

## V Lärmbekämpfung, Schalldämmung und Schalldämpfung

### V.1 Schallemission und -Immission

Aufgrund der großen Bedeutung von Schall als Faktor der Umweltverschmutzung (vgl. Kapitel III, Schallwirkung) werden erhebliche Maßnahmen zur Lärmbekämpfung durchgeführt, die sich in entsprechenden gesetzlich vorgegebenen Richtlinien bewegen. Ähnlich wie bei der Umweltverschmutzung mit Substanzen unterscheidet man auch beim Schall zwischen der Schall-Immission und -Emmission. Unter **Schall-Emission** versteht man dabei die Schalleistung (bzw. den Schalleistungspegel), die von einer bestimmten Quelle (z. B. einer Maschine oder einer Fabrik) nach außen abgestrahlt (d. h. emittiert) wird. Unter **Schall-Immission** versteht man dagegen die Schalleistung (bzw. den Schalleistungspegel), die an einem bestimmten Ort (z. B. am Ohr der betroffenen Person) auftritt.

Zur Bestimmung der Schallemission gibt es verschiedene Meßverfahren, die sich aufgrund der erfaßten Schallmeßgröße und im Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit unterscheiden.

Beim Hüllflächenschalldruckmeßverfahren geht man von exakten bzw. genäherten Freifeldbedingungen aus, d. h. es dürfen keine Reflexionen eines umgehenden Raumes das Meßergebnis stark verfälschen. Auf einer Meßfläche  $S$ , die die zu bestimmende Schallquelle möglichst vollständig umschließt und nach Möglichkeit einen konstanten Abstand von der Schallquelle aufweist (z. B. 1 Meter) wird nun der Geräuschpegel  $L_p$  gemessen.

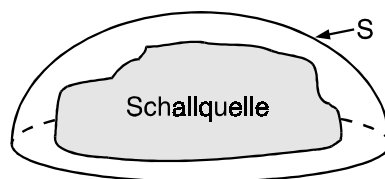


Abbildung 5.1: Schallquelle mit Meßfläche S

Die insgesamt von der Schallquelle abgestrahlte Schalleistung  $P$  berechnet sich dann zu:

$$P = \oint_S \overline{p \cdot \underline{v}} \, d\underline{S} \approx \oint_S \frac{1}{\rho \cdot c} \cdot \overline{p^2} \, dS \quad (\text{V.1})$$

Daraus wird der Leistungspegel  $L_w$  der Emission berechnet zu:

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} = \overline{L_p} + L_s + C_0$$

mit:  $\overline{L_p}$ : mittlerer Pegel auf der Fläche S

$$L_s = 10 \cdot \log \frac{S}{S_0}$$

$$C_0 = -10 \cdot \log \frac{\rho \cdot c}{(\rho \cdot c)_0} \quad (\text{V.2})$$

Dabei bezeichnet  $P_0$  die Bezugsschalleistung,  $S_0$  bezeichnet eine Referenz-Schallfläche ( $10 \text{ m}^2$ ) und  $C_0$  bezeichnet eine Korrekturkonstante, die z. B. die Temperaturabhängigkeit der Dichte und der Schallgeschwindigkeit von Luft beinhaltet. Obwohl dieses Verfahren direkt aus der Definition von Schalleistung und Schallfluß resultiert, weist es doch einige Nachteile auf (z. B. Störanfälligkeit durch von außen einfallenden Schall oder bei Nichteinhaltung der Freifeldbedingungen). Diese Störfaktoren können vermieden werden, wenn anstelle des Schalldrucks die Schallintensität gemessen wird.

Bei dem **Hüllflächen-Schallintensitätsmeßverfahren** wird daher auf einer die Schallquelle umgebenden Fläche die Schallintensität bestimmt, also:

$$P = \oint_S \underline{I} \, d\underline{S} \Rightarrow L_w = \overline{L_{in}} + L_s \quad (\text{V.3})$$

Dabei bezeichnet  $\overline{L_{in}}$  den mittleren Schallintensitäts-Pegel auf der Hüllfläche S und der Wert  $L_s$  die Abweichung der Größe der aktuellen Meßfläche von der Bezugs-Meßfläche (vgl. V.2). Der Vorteil dieses Verfahrens ist, daß die Phasenbeziehung zwischen Schallschnelle und Schalldruck mit berücksichtigt wird, so daß die Blind-Komponente der Schalleistung (z. B. im Nahfeld einer Schallquelle, in dem die Schnelle  $v$  nicht in Phase mit dem Schalldruck  $p$  steht) eliminiert wird.

Weiterhin werden Störeinflüsse kompensiert, z. B. externe inkohärente Schallquellen oder Reflexionen, indem die von diesen äußeren Schallquellen erzeugten Schallflüsse vektoriell entlang der Meßfläche aufaddiert werden. Dadurch wird der in das umschlossene Volumen eintretende Schallfluß gerade mit negativen Vorzeichen zu dem wieder austretendem

Schallfluß zuaddiert, so daß sich insgesamt eine Kompensation dieser Störeinflüsse ergibt.

Beim **Hallraummeßverfahren** geht man zu dem anderen Extremfall über, daß sich das Meßobjekt in einem Hallraum mit (fast) ideal reflektierenden Wänden befindet, so daß die Mittelung über die verschiedenen Schallabstrahl-Richtungen durch das diffuse Schallfeld im Hallraum geschieht. Wenn man von einem Hallraum mit einem Volumen  $V(\text{m}^3)$  mit einer Nachhallzeit  $T(\text{s})$  und einer Oberfläche  $S_R$  ausgeht, bei dem bei der Mittenfrequenz  $f_m$  und dem Luftdruck  $B$  (mB) gemessen wird, ermittelt sich der Schalleistungspegel zu:

$$L_p = L_{pm} + \left[ -10 \log \frac{T}{[\text{s}]} + 10 \log \frac{V}{[\text{m}^3]} \cdot 10 \log \left( 1 + \frac{S_R c}{8 V f_m} \right) - 10 \log \frac{B}{[1000 \text{mb}]} - 14 \right] \text{dB} \quad (\text{V.4})$$

Dabei bezeichnet  $L_{pm}$  den mittleren Pegel im Hallraum, d. h. den über verschiedene Mikrofonpositionen gemessenen Pegel. Da bei diesem Verfahren der Einfluß externer Störquellen eliminiert wird (bei entsprechender akustischer Isolation des Hallraums) und die Reflexionen an den Raum-Begrenzungen nicht stören, sondern explizit in die Rechnung mit einbezogen werden, stellt dieses Hallraumverfahren das derzeit gängigste Präzisionsmeßverfahren dar. Es setzt natürlich eine entsprechende Hallraum-Güte voraus (d. h. geringe Absorption des Schalls an den Wänden des Hallraums). Je höher die Güte des Hallraums, desto größer ist bei gleichem Schalleistungspegel  $L_p$  der mittlere Pegel im Hallraum  $L_{pm}$ , so daß ein entsprechend hoher Signal-Rauschabstand bei der Messung dieses Hallraum-Pegels auftritt. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch die Tatsache, daß die gesamte Schallquelle sich im Meßraum befinden muß. Dies bereitet bei großen Schallquellen (z. B. Maschinen oder ganzen Fabriken) jedoch erhebliche Probleme.

Diese Probleme werden beim **Vergleichsverfahren** umgangen, indem am Ort der zu messenden Schallquelle eine Prüfschallquelle aufgestellt wird, deren insgesamt abgestrahlte Schalleistung bekannt ist. Unter der Annahme, daß die Prüfschallquelle dieselbe Abstrahlcharakteristik wie die zu bestimmende Schallquelle hat, kann nun durch einen Pegelvergleich zwischen dem Schallpegel, der an einem bestimmten Meßort von der vorgegebenen Schallquelle und dem Schallpegel, der von der Prüfschallquelle erzeugt wird, auf die Abstrahlleistung der vorgegebenen Schallquelle zurückgeschlossen werden.

Die auf diese verschiedenen Arten gemessenen Schalleistungspegel sind für die jeweilige Schallquelle charakteristisch. Beispielsweise hängt der Schalleistungspegel von Maschinen mit der Gesamt-Leistung der Maschine zusammen unter der Voraussetzung, daß ein bestimmter Prozentsatz der Maschinennennleistung in Schallenergie umgewandelt wird. Je nachdem wie hoch dieser Prozentsatz ist, handelt es sich um relativ „leise“ bzw. „laute“ Maschinen. Die Angabe der Geräuschemission einer Maschine bzw. die entsprechende Klassifizierung ist für die Planung der Schall-Immission an einem bestimmten Ort von großer Bedeutung. Sie ist vorgeschrieben für alle Arbeitsmittel, für die 70 dB (A) in unmittelbarer Nähe dieser Arbeitsmittel überschritten wird.

Zur Beurteilung der Schall-Immission wird der Bezugspegel  $L_R$  verwendet, d. h. der für die Schallwirkung relevante Pegel, der während der Beurteilungsdauer anliegt. Diese Größe beinhaltet neben dem A-bewerteten  $L_{Aeq}$  eine Reihe von Zu- bzw. Abschlägen, die aufgrund der besonderen Qualität des auftretenden Schalls erforderlich sind. Für den Beurteilungspegel  $L_R$  gilt also:

$$L_R = \underbrace{L_{Aeq}}_{\substack{\text{A-bewertet,} \\ \text{Energie-} \\ \text{gemittelt}}} + K_1 + K_2 + \dots \quad (\text{V.5})$$

Die Summanden  $K_i$  bezeichnen die folgenden möglichen Zu- bzw. Abschläge:

$K_I$ : bezeichnet den Zuschlag für Impulshaltigkeit (d. h. bei Auftreten impulshafter Änderungen des Momentan-Pegels).  $K_I$  beträgt etwa 3 dB oder 6 dB und kann beispielsweise berechnet werden nach:

$$K_I = L_{Aeq} - L_{Aeq} \quad (\text{DIN 45645}) \quad (\text{V.6})$$

$K_{\text{ton}}$  bezeichnet den Tonhaltigkeits-Zuschlag, der ebenfalls 3dB oder 6dB betragen kann und vom Gutachter nach Gehöreindruck vergeben wird. Eine Möglichkeit zur objektiven Berechnung des Tonhaltigkeitszuschlages berechnet den Unterschied zwischen dem über ein relativ breites Frequenzband gemittelten Pegel  $L_N$  und dem Pegel  $L_T$ , der schmalbandig um dem jeweiligen Ton herum gemittelt wurde. Wenn die entsprechenden Pegel (bzw. auf die Frequenz bezogenen Dichtepegel) einen Unterschied von < 6 dB aufweisen, kann der Zuschlag gewährt werden.

$K_{inf}$  bezeichnet den Zuschlag für Informationsgehalt des störenden Schallsignals (z. B. bei Lautsprecherdurchsagen oder Musikwiedergabe). Dieser Zuschlag kann ebenfalls 3 dB oder 6 dB betragen.

$K_R$  bezeichnet den Zuschlag für Lärm-Einwirkungen während der Ruhezeit am Tage (d. h. zwischen 6-7 Uhr, 19-22 Uhr) und beträgt 6 dB. Dieser Zuschlag ist notwendig, weil während der Tageszeit und der Nachtzeit unterschiedliche Kriterien angelegt werden. Während der „Randzeiten“ am Tage kann daher ein Zuschlag von 6 dB gewährt werden.

$K_{sit}$  und  $K_{Qu}$  bezeichnen den Zu- oder Abschlag für bestimmte örtliche Situationen bzw. für bestimmte Geräuschquellen, die vom Gutachter aufgrund seines Höreindrucks vergeben werden können. Diese Möglichkeit trägt dem Umstand Rechnung, daß nicht sämtliche Aspekte von emittiertem Schall durch „objektive“ Meßverfahren in ähnlicher, für den Menschen gerechter Weise erfaßt werden können, wie von einem erfahrenen Schall-Gutachter.

Der auf die oben beschriebene Weise erhobene Beurteilungspegel wird nun verglichen mit **Grenzwerten** (d. h. Werte, deren Nicht-Einhaltung unmittelbar rechtliche Folgen hat, wie es beispielsweise bei Fluglärm der Fall ist). Die Beurteilungspegel können auch mit **Richtwerten** verglichen werden (d. h. „kann“-Vorschriften, die das Erreichen eines Schutz-Ziels verfolgen). **Anhaltswerte** werden dagegen bei noch unsicherer rechtlicher Entscheidungslage angestrebt und dienen eher zur Orientierung. Im folgenden sind exemplarisch einige Immissionsgrenzwerte tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 5.1: Immissionsgrenzwerte für Lärmschutz bei neuen Bundesstraßen

Immissionsort	Immissionsgrenzwerte in dB(A)	
	tags	nachts
Krankenhäuser, Schulen, Kurheime, Altenheime	57	47
reine und allgemeine Wohngebiete, Kleinsiedlungsgebiete	59	49
Kern-, Dorf-, Mischgebiete	64	54
Gewerbegebiete	69	59

Tabelle 5.2: Immissionsgrenzwerte für Lärmschutz an bestehenden Bundesstraßen:

Immissionsort	Immissionsgrenzwerte in dB(A)	
	tags	nachts
Krankenhäuser, Schulen, Kurheime, reine und allgemeine Wohngebiete, Kleinsiedlungsgebiete	70	60
Kern-, Dorf-, Mischgebiete	72	62
Gewerbegebiete	75	65

Die Immissionsgrenzwerte für **bestehende** Bundesstraßen sind offenbar nicht so streng wie für die Planung neuer Bundesstraßen, bei denen der Aspekt des Schallschutzes stärker berücksichtigt wird. Aus diesem Grund muß die Planung z. B. von Ortsumgehungsstraßen auch immer eine akustische Planung mit beinhalten.

Als Beispiel für Anhaltswerte sei in folgender Tabelle der Innengeräuschpegel für von außen in Aufenthaltsräume eindringenden Schall angegeben:

Raumart	äquivalenter Dauerschallpegel $L_{Aeq}$ in dB(A)	mittlerer Maximalpegel $L_{AFmax,m}$ in dB(A)
<i>Schlafräume nachts</i>		
in reinen und allgemeinen Wohngebieten, Krankenhaus- und Kurgeländen	25...30	35...40
in allen übrigen Gebieten	30...35	40...45
<i>Wohnräume tagsüber</i>		
in reinen und allgemeinen Wohngebieten, Krankenhaus- und Kurgeländen	30...35	40...45
in allen übrigen Gebieten	35...40	45...50
<i>Kommunikations- und Arbeitsräume tagsüber</i>		
Unterrichtsräume, ruhebedürftige Einzelbüros, wissenschaftliche Arbeitsräume, Bibliotheken, Konferenz- und Vortragsräume, Arztpraxen, Operationsräume, Kirchen, Aulen	30...40	40...50
Büros für mehrere Personen	35...45	45...55
Großraumbüros, Gaststätten, Schalterräume, Läden	40...50	50...60

Beispielweise orientiert sich der in Schlafräumen nachts zu herrschende äquivalente Dauerschallpegel bzw. mittlere Maximalpegel an dem Pegel, der als Grenzwert für Schlafstörungen in der Schallwirkungsforschung gefunden wurde (vgl. Kapitel IV.2). Da dieser Wert jedoch kein „harter“, meßtechnisch exakt bestimmbarer Pegel darstellt, können die entsprechenden Schallschutz-Bestimmungen auch diesen Pegel nicht rechtlich bindend vorschreiben. Als Anhaltswert ist dieser Wert dagegen sicher sinnvoll. Weitere Richtlinien für beispielsweise Schienenverkehr, Luftverkehr, Industrie-, Gewerbe- und Freizeitanlagen, für den Arbeitsplatz und für haustechnische Anlagen finden sich im Taschenbuch der technischen Akustik (Heckl/Müller, 1994).

## V.2 Schalldämmung

In diesem Abschnitt wollen wir uns mit Lärmschutzmaßnahmen beschäftigen, die entweder auf eine Dämmung des Luftschalls (d. h. des von der Schallquelle zum möglichen Empfänger direkt über den Luftweg übertragenen Schalls) abzielen oder auf eine Verminderung des Körperschalls (d. h. des Schallanteils, der mit Hilfe von schwingenden Körpern wie z. B. Decken und Wänden an den Ort des Empfängers gelangt).

### V.2.1 Luftschalldämmung

Um eine Schallübertragung zwischen Schallquelle und Empfänger über Luftschall zu verhindern, wird üblicherweise eine mehr oder weniger schalldichte Wand angebracht, die den direkten Schallweg unterbricht. Die Schalldämmung dieser Wand oder darin enthaltener Elemente (z. B. Fenster und Türen) kann mittels eines bauakustischen Prüfstandes wie folgt ermittelt werden:

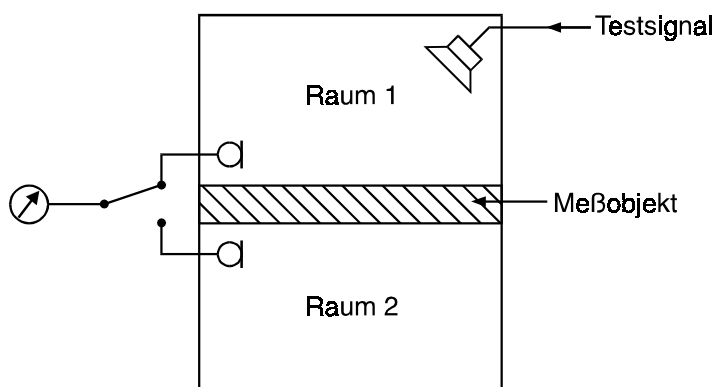


Abbildung 5.2: Bauakustischer Prüfstand zur Messung der Schalldämmung

Von dem Lautsprecher im Raum 1 wird ein Testsignal abgestrahlt, dessen Pegel  $L_1(f)$  (z. B. als Funktion der Frequenz mit Hilfe eines Terz-Band-Filters) gemessen wird. Ebenso wird der Pegel  $L_2(f)$  in Raum 2 (ggf. frequenzabhängig) gemessen. Als Luftschalldämm-Maß  $R'$  (in dB) ergibt sich dann folgende Größe:

$$R' = L_1(f) - L_2(f) - 10 \cdot \log \frac{S}{A} \quad (\text{V.7})$$

Dabei bezeichnet  $S$  die Oberfläche des Testobjekts und  $A$  die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraums. Um eine möglichst hohe Meßgenauigkeit zu erzielen, ist der Empfangsraum meist als Hallraum ausgeführt und die äquivalente Absorptionsfläche läßt sich aus der Nachhallzeit dieses Hallraums berechnen. Dieser letzte Faktor ( $10 \cdot \log S/A$ ) soll den Einfluß der akustischen Eigenschaften des Empfangsraums weitestgehend eliminieren.

Um von diesem gemessenen Luftschalldämm-Maß auf eine realistische Eigenschaft schließen zu können (z. B. wie „gut“ eine Wandkonstruktion sich im Gegensatz zu konventionellen Wänden für den Schallschutz eignet) wird das bewertete Schalldämm-Maß  $R_w$  durch Vergleich mit einer „Sollkurve“ ermittelt. Diese Sollkurve ist das Luftschalldämm-Maß einer verputzten Ziegelwand und ist in unten stehender Abbildung als durchgezogene Linie gekennzeichnet. Dieses Sollkurve wird nun solange vertikal verschoben, bis die gemessene Kurve eine mittlere Unterschreitung von  $\leq 2$  dB aufweist, d. h.:

$$\text{mittlere Unterschreitung} = \frac{\sum \Delta \text{Pegel}}{\text{Zahl der Frequenzen}} \leq 2 \text{ dB} \quad (\text{V.8})$$

Die Luftschalldämmung des zu bewertenden Bauteils darf also an vielen Stellen besser sein als die verschobene „Sollkurve“, darf aber nur um den Wert von 2 dB im Durchschnitt „schlechter“ sein. Als bewertetes Schalldämm-Maß  $R'_w$  ergibt sich nun der Wert  $R'$  bei 500 Hz der verschobenen Sollkurve. Das bewertete Schalldämm-Maß behandelt demnach einen beliebigen Frequenz-Verlauf des Luftschalldämm-Maß in ähnlicher Weise wie den Frequenz-Verlauf einer verputzten Ziegelwand.



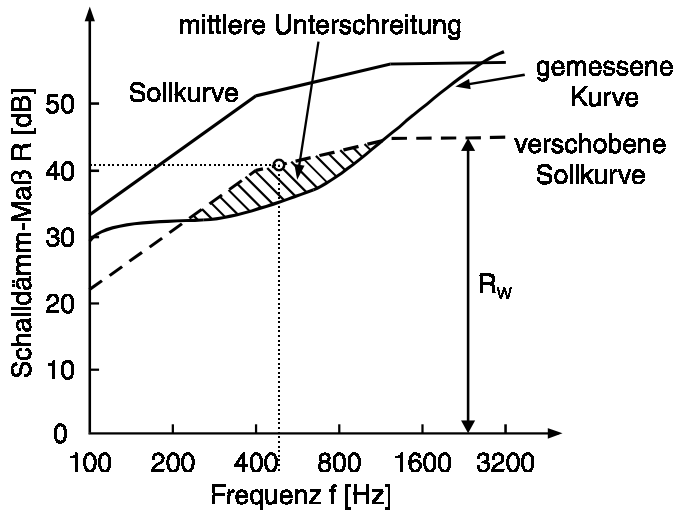


Abbildung 5.3: Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w$

Ein qualitatives Verständnis über die Luftschalldämmung von Wänden kann man durch Betrachtung der Schalldämmung an homogenen Platten beginnen, die in folgender Abbildung schematisch dargestellt ist:

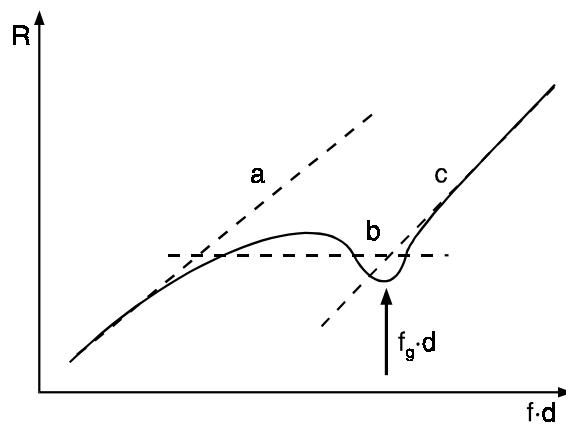


Abbildung 5.4: Luftschalldäm-Maß aufgetragen über das Produkt der Frequenz und Dicke

Dargestellt ist das Luftschalldämm-Maß als Funktion des Produkts aus Frequenz  $f$  und Dicke  $d$  der Platte, die ein Flächengewicht  $m''$  aufweisen soll. Bei diesem Frequenzgang kann man drei Bereiche unterscheiden:

a) Bei tiefen Frequenzen beträgt  $R$ :

$$R = \left( 20 \cdot \log \frac{\pi \cdot f \cdot m''}{\rho \cdot c} - 3 \right) \text{dB} \tag{V.9}$$

Dabei bezeichnet  $\rho \cdot c$  den Wellenwiderstand von Luft und  $f$  die Frequenz, so daß für die Größe von  $R$  bei tiefen Frequenzen ausschließlich die Flächendichte  $m''$  entscheidend ist. Für diese niedrigen Frequenzen gilt also der Leitsatz: „die Masse macht's“.

b) Mit zunehmender Frequenz tritt die Platte in Resonanz mit der anregenden Schwingung, so daß die Schalldämmung verschlechtert wird. Diese Resonanz tritt bei der Frequenz  $f_g$  auf mit:

$$f_g = \frac{c^2}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{m''}{B}} \approx \left( 6.4 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{d} \cdot \sqrt{\frac{\rho_p}{E}} \right) \text{Hz} \quad (\text{V.10})$$

Dabei bezeichnet  $E$  den Elastizität-Modul und  $\rho_p$  das spezifische Gewicht der Platte.

c) Oberhalb der Resonanz-Frequenz wird die Platte nicht mehr wesentlich zu Schwingungen angeregt, so daß eine bessere Schalldämmung mit zunehmenden Frequenzen resultiert (ca. 25dB / Dekade). Dies entspricht der bauakustischen Realität, daß hohe Frequenzen besser und leichter gedämpft werden können als niedrige. Hier berechnet sich das Schalldämm-Maß  $R$  zu:

$$R = \left( 20 \cdot \log \frac{\pi \cdot f \cdot m''}{\rho \cdot c} - 10 \cdot \log \frac{1}{2 \cdot \eta} \sqrt{\frac{f_g}{f}} \right) \text{dB} \quad (\text{V.11})$$

Dabei bezeichnet  $\eta$  einen vom Plattenmaterial abhängigen Verlustfaktor.

Neben der oben bereits besprochenen Verbesserung der Schalldämmung durch eine höhere Masse kann auch eine Verbesserung durch mehrschalige Bauweise erreicht werden, in dem der Schall mehrere Impedanz-Sprünge passieren muß (mit entsprechenden Reflexions- und Absorptionsverlusten). Als Prototyp einer doppelschaligen Bauweise sei hier die federnde Verbindung zwischen zwei Platten der Massendichte  $m_1''$  und  $m_2''$  aufgeführt, die mehr oder weniger stark miteinander gekoppelt sind.

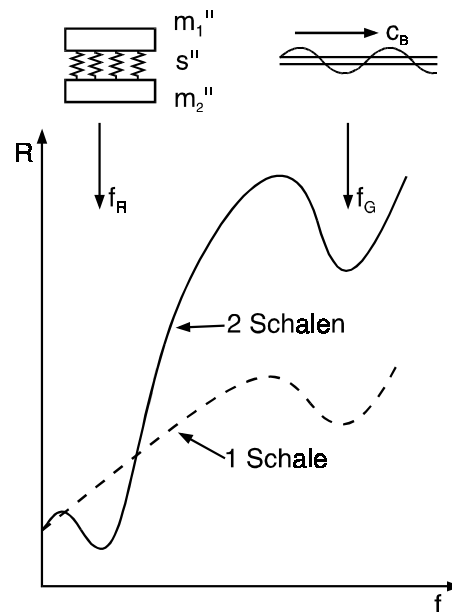


Abbildung 5.5: Prototyp (schematisch) einer doppelschaligen Bauweise

Im Vergleich zur einschaligen Bauweise weist diese zweischalige Bauweise bei tiefen Frequenzen eine Verschlechterung auf, weil eine Resonanz zwischen den beiden Massen der Schalung und der dazwischen bei niedrigen Frequenzen als Feder wirkenden Verbindung auftritt. Weil die gesamte Konstruktion bei dieser relativ niedrigen Resonanz-Frequenz mit-schwingen kann, resultiert also zunächst eine Verschlechterung der Schalldämmung. Mit zunehmender Frequenz wird die Schalldämm-Wirkung jedoch höher, hat allerdings bei der bereits für einschalige Dämmung beschriebenen Resonanz-Frequenz  $f_g$  wiederum ein Minimum. Bei dieser Frequenz schwingen die beiden Schalungen nicht mehr gegeneinander (wie bei der niedrigen Resonanz mit der Frequenz  $f_R$ ), sondern sie schwingen unabhängig voneinander jeweils mit der Resonanzfrequenz  $f_g$ .

Insgesamt kann eine Verbesserung der Luftschalldämmung durch folgende Maßnahmen erreicht werden:

- Zunächst ist eine luftdichte **Abdichtung** zwischen den voneinander akustisch zu trennenden Räumen notwendig, weil schon relativ kleine Luftöffnungen zu einem relativ guten Schalldurchgang führen. Dieses Phänomen kann auch bei Türen beobachtet werden, die bei vollständiger Öffnung den Schall nur geringfügig besser passieren lassen als bei fast vollständiger Schließung (mit einem Luftspalt). Erst wenn die Öffnung sehr klein ist (z. B. Schlüsselloch) wird eine ausreichende Schalldämm-Wirkung erreicht, obwohl es noch immer die sprichwörtliche Möglichkeit zum „Abhören durch das Schlüsselloch“ gibt!

- Durch Vergrößerung der Dicke bzw. Vergrößerung der Masse der Trennwand kann die Dämmung verbessert werden (s. o.).
- ein mehrschichtiger Aufbau der Dämmung bewirkt ebenfalls bei gleicher Gesamtmasse über einen großen Frequenzbereich eine Verbesserung der Schalldämm-Wirkung.

Um einen Anhaltspunkt über die in der Realität bei verschiedenen Wandausbauten erreichbaren Schalldämm-Werte zu informieren sei folgende Tabelle (aus Heckl/Müller, 1993) angegeben:

Wandaufbau, Schalen	Verbindung zwischen den Schalen	Dicke mm	Flächen- gewicht kg/m <sup>2</sup>	bewertetes Schall- dämm-Maß	
				R <sub>w</sub> in dB	R' <sub>w</sub> in dB
Holzspanplatte, Gipskartonplatten	über Holzstiele	80...100	20...25	37...40	37...40
Gipskartonplatten	über gemeinsa- me Blechständer	125	30	49	48
Gipskartonplatten	keine (getrennte Ständer)	125	30	52	50
Gipskartonplatten 2 Lagen	keine (getrennten Ständer)	155	52	60	55
Holzspanplatten (innenseitig be- schwert mit 1mm Bleiblech)	über Holzstiele	80	35...40	48	47
5cm Holzwolle- Leichtbauplatten, verputzt	keine	140	85	60	55

## V.2.2 Körperschalldämmung

Um die Körperschallübertragung von einem Raum zu einem anderen Raum messen zu können, wird der Körperschall im „Senderraum“ mit einem Trittschallgeber angeregt, d. h. einem Hammerwerk mit 5 Hämmern à 500 g, die mit einer Frequenz von 10 Hz aus einer Höhe von jeweils 4 cm auf den Boden auftreffen. Im Empfangsraum wird dann der auftretende Schallpegel mit einem Schallpegelmesser gemessen und in den Norm-Trittschallpegel umgerechnet, in dem der Einfluß von Schallabsorptions-Materialien im Empfängerraum eliminiert wird:

$$L_N = L + 10 \cdot \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{V.12})$$

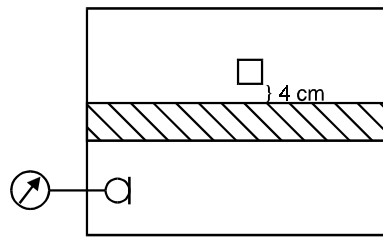


Abbildung 5.6: Messung der Körperschallübertragung von einem Raum zu einem anderen

Dabei bezeichnet  $A$  die effektive Absorptionsfläche im Empfängerraum (sie kann z. B. anhand der Nachhallzeit des Raums bestimmt werden) und  $A_0$  eine Referenz-Absorptionsfläche, die mit  $10 \text{ qm}$  festgelegt wurde. Diese Definition ist äquivalent zur Bestimmung des Luftschalldämm-Maßes (vgl. Formel V.7).

Um wiederum eine Bewertung des aufgenommenen Normtrittschallpegels mit realistischen Trittschalldämm-Maßen zu erreichen, wird genau wie bei der Luftschalldämmung das aufgenommene Schalleistungsspektrum mit einer Sollkurve verglichen, die der Körperschalldämmung einer Decke entspricht, die aus einer  $12 \text{ cm}$  dicken Betonschicht mit einer daraufliegenden  $2,4 \text{ cm}$  dicken Holzdielenschicht mit Lagerung besteht.

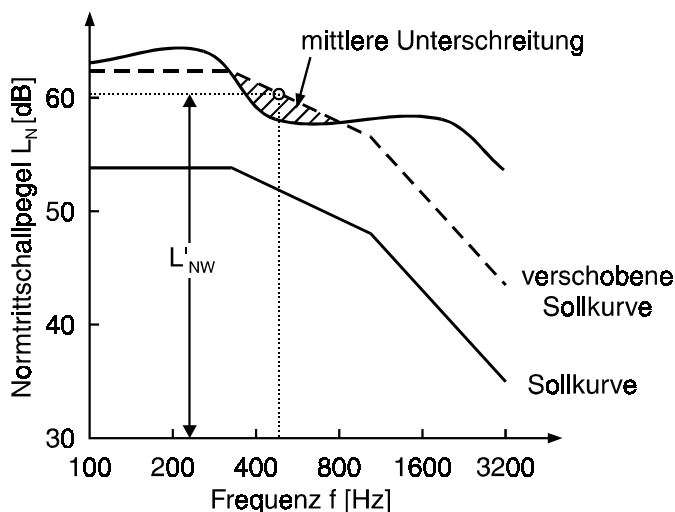


Abbildung 5.7: Bestimmung des bewerteten Norm-Trittschallpegels

Die Sollkurve wird nun soweit verschoben, bis die mittlere Unterschreitung der Sollkurve (d. h. der Betrag der Unterschreitung gemittelt über mehrere

Frequenzen) kleiner oder gleich 2 dB ist. Als bewerteter Norm-Trittschallpegel  $L'_{NW}$  wird dann der 500 Hz-Wert der verschobenen Sollkurve bezeichnet. In der nachfolgenden Tabelle sind einige praktisch erreichbare bewertete Norm-Trittschallpegel aufgeführt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß es sich um Pegel und nicht um Dämmmaße handelt, d. h. die Körperschalldämmung nimmt mit abnehmendem Normtrittschallpegel zu:

	$L'_{NW}$
Massive Rohdecke (ohne Belag)	73...83
Maximal zulässig bei Wohnbauten (DIN 4109)	53
Grenzwert für „gehobenen“ Trittschallschutz	46
Maximal praktisch erreichbar	40

Eine Verbesserung der Körperschalldämmung (bzw. Trittschalldämmung) kann durch die Verwendung von weichen Bodenbelägen erreicht werden, die einen Teil der kinetischen Anregungsenergie bereits abdämpfen und damit verhindern, daß überhaupt viel Trittschall erzeugt wird. Weiterhin ist ein mehrschichtiger Aufbau von Decken sinnvoll, der allerdings eine unterschiedliche Fortleitung von Körperschall in den einzelnen Schichten als Voraussetzung hat. Dies wird z. B. beim sogenannten „schwimmenden Estrich“ angestrebt, bei dem auf die Beton-Rohdecke eine schallweiche, elastische Schicht (Trittschall-Dämmmatten, spezielle Polymerwerkstoffe, z. B. Elastomer) gelegt wird. Auf diese Schicht wird eine weitere Betonschicht als schwimmender Estrich aufgebracht. Dabei ist darauf zu achten, daß es keine starre Verbindung zwischen dem Estrich und der Betondecke bzw. der fest mit der Betondecke verbundenen Wand gibt. Jede dieser dabei auftretenden Schallbrücken würde zu einer drastischen Reduktion der Körperschalldämmung führen, die den gesamten betriebenen Aufwand zunichte macht.



Abbildung 5.8: Aufbau des "schwimmenden Estrichs"

Die größte Dämmwirkung wird oberhalb der Resonanzfrequenz der Konstruktion erreicht, bei der die Estrich-Schicht in Gegenphase mit der Betondecke schwingt, die durch die bei niedrigen Frequenzen als federwir-

kende Trittschalldämmmatte gekoppelt sind (vgl. Resonanzfrequenz  $f_R$  bei doppelschaligem Wandaufbau). Diese Resonanzfrequenz beträgt:

$$f_R = 160 \cdot \sqrt{\frac{s''}{m_e''}} [\text{Hz}] \quad (\text{V.13})$$

$s''$  bezeichnet dabei die dynamische Steifigkeit der Dämmschicht (in  $\text{MN/m}^3$ ),  $m_e''$  bezeichnet das Flächengewicht des Estrichs (in  $\text{kg/m}^3$ ).

Die Trittschallminderung für Frequenzen weit oberhalb der Resonanzfrequenz  $f_R$  beträgt damit:

$$\Delta L = 40 \cdot \log \frac{f}{f_R} [\text{dB}] \quad \text{für } f \gg f_R \quad (\text{V.14})$$

Ein ähnliches Prinzip wird auch bei der Körperschalltrennung von Gebäuden (z. B. Einfamilien-Reihenhäusern) angewendet, bei denen zwischen den jeweiligen aneinandergrenzenden Außenmauern eine kleine Luftschicht gelassen wird, die eine körperschall-technische Entkopplung beider Häuser bewirken soll. Sobald jedoch eine auch sehr geringgradige schallharte Verbindung auftritt (z. B. durch Kieselsteine, die zwischen den beiden Wänden liegen und zu beiden Seiten Kontakt haben) ist der gesamte Körperschalldämmeffekt fast vollständig verschwunden. Dieses Beispiel mag illustrieren, wie schwierig eine suffiziente Körperschalldämmung in der Bauakustik praktisch durchgesetzt werden kann.

### V.3 Schallabsorption

Während wir uns in den vorangehenden Abschnitten mit dem Durchgang von Schall durch verschiedene Bauelemente beschäftigt haben, soll im folgenden die Schallabsorption betrachtet werden, d. h. die bei der Reflexion des Schalls an begrenzenden Flächen auftretenden Leistungsverluste. Dabei betrachten wir den allgemeinen Fall, daß der Schall vom Medium 1 (Luft) mit dem Wellenwiderstand  $Z_1$  auf das Medium 2 (z. B. eine poröse Wand bzw. ein Schallabsorber) mit dem Wellenwiderstand  $Z_2$  auftrifft.

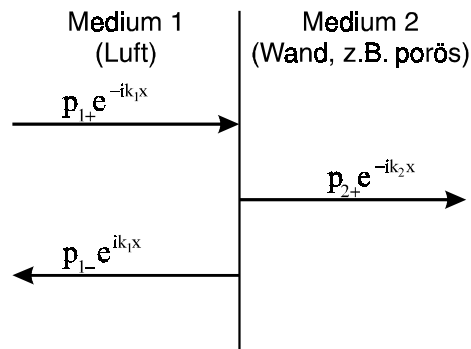


Abbildung 5.9: Schallreflexion an einer absorbierenden Wand

Für das Verhältnis aus reflektiertem zu einfallenden Schall errechnet sich der Reflexionsfaktor  $\underline{r}$ , der im allgemeinen komplex sein kann:

$$\underline{r} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad \frac{1 - \underline{r}}{1 + \underline{r}} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (\text{V.15})$$

$\underline{r}$  ist rein reell, wenn durch die Reflexion an der Wand kein Phasensprung bzw. nur ein Phasensprung von 180 Grad erzeugt wird. Falls jedoch die Wandimpedanz  $Z_2 = \frac{p_2}{v_2} = W$  neben dem Amplitudensprung auch einen

Phasensprung verursacht, ist  $\underline{r}$  komplex. Als **Absorptionsgrad** der Wand wird der Prozentsatz der einfallenden Schalleistung bezeichnet, der an der Wand absorbiert wird. Man definiert also den Absorptionsgrad  $\alpha$ :

$$\alpha = 1 - |\underline{r}|^2 = \frac{4 \cdot W' \cdot Z_1}{(W' + Z_1)^2 + (W'')^2} \quad (\text{V.16})$$

Diejenigen (komplexen) Werte von  $Z_2$ , die zu dem gleichen Absorptionsgrad  $\alpha$  führen, werden in der komplexen Ebene ( $Z_2 = W' + i \cdot W''$ ) durch Kreise („apollonische Kreise“) gekennzeichnet:

$$|\underline{r}| = \text{const.} \Leftrightarrow |W - Z_1| = |W + Z_1| \cdot \text{const.} \quad (\text{V.17})$$



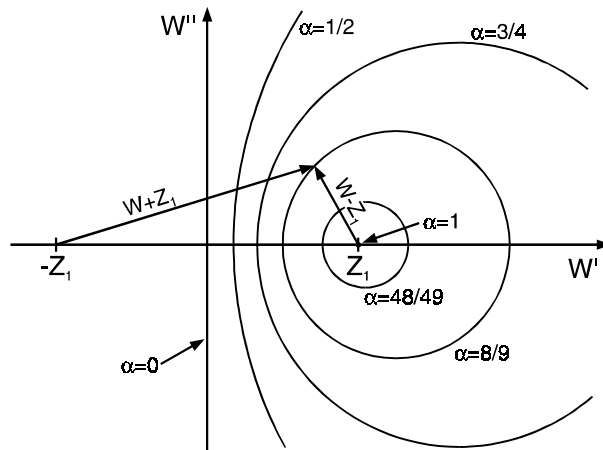


Abbildung 5.10: Kurven gleichen Absorptionsgrades  $\alpha$  für verschiedene komplexe Wandimpedanzen  $W = W' + i W''$

Um die Eigenschaften von Absorbern besser verstehen zu können, soll zunächst das grundlegende Prinzip von Absorbern erläutert werden. Die Grundidee ist, daß die Schallenergie in Wärme umgewandelt wird, indem die Teilchenbewegung vor dem Absorber eine Schwingung in den Poren des Absorbers anregt, bei der aufgrund der hohen inneren Reibung viel Energie übertragen wird.

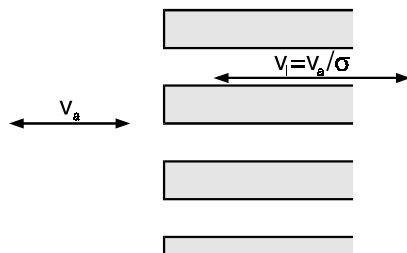


Abbildung 5.11: Funktionsprinzip eines porösen Absorbers

Wenn vor dem Absorber die Schallschnelle  $v_a$  herrscht, dann soll in der Grenzfläche des Absorbers die Schallschnelle  $v_i = \frac{v_a}{\sigma}$  auftreten, wobei  $\sigma$  die Porosität bezeichnet, d. h. den Anteil der Poren-Öffnungsfläche an der Gesamtfläche. Als Wandimpedanz berechnet sich für eine unendlich dicke poröse Schicht:

$$\underline{W}_1 = \frac{\rho \cdot c \cdot \sqrt{\chi}}{\sigma} \cdot \sqrt{1 - i \cdot \eta'} \tag{V.18}$$

$$\sigma = \frac{V_{\text{Por}}}{V_{\text{Gesamt}}} \tag{V.19}$$

Die Porosität eines Körpers kann durch folgende Meßanordnung bestimmt werden, bei der ein Volumen  $V_1$  einmal in Abwesenheit und zum anderen in Gegenwart des porösen Körpers komprimiert wird. Dabei tritt jeweils die Volumenänderung  $\Delta V$  und eine Druckänderung  $\Delta p$  in beiden Fällen auf:

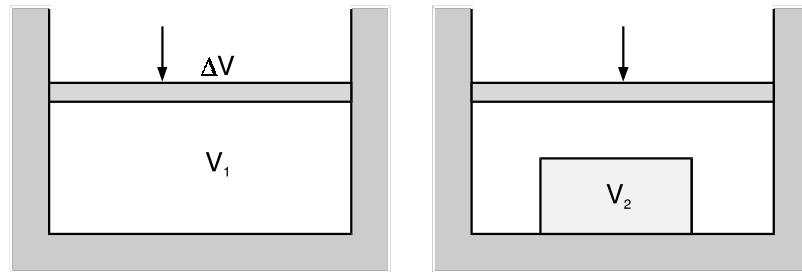


Abbildung 5.12: Zur Definition der Porosität eines Körpers mit Volumen  $V_2$

$$\begin{aligned}\Delta p_1 &= p_0 \cdot \frac{\Delta V}{V_1} \\ \Delta p_2 &= p_0 \cdot \frac{\Delta V}{V_1 - V_2(1 - \sigma)} \\ \Rightarrow \sigma &= 1 - \frac{V_1}{V_2} \left( 1 - \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} \right)\end{aligned}\quad (\text{V.20})$$

Die Größe  $\eta$  in Gleichung V.18 bezeichnet die **dynamische Viskosität** des Mediums (in diesem Falle der Luft), die sich aufgrund folgender Gleichung ergibt:

$$\underbrace{-\frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{Druck}} + \underbrace{\eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}}_{\text{Zähigkeit}} = \underbrace{\rho \cdot \frac{\partial v_x}{\partial t}}_{\substack{\text{Beschleunigung} \\ \text{vernachlässigbar} \\ \text{bei engem Rohr,} \\ \text{tiefen Frequenzen}}}\quad (\text{V.21})$$

Dabei wird ein Kräftegleichgewicht zwischen den auf ein Volumenelement einer zähen Flüssigkeit in einem engen Rohr angreifenden Kräften angenommen. Unter der Annahme, daß die Poren sehr eng sind und deshalb die Beschleunigungs-Komponente (d. h. die Geschwindigkeitsänderung in x-Richtung) vernachlässigt werden kann, ergibt sich für die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  einer laminaren Strömung in x-Richtung als Funktion der Position  $y$  im Rohr die Geschwindigkeit:

$$v = v_{\max} \left( 1 - \frac{4 \cdot y^2}{b^2} \right), \quad \bar{v} = \frac{2}{3} \cdot v_{\max} \quad (\text{V.22})$$

wobei  $b$  die Breite des Rohres und  $v_{\max}$  die maximale Strömungsgeschwindigkeit angibt, während  $\bar{v}$  die Durchschnittsgeschwindigkeit im Rohr angibt. Unter der Annahme, daß die Strömungsgeschwindigkeit in den Poren  $v_i$  beträgt und die entsprechende Geschwindigkeit außerhalb des Körpers (vor den Poren)  $v_a$  beträgt, folgt damit für die Druckänderung mit der Eindringtiefe  $x$

$$-\frac{dp}{dx} = \eta \cdot \frac{12}{b^2} \cdot \underbrace{v_a}_{\substack{\text{in Poren,} \\ v_i \cdot \sigma = v_a}} \quad (\text{V.23})$$

Diese Proportionalität zwischen  $\frac{dp}{dx}$  und  $v_a$  kann auch durch den **spezifischen Strömungswiderstand** (Strömungskennwiderstand  $\Xi$ ) bezeichnet werden, also:

$$-\frac{dp}{dx} \geq \Xi \cdot v_a$$

Mit diesem spezifischen Strömungswiderstand und unter Zugrundelegung eines Strukturfaktors  $\chi$ , der  $\geq 1$  ist, kann nun der Frequenzparameter  $\eta'$  definiert werden, der in Gleichung V.18 auftrat:

$$\eta' = \frac{\Xi \cdot \sigma}{\omega \cdot \rho \cdot \chi} \quad (\text{V.24})$$

Dieser Frequenzparameter beschreibt anschaulich das Verhältnis des eingeschlossenen Luftvolumens zum an der Schallschwingung teilnehmenden Luftvolumen. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit des Frequenzparameters ergibt sich folgende Frequenzabhängigkeit für eine unendlich dicke Wand bzw. eine poröse Wand endlicher Dicke:

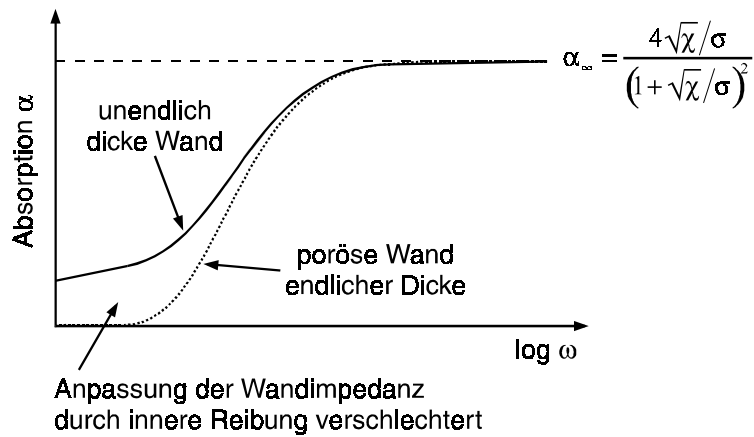


Abbildung 5.13: Absorptionsgrad als Funktion der Frequenz für verschiedene absorbierende Wände

Der Absorptionsgrad der porösen Wand endlicher Dicke ist zu niedrigen Frequenzen hin kleiner, weil die Wandimpedanz aufgrund der inneren Reibung nicht so gut an die Impedanz des äußeren Mediums angepaßt ist, so daß Reflexionen auftreten und der Absorptionsgrad entsprechend geringer wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Schallabsorption kann durch das Anbringen eines porösen Vorhanges mit einem bestimmten Abstand von der (mehr oder weniger stark reflektierenden) Wand erreicht werden. Für diesen Fall ist die Absorption immer maximal, wenn der poröse Vorhang genau in einem Schnelle-Maximum liegt, so daß möglichst viel Schallenergie durch innere Reibung im porösen Vorhang umgewandelt wird. Da aufgrund der schallharten Reflexion an der dahinterliegenden Wand dort ein Druckknoten entsteht, ist dieses Absorptionsmaximum immer dann erreicht, wenn der Abstand gleich  $\lambda/4$  beträgt (z. B. für  $f = 100\text{Hz}$  tritt das Absorptions-Maximum für  $d = 85\text{ cm}$  auf).

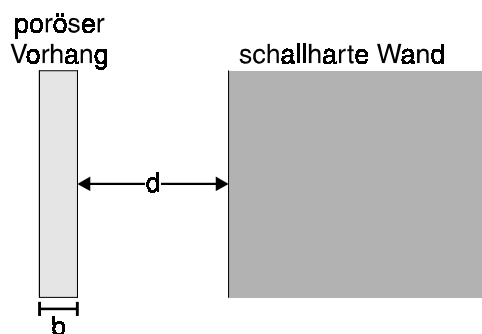


Abbildung 5.14: Anordnung eines porösen Vorhangs mit Wandabstand zur Schallabsorption

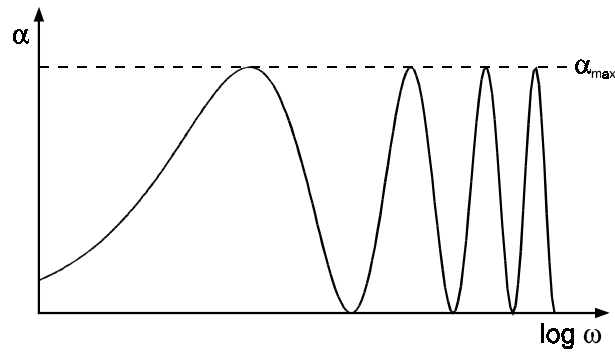


Abbildung 5.15: Frequenzgang des Absorptionsgrades für die Anordnung aus Abbildung 5.14

Für die maximal dabei erreichbare Absorption  $\alpha_{\max}$  gilt:

$$\begin{aligned}\alpha_{\max} &= \frac{4 \cdot \Xi \cdot b \cdot \rho \cdot c}{(\Xi \cdot b + \rho \cdot c)^2} \\ &= 1, \text{ falls } \Xi \cdot b = \rho \cdot c\end{aligned}\quad (\text{V.25})$$

Dabei bezeichnet  $b$  die Dicke des Vorhanges.

Das Problem beim Anbringen des porösen Vorhanges vor der Wand sind die notwendigen, aber leider relativ großen Abstände zur Wand, die sich insbesondere bei kleinen Räumen verbieten. Eine Möglichkeit, diese Abstände zu verringern, besteht darin, einen (komplexen) Impedanz-Sprung kurz vor der Wand einzuführen, so daß die Resonanz-Bedingung (absorbierendes Material im Abstand  $\lambda/4$  von der Wand entfernt) schon bei kleineren Abständen erfüllt ist. Diese Idee liegt den weit verbreiteten **Resonanz-Absorbern** zugrunde, die sich typischerweise als Form von Lochabsorberplatten an Decken oder Wänden von öffentlichen Gebäuden befinden. Dabei wird im Abstand  $d$  von der Wand eine Loch-Platte mit den Lochdurchmessern  $2 \cdot a$  und dem (mittleren) Abstand zwischen benachbarten Löchern  $e$  angebracht, die eine Dicke  $l_0$  aufweist. Das poröse, absorbierende Material müßte sich streng genommen vor der Lochplatte befinden, aus praktischen Gründen ist es jedoch zwischen der Lochplatte und der schallharten Wand angebracht, was bei entsprechender Abstimmung der Platten einen vergleichbaren Effekt bringt.

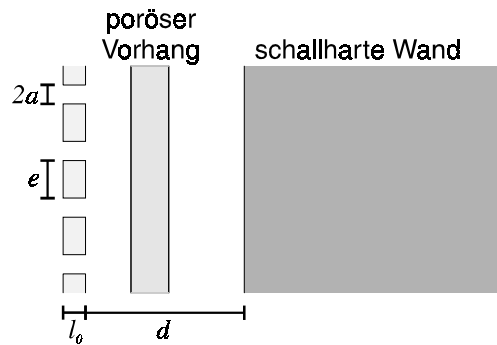


Abbildung 5.16: Anordnung von Lochabsorber-Platten

Der Absorptionsgrad  $\alpha$  erhält damit die folgende Form:

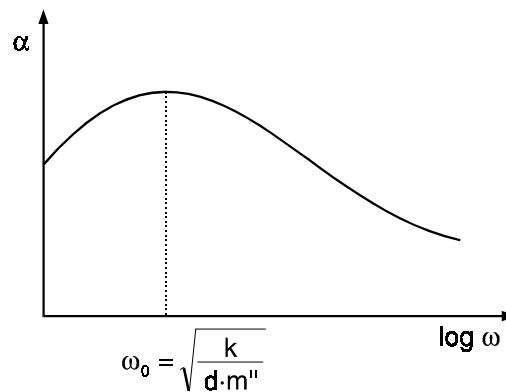


Abbildung 5.17: Absorptionsgrad von Lochabsorber-Platten

Die maximale Absorption tritt dabei bei der Resonanz-Frequenz  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{d \cdot m''}}$  auf.  $m''$  bezeichnet dabei die scheinbare akustische „Massenbelegung“ der Lochplatte, d. h.

$$m'' = \rho \cdot (l_0 + 1,6a) \frac{e^2}{\pi \cdot a^2} \quad (\text{V.26})$$

und die dabei auftretende akustische „Steifigkeit“ wird durch das Verhältnis aus Kompressionsmodul  $k$  und den Wandabstand  $d$  hervorgerufen. Mit diesen beiden Größen tritt bei der Frequenz  $\omega_0$  eine Resonanz auf (d. h. maximale Schnelle am Ort der Lochplatten), so daß bei dieser Frequenz am meisten Verluste in den dahinterliegenden porösen Absorber auftreten und die maximale Absorption der Lochplatten-Absorber erreicht werden kann. Trotz ihrer beschränkten Abmessungen wird daher auch bei niedrigen Frequenzen mit diesen Elementen eine relativ gute Schalldämmung erreicht.