



*Karl Brüstle
Dipl.-Ing. (HTL/FH)
Ingenieurbüro für Technische
Akustik
Univ.-Lehrauftrag und
FH-Lektor in Wien für
Akustik und Bauphysik
Dornbirn, Österreich*

Akustik - Theorie und Praxis

Acoustic in theory and practice

Acustica - teoria e pratica

Dokument in Deutsch

Akustik - Theorie und Praxis

1 Die Akustikfragen des Holzbaus

Während beim Holzbau raumakustische Anforderungen leichter zu erfüllen sind, fehlt für den bauakustischen Schallschutz, d. h. für die Schalldämmung, die große Gewichtsmasse der massiven Bauteile. Im Holzbau müssen die hohen geforderten Schalldämmmaße daher mit anderen Methoden erreicht werden.

Die bekannten mehrschaligen Leichtbauwände nutzen diese Methoden-Grundgesetze. Im Folgenden sollen diese erläutert und das Verständnis dafür vertieft werden. Denn sie durchziehen den hier relevanten Gesamtbereich der sogenannten Technischen Akustik auf eine überraschend umfassende Weise. Es soll gezeigt werden, dass in den bloß scheinbar so unterschiedlichen Konstrukten dieser Akustik-Teilbereiche die gleichen Gesetzmäßigkeiten gelten und genutzt werden. Zwei der wichtigsten Grundgesetze sind auch in den Hochbau-Schallschutznormen lange Zeit nicht angesprochen worden. Doch bereits vor ca 10 Jahren ist dies in den Neuausgaben der Schallschutznormen geschehen (Resonanz, Verlustfaktor).

Betroffen sind beim gegebenen Thema die folgenden Bereiche:

- Bauakustik
- Lärmschutz, primär gegenüber Außenlärm und im Sinne von raumakustischer Lärmsenkung z. B. in gewerblich-industriellen Arbeitsräumen(Dienstnehmerschutz)
- Vibrationsschutz
vor allem betreffend die maschinellen Einrichtungen mit rotierenden oder stoßenden Elementen wie z. B. Lüfteraggregate, Kältekompressoren, Liftmaschinensätze etc
- Raumakustik, im Sinne optimaler Hörsamkeit von Sprache und Musik

2 Bauakustik / Schallschutz und Vibrationen/Körperschall

2.1 Frequenzbereich

Für den allgemeinen Schallschutz ist zur normgemäßen Beurteilung der derzeitige sogenannte

- "bauakustisch relevante Frequenzbereich" maßgebend. Dieser Tonhöhenbereich umfasst seit längerem
- den Bereich von 100 Hz bis 3150 Hz, aufgeteilt in 16 Teilbänder, die sogenannten Dritteloktav- oder Terzbänder

Diese "Feinaufteilung" (früher waren es nur 5 bis 6 Oktavbänder) gestattet eine wesentlich bessere Einbeziehung des subjektiven Störcharakters von Geräuschen, von Lärm, von Bauteil-Schalldämmungen und von einfacheren raumakustischen Gegebenheiten.

2.2 Trittschall im Holzbau

Im Holzbau muss auch der normale Trittschall als besonders kritischer Störschall-Erzeuger angesehen werden, denn die hier nötige Leichtbauweise auch für sogenannte Trockenestriche neigt zum gefürchteten Dröhnen und Poltern mit deren hohen Energieanteilen auch unter 100 Hz, jedenfalls bis 50 Hz herunter. Aus diesem Grund wird im Holzbau zunehmend der erweiterte Frequenzbereich von 50 Hz bis 5000 Hz (Terzbänder) zur schallschutzmäßigen Störungsbeurteilung herangezogen.

Der daraus abgeleitete "bewertete/gewichtete Einzahlwert" des Norm-Trittschallpegels $L_{n,w}$ erhält dann den normgerechten Index-Zusatz (Correction, Korrektur):

+Ci50-5000, woraus der erfasste Frequenzbereich zu ersehen ist.

Z. B.: Bewerteter Norm-Trittschallpegel $L_{n,w+Ci50-5000}$ in dB.

2.3 Vibrationen von Maschinensätzen, Körperschall

Die Vibrationen im obenerwähnten Sinn betreffen vor allem die Frequenzen bis weit unter 100 Hz, auch bis unter die menschliche Hörgrenze von ca 20 Hz. Für die üblichen Höchstdrehzahlen der Maschinensätze von 1500 Umdrehungen pro Minute sind das 25 Schwingungen pro Sekunde, also eine Störfrequenz von 25 Hz.

Wenn Lüfter im Dauerbetrieb mit einer ökonomisch niedrigeren Zweidrittel-Drehzahl von z. B. nur 1000 Umdrehungen pro Minute laufen, dann liegt die vibrationserzeugende Stör-Frequenz noch niedriger, nämlich bei ca 17 Hz. Alle genannten Vibrationsfrequenzen sind gut hörbar, sie liegen noch im menschlichen Hörbereich, auch wenn die gehörmäßige Wahrnehmungsfähigkeit gegen tiefe Frequenzen zu bekanntlich stark abnimmt (ISO-Kurven gleicher Lautstärkepegel). Unter ca 20 Hz werden sie als Erschütterung z. B. des Fußbodens wahrgenommen. Aber auch für Frequenzen bis ca 50 Hz und darüber gilt dies. Das betrifft in erster Linie die Vertikalbewegungen von Flächen, auf denen man steht. Das sind Erschütterungen, für die der Mensch besonders empfindlich ist.

Resonanzerscheinungen im Holzbau

Eine besondere Problematik des Holzbaus ist es, dass Vibrationsenergie, die in die Holzbaustruktur eingedrungen ist, bedeutende Verstärkungen durch Resonanzerscheinungen an verschiedenen Konstruktionsteilen erfahren kann, die zumeist unkalkulierbar sind und deshalb schon an der Vibrationsquelle sorgsam unterbunden werden müssen. Im Massivbau haben z. B. die schweren Betonplatten und ähnlich ausgeführte Wände infolge ihres hohen Gewichts eine sehr niedrige "Plattenresonanzfrequenz", wie jedem Tragwerksplaner bekannt ist. Diese niedrige Eigenfrequenz (etwa im Bereich um 2 Hz herum) ist schallschutzmäßig irrelevant. Sie ist nur dann von großer Bedeutung, wenn so niedrige und starke Anregungsfrequenzen auf derartige Bodenplatten einwirken (z. B. Metall-Pressmaschinen).

Im Holzbau dagegen gibt es zahlreiche flächige und stabförmige Bauteile mit geringerem Gewicht, deren Eigenschwingungszahl, d. h. deren "Eigenton" im tieffrequenten Hörbereich und darunter liegt. Solche Eigentöne werden durch die Resonanzüberhöhung kräftig verstärkt. Das vorerwähnte Poltern und Dröhnen beim Begehen von Holzfußböden gehört in diese Kategorie. Somit ist hier nun das Stichwort "Resonanz" bzw "Eigenfrequenz" bzw "Eigenton" bereits gefallen, das im Folgenden etwas näher beleuchtet werden soll, weil es in der gesamten Akustik, besonders aber im Leichtbau durchwegs große Bedeutung besitzt. Das darf und muss gewagt werden, nachdem dieser Begriff schon vor 10 Jahren erstmals Eingang in die betreffenden Regelwerke gefunden hat bzw finden musste als das einzig bestimmende Kriterium für viele akustisch-praktische Phänomene. Typisch dafür ist die Tabelle zur Ermittlung der Schalldämmungs-Veränderung von Vorsatzschalen.

Maßgebend für die Schalldämmung ist nämlich nur die Eigenfrequenz der Vorsatzschale wie z. B. folgend:

Resonanzfrequenz f_0 Veränderung des bewerteten Schalldämmmaßes R_w

≤ 80 Hz	15 dB	
100 Hz	12 dB	
200 Hz	2 dB	
250 Hz	0 dB !!	(Wirkung Null, keine Verbesserung)
315 Hz	-5 dB !!	(erhebliche Verschlechterung)
500 bis 1600 Hz	-10 dB !!	(große Verschlechterung)

Gemäß dem betreffenden Normenpapier kann diese Eigenfrequenz leicht annähernd errechnet werden mit ganz einfachen Formeln wie folgt:

Für Vorsatzschalen: $f_0 \approx 60 / \sqrt{(m' \cdot d)}$;

für Doppelschalen: $f_0 \approx 85 / \sqrt{(m' \cdot d)}$;

m' Flächenmasse der Vorsatzschale bzw der Einzelschale der Doppelschalenkonstruktion, in kg/m^2 ,

d Luftschichtdicke (mit Porösstofffüllung) in m. Dazu die nachfolgenden Erläuterungen.

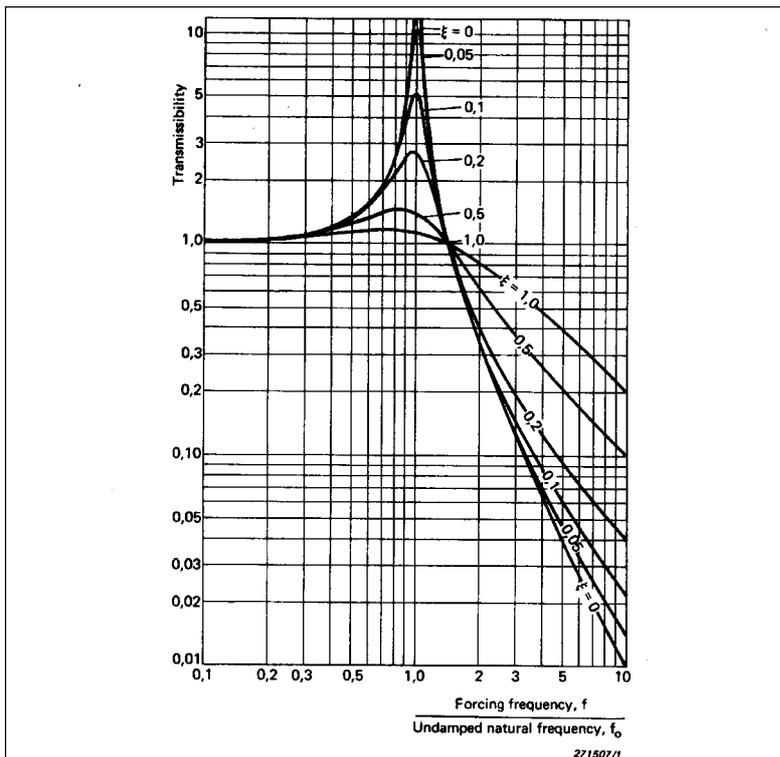


Figure 1: "Curves showing the absolute transmissibility as a function of the frequency ratio f/f_0 for various damping ratios".

3 Grundgesetzmäßigkeiten der Akustik

Resonanzerscheinungen bilden eine der wenigen grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Akustik. Mit der Kenntnis dieser wenigen Grundgesetze lassen sich die verschiedenartigen Erscheinungsformen von akustischen Maßnahmen und Konstrukten der o. e. Teilgebiete gut verstehen.

Es handelt sich um die folgenden universellen Grundgesetze:

- Das Berger'sche Massengesetz der Schalldämmung. Maßgebend für schwere Massivwände und Massivdecken.
- Den Koinzidenzeffekt (Spuranpassungseffekt) bei der Luftschalldämmung. Maßgebend für dünne Schalenbauteile, zumeist mehrschalig ausgeführt.
- Die Resonanz-Erscheinungen im gesamten hier relevanten Frequenzbereich. Das ist eine universelle Gesetzmäßigkeit, deren Ausnutzung die gesamte Technische Akustik bestimmend durchzieht. Für dieses wichtige Phänomen soll durch dieses Referat etwas mehr Verständnis geschaffen werden.
- Die Verlustfaktoren (inneren Reibungsverluste) verschiedener Materialien, die wegen der Energievernichtung in der Akustik vielfältig zum Einsatz kommen.

3.1 Das Berger' sche Massengesetz

Das Berger' sche Massengesetz der Schalldämmung (Dissertation Techn. Hochschule München 1910/11 !):

Vergrößerung der Flächenmasse m' :

Für einschalige plattenförmige Massiv-Bauteile steigt die Luftschalldämmung R_w bei Zunahme der sogenannten Flächenmasse m' (kg/m^2) an, und zwar theoretisch um 6 dB je Verdoppelung der Flächenmasse m' .

Praktisches Ergebnis: Je dicker und schwerer die Wand/Decke, desto besser ist die Schalldämmung.

Siehe die beigefügte, praktisch brauchbare Diagrammkopie aus einer einschlägigen Norm, die den Zusammenhang zwischen diesen beiden Komponenten zeigt.

Frequenzzunahme:

Bei Verdoppelung der Frequenz steigt die Luftschalldämmung R_w um theoretisch jeweils 6 dB an.

Frequenzverdoppelung / -halbierung = Oktavsprung.

Je schneller eine Wand durch die Schallwellen hin- und herbewegt werden soll, desto größer ist der Widerstand, den die große Masse den Hin- und Her-Beschleunigungen entgegensetzt.

Problematische Folge: Je tiefer die Anregungsfrequenz, desto schlechter wird die Schalldämmung. Bei tiefen Frequenzen werden auch Massivwände immer stärker schalldurchlässig.

3.2 Der Koinzidenzeffekt (Spuranpassungseffekt)

Der Koinzidenzeffekt beruht auf folgenden Grundtatsachen, die hier nicht bis ins Detail näher erklärt werden sollen:

Luftschallwellen erzeugen beim Schrägeinfall auf Wände/Decken in diesen Bauteilen Biegewellen, ähnlich den bekannten Wasseroberflächen-Wellen nach einem Steinwurf.

Bei Luftschallwellen haben wir die sehr komfortable Situation, dass sich diese mit konstanter Geschwindigkeit

c_{Luft} = ca 340 m/s ausbreiten, und zwar bei allen hier relevanten Frequenzen.

Dagegen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Biegewellen in einem plattenförmigen Bauteil nicht konstant, sondern ist abhängig von:

- der Frequenz (steigt mit dieser an)
- und der Plattendicke (steigt mit dieser an)

Wenn nun die Luftschallwelle und die zugehörige Biegewelle an der Wand parallel und mit gleicher Geschwindigkeit entlanglaufen (Koinzidenz), tritt eine Verstärkung/Aufschaukelung der Biegewelle ein, was sich auf der anderen Wandseite durch ebenfalls verstärkte Schallabstrahlung bemerkbar macht: die Schalldämmung beginnt abzusinken. Für die Biegewelle geschieht dies nur dann, wenn Frequenz und Plattendicke dafür die richtigen Werte haben.

Die zugehörige Frequenz ist die sogenannte "Koinzidenzgrenzfrequenz f_G ", bei welcher die Schalldämmungsverschlechterung beginnt. Bei Luftschall-Schrägeinfall läuft die sogenannte "Wellenspur" des Luftschalls an der Wand entlang, daher "Spuranpassungseffekt". Die Wellenspur ist naturgemäß stets schneller als die Luftschall-Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Bei 45° Einfallswinkel, der statistisch und leicht einsichtig etwa am häufigsten vorkommt, läuft die Luftschall-Wellenspur mit der 1,41 fachen Luftschall-Ausbreitungsgeschwindigkeit an der Wand entlang. Damit die Biegewelle gleich schnell ist, muss sie gemäß Obigem eine höhere Frequenz haben, und zwar die doppelte Frequenz. Bei dieser doppelten Koinzidenzgrenzfrequenz ist der Schalldämmungseinbruch bereits maximal, dank den statistisch sehr zahlreichen Schallstrahlen bei diesem und den benachbarten Einfallswinkeln.

Der Koinzidenzeffekt bildet eine Grenze (Koinzidenzgrenzfrequenz f_G) für die universelle Wirksamkeit des Berger'schen Massengesetzes, bei welcher ein starker Einbruch der Schalldämmung beginnt. Die größte Tiefe des Einbruchs liegt also ca bei der 2-fachen Koinzidenzgrenzfrequenz. Gegen noch höhere Frequenzen zu steigt die Luftschalldämmung dann rasch wieder an und folgt ab der ca dreifachen Koinzidenzgrenzfrequenz wiederum dem Massengesetz.

Folgerungen

Dieser starke Absenk-Einbruch der Schalldämmung darf nun nicht in den o. e. bauakustisch relevanten Frequenzbereich hereinreichen. Er muss mit seiner Koinzidenzgrenzfrequenz, bei welcher der starke Abfall beginnt, an der oberen Frequenzgrenze, nämlich bei 3150 Hz, gehalten werden.

Dies gelingt durch dünneres (= biegeweicherer) Plattenmaterial, beispielsweise durch eine Plattendicke von präzise 11 mm (siehe Normen-Diagramme) bei den folgenden Materialien: Holzspanplatten, Gipskartonplatten. Zulässig sind aber noch etwas größere Plattendicke zwischen 15 mm und 20 mm, weil die größeren Flächenmassen den Koinzidenz-Schalldämmeinbruch noch etwas überkompensieren können.

Gemäß den Angaben in den einschlägigen Normen sind bei den nachstehenden Materialien wegen des Koinzidenzeffekts folgende maximalen Dicken noch zulässig:

Holzspanplatten	20 mm
Sperrholzplatten	5 mm
Stahlblechplatten	2 mm
Gipskartonplatten	15 mm
Gipsfaserplatten	15 mm
Faserzementplatten	6 mm
Glas	4 mm

Das Material muss also dünn genug, d. h. "biegeweich" bleiben, darf daher nicht einschalig dicker werden. Mit zunehmender Dicke wandert der Koinzidenzeinbruch gemäß Obigem hinunter zu tieferen Frequenzen, d. h. in unseren bauakustisch relevanten Frequenzbereich hinein, wodurch das bewertete Schalldämmmaß R_w sich bedeutend verschlechtert.

Dieses Wandern zu tieferen Frequenzen erfolgt nach dem einfachen Zusammenhang:

- Doppelte Einzelschalendicke ergibt Halbierung der Koinzidenzgrenzfrequenz.

Das muss vermieden werden. Wenn größere Dicken erforderlich sind, müssen Mehrfachbeplankungen mit den ebenerwähnten geringeren Einzeldicken vorgesehen werden, wodurch die erforderliche "Biegeweichheit", d. h. die zugehörige ausreichend hoch gelegte Koinzidenzgrenzfrequenz hochliegend erhalten bleibt. Die Flächenmasse aber erhöht sich und damit auch die Schalldämmung.

3.3 Mehrfachschalen

Allerdings haben so dünne Platten, auch wenn sie dreifach beplankt sind, nur eine geringe Flächenmasse m' von z. B. ca 40 kg/m² bei dreifachen Holzspanplatten mit 20 mm Dicke. Damit wird bestenfalls eine Luftschalldämmung von 30 dB erreicht.

Solche dünnen Einzelwände sind folglich in der Praxis weitgehend unbrauchbar. Die bekannten sehr hohen Schalldämmungen werden mit solchen Schalen dadurch erzielt, dass sie "mehrschalig" eingesetzt werden, nämlich:

- als Vorsatzschalen vor schweren Massivwänden,
- oder als Doppelschalen mit Luftzwischenraum von mindestens 5 cm, üblicherweise 10 cm, wie z. B. bei den bekannten Leichtbau-Bürotrennwänden.

Dadurch werden Schalldämmungen erreicht, die weit über das Massengesetz hinausgehen. Die Ursache dafür bildet die Ausnutzung der Resonanzerscheinungen. Die Erhöhung der Flächenmasse bei diesen dünnen Schalen hat mit dem Berger'schen Massengesetz nichts mehr zu tun, sondern mit der Tieferlegung der Eigenfrequenz dieser Systeme.

3.4 Die Resonanzerscheinungen

Resonanzerscheinungen bilden das entscheidende Kriterium für die gegenständlichen akustischen Teilgebiete, in denen es durchgehend sogenannte "schwingungsfähige Systeme" gibt. Bei diesen treten unvermeidlich Resonanzen bzw Eigenschwingungszahlen auftreten (Analogon: Pendelschwingungen).

Es handelt sich dabei stets um abgefederte Massen, um sogenannte "Feder-Masse-Systeme". Man kann sich dies zuerst einmal als ein Gewicht an einer Schraubenfeder hängend vorstellen. Dafür gilt das einfache Grundgesetz:

- Vergrößerung der Masse senkt die Eigenfrequenz (größeres Pendelgewicht = langsamere Schwingungen).
- Längere, weichere, d. h. weniger steife Feder senkt die Eigenfrequenz, das System schwingt langsamer. Hierfür wird in der Akustik der Terminus "Steifigkeit s " verwendet..

Gefederte Massen

In der Akustik tritt diese Gewichtsmasse in folgenden Erscheinungsformen auf:

Maschinenmasse (Lüfter, Liftaggregate etc), Flächenmasse m' der plattenförmigen Bauteile, auch der Leichtbau-Schalen, Estrich-Flächenmasse m' (!!), Platten-Flächenmasse der raumakustischen Tiefton-Absorber, Erhöhter "Massenbelag" der Luftstöpsel bei Loch-/Schlitzplatten-Absorbern.

Akustische "Federungen"

Die Federwirkung erscheint in folgenden Gestalten:

Die Elastomerfederung oder die Stahlfederelemente unter Maschinensätzen. Das Luftvolumen (Luftpolster) hinter Vorsatzschalen, das Luftvolumen zwischen den Schalen von mehrschaligen Leichtbauwänden, die Trittschalldämmungs-Unterlage unter Estrichen, das Luft-Volumen (Luftpolster) hinter den Tieftonabsorber-Paneelplatten.

Zu diesen Resonanzsystemen gehören also die folgenden wohlbekannteren "schwingungsfähigen" Anordnungen der Akustik, woraus die außerordentliche Bedeutung dieser Erscheinung ersichtlich wird.

- Sogenannte biegeweiche Vorsatzschalen vor Massivwänden oder unter Decken (Holzspan oder Mehrschichtplatten etc).
- Doppelschalige Leichtbauwände in bekannter Ausführung, z. B. als Bürotrennwände etc, erforderlichenfalls mehrfach beplankt für größere Flächenmassen.
- Doppelschalige tragende Deckenkonstruktionen und Fertigelemente des Holzbaus (Kasten- und Flächenelemente etc).
- Schwimmende Estriche, auch Trockenestriche des Holzbaus, die zusammen mit der weichfedernden Unterlage ein ganz typisches schwingungsfähiges System mit konkreter Eigenresonanz bilden.
- Vibrationserzeugende Maschinensätze, die aus Gründen des Körperschallschutzes auf federelastische Unterlagen aus Elastomeren (Polymerisaten) oder auf Stahlfederelemente aufgesetzt werden. Das sind ebenfalls typische schwingungsfähige Feder-Masse-Systeme, bei denen die Frequenzlage der Resonanzfrequenz ebenfalls äußerst wichtig für die Schallschutz-Wirksamkeit ist.

- Zum Beispiel sind dies häufig: Liftmaschinensätze, Lüfteraggregate, Kompressoren für Kälteerzeugung oder Druckluft, etc.
- Massive tragende Deckenplatten z. B. aus Beton, deren Eigenfrequenzen zwar sehr tief liegen (weit unterhalb des menschlichen Hörbereichs), von den Tragwerksplanern jedoch sehr wohl ermittelt und angegeben werden, damit nicht z. B. große Maschinensätze genau diese Resonanzfrequenz anregen, was zu Zerstörungen führen kann.
- In diese "Maschinenakustik" fallen z. B. Dieselaggregate, diverse große Werkzeug- und Stanzmaschinen der Metallbearbeitung usw.
- Die Federwirkung dieses Schwingungssystems liegt in der Verbiegung der Platte selbst, die ja rundum starr eingespannt ist. Hier gibt es keine konzentrierte oder flächige Feder.
- Tieftonabsorber der Raumakustik aus Paneelplatten mit Luftraum dahinter; sog: Resonanzabsorber.
- Loch- und Schlitzplattenabsorber für mittlere Frequenzen, bei denen nicht nur die Platte als üblicher Tieftonabsorber wirkt, sondern vor allem die Luftstüpsel der Löcher (Schlitze) eine starke Resonanzbeschleunigung mit hohen "Reibungsverlusten" erfahren, wodurch sehr große Schluckgrade bis zu 100% bei mittleren Frequenzen (etwa um 500 Hz herum) erzielt werden.
- Durch die enormen Beschleunigungen der Luft an den Loch-Verengungen tritt eine "Massenvergrößerungswirkung" ein, ein vergrößerter "Massenbelag". Zusammen mit dem federnden Luftraum dahinter entsteht Resonanz bei den erwähnten mitteltiefen Frequenzen.

3.5 Der Verlustfaktor

Bei fast allen vorgenannten Resonanzsystemen kommt es darauf an, das resonanzartig überhöhte Mitschwingen rasch zum Abklingen zu bringen.

3.5.1 Porösstoffe

Bei Vorsatzschalen und bei mehrschaligen Leichtbauwänden geschieht dies durch das Einfügen von offenporigen Faserstoffen in den Luftzwischenraum, möglichst vollfüllend. Das verbessert naturgemäß die Schalldämmung. Selbstverständlich müssen die Porösstoffe einen ausreichend großen "Strömungswiderstand" besitzen, damit die hin- und her-geschobenen Luftmoleküle genügend Reibungswiderstand in den Poren vorfinden.

Das ist z. B. bei den leichtgewichtigen Mineralfaserwollen nicht ausreichend der Fall. Dazu braucht es engere Poren, d. h. als Hilfsgröße eine größere Wichte der Mineralfaserplatten von mindestens 50 kg^3 , besser 70 bis 100 kg/m^3 , je nach Anwendungsfall und Anforderung. Neuerdings werden diese Strömungswiderstände schon in manchen Firmenprospekten ebenfalls angegeben, nämlich als längenspezifische Strömungswiderstände w oder r (auf Einheitsmaße bezogen).

3.5.2 Material-inhärente Verlustfaktoren

Auch die hohen Verlustfaktoren bestimmter Stoffe werden für die "Dämpfung" von unerwünschten Schwingungen eingesetzt. Ein Musterbeispiel bilden die Estrichmaterialien für die schwimmenden Estriche, z. B. Anhydrit-Estrichmaterial etc.

Der hohe Verlustfaktor im Vergleich mit Betonestrichen oder mit Holzbau-Trockenestrichen bewirkt, dass die Biegewellen, die von den Tritten beim Begehen im Estrich erzeugt werden (à la Wasseroberflächenwellen), sehr rasch abklingen, d. h. "gedämpft" werden, sodass diese Estriche nicht unangenehm dröhnen oder poltern

Für Asphaltestriche gilt Ähnliches. Es sind dies sozusagen "Antidröhn-Materialien". Andere Materialien wie Antidröhn-Folien, Schwerfolien, Schaumstoffe etc werden auf "tönende" Platten aufgeklebt und unterdrücken das ansonsten verstärkt und länger tönende Schwingen (typisches sichtbares Beispiel: Motorhauben von Pkw's). Zweischalige Türblätter zum Beispiel, werden auf diese Weise entdröhnt, vor allem aber auch beschwert, sodass die Resonanzfrequenz dieses doppelschaligen Systems wunschgemäß sinkt und so die Schalldämmung erhöht.

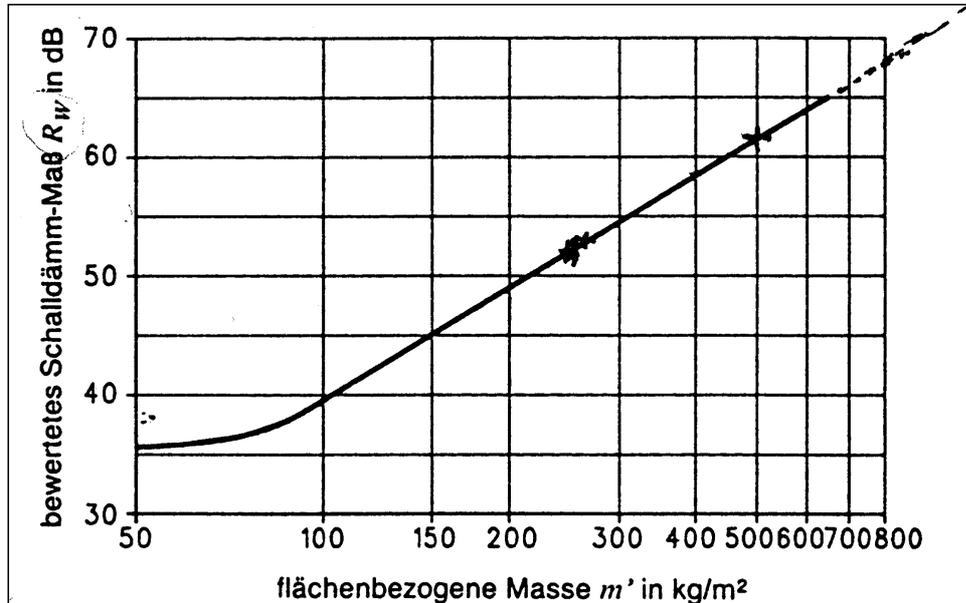


Figure 2: Bewertetes Schalldämm-Mass R_w von massiven einschaligen Wänden und Decken gemäss 3.2.1

4 Resonanzen und Schalldämmung im Holzbau

4.1 Resonanzverhalten

Hier folgt nun noch die Erklärung dafür, warum und wie durch Nutzung des Resonanzverhaltens eine hohe Schalldämmung und eine hohe Vibrationsdämmung erreicht wird. Gerade im Holzbau muss mit diesen Möglichkeiten gearbeitet werden.

Grundlage ist der allgemeingültige frequenzabhängige Verlauf der Resonanzwirkung, d. h. der frequenzabhängigen Verstärkungen und Absenkungen von Schall- bzw. Vibrationsanregungen. Abhängig sind diese Auswirkungen von der Frequenzlage der Resonanzfrequenz und jener der (zu unterdrückenden) Anregungsfrequenzen z. B. des Trittschalls, der Maschinenvibrationen. Dazu gibt es eine wichtige, universell gültige Kurvendarstellung gemäß der Beilage.

Wichtigste Kernpunkte:

- Bei der Resonanzfrequenz f_0 und in deren Nähe treten hohe Verstärkungen/Überhöhungen von Schallwellen- und Vibrations-Anregungen auf.
Das Ausmaß der Verstärkung ist abhängig vom Verlustfaktor der Federung und/oder der zusätzlich vorgesehenen (Stoß-) Dämpfer. Dort wo Überschwingen unterdrückt werden muss, werden Verlustfaktoren künstlich eingebracht durch entsprechende Federungsmaterialien (Elastomere) oder durch Dämpfer bei Stahlfederelementen (Musterbeispiel: Automobilfederungen mit Stoßdämpfern).
- Bei dem 1,41-fachen Wert der Resonanzfrequenz tritt weder Verstärkung noch Abschwächung ein.

- Ab der doppelten Resonanzfrequenz $2 \cdot f_0$ beginnt die Schwingungsunterdrückung.
- Erst ab der dreifachen Resonanzfrequenz $3 \cdot f_0$ erreicht die unterdrückende Wirkung brauchbare Ausmaße.
- Bei noch höheren Frequenzen (mehr als die dreifache Resonanzfrequenz) ergeben sich außerordentlich starke und zunehmende Vibrationsunterdrückungen, von denen man bei gelegentlichen Sonder-Bedarfsfällen Gebrauch machen muss.
Dies geschieht, wie indem die Systemresonanzfrequenz noch weiter unter die Störfrequenzen geschoben wird (geringere Federsteife, größere Massen).

Beispiel Liftmaschinensatz Normvorschrift

So ist zum Beispiel in den Normen vorgeschrieben, dass im normalen Mehrwohnungs- und Bürobau die Liftaggrate wie folgt federelastisch zu lagern sind:

Die Anregungs- bzw Störfrequenz des Liftmaschinensatzes von üblicherweise 1500 U/min, entsprechend 25 Hz, muss dreimal so groß bleiben wie die einzustellende Eigenresonanz des gefederten Liftmaschinensatzes. Dies entspricht der obigen Anmerkung, dass ab der dreifachen Resonanzfrequenz eine brauchbare Schwingungsunterdrückung gegeben ist. Daher Anforderung:

Der Liftmaschinensatz, d. h. seine Gewichtsmasse, muss folglich so weich abgedert werden, dass seine Resonanzfrequenz bei 1/3 der Anregungsfrequenz von 25 Hz also bei ca 8 Hz zu liegen kommt.

Andere wohlbekanntete Resonanzsysteme

Dieses Prinzip ist schließlich auch grundlegend für die folgenden, weiter vorne bereits erwähnten akustischen Anordnungen. Deren Eigenfrequenzen müssen im obigen Sinn ausreichend tief gelegt werden, hier fast durchwegs unter 100 Hz, d. h. unter die Untergrenze des derzeit bauakustisch relevanten Frequenzbereichs. Wenn dies z. B. bei Holzbau-Trockenestrichen aus Mangel an Masse nicht gelingt, dann muss der höher liegende Dröhn-/Polter-Resonanzbereich entdröhnt werden z. B. durch dämpfende Unterlagen mit hohem Verlustfaktor.

- Fußboden-Estriche auf federnder Unterlage, deren Federwirkung teils auch aus dem Luftraum inkl der porigen Trittschalldämmplatten besteht.
- Flächenmasse der Vorsatzschale zusammen mit dem federnden Luftraum dahinter.
- Flächenmasse der doppelschaligen Leichtbauwände zusammen mit dem zwischen liegenden federnden Luftpolster inkl der Energievernichtenden Porösstoff-Vollfüllung.

In den Normen-Neuausgaben sind bereits einfache Formeln zur leichten Ermittlung der Resonanzfrequenzen der eben geschilderten Bausysteme enthalten. Daraus ist ebenfalls zu schließen, dass dies als das maßgebende Kriterium für die Beurteilung und das Verständnis der schalldämmenden Wirkung obiger Konstruktionen gesehen werden muss.

4.2 Schallschutz im Holzbau

4.2.1 Mehrschalige Konstruktionen mit tiefer Resonanzfrequenz

Für den Schallschutz im Hochbau bedeutet das Vorerwähnte, dass zur Erreichung der nötigen hohen Schalldämmungen doppelschalige oder mehrschalige Leichtbaukonstruktionen mit ausreichend tiefgelegter Resonanzfrequenz eingesetzt werden müssen. Dazu müssen u. U mehrfach beplankte Schalen (zweifach, dreifach) zur Vergrößerung der Flächenmassen vorgesehen werden, was ausschließlich dem Herunterschieben der Resonanzfrequenzen dient.

Siehe wieder das beigefügte Diagramm mit dem universell gültigen spektralen Resonanzverhalten von Masse-Feder-Systemen. Zu beachten ist außerdem die Koinzidenzgrenzfrequenz der einzelnen Leichtbauschalen, d. h. deren ausreichende Biegeweichheit. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass die Schalen der mehrschaligen Bauteile nicht mit starren Kanthölzern etc miteinander verbunden werden. Das ergibt sogenannte "massive Schallbrücken", durch welche die Schalldämmung stark abgemindert wird. Das gilt besonders für die Wände, bei denen die Schalenverbindungen elastisch gehalten werden müssen. Entweder durch federnde Steher, durch Federelementbefestigung einer Schale oder durch versetzte Holzsteher, die jeweils nur eine Schale tragen.

4.2.2 Doppelschalige Deckenelemente

Bei den erforderlichen hohen Schallschutzwerten müssen auch die Decken doppelschalig und weitgehend biegeweich ausgeführt werden. Aus statischen Gründen müssen die beiden Schalen der Deckenelemente mit Stegen miteinander fest verbunden werden. Das sind zumeist keine massiven Kanthölzer, deren negative massive Schallbrückenwirkung soeben erwähnt wurde. Stattdessen werden von den qualifizierten Herstellern möglichst schmale, fast federnde Holzstege mit möglichst großen, statisch noch zulässigen Abständen eingesetzt, deren geringe Schalldämmungs-Abminderung durch etwas größere Schalen-Massen kompensiert werden.

Auch hier senken die vergrößerten Schalenmassen die Systemresonanz der Doppelschalendecke so weit, dass die zu dämmenden tiefsten Anregungsfrequenzen des normmäßig relevanten Frequenzbereichs genügend weit über der System-Resonanzfrequenz zu liegen kommen. So sind Kasten- und Flächenelemente etc für Decken und Fußböden entwickelt worden, deren Schallschutzeigenschaften auch durch Prüfgutachten belegt sind.

4.2.3 Maschinensätze im Holzbau, Körperschall

Für die Vibrationsgedämmte Abfederung von Maschinensätzen, häufig von Lüfteraggregaten und Kältemaschinen, ist es fast immer ungünstig, die Lastabfuhr direkt auf die Holzkonstruktion zu legen, bei der es unkalkulierbare Stab- und Plattenresonanzen im Tieffrequenz- und Vibrationsbereich sowie deren Weiterleitung in entferntere Bauteile ingeben kann. Am sichersten zur Erreichung der Norm-Empfehlungen für die höchstzulässigen Geräusche und Vibrationen in den Nutzräumen ist es, die Maschinensätze über Federelemente auf eine sogenannte Beruhigungsmasse zu stellen, die möglichst aus einer 15 cm bis 20 cm dicken Betonplatte bestehen soll. Die Lastabfuhr soll dabei direkt auf die tragenden Bauteile erfolgen.

Die Resonanzfrequenz des Schwingsystems Maschinensatz+Federelemente muss ausreichend tiefgelegt werden. Bei 1500 U/min (25 Hz) sind das $f_0 = 8$ Hz. Im Holzbau reicht das je nach Situation oftmals nicht aus. Beim ökonomischen 2/3 Drehzahl-Dauerbetrieb von Lüftern wären folglich ca 5 Hz anzustreben. Mit serienmäßigen Stahlfederelemente kann diese Anforderung leicht erfüllt werden. Die Lösungen für solche Fälle sollen immer sorgfältig und rechtzeitig geplant werden.