

# Holz in der Raumakustik

*Kurt Eggenschwiler, Abteilung Akustik/Lärmbekämpfung, EMPA, CH-8600 Dübendorf*

## 1. Einleitung

Holz ist für die Akustik ein bedeutender Werkstoff. Bereits der Wald hat - wie wir aus eigener Erfahrung wissen - ganz bestimmte akustische Eigenschaften. Japanische Wissenschaftler haben herausgefunden, dass sich der Wald in bezug auf bestimmte akustische Parameter nicht so stark von einem guten Konzertsaal unterscheidet. [1]

Am berühmtesten und am stärksten von Mythen umrankt ist wohl das Holz zum Bau von Musikinstrumenten. Der Geigenklang lebt von der Qualität des Resonanzkastens aus Holz. Selbst Feinheiten, wie der Zeitpunkt des Baumfällens, werden als Beitrag für einen guten Klang gewertet.

Können die Klangeigenschaften des Resonanzkastens auf Konzerträume übertragen werden? Oft wird ja tatsächlich der Raum als erweitertes Musikinstrument, manchmal auch direkt als Resonanzkörper bezeichnet. Selbst in einem Fachbuch, welches sich ganz den akustischen Eigenschaften von Holz widmet, wird die Meinung vertreten, dass die Akustik von Konzertsälen durch Holz wesentlich verbessert werde. [2]

Bevor in den folgenden Abschnitten auf die Eigenschaften und die Verwendung des Holzes in der Raumakustik eingegangen wird, sei die Antwort auf die obige Frage vorweg genommen. Holz kann aus physikalischen Gründen in Räumen nicht die gleiche Wirkung entfalten wie bei einem Resonanzkasten der Geige. Und es ist nicht so, dass Holzflächen in einem Konzertsaal mit der Musik mitschwingen sollen. Tun sie dies nämlich, entziehen sie dem Schallfeld zu viel Energie im Bereich der tiefen Töne, und der Raum verliert seine akustische Wärme. Die Akustik der besten Konzertsäle ist nicht primär auf den Einsatz von Holz zurückzuführen.

Eine Ausnahme ist die positive Wirkung von Holzböden auf der Bühne. Hier ist das Mitschwingen für die Musizierenden an Cello und Bass sehr erwünscht. Schliesslich muss aber das Holz aus den anderen Bereichen des Konzertsaales trotzdem nicht verbannt werden. Viele Beispiele zeigen: Holz im Konzertsaal, *richtig* verwendet, führt bestimmt zu einem lebendigen Klangerlebnis. Dies sollte aus der nun folgenden Darstellung verständlich werden. Es wird der breite Einsatzbereich von Holz in der Raumakustik als reflektierende, schallstreuende und absorbierende Raumfläche für Musikräume, Theater, Kirchen, Schulzimmer, usw. diskutiert.

## 2. Holz als Schallreflektor

### 2.1 Einleitung: Schallreflexion und Streuung

In Räumen mit hohen akustischen Anforderungen muss der Schall so gelenkt werden, dass die Hörsamkeit in einem möglichst grossen Bereich des Publikums gut ist. Es wird unterschieden zwischen Musik- und Sprachhörsamkeit, wobei es bei der letzteren vor allem um eine gute Sprachverständlichkeit geht. In der Raumakustik gilt es in der Regel, zu der von den Schallquellen produzierten Schallenergie Sorge zu tragen. Erst wenn sie zu stark ist und z.B. zu spät nach dem Direktschall eintrifft, werden Flächen eingesetzt, um den Schall zu absorbieren (siehe Abschnitt 3).

Das erwähnte Ziel der Lenkung des Schalls wird erreicht, wenn gezielt Flächen eingesetzt werden, um den Schall zu reflektieren oder allenfalls zu streuen, und dies mit möglichst wenig Energieverlust. Bei den in diesem Abschnitt diskutierten Flächen sind

sowohl Wand-, Boden- und Deckenflächen als auch frei hängende Reflektoren gemeint. Die Flächen müssen gewisse Bedingungen erfüllen, um wirksam zu sein:

- *Grösse:* Wegen der Wellennatur des Schalls wirkt eine Fläche nur für Frequenzen oberhalb einer Grenzfrequenz als Reflektor. Tieffrequente Schallwellen, also grosse Wellenlänge "sehen" kleine Reflektoren gar nicht. Je grösser die von der einfallenden Schallwelle "sichtbare" Fläche ist, um so tiefer ist diese Grenzfrequenz (siehe Abb. 1). Regeln für die Dimensionierung finden sich z. B. in [3].
- *Geometrische Ausrichtung:* Für den Frequenzbereich oberhalb der Grenzfrequenz kann die Schallreflexion nach den gleichen Gesetzen wie in der geometrischen Optik gezeichnet werden: Einfallswinkel = Ausfallswinkel (siehe Abb. 1). Die Raumflächen oder frei hängenden Reflektoren sind entsprechend den akustischen Erfordernissen auszurichten.
- *Flächengewicht:* Je tiefere Töne noch reflektiert werden sollen, um so schwerer muss ein Reflektor sein. Für Sprache genügen  $10 \text{ kg/m}^2$ , für Musikinstrumente mittlerer Tonlagen sind  $20 \text{ kg/m}^2$  notwendig. Für Musik im allgemeinen ist ein Flächengewicht von  $40 \text{ kg/m}^2$  zu beachten. Der letzte Wert gilt z. B. für eine Podiumsbegrenzung in einem Konzertsaal und für sämtliche Flächen, falls der Konzertsaal mit Holz ausgekleidet wird.
- *Oberflächenstruktur:* Schall, der auf eine wie in Abb. 2 schematisch dargestellte Oberflächenstruktur mit der Tiefe  $s$  auftrifft, wird je nach Frequenz auf verschiedene Art reflektiert. Tiefe Frequenzen (Wellenlängen  $\lambda$  grösser als  $s$ ) "sehen" die Sägezähne nicht und werden quasi an der gestrichelten Fläche spiegelartig reflektiert. Hohe Frequenzen dagegen werden von den Sägezähnen gespiegelt. Frequenzen, deren Wellenlänge in der gleichen Grössenordnung liegen wie  $s$ , werden in verschiedene Richtungen gestreut. Damit der Schall auch bei mittleren und tiefen Frequenzen gestreut wird, sind relativ grosse Strukturiefen  $s$  notwendig. Am besten wirkt eine stark unregelmässige Form (siehe Abb. 4 und 5).

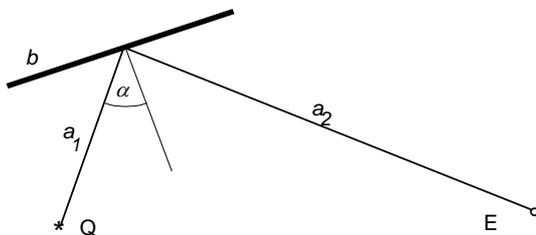


Abb. 1 Skizze zur unteren Grenzfrequenz  $f_u$ . Beispiel mit einem  $2 \times 2 \text{ m}$  Reflektor und einem steilen Einfallswinkel:

$$a_1 = 2 \text{ m}, a_2 = 20 \text{ m}, f_u \cong 300\text{-}400 \text{ Hz};$$

$$a_1 = 10 \text{ m}, a_2 = 20 \text{ m}, f_u \cong 1'000 \text{ Hz}.$$

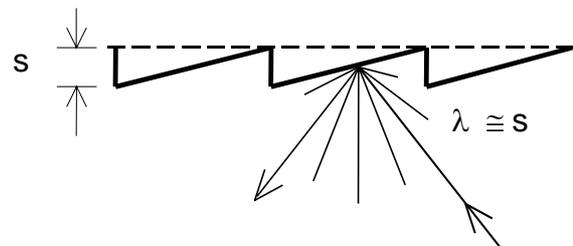


Abb. 2 Schallstreuung an strukturierten Oberflächen. Der Schall wird je nach Strukturtiefe bei anderen Frequenzen gestreut:

$$s = 0.10 \text{ m} \quad \text{Frequenz} = 3'400 \text{ Hz}$$

$$s = 0.50 \text{ m} \quad \text{Frequenz} = 680 \text{ Hz}$$

## 2.2 Verwendung von Holz für Schallreflektoren

Holz kann für alle Frequenzen ein ausgezeichneter Schallreflektor sein. Holz ist nicht porös und absorbiert darum im Hochtonbereich sehr wenig Schall. Der Absorptionsgrad beträgt im Mittel- und Hochtonbereich nur rund 5%. Dies ist vergleichbar mit anderen "schallharten" Materialien, wie z.B. Beton, Verputz etc. Im Tieftonbereich hängt das Reflexionsverhalten vom Flächengewicht ab.

Diese Eigenschaft des Holzes erlaubt es, die Innenverkleidung von Konzertsälen vollständig oder z.T. aus Holz zu fertigen, wie in den folgenden Sälen: Salle Stravinski, Montreux, 1993; Sibelius Konzersaal, Lahti, 2000 [4]; Konzerthaus Dortmund, 2002 [5].

### 2.3 Verwendung von Holz für Schalldiffusoren

Da sich Holz sehr gut zu verschiedenen Formen jeder Grösse verarbeiten lässt, es für Diffusoren sehr gut geeignet. Ein häufiger Diffusor ist die konvex gebogene Wandverkleidung. Die auf diese Struktur auffallenden Schallwellen werden wie in Abb. 3 gestreut.

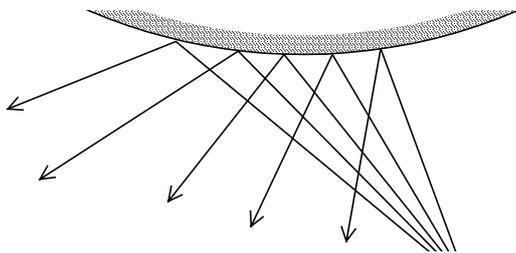


Abb. 3 Reflexion an einer konvex gebogenen Fläche.

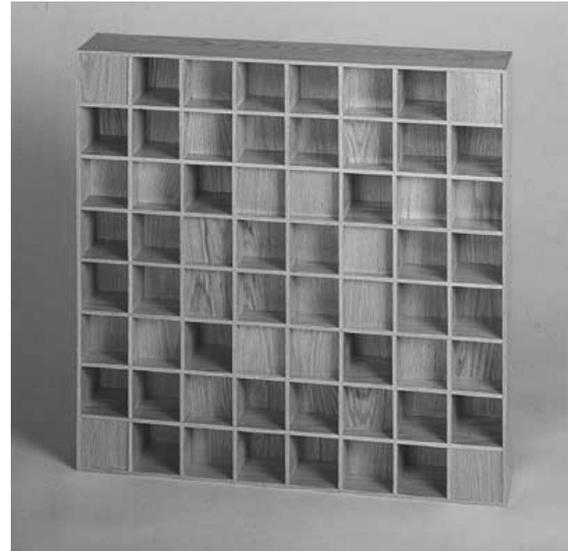


Abb. 4 Schröder-Diffusor (Quelle: RPG)



Selbstverständlich sind eine Fülle von strukturierten Wand- und Deckenformen denkbar, welche Schall analog Abb. 2 streuen. Regelmässige Strukturen sind dabei zu vermeiden. Je unregelmässiger strukturiert die Flächen sind, desto gleichmässiger ist die Streuung. Die wirkungsvollsten Strukturen sind nach mathematischen Gesetzen gestaltet (Schröder-Diffusoren, Prinzip: siehe Abb. 4).

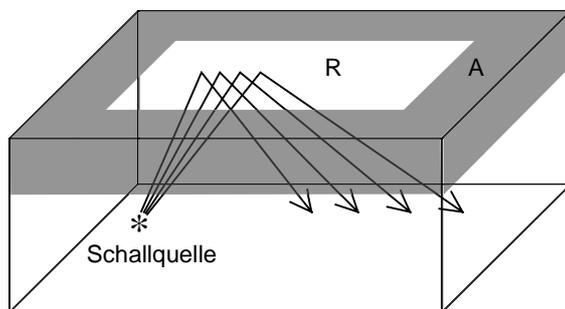
Abb. 5 Musikstudio mit stark schallstreuenden Wand- und Deckenelementen (Quelle: PTB)

### 3. Holz als Schallabsorber

#### 3.1 Schallabsorber in mittleren und grösseren Räumen

Schallabsorber entziehen dem Schallfeld Energie. Dadurch wird im Raum der Nachhall verkürzt und damit die Sprachverständlichkeit verbessert. Gleichzeitig wird der Raumschallpegel reduziert, also z.B. der Lärm in einem Restaurant oder in einer Fabrikhalle vermindert. Schallabsorber können auch eingesetzt werden, um unerwünschte Schallrückwürfe von bestimmten Flächen zu dämpfen.

In mittleren und grösseren Räumen für Musikdarbietungen ist in der Regel der Einsatz von Schallabsorbern zu vermeiden, um die Lebendigkeit der Musikdarbietung nicht zu beeinträchtigen. In Räumen für Sprache sind dagegen Schallabsorber zur Verminderung der Nachhallzeit meistens notwendig. Nur ist darauf zu achten, dass die Absorber nicht die nützlichen frühen Schallreflexionen schwächen (siehe *Abb. 6*).



*Abb. 6 Einige Schallstrahlen und Möglichkeit der Anordnung reflektierender (R) und absorbierender (A) Flächen in einem Schulzimmer. Die reflektierende Fläche spiegelt nützlichen Schall in den hinteren Bereich des Raumes.*

Die oben erwähnte Nachhallzeit lässt sich mit der einfachen Formel von Sabine mit einer für die Praxis in der Regel genügenden Genauigkeit bestimmen. [3] Die Formel ist allerdings nur unter der strengen Bedingung gültig, dass das Schallfeld diffus ist. Es wird also vorausgesetzt, dass die Energiedichte im ganzen Raum gleich ist, und sich der Schall in alle Richtungen gleichmässig ausbreitet.

Die erwähnten Bedingungen sind nur dann annähernd erfüllt, wenn die Schallabsorber gleichmässig im Raum verteilt sind. In einer Turnhalle, wo nur die Decke absorbierend ist, und die restlichen Flächen schallhart sind, ergibt die Berechnung einen kürzeren Nachhall als im fertig gebauten Raum gemessen werden kann. Akustikfachleute werden sich deshalb nicht alleine auf die Formel stützen und für solche Räume fordern, auch an den Stirn- und Seitenwänden eine angemessene Fläche mit Schallabsorbern zu belegen.

Für Räume mit besonderen Anforderungen an die Hörsamkeit, wie Konzertsäle, Theater und Mehrzwecksäle, ist es erforderlich, für die raumakustische Prognose auf dem Computer Simulationen durchzuführen oder sogar physikalische Modelle zu bauen. [6]

Für die Nachhallzeit gibt es Vorschläge für optimale Werte, welche sich für eine erste Annäherung gut eignen (Mittelwert bei 500 Hz/1000 Hz):

Grosse Konzertsäle	2 Sekunden
Theater	1 Sekunde
Schulzimmer	0.4 – 0.6 Sekunden

In Räumen für Sprache ist auch eine ausreichende Absorption im Tieftonbereich zu empfehlen. Speziell wichtig ist sie aber in kleinen Räumen: In Musikproberäumen, Tonaufnahme- und Abhörräumen etc. ist der Einsatz von Schallabsorbern im Tieftonbereich unbedingt notwendig.

### 3.2 Schallabsorber in kleinen Räumen

In kleineren Räumen spielen Eigenmoden bei tiefen Frequenzen eine grosse Rolle, weil die Eigenmodendichte in diesem Frequenzbereich noch nicht so gross ist. Dies führt auf der einen Seite dazu, dass das Übertragungsverhalten der tiefen Töne sehr unregelmässig ist. Auf der anderen Seite stellt sich je nach Ort im Raum die Lautstärke verschieden ein. Tieftonabsorber dämpfen diesen Effekt (siehe Abb. 7).

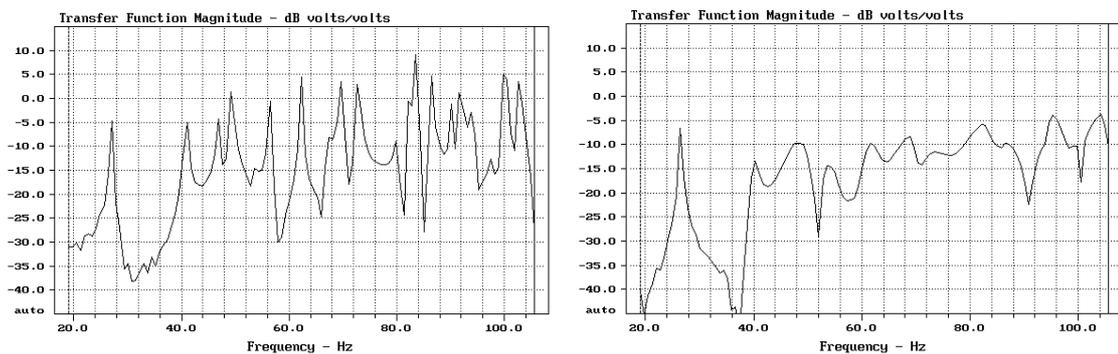


Abb. 7 Schematischer Frequenzgang der Übertragung von der Quelle zum Empfänger in einem kleinen Raum. Links: Raum mit schallharten Flächen - starke Schwankungen des Frequenzgangs. Rechts: Gleicher Raum, aber im Tieftonbereich schallabsorbierend - Frequenzgang relativ ausgeglichen.

### 3.3 Verwendung von Holz als Schallabsorber im Tieftonbereich - Plattenschwinger

Holzplatten oder -verkleidungen mit einem gewissen Abstand vor einer harten Wand wirken mit der Luft im Hohlraum zusammen als schwingungsfähiges Masse-Feder-System mit einer Resonanzfrequenz  $f_0$ , die relativ tief liegt. In einem mehr oder weniger breiten Frequenzbereich rund um  $f_0$  absorbiert das System Schallenergie.

Wie ist ein System aufzubauen, damit es für einen möglichst breiten Frequenzbereich gut wirksam ist?

- Die Platte muss frei schwingen können. Es ist deshalb eine gewisse Mindestfläche von Versteifungen und Unterstüzungen frei zu halten (etwa 0.4 m<sup>2</sup> Fläche, 0.5 m seitliche Abstände der Unterkonstruktionen).
- Damit das eingeschlossene Luftvolumen als (Luft-)Feder wirksam ist, darf der Abstand zur harten Wand nicht zu gross sein. Seitlich sollten die Platten abgeschlossen sein.
- Auf der anderen Seite darf der Abstand aber auch nicht zu klein sein, weil sonst die Wirkung des Absorbers auf einen zu kleinen Frequenzbereich begrenzt ist.
- Im Hohlraum ist ein Dämmstoff (z.B. Mineralfaserplatten) einzulegen. Die Wirksamkeit des Absorbers wird so deutlich verbessert

In Abb. 8 ist der mögliche Bereich für den Wandabstand und das Flächengewicht in Funktion der Resonanzfrequenz angegeben. Ein Beispiel des Schallabsorptionsgrads eines Plattenschwingers findet sich in Abb. 9.

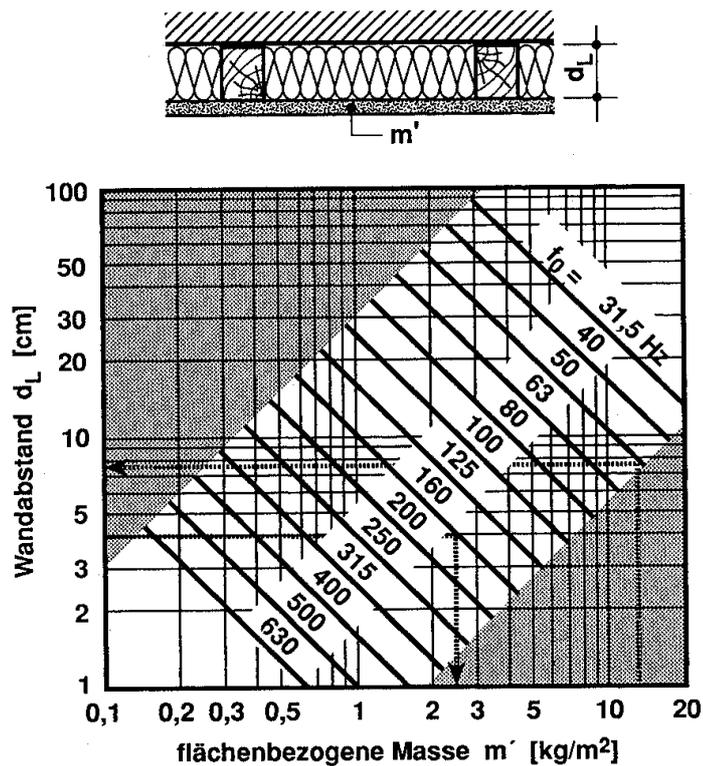


Abb. 8 Resonanzfrequenz von Plattenschwingern in Abhängigkeit von Wandabstand  $d_L$  und flächenbezogener Masse  $m'$  der Platte. [3]

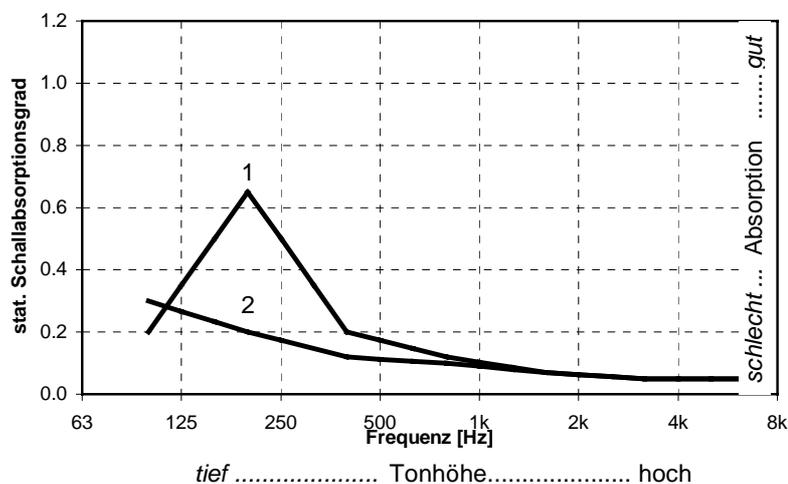


Abb. 9 Schallabsorptionsgrad von zwei Plattenschwingern aus Holz.  
 1: Hartfaserplatte, Dicke 3.5 mm, Abstand von der Wand 6 cm.  
 2: Holzspanplatte, Dicke 6 mm, Abstand von der Wand 6 cm  
 beide lose hinterfüllt mit Mineralfaserplatte.

### 3.4 Helmholtzresonatoren

Bei Helmholtzresonatoren handelt es sich um Luftvolumen (z.B. 1 Liter), die über ein kleines Loch an den Raum angekoppelt sind. Die Luftmasse im Loch wirkt zusammen mit der eingeschlossenen Luft als Feder-Masse-System, welches im Tieftonbereich

Schall absorbiert. Helmholtzresonatoren kommen nur in Spezialfällen zum Einsatz, wie z.B. in Tonstudios. Sie können vollständig aus Holz gebaut werden.

### 3.5 Verwendung von Holz als Schallabsorber im Mittel- und Hochtonbereich - Schlitz- und Lochplattenabsorber

Um Schallabsorber für mittlere und höhere Frequenzen zu bauen, muss Holz mit anderen Materialien kombiniert und/oder stärker verarbeitet werden. Sehr häufig werden geschlitzte oder gelochte Holzplatten mit einer porösen Schicht, z.B. Mineralfaser- oder Weichfaserplatten kombiniert. Für bestimmte Anwendungen, wie zur Lärmbekämpfung in Fabrikhallen, werden auch zementgebundene Holzwolleplatten eingesetzt.

Ein Absorber mit sehr einfachem Aufbau ist in Abb. 10 dargestellt. Er besteht aus Holzriemen mit Luftspalten über einer genügend dicken Schicht von 30 - 50 mm eines porösen Materials wie Mineralfaserplatten. Je grösser der Anteil der Luftspalten ist, um so besser wirkt der Absorber zu höheren Frequenzen. Dies ist allerdings in der Regel nicht notwendig, weil im hohen Tonbereich meistens genug Schallabsorption im Raum vorhanden ist. Mit 15 - 20 % Schlitzanteil wird akustisch eine recht gute Wirkung erreicht. Im Tieftonbereich wirkungsvoller wird der Absorber, wenn zwischen harter Wand oder Decke und Mineralfaserplatte noch ein Luftabstand eingehalten wird.

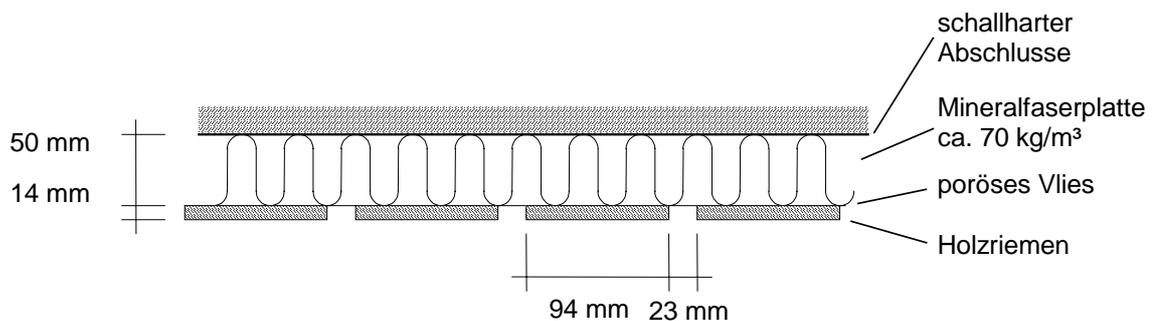


Abb. 10 Guter Schallabsorber aus Holzriemen mit Luftspalten

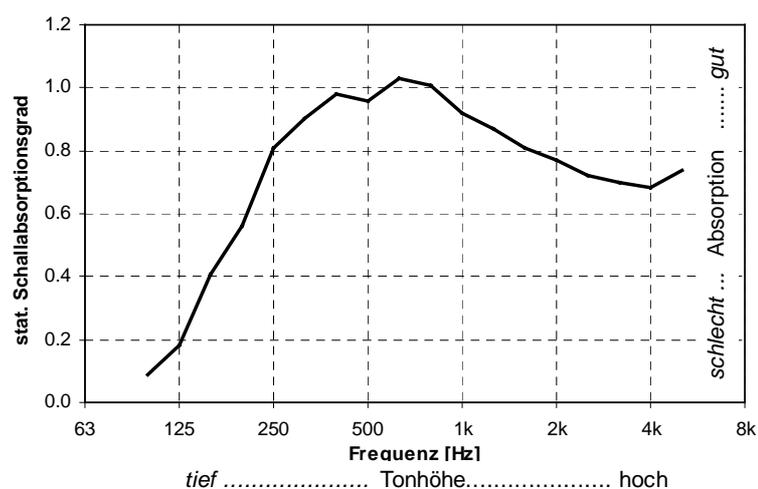


Abb. 11 Schallabsorptionsgrad des Absorbers von Abb. 10

Im Handel sind verschiedene ästhetisch sehr ansprechende Produkte erhältlich, die auf dem gleichen Prinzip basieren: Eine gelochte oder geschlitzte Platte befindet sich vor einem porösen Material, z.B. einer Weichfaserplatte. Der Loch- resp. Schlitzanteil beträgt in der Regel zwischen 10 und 25 %. Die verschiedenen Absorbertypen können mit Plattenschwingern so kombiniert werden, dass sich im Raum die gewünschten Nachhallzeiten einstellen.

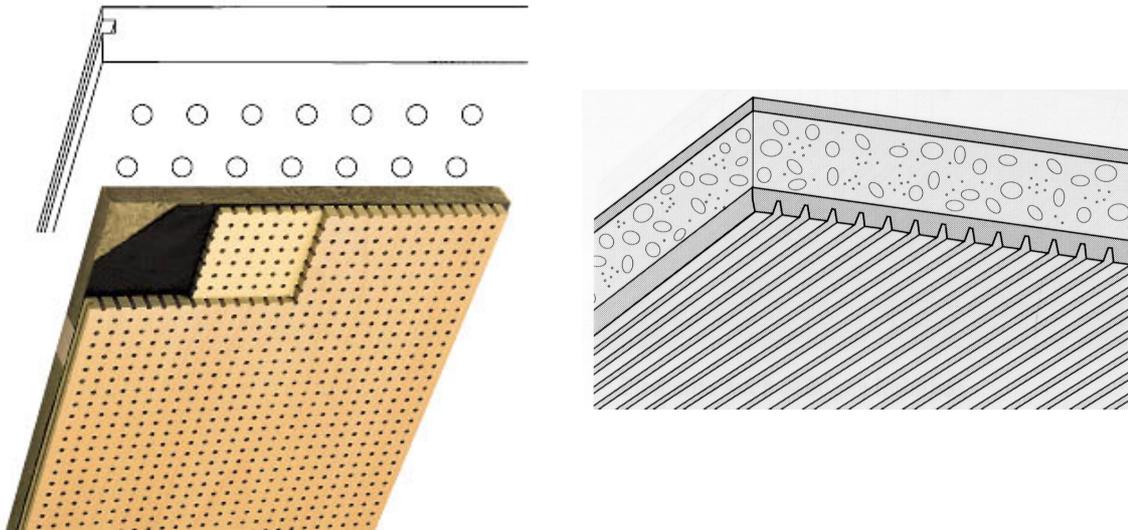


Abb. 12 Handelsübliche Schallabsorber mit Holzoberfläche. Je nach Lochung, Hinterfüllung und Abstand von der Decke ergibt sich ein anderer Schallabsorptionsgrad. (Quelle: nH und Lignoform).

## Literaturverzeichnis

- [1] Hiroyuki Sakai, Shin-ichi Sato, and Yoichi Ando: Orthogonal acoustical factors of sound fields in a forest compared with those in a concert hall. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 104, No. 3, Pt. 1, September 1998.
- [2] Voichita Bucor: Acoustics of wood, CRC Press, 1995.
- [3] Fasold W., Veres E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Verlag für Bauwesen, Berlin 1998
- [4] Finnische Holzarchitektur und finnisches Bauen. puu 3/2000
- [5] <http://www.konzerthaus-dortmund.de>
- [6] Eggenschwiler Kurt, Heutschi Kurt: Raumakustische Planungs- und Messverfahren. Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 38, 1998, S. 708 - 712.