

Subjektive Wahrnehmung von Schall

Olin Bartlomé
Lignum I Holzwirtschaft Schweiz
CH-Zürich



1. Subjektive Wahrnehmung von Schall

1.1. Bewohnerbedingte Anforderungen müssen erfüllt werden

Das Ziel der akustischen Gestaltung ist in erster Linie geeignete Bedingungen für die Nutzer zu schaffen. Denn bei Lärmbelastung treten körperliche Veränderungen auf, ohne dass dies bewusst wahrgenommen wird¹. Die häufige Einschätzung, dass Lärm nicht stört, bzw. dass man sich daran gewöhnt, schliesst daher mögliche langfristige gesundheitliche Beeinträchtigungen nicht aus [1].

Im Hochbau geht es dabei um Luftschalldämmung gegenüber Innen- und Aussengeräuschen, um Trittschall- und Körperschalldämmung und um die Schallabsorption (Raumakustik). Die schallschutztechnischen Anforderungen sind in der Schweiz in der Norm SIA 181 <Schallschutz im Hochbau> und in Deutschland in der DIN 4109 <Schallschutz im Hochbau> geregelt. Die verlangten Einzahlwerte beziehen sich hauptsächlich auf das Frequenzspektrum zwischen 100 und 3150 Hz, der Tieffrequenzbereich wird (damit) faktisch nicht einbezogen.

Neben den normativen Vorgaben bestehen bewohnerbedingte Anforderungen. Diese basieren auf dem subjektiven Empfinden der Menschen. Gemessen an Umfragen [2] und der Anzahl Reklamationen ist auch bei erfüllten Normwerten der störendste Lärm bei in Leichtbauweise errichteten Gebäuden die Trittschallübertragung aus fremden Wohnbereichen. Dieser dumpfe Lärm, der auch als Dröhnen bezeichnet wird, wird im darüber liegenden Stockwerk hauptsächlich durch Schritte, aber auch durch herumrennende Kinder oder Stühlerücken verursacht [3]. Diese in Gebäuden üblichen Schallemissionen sind z.T. sehr tieffrequent, d.h. sie haben ihre wesentlichen Schallanteile unterhalb 100 Hz.

1.2. Schalltechnisches Verhalten von Massiv- und Leichtbaukonstruktionen

Warum sind nun diese tieffrequenten Geräusche bei konventionellen Leichtbaukonstruktionen so dominant hörbar? Der Grund liegt in der Tatsache, dass sich Leichtbaukonstruktionen bauakustisch anders verhalten als Massivbaukonstruktionen wie z.B. Stahlbetondecken. Wie Abbildung 1 veranschaulicht, erreicht eine Stahlbetonrohdecke (gepunktete Kurve) in den Oktavbändern von 50 bis 100 bzw. 250 Hz eine signifikant bessere Trittschalldämmung gegenüber bauüblichen Leichtbaukonstruktionen. Umgekehrt ist bei Stahlbetondecken die Schallübertragung bei hohen Frequenzen i.d.R. ausgeprägter (ausgezogene Kurve).

¹ So lassen sich bei Untersuchungen von Schlafenden hormonelle Veränderungen im Körper als Folge von Lärmeinwirkungen feststellen [1].

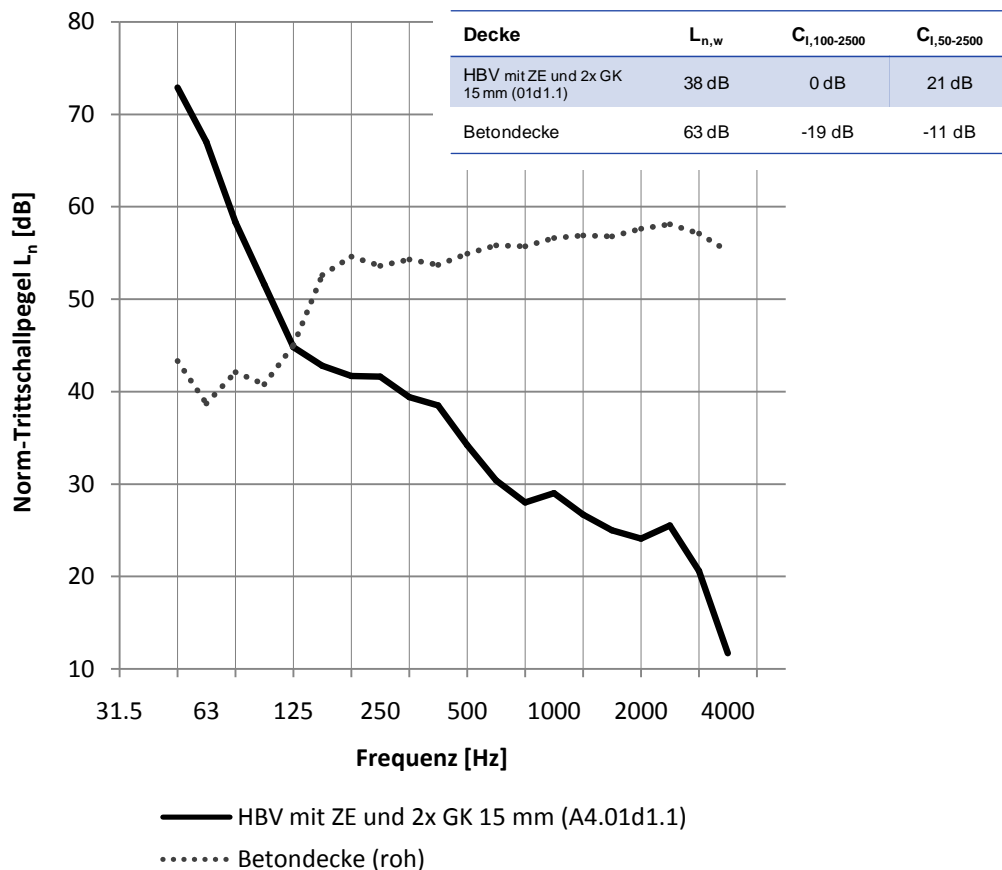


Abbildung 1: Norm-Trittschallpegel L_n einer Holzbetonverbunddecke sowie einer Stahlbetonrohdecke (Holz-Beton-Verbunddecke mit Zementestrich und 30 mm abgehänger, biegeweicher Unterdecke).
 Quelle: O. Bartlomé/LIGNUM

Neben der Bauweise hat beim Trittschallschutz die Nachgiebigkeit der Deckschicht des Bodens einen grossen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften einer Decke. So dämpft z.B. ein Teppich die tiefen Frequenzen und schiebt die Norm-Trittschallpegel L_n innerhalb der Konstruktionsprinzipien in diesen Terzbändern zusammen [4].

1.3. Paradigma-Wechsel nötig

Es scheint klar, dass basierend auf den genannten Gegebenheiten ein Paradigmenwechsel stattfinden muss, vom «einfachen» Einhalten der normativen Vorgaben zur Berücksichtigung der bewohnerbedingten Ansprüchen. Folgerichtig wird im Holzbau der Fokus seit einiger Zeit auf die tiefen Frequenzbereiche gelegt. Andererseits wird auch der Zusammenhang zwischen subjektiven und objektiven Beurteilungsgrössen von Trittschall untersucht, so auch im Rahmen des Kooperationsprojektes «Schallschutz im Holzbau» der Lignum und der Berner Fachhochschule Architektur, Bau und Holz. Gemeinsam mit dem IBP des Fraunhofer Instituts werden dabei innerhalb eines europäischen «Woodwisdom-Net» Projektes die psychoakustische Bewertung sowie die Korrelation zu physikalischen Messgrössen von Trittschall bei Holzbauten beschrieben und in einer Lignum-Dokumentation aufbereitet.

2. Welche Massnahmen müssen getroffen werden, um gute Resultate zu erreichen?

2.1. Designteam

Einerseits geht es um Qualitätssicherung. Da sich die moderne Holzbauproduktion durch höchste Massgenauigkeit auszeichnet und sich im klar strukturierten, hochautomatisierten Ablauf in der Werkhalle per se faktisch keine Unregelmässigkeiten einschleichen können,

ist diese <Vorschrift> verhältnismässig einfach zu erfüllen. Durch die termingerechte Lieferung auf die Baustelle und das präzise Aufrichten und zusammenfügen der Elemente kann bzw. muss ein nachträgliches Verletzen der schalltechnisch relevanten Schichten (z.B. durch Elektroleitungen) auf der Baustelle ausgeschlossen werden.

Nichtsdestotrotz oder genau deshalb² ist es beim Planungsprozess von grosser Wichtigkeit ein kompetentes Designteam aus Planern mit Wissen zum System und Akustikern zu haben. Denn einerseits ist der Schallschutz interdisziplinär, andererseits ist bei der Akustik der <gesunde Menschenverstand> sehr oft eine trügerische Hilfe. So sind z.B. die akustischen Eigenschaften von Holzdecken schwerer abschätzbar als die von Massivdecken, weil die Rohdecken in der Regel weder als sehr schwer noch als sehr steif im Vergleich zu Deckenauflage und Unterdecke angenommen werden können. Je nach Konstruktionsart beeinflussen sich die Elemente der Decke gegenseitig, und es können Systeme mit mehreren Resonanzen entstehen [5]. Die Komplexität dieser Systeme wächst exponentiell, je grösser die Anzahl Schichten, Materialien, Abmessungen etc. variieren.

2.2. Konstruktive Massnahmen

Rohdecke

Der Hauptgrund für die geringen Schallschutzeigenschaften von Leichtbaukonstruktionen bei tiefen Frequenzen ist deren geringere Masse [6]. Wie in Abbildung 1 aufgezeigt, hat eine gegenüber üblichen Leichtbaudecken wesentlich schwerere Stahlbetondecke in den tiefen Frequenzbändern bedeutend tiefere Norm-Trittschallpegel L_n . Durch das Hinzufügen von Masse bei Holzdecken werden wesentlich bessere Norm-Trittschallpegel L_n in den tiefen Frequenzbändern erreicht, wobei die Art der Masse auf das Tragsystem abzustimmen ist [6].

In Abbildung 2 sind Messergebnisse einer unbeschwerteten und einer beschwerteten Brettstapeldecke dargestellt.

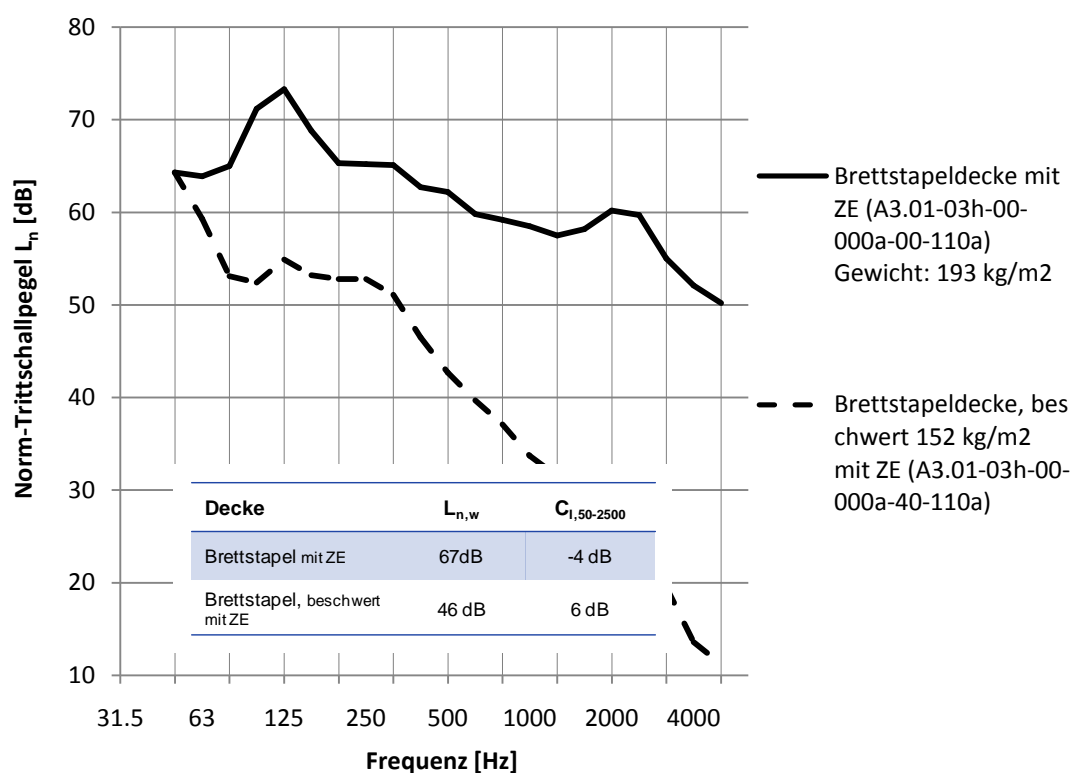


Abbildung 2: Norm-Trittschallpegel L_n einer unbeschwerteten und einer mit zusätzlichen 152 kg/m² beschwerteten Brettstapeldecke. Quelle: O. Bartlomé/LIGNUM

² Die industrielle Bauteilfertigung ermöglicht die Verwendung von Regeldetails, und ein Produktentwicklungsteam kann in der Entwurfsphase deren Fertigung kontrollieren.

Auch aus [7] und [8] geht hervor, dass die Schalldämmung mit zunehmendem Ballast auf der Tragkonstruktion signifikant besser wird. Bei ca. 80 kg/m^2 flacht die Kurve schliesslich etwas ab. Bei Massivholzdecken sollte Splitt verwendet werden [9], [6]. Ballastierte Deckenkonstruktionen in Leichtbauweise sind trotz der zusätzlichen Masse immer noch wesentlich leichter als Betondecken.

Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass innerhalb des Leichtbaus hinsichtlich der Konstruktionsprinzipien und der akustischen Eigenschaften Unterschiede bestehen. So verhalten sich Balken-/Rippen-Konstruktionen anders als Massivholzkonstruktionen (Abbildung 3).

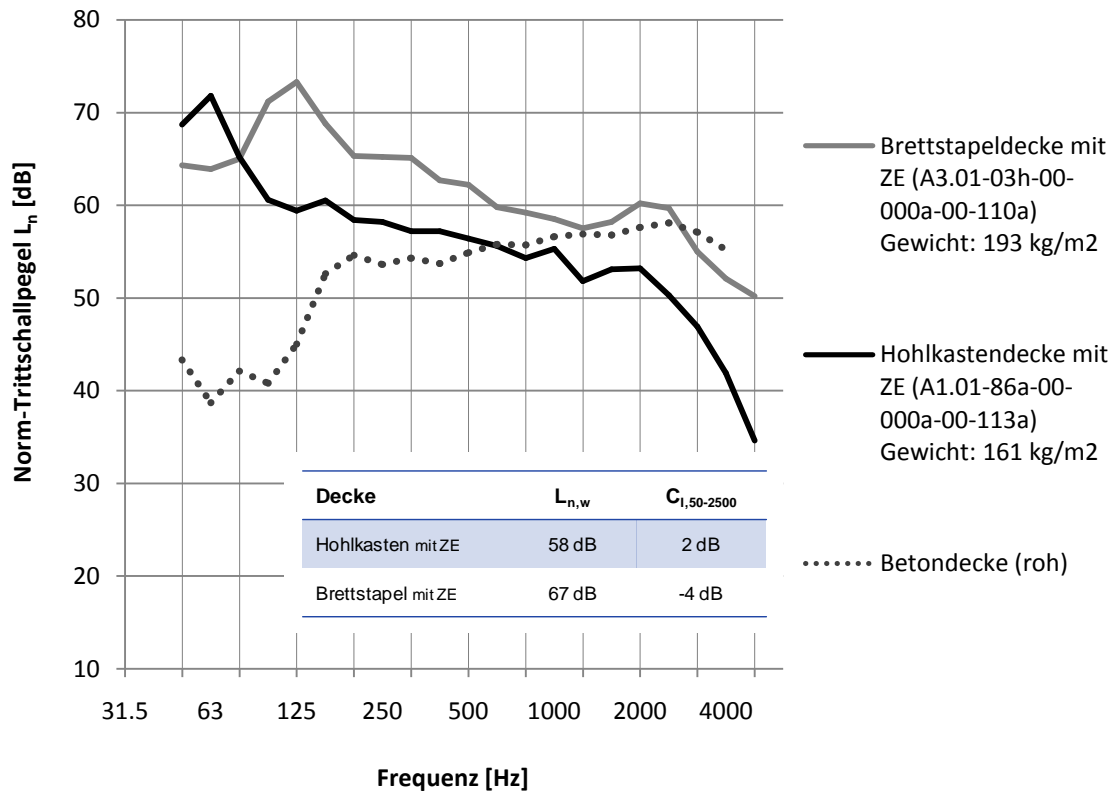


Abbildung 3: Schalltechnische Eigenschaften unterschiedlicher Deckensysteme. Die etwas leichtere Hohlkasten- decke verhält sich ab 100 Hz etwas günstiger als die Brettstapeldecke (beide Decken mit Zementestrich und ohne abgehängte, biege- weiche Unterdecke). Quelle: O. Bartlomé/LIGNUM

Fussbodenaufbau

Die erste Massnahme zur Verbesserung des Schallschutzes von Decken ist der Einsatz eines Fussbodenaufbaus. Damit wird ein Masse-Feder-System geschaffen, bestehend aus einem schwimmenden Estrich (Masse) und einer Trittschalldämmung (Feder). Speziell bei Massivholzdecken hat sie einen signifikanten Einfluss, weil der Fussbodenaufbau das einzige Masse-Feder-System bildet. Bei Rippen-/Holzbalkendecken bilden sich durch die konstruktionsbedingten Hohlräume Resonanzen und damit weitere Masse-Feder-Systeme.

Die Resonanzfrequenz ist die wichtigste Grösse bei der Dimensionierung des Fussbodenaufbaus. Der Fussbodenaufbau stellt ein Tiefpassfilter dar, welcher erst bei Frequenzen oberhalb der Resonanzfrequenz f_0 zu dämmen beginnt. Im Bereich der Resonanzfrequenz und darunter lässt der Filter die Signale ungehindert passieren. Im ungünstigsten Fall – dieser tritt dann ein, wenn die inneren Körperschallverluste bzw. Reibung im Dämmmaterial klein sind – ist sogar mit einer Verstärkung der übertragenen Signale in der Grössenordnung von 10 – 15 dB zu rechnen.

D.h. um beim Trittschall gute Resultate zu erzielen, muss die Resonanzfrequenz des Fussbodenaufbaus möglichst tief sein, also unterhalb des fürs menschliche Gehör störenden Bereichs. Das System ist daher theoretisch so abzustimmen, dass die Resonanzfrequenz bei (weit) unter 50 Hz liegt.

Die Resonanzfrequenz hängt hauptsächlich von zwei Parametern ab: der flächenbezogenen Estrichmasse und der dynamischen Steifigkeit s' der Trittschalldämmung. Die Resonanzfrequenz lässt sich mit diesen beiden Parametern mit Formel 1 berechnen:

$$f_0 = 160 * \sqrt{\frac{s'}{m'}} \text{ [Hz]}$$

Formel 1

Darin sind:

f_0 = Resonanzfrequenz in Hz

m' = flächenbezogene Masse des Estrichs in kg/m^2

s' = flächenbezogene dynamische Steifigkeit der Trittschalldämmung in MN/m^3

Wie anhand Formel 1 feststellbar, muss die Trittschalldämmung eine möglichst geringe dynamische Steifigkeit s' aufweisen. Bei einer Halbierung der dynamischen Steifigkeit s' kann mit einer Vergrößerung des Trittschallverbesserungsmasses ΔL_W von theoretisch maximal 6 dB gerechnet werden. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass diese Verbesserung der Trittschalldämmung nun aber nicht automatisch zu einer Verringerung des Dröhnens führt. Das Weicher machen der Lagerung führt lediglich zu einer Verlagerung der Eigenfrequenz des Estrichs zu tieferen Frequenzen. Eine merkbare Verbesserung der Situation lässt sich, so wie es im Moment aussieht, nur über den Verlustfaktor des Dämmmaterials erzielen.

Verlustfaktor des Dämmmaterials: EPS-T und Leichtbaukonstruktionen vertragen sich schlecht

Für die Berechnung der erzielbaren Trittschallminderung bzw. der Einfügungsdämmung L_n eines Estrichs in Terzbandbreite kann die folgende, allgemein gültige Beziehung (Formel 2 [10]) herangezogen werden:

$$\Delta L_n = 10 \lg \frac{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + d}{1 + d} \text{ [dB]}$$

Formel 2

Darin sind:

f = betrachtete Frequenz in Hz

f_0 = Resonanzfrequenz des Estrichs in Hz (gemäss Formel 1)

d = innere Dämpfung bzw. Verlustfaktor des Dämmmaterials unter dem Estrich [-]
(Holzweichfaser = 0,3; Mineralfaser = 0,18; EPS-T = 0,06)

Anhand dieser Formel ist erkennbar, welchen signifikanten Einfluss der Verlustfaktor des Dämmmaterials d hat. Im Vergleich zu Trittschalldämmung aus Mineralfaser weist gewalktes expandiertes Polystyrol (EPS-T) einen bedeutend kleineren Verlustfaktor d auf. Dadurch kommt es bei der Resonanzfrequenz des Estrichs zu einer relativ grossen Resonanzüberhöhung und die Dröhngeräusche sind 8 bis 10 dB (!) stärker ausgeprägt. Dieser Punkt ist sehr kritisch und da aus ökonomischen Gründen EPS-T häufig zum Einsatz kommt, muss das sehr kritisch hinterfragt werden.

Zudem spielt auch die Dicke der Trittschalldämmung eine Rolle: Untersuchungen [6] haben gezeigt, dass die optimale Dicke der Trittschalldämmung (TSD) ≥ 40 mm ist. Bei mehrgeschossigen Gebäuden wird die TSD bautechnisch meist zweilagig zu je 20 mm verbaut. Da die Zusammendrückbarkeit $d_L - d_B$ mit zunehmender Dicke der TSD grösser wird und diese in SN 567 251 auf max. 5 mm begrenzt ist, wird als untere Lage auch 20 mm dickes expandiertes Polystyrol angewendet. Damit wird die Dicke der eigentlichen TSD auf 20 mm reduziert und deren Leistung entsprechend verringert.

Abgehängte biegeweiche Unterdecken

Zuzüglich zum Fussbodenaufbau wird durch abgehängte Unterdecken wie in Abbildung 4 dargestellt, ein weiteres Masse-Feder-System geschaffen, bestehend aus einer biegeweichen Unterdecke (Masse) und einem Abhängesystem mit Luft/Hohlraumbedämpfung (Feder).

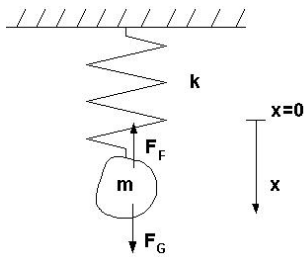


Abbildung 4: Masse-Feder-System von abgehängten Unterdecken (Plattenschwinger)

Damit hat eine abgehängte Unterdecke auch eine ausgeprägte Resonanzfrequenz f_0 , welche der Physik folgend von der Masse und der Federsteifigkeit der Zwischenschicht abhängt. Letztere ist abhängig vom Elastizitätsmodul und der Distanz (Abhängehöhe) der Zwischenschicht. Die Resonanzfrequenz f_0 ergibt sich zu:

$$f_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E}{h} \left(\frac{1}{m_1'} + \frac{1}{m_2'} \right)} \quad [\text{Hz}]$$

Formel 3

Darin sind:

- f_0 = Resonanzfrequenz [Hz]
- E = Elastizitätsmodul der Feder [Pa] (Luft³: $\approx 0,1$ Mpa)
- h = Abhängehöhe [m]
- m_1' = flächenbezogene Masse der Decke [kg/m^2]
- m_2' = flächenbezogene Masse der Unterdecke [kg/m^2]

Konstruktionen mit biegeweichen Unterdecken zeigen im Vergleich zu Konstruktionen ohne biegeweiche Unterdecken speziell in den Terzbändern über 100 Hz bessere Leistungen (vgl. Abbildung 5). Dabei ist es von grosser Bedeutung, dass die Unterdecke von der Rohdecke fachmännisch entkoppelt wird. Denn oft ist eine <nur> fast perfekte Entkopplung genauso schlecht wie eine vollständige Verbindung.

³ In diesem Fall das Kompressionsmodul. E-Modul bei Feststoffen (und theoretisch ein paar nichtnewtonsche Flüssigkeiten).

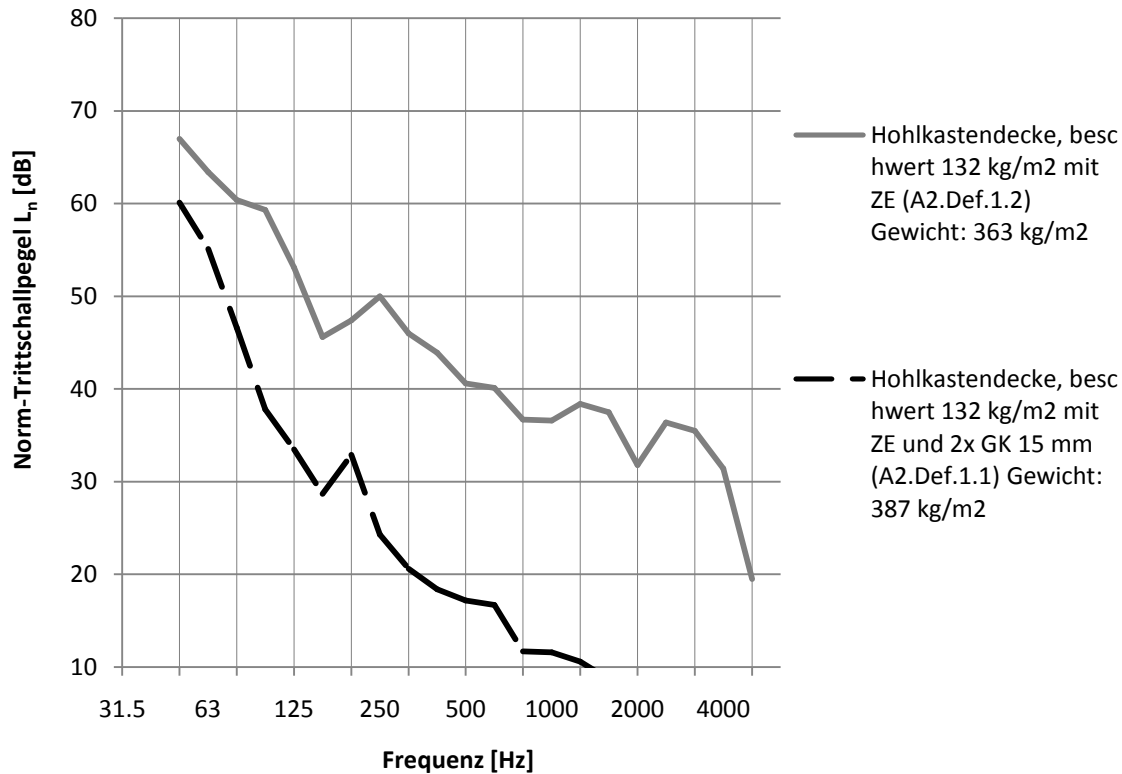


Abbildung 5: Schalltechnische Eigenschaften einer beschwerten Hohlkastendecke mit Zementestrich, einmal mit und einmal ohne abgehängte, biegeweiche Unterdecke. Quelle: O. Bartlomé/LIGNUM

Biegeweiche Unterdecken bei Rippen-/Holzbalkendecken: Bei Rippen- und Holzbalkendecken wird durch entkoppelte Unterdecken die Resonanzfrequenz f_0 der Decke gegenüber dem nichtentkoppeltem Standardaufbau (Holzlattung) in den tieferen Frequenzbereich verschoben (von ca. 125 Hz auf ca. 63...80 Hz) und dadurch das Potenzial für die Verbesserung des Normtrittschallpegels L_n gelegt. Bei geringem Schalenabstand ist der Schallschutz in den tiefen Frequenzen bei beiden Konstruktionen allerdings sehr ähnlich. Mit einem grossen Schalenabstand von 32 cm können hingegen sehr gute Werte bereits ab 50 Hz erreicht werden – auch ohne Deckenbeschwerung, wie Messungen im Rahmen des Kooperationsprojektes gezeigt haben.

Biegeweiche Unterdecken bei Massivholzdecken: Biegeweiche Unterdecken verbessern bei diesem Deckentyp den Schallschutz im Standardfrequenzbereich. In den Terzbändern unter 100 Hz lässt eine biegeweiche Unterdecke die Schalldämmung einer Massivholzkonstruktion in der Regel unverändert bzw. kann sie sich bei geringen Abhängehöhen sogar verschlechtern. Beides kann auch dann der Fall sein, wenn die Resonanzfrequenz der biegeweichen Unterdecke sehr tief ist. In Abbildung 6 ist dieser Effekt ersichtlich: Auch bei einer Resonanzfrequenz von ungefähr 40 Hz hat die abgehängte Unterdecke keinen Einfluss auf den Schallschutz in den Terzbändern 50 und 63 Hz.

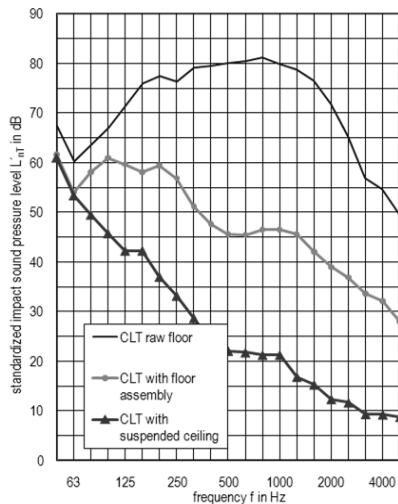


Abbildung 6: Trittschalleigenschaften einer Brettsperrholz-Rohdecke (blau), einer Brettsperrholz-Decke mit Fussbodenaufbau (grün) sowie einer Brettsperrholz-Decke mit Fussbodenaufbau und abgehängter Unterdecke (rot). Quelle: Feasibility study Low Frequency and Apartment Buildings in Lightweight Mode of Construction

Weitere zu beachtende Punkte:

- Hohlraumbedämpfung: Hohlraumfüllungen verbessern den Trittschallschutz, speziell in Kombination mit biegeweichen, federnd befestigten Unterdecken. Es muss nicht der ganze Hohlraum gefüllt sein, sofern keine wärmetechnischen Forderungen erfüllt werden müssen. In der Praxis hat sich eine Füllung des Hohlraums von 70 % in der Dicke als ausreichend erwiesen. In der Fläche haben sich 80 % als ausreichend erwiesen.
- Längenspezifischer Strömungswiderstand: Bei der Hohlraumbedämpfung muss die Admittanz hoch sein, damit der Schall gut eindringen kann. Der optimale längenspezifische Strömungswiderstand ist $r = 10 \text{ kPa s/m}^2$.

3. Flankenübertragung

Die Schalldämmung am Bau wird von der direkten Schallübertragung des Trennelements und von den Übertragungen über die Flankenbauteile, den Stossstellen beeinflusst. In gewissen Fällen ist es nicht ungewöhnlich, dass die Flankenübertragung gegenüber der direkten Schallübertragung vorherrscht: Die Flankenübertragung von den Dächern in Verbindung mit den Trennwänden von Doppelhäusern beispielsweise ist normalerweise der entscheidende Übertragungsweg [11].

Genau wie die direkte Schallübertragung hängen auch die Flankenübertragungen stark vom Konstruktionsprinzip ab. Massivkonstruktionen mit starren Verbindungen zwischen den Trenn- und Flankenbauteilen weisen ein anderes Verhalten auf als Leichtbaukonstruktionen.

3.1. Beispiel Hohlkastendecke

Die Schalldämmung am Bau wird von der direkten Schallübertragung des Trennelements und von den Übertragungen über die Flankenbauteile, den Stossstellen beeinflusst. Genau wie die direkte Schallübertragung hängen auch die Flankenübertragungen stark vom Konstruktionsprinzip ab. Massivkonstruktionen weisen ein anderes Verhalten auf als Leichtbaukonstruktionen.

Um die Wirkungsweise von Flankenübertragungen genauer zu untersuchen, werden innerhalb des Projektes <Schallschutz im Holzbau> aktuell umfangreiche Labormessungen im neu erstellten Leichtbauprüfstand an der Empa durchgeführt.

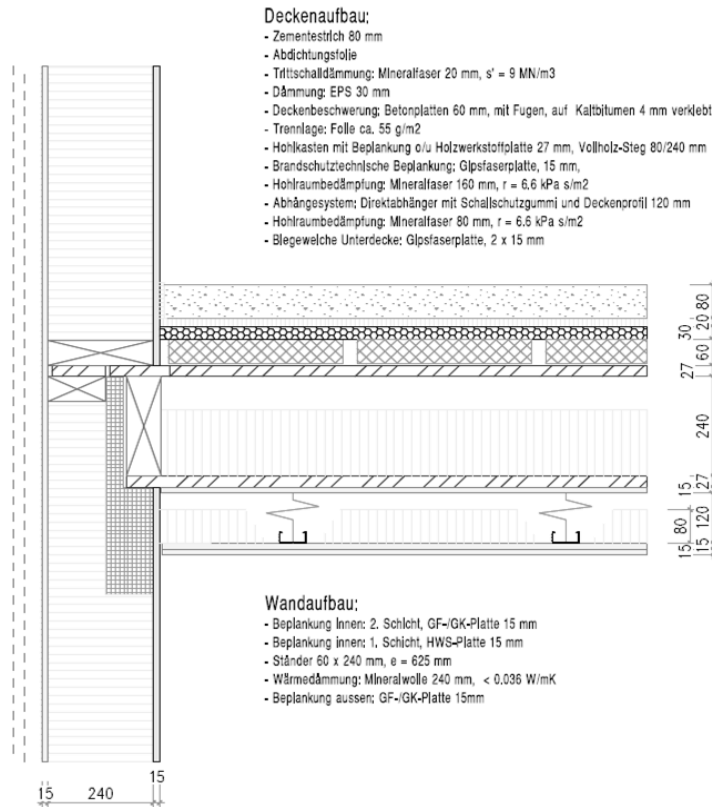


Abbildung 7: Stossstellen Hohlkastendecken/Holzständerwand. Quelle: Lignum

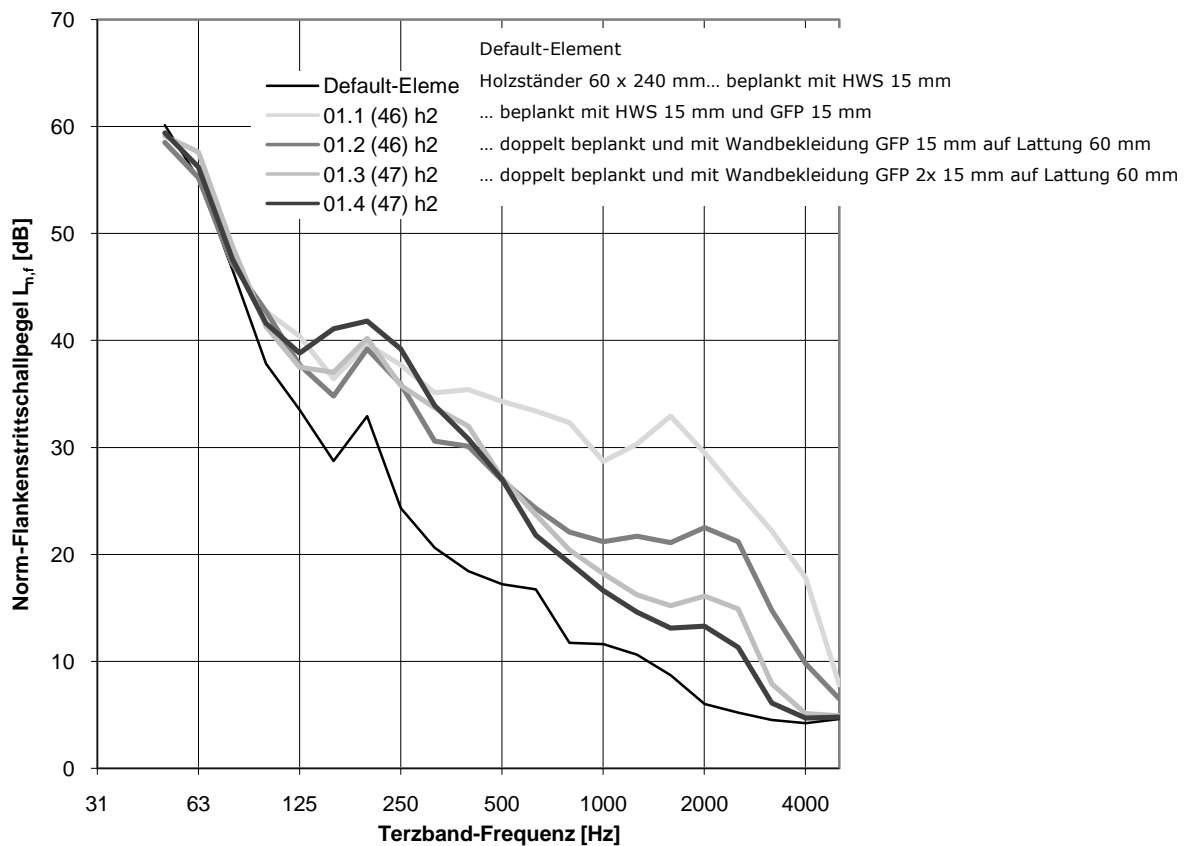


Abbildung 8: Norm-Flankentrittschallpegel $L_{n,f}$ der Stossstelle Hohlkastendecke (mit Beschwerung und abgehängter Unterdecke) in Kombination mit variierenden Holzständerwandaufbauten. Das Default-Element ist ein Wand-Element mit maximaler Schalldämmung. D.h. bei dieser Stossstelle wird faktisch sämtlicher Schall über die Hohlkastendecke übertragen, ergo sind die Schallanteile, die über dieser Kurve liegen, Flankenübertragung.

Wie die Ergebnisse der untersuchten Konstruktionsaufbauten zeigen, werden über die Stosstelle bei Trittschallanregung in erster Linie die Schallanteile oberhalb von 100...125 Hz übertragen. Die Schallanteile der darunterliegenden Frequenzen gehen über die Hohlkastendecke und nehmen damit den direkten Weg D_d (vgl. Abbildung 8). Die Trittschallübertragungen über die Nebenwege sind somit im für den Leichtbau <kritischen> Frequenzbereich gering. Folglich zeigt eine tieftonoptimierte Hohlkastendecke nicht nur bei der direkten Schallübertragung ihre Qualitäten, sondern im übertragenen Sinn auch bezüglich der indirekten Übertragung von tieffrequenten Schallanteilen, da sie dort das schwächste Glied darstellt.

Es lässt sich ableiten, dass je geringer die Trittschalldämmung einer Hohlkastendecke ist (z.B. ohne Beschwerung etc.), desto geringer die Trittschalldämmung im Bau ausfällt. Dabei darf nicht vergessen werden, dass sich bei Leichtbaukonstruktionen bekanntlich mit abnehmender Trittschalldämmung diese in den tiefen Terzbändern überproportional verschlimmert und sich das System durch die Gegebenheit der Flankenübertragung zusätzlich diskreditiert.

3.2. Breitbandig gute Resultate

Breitbandig <gute> Resultate, also auch in den Terzbändern unter 100 Hz, sind damit in erster Linie von der schalltechnischen Qualität der Hohlkastendecke abhängig. Wenn eine Hohlkastendecke in den kritischen Frequenzen gute Resultate liefert, tut sie das auch im eingebauten Zustand inklusive Nebenwegübertragung. D.h. je tieftonoptimierter eine Decke ist, desto breitbandiger wirkt sie im Bau. Die Holzleichtbau-Wandkonstruktion hat bei der Trittschalldämmung eher einen geringen Einfluss. Wenn die tiefen Frequenzen ausser Acht gelassen werden, dann hat die Ausführung des Knotens einen Einfluss auf das Endergebnis.

-
- [1] Abbühl, F.; Balmer, M.; Bögli, H.; Brulhart, C.; Burkhardt, M.; Fischer, F.; Kuentz, T.; Liengme, J.D.; Looser, M.; Jörg, U.; Meloni, T.; Schaffner, M.H.; Seiler, A.; Siegenthaler, M.; Zurkinden, A. (2002): *Lärmbekämpfung in der Schweiz – Stand und Perspektiven*. Schriftenreihe Umwelt Nr. 329. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
 - [2] Burkhardt, C. (2002): Tieffrequenter Trittschall – Messergebnisse, mögliche Ursachen. In: Tagungsband DAGA 2002
 - [3] Hagberg, K.; Persson, T.; Höök, M. (2009): *Design of light weight constructions – risks and opportunities*. In: InterNoise 2009. Ottawa
 - [4] Sipari, P.; Heinonen, R.; Parmanen, J. (1998): *Acoustics properties of wooden floor slabs*. In: VTT Publications 345
 - [5] Fasol, W.; Veres, E. (2003): *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Huss-Medien GmbH, Berlin
 - [6] Rabold, A.; Düster; Hessinger, J.; Rank, E. (2009): Optimization of lightweight floors in the low frequency range with a FEM based prediction model. In: Tagungsband DAGA 2009
 - [7] Rabold, A.; Hessinger, J.; Buschbacher, H.P. (2003): Entwicklung eines anwenderbezogenen Berechnungsverfahrens zur Prognose der Schalldämmung von Holzdecken am Bau. Forschungsbericht, ift Rosenheim
 - [8] Blickle, R.; Kühn, B. (2004): Berechnung der Gehgeräusch-Immissionen und Trittschalldämmung von Geschossdecken in Holz im Frequenzbereich von 16 bis 200 Hz. In: Schweizer Holzbau 2004/7
 - [9] Holtz, F.; Hessinger, J.; Buschbacher, H.P.; Rabold, A. (1999): *Informationsdienst Holz – Schalldämmende Holzbalken- und Brettstapeldecken*. Holzbau Handbuch, Reihe 3, Teil 3, Folge 3. Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH), München
 - [10] Kühn, B.; Blickle, R. (1992): Untersuchungen zum Sonderfall des dröhnenden Nassestrichs, SIA Heft 46/1992
 - [11] Holtz, F.; Rabold, A.; Hessinger, J.; Buschbacher, H.P.; Schifflechner, K.; Mederle, S.; Welsch, M. (2001): *Schall- Längsleitung von Steildächern – Analyse, Optimierung, Sanierung*. DGfH-Forschungsbericht des Labors für Schall- und Wärmemess-technik GmbH – das Schallschutzprüfzentrum des ift Rosenheim