

Tiefe (Hör-)Einblicke in die tieffrequente Trittschallübertragung

Schöpfer Fabian
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Schanda Ulrich
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Tiefe (Hör-)Einblicke in die tieffrequente Trittschallübertragung

1. Hören wir, was wir planen?

1.1. Die Sache mit dem Hören

Das Motto des diesjährigen Akustik-Blocks A3 der Tagung ist eigentlich ein langgehegter Wunsch, wenn es um Trittschallübertragung geht. In der Tat wünscht man sich Hörbeispiele, um Trittschalldämmung verständlich zu machen. Diese sind aber schwierig in ein schriftliches Dokument aufzunehmen. Es gibt diese Hörbeispiele von verschiedenen Holzdecken mit unterschiedlichstem bewerteten Norm-Trittschallpegel, wenn diese Decken von Gehern begangen werden. Konkrete Hörbeispiele haben aber immer den Nachteil, dass sie nur spezifisch für genau den jeweiligen Deckenaufbau sind. Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass die Höraufnahme von den raumakustischen Verhältnissen des Aufnahme- und des Darbietungsraumes eine Rolle spielt. Ein Anhören erfordert eine hohe Qualität an der Schallwiedergabe und in der Regel nur mit Kopfhörer realisierbar. Inwieweit der subjektive Höreindruck dadurch beeinträchtigt ist, sei dahingestellt. Ein Anhören, bezeichnet als Auralisation, ist also doch nicht so einfach möglich. Und dann würde man ja gerne die bei unterschiedlichen Anregungen wie Gehern oder spielenden Kindern anhören. Eigentlich wäre die Auralisation ein Muss in der Schallschutzberatung von Endkunden. Um nun diese Schwierigkeiten zu umgehen, befasst sich dieser Artikel zuerst mit einem messtechnischen Zugang, um den konstruktiven Aspekten der tieffrequenten Trittschallübertragung auf die Spur zu kommen und zeigt dann noch kurz auf, wie man zu einer Auralisation kommen könnte. Zuletzt sei noch erwähnt, dass insbesondere unter dem Aspekt, die Trittschalldämmung diesen Kunden, die meist keine Einordnung von akustischen Pegeln machen können, eine dem menschlichen Empfinden lineare, akustische Größe, nämlich die Lautheit anbieten zu können.

1.2. Was man bei der Trittschallübertragung hört

Es ist mittlerweile ja kein Geheimnis mehr, dass vor allem die tiefen Frequenzen bei Geheranregungen dominieren; das hört jeder.

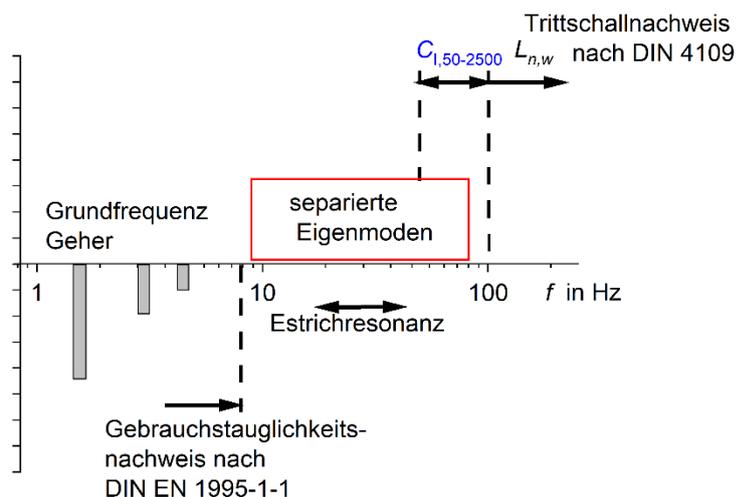


Abbildung 1: Übersicht des Frequenzbereiches im Hinblick auf Schwingungen und Trittschall

Abbildung 1 zeigt den tiefen Frequenzbereich unter 100 Hz. Der nach ISO 717-2 für die Bildung des bewerteten Norm-Trittschallpegels relevante Frequenzbereich liegt jedoch über 100 Hz. Dabei passiert hier aus akustischer Sicht jedoch sehr viel unter 100 Hz, sowohl durch die Schwingungen der Deckenkonstruktion, aber auch durch die typischen, wohnüblichen Anregungen wie Begehen, welche ihre Kräfte v.a bei tiefen Frequenzen einleiten. Abbildung 3 links soll an dieser Stelle noch einmal anhand von Terzspektren des Norm-Trittschallpegels die Relevanz des Frequenzbereiches unter 100 Hz verdeutlichen. Viele

Decken, und das gilt auch im Massivbau!, weisen hohe Norm-Trittschallpegel unter 100 Hz auf, welche nur durch den Spektrumanpassungswert $C_{I,50}$ in einer Planung berücksichtigt werden kann. Diese Problematik zeigt auch Abbildung 2 rechts anhand von 14 Reklamationsfällen von Massivbaudecken.

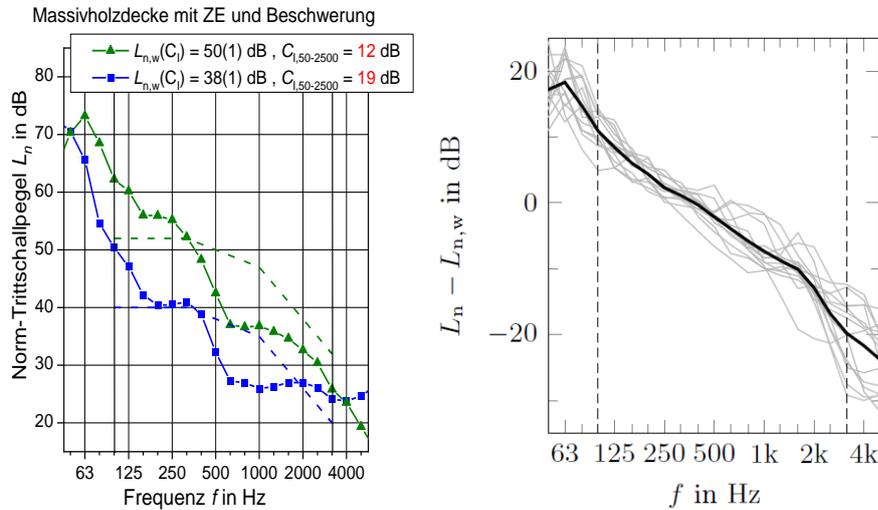


Abbildung 2: Links: Hohe Norm-Trittschallpegel bei tiefen Frequenzen (unter 200 Hz). Rechts: Auf den jeweiligen Einzahlwert bezogene Norm-Trittschallpegel von 14 Reklamationsfällen im Massivbau. Siehe [1]. Daten aus [2].

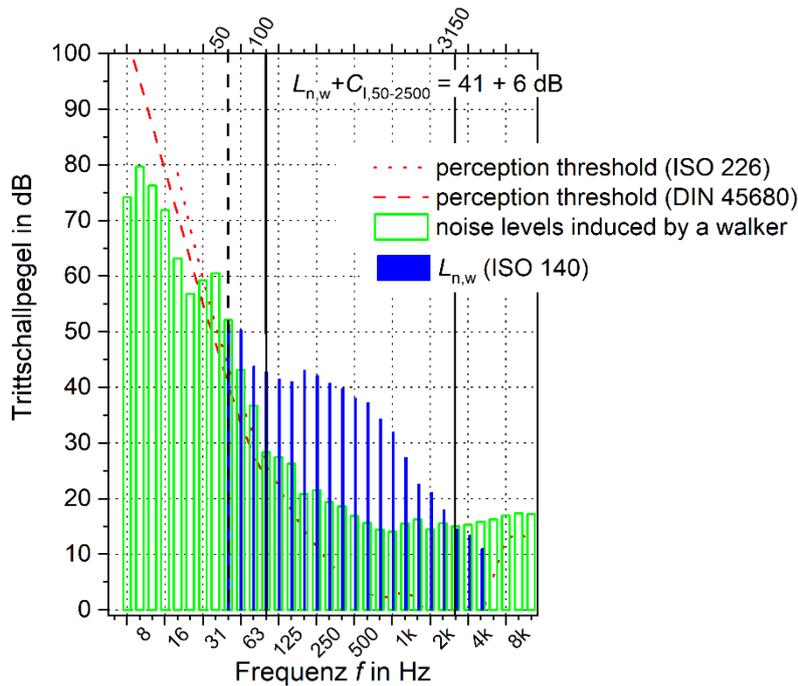


Abbildung 3: Hohe Norm-Trittschallpegel bei tiefen Frequenzen (unter 200 Hz). Beim Begehen von Decken liegen gerade die Trittschallpegel zwischen 40 Hz und 125 Hz über der Hörschwelle.

Abbildung 3 zeigt ein Terzspektren einer Decke, und zwar für einen ausgedehnten Frequenzbereich von wenigen Hertz bis 8 kHz. Eingezeichnet ist hier zusätzlich die Hörwahrnehmungsschwelle nach ISO 226 bzw. nach der DIN 45680 für tieffrequente Geräusche. Konzentriert man sich auf die durch einen Geher verursachten Trittschallpegel, so sieht man, dass die Wahrnehmungsschwelle v.a. im Bereich von 40 Hz bis 125 Hz deutlich überschritten ist.

2. Übertragungsweg

2.1. Anregungen und deren Kräfte

Das bei der Messung des Norm-Trittschallpegels verwendete Norm-Hammerwerk ist die seit Jahrzehnten bewährte Anregungsquelle zur Untersuchung der Körperschallanregung von Decken.

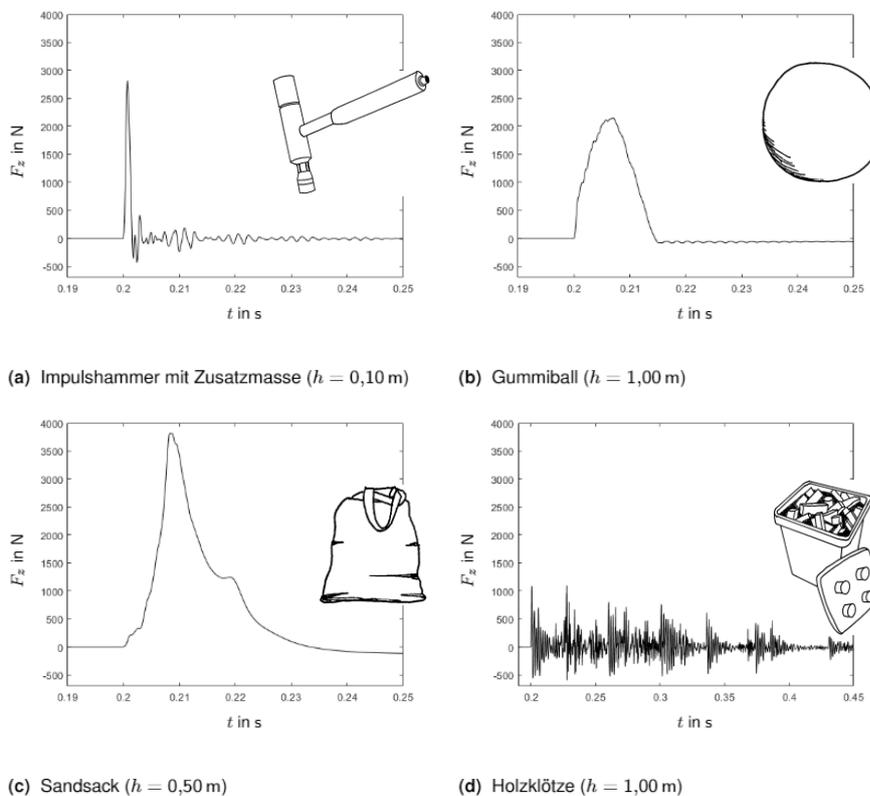


Abbildung 4: Kraft-Zeitverläufe von Anregungsquellen auf einer sehr schweren Betondecke. (a) Impulshammer (b) Gummiball ($h = 1$ m), (c) Sandsack (10 kg, $h = 1$ m) (d) Holzklötze (Bild unten) Geher mit Socken (75 kg, 100 Schritte/min) [3]

International gibt es als standardisierte Anregungsquelle auch einen genormten Gummiball. Unter Körperschallanregung fallen in der täglichen Nutzung von Trenndecken vielfältige Möglichkeiten: Die wichtigste ist dabei natürlich das Begehen der Decke, aber auch fallende Bauklötze oder spielende und hüpfende Kinder sind Körperschallquellen. Die folgende Abbildung 4 zeigt Kraft-Zeitverläufe derartiger Anregungsquellen, wenn diese auf einer sehr schweren Betondecke gemessen werden. Ebenfalls gezeigt ist ein Schlag mit einem Impulshammer. Der Gummiball und der Sandsack sind Anregungsquellen die mit hüpfen verglichen werden können.

Abbildung 5 zeigt Spektren des Kraftpegels von 5 Anregungsquellen, jedoch auf zwei unterschiedlichen Empfangsstrukturen (Tiefgaragenbodenplatte als sehr schwere Betonplatte, Holzbalkendecke mit entsprechender Nachgiebigkeit) [1]. Dabei ist zu erkennen, wie die Kraftpegel auf der Holzbalkendecke im Vergleich zur Tiefgaragenbodenplatte kleiner sind. Aufgrund des sehr hohen Widerstandes (Impedanz), den diese schwere Decke der Anregung entgegenbringt, spricht man von der blockierten Kraft (oder auch Leerlaufkraft). Eine Decke mit einer kleineren Impedanz gibt bereits während der Anregung nach, die eingeleitete Kraft wird damit geringer.

Aus der spektralen Charakteristik wird ersichtlich, dass die Anregung durch einen Geher im Wesentlichen bei Frequenzen unter 100 Hz stattfindet. Sowohl beim Geher als auch beim genormten Gummiball sind die Pegel der eingeleiteten Kraft bei beiden Empfangsstrukturen ähnlich; nicht jedoch beim Norm-Hammerwerk. Hier ist zu sehen, dass die eingeleitete Kraft (verursacht ja durch sehr kurzzeitige Hammerschläge) in den beiden Empfangsstrukturen doch deutlich unterschiedlich sind.

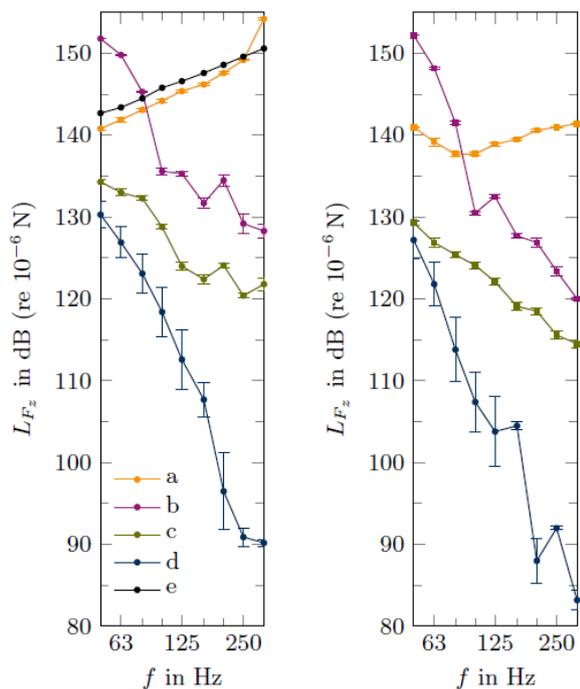


Abbildung 5: Kraftspektren gleicher Anregequellen auf unterschiedlichen Empfangsstrukturen. Links: Tiefgaragenbodenplatte als Beispiel für eine Empfangsstruktur mit sehr hoher Impedanz. Rechts: Holzbalkendecke als Beispiel für eine Empfangsstruktur mit einer kleineren Impedanz. (a) Norm-Hammerwerk, (b) Gummiball ($h = 1\text{m}$), (c) modifiziertes Norm-Hammerwerk, (d) Geher mit Socken, (e) Norm-Hammerwerk (Theorie elastischer Stoß) [1].

2.2. In die Decke eingeleitete Körperschalleistung

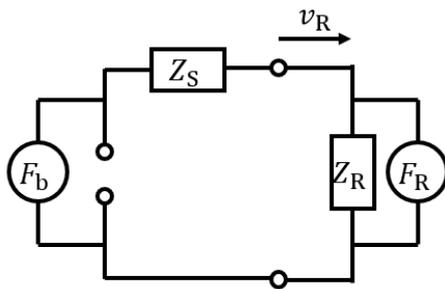
Der Nachweis der «Eignung» einer Wohnungstrennendecke wird nur über die Unterschreitung des erforderlichen Norm-Trittschallpegels (und auch nur für den Bewertungsbereich >100 Hz) erbracht. Im Folgenden wird die Körperschallanregung von Bauteilen in allgemeiner Form, d.h. bei beliebiger Anregung beschrieben und die Möglichkeiten aufgezeigt, die von diesen Anregungsquellen verursachte Schalldruckpegel vorherzusagen. Der Nutzen des Norm-Trittschallpegels zur Nachweisführung des Trittschallschutzes wird damit in keinsten Weise in Frage gestellt, sollte jedoch unter Berücksichtigung des Spektrumanpassungswertes $C_{1,50-2500\text{Hz}}$ erfolgen.

Die Trittschallanregung stellt allgemein betrachtet im Gebäude eine Körperschallanregung dar. Analog zur Luftschalleistung kann auch der Körperschall als Leistung, der sogenannten installierten Leistung [4] angegeben werden. Bei der Luftschalleistung ist die Angabe weitestgehend allgemein gültig, da die Eigenschaften der Luft als Medium, in das die Leistung abgegeben wird, in der Regel nur geringfügig schwanken. Bei der Körperschalleistung sind die Eigenschaften des Bauteils, an dem die Anregung stattfindet, sehr wichtig und

somit zwingend mit zu beachten. Zunächst kann die durch eine anregende Quelle eingeleitete Körperschalleistung aus der auf die Struktur (Receiver, Index «R») wirkende Kraft, \hat{F}_R und der Schwingschnelle, \hat{v}_R der Struktur an diesem Punkt beschrieben werden

$$P_R = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{\hat{F}_R \cdot \hat{v}_R^*\} \quad (1)$$

Hier ist eine Analogie zur Elektrotechnik zu erkennen, wo die Wirkleistung das Produkt aus Spannung und Strom ist. Ein Schaltbild der elektro-mechanischen Analogie 1. Art ist in Abbildung 6 dargestellt.



$$\hat{F}_R = \hat{F}_b \frac{Z_R}{(Z_S + Z_R)} = \hat{F}_b \frac{Y_S}{(Y_S + Y_R)}$$

Abbildung 6: Ersatzschaltbild (Spannung→Kraft, Strom→Schnelle)

Die Impedanz Z (komplexer Widerstand) ergibt sich aus dem Verhältnis der anregenden (eingeleiteten) Kraft \hat{F}_R als die Ursache für die Bewegung der Decke zur Reaktion der Decke, beschrieben mit der Schwingschnelle. Der Kehrwert der Impedanz Z wird als Admittanz, Y (Anregbarkeit) bezeichnet und ist ein Maß dafür, wie gut eine Decke durch eine Krafteinleitung angeregt wird. In Gleichung (2) ist die Impedanz bzw. Admittanz für die Decke (Receiver, Index «R») und die Impedanz bzw. Admittanz der Quelle (Source, Index «S») definiert.

$$Z_R = \frac{\hat{F}_R}{\hat{v}_R}; Y_R = \frac{\hat{v}_R}{\hat{F}_R} \quad \text{bzw.} \quad Z_S = \frac{\hat{F}_S}{\hat{v}_S}; Y_S = \frac{\hat{v}_S}{\hat{F}_S} \quad (2)$$

Mit Gleichung (2) kann die installierte (eingeleitete) Körperschalleistung aus Gleichung (1) allein mit der tatsächlich auf die Struktur wirkende Kraft und der Admittanz der Struktur ausgerückt werden.

$$P_R = \frac{1}{2} |\hat{F}_R|^2 \operatorname{Re}\{Y_R\} \quad (3)$$

Die tatsächliche Kraft ist aber abhängig von der Admittanz des angeregten Bauteils und der Admittanz der Anregungsquelle (s.u.).

Aus dem Schaltbild in Abbildung 6 wird ersichtlich, dass die blockierte Kraft eine Größe ist, welche die Anregungsquelle unabhängig von der angekoppelten Struktur beschreibt. Damit kann die installierte (eingeleitete) Körperschalleistung nun nur noch mit Größen beschrieben werden, die für die Struktur und die Quelle unabhängig voneinander ermittelbar bzw. messbar sind.

$$P_R \approx \frac{1}{2} |\hat{F}_b|^2 \cdot \frac{|Y_S|^2}{|Y_S|^2 + |Y_R|^2} \cdot \operatorname{Re}\{Y_R\} \quad (4)$$

Für den bereits erwähnten Fall einer sehr schweren Betondecke als Empfangsstruktur ist die Admittanz Y_R sehr klein. Damit ist der mittlere Faktor nahe Eins, Gleichung (4) geht damit in Gleichung (3) über, die eingeleitete Kraft entspricht der blockierten Kraft.

2.3. Übertragungsfunktion zur Prognose des Schalldruckpegels im Empfangsraum

Setzt man den Schalldruck im Empfangsraum ins Verhältnis zur Anregung, also zum Beispiel zur installierten Leistung, so erhält man eine sogenannte Übertragungsfunktion. Für ein lineares, zeitinvariantes System (von dem man im Gebäude i.d.R. ausgehen kann) ist diese Übertragungsfunktion ein konstanter Übertragungsfaktor zwischen Eingangsgröße und Ausgangsgröße. Das heißt aber auch im Umkehrschluss, dass alle Informationen der black box, also der gesamten Anregung, der Übertragung, der Abstrahlung, ja sogar der Eigenschaften des Empfangsraumes in dieser Übertragungsfunktion enthalten sind. Vor allem bei der tieffrequenten Trittschallübertragung sind nicht nur die Konstruktion der Decke, sondern auch der Ort der Anregung oder das Schallfeld im Empfangsraum Parameter die sich signifikant auswirken können. Vor allem in der Produktentwicklung stellen Übertragungsfunktionen somit ein wichtiges Werkzeug dar. Tatsächlich müssen die Übertragungsfunktionen nicht als Terz-, sondern als Schmalbandspektrum vorliegen, da nur dann konstruktive Informationen darin abzulesen sind.

Tatsächlich kann man den bekannten Norm-Trittschallpegel verwenden, um eine Übertragungsfunktion zwischen dem gemittelten und normierten Schalldruckpegel im Empfangsraum, $L'_{n,w}$ und dem tatsächlichen Kraftpegel des Norm-Hammerwerkes, $L_{F,R,NHW}$ auf der Decke in Pegelschreibweise als Differenz aufzustellen.

$$\text{Übertragungsfunktion} = L'_{n,w} - L_{F,R,NHW} \quad (5)$$

Theoretisch könnte man nun die Kraft des Norm-Hammerwerkes ersetzen, um für beliebige Anregekräfte, zum Beispiel durch eine gehende Person oder eine Waschmaschine, den resultierenden Schalldruckpegel zu berechnen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die tatsächliche Kraft des Hammerwerkes nicht immer als bekannt angenommen werden kann. Insbesondere dann nicht, wenn wie in Abschnitt 2.1 beschrieben die Admittanz der Decke nicht viel kleiner als die des Hammerwerkes selbst ist.

Alternativ kann die Decke aber auch mit einem Modalhammer angeregt werden, wodurch die anregende Kraft gemessen wird und somit bekannt ist. Wird zudem die Schwingschnelle nahe der Anregung und der Schalldruckpegel im Empfangsraum gemessen, kann eine Übertragungsfunktion zwischen dem resultierenden Schalldruckpegel und der Körperschalleistung aufgestellt werden. Diese beschreibt nun wiederum allgemeingültig die Übertragung von einer beliebigen Körperschallanregung und dem resultierenden Schalldruck. Der Schalldruck wird nun mit einem zusätzlichen Index «e» versehen, der für Equipment, also eine beliebige Anregungsquelle steht. Der Index «s» beim Leistungspegel steht für «structure-borne sound» (Körperschall). Für eine bekannte Anregung mit $L_{W,s,i}$ kann also der L'_{ne} gemessen werden. Für ein lineares zeitinvariantes System kann die Differenz nun auch für eine Bezugsleistung von 1 Watt ($L_{W,0} = 120$ dB) und den daraus resultierenden Schalldruckpegel $L'_{ne,0,s,i}$ [5] aufgestellt werden.

$$L'_{ne,0,s,i} - L_{W,s,0,i} = L'_{ne} - L_{W,s,i} \quad (6)$$

Durch Umstellen erhält man $L'_{ne,0,s,i}$ aus den beiden bekannten gemessenen Größen und der Bezugsleistung $L_{W,s,0,i}$ von 1 Watt bzw. 120 dB.

$$L'_{ne,0,s,i} = L'_{ne} - L_{W,s,i} + 120 \text{ dB} \quad (7)$$

Dieser Schalldruckpegel ist nun sehr ähnlich dem bekannten Norm-Trittschallpegel, beschreibt aber in allgemeiner Form den resultierenden Schalldruckpegel inklusive aller Übertragungswege für eine Körperschallanregung mit 1 Watt auf dem Bauteil i .

Hier zeigt sich neben der detaillierten Analyse der Übertragung eine zweiter vorteilhafter Aspekt der Übertragungsfunktion. Sie erlaubt es auf der Anregungsseite beliebige Quellen rechnerisch einzusetzen und den jeweiligen resultierenden Schalldruck zu bestimmen. Dies

zeigt aber auch die Nachteile der sonst sehr praktikablen Messung des Norm-Trittschallpegels mit dem Hammerwerk auf: Diese eignet sich sehr gut um über einen breiten Frequenzbereich die Körperschallübertragung verschiedener Decken miteinander zu vergleichen und Anforderungswerten gegenüberzustellen. Mit den Schalldruckpegeln, erzeugt von tatsächlichen Anregungsquellen wie dem Begehen einer Decke hat die Hammerwerksmessung, auch wenn es der Name «Trittschallpegel» vermuten lässt, wenig zu tun. Die übliche Hammerwerksmessung soll hier aber nicht infrage gestellt werden. Vielmehr soll an dieser Stelle aber auf die Möglichkeiten der allgemein formulierten Übertragungsfunktion zum Beispiel in der Produktentwicklung hingewiesen werden. Durch die Analyse von Übertragungsfunktionen im tiefen Frequenzbereich kann viel über die Konstruktion gelernt und diese daraus optimiert werden. Zudem erlaubt diese Formulierung eine Berechnung der zu erwartenden Schalldruckpegel für beliebige realistische Anregungsquellen neben dem Norm-Hammerwerk.

3. Analyse der tieffrequenten Körperschallübertragung

3.1. Übertragungsfunktion im Detail

In der Überschrift dieses Abschnittes wurde nun bewusst der Begriff Körperschallübertragung als allgemeine Form der Trittschallübertragung verwendet. Im Folgenden werden nun im Labor gemessene Übertragungsfunktionen für verschiedene Deckenkonstruktionen als schmalbandige Spektren im tiefen Frequenzbereich gezeigt. Dabei wurden folgende Deckenaufbauten betrachtet:

1. Rohdecke (**RD**) mit sichtbarer Balkenlage
2. Schüttung und Trockenestrich (**Estrich**) auf **RD**
3. **RD** mit Unterdecke an Federschiene (**UD**)
4. **Estrich + RD + DU**

Abbildung 7 zeigt den $L'_{ne,0,s,i}$ für diese vier Varianten. Dabei wurden 5 beliebige Anregungspositionen auf der Decke und 6 Mikrofonpositionen im Empfangsraum gemittelt.

Bei sehr tiefen Frequenzen < 10 Hz liegen die Daten der Decken sehr nahe zusammen. In diesem Bereich ist die Übertragung durch das modale Biegeverhalten der Gesamtkonstruktion geprägt. Schon bei tiefen Frequenzen wird aber der Effekt der Beschwerung durch die Schüttung sichtbar. Bei 26 Hz tritt ein deutlicher Effekt bei allen Konstruktionen auf. Die halbe Wellenlänge bei dieser Frequenz entspricht der Raumlänge des Empfangsraumes; damit handelt es sich um eine Resonanz des Empfangsraumes. Bis etwa 63 Hz ist die Wirkung der Unterdecke kaum zu erkennen, die Werte mit Unterdecke liegen bis hier im Bereich der Rohdecke. Dies zeigt den Einfluss verschiedener Einflussparameter auf den Schalldruckpegel im tiefen Frequenzbereich.

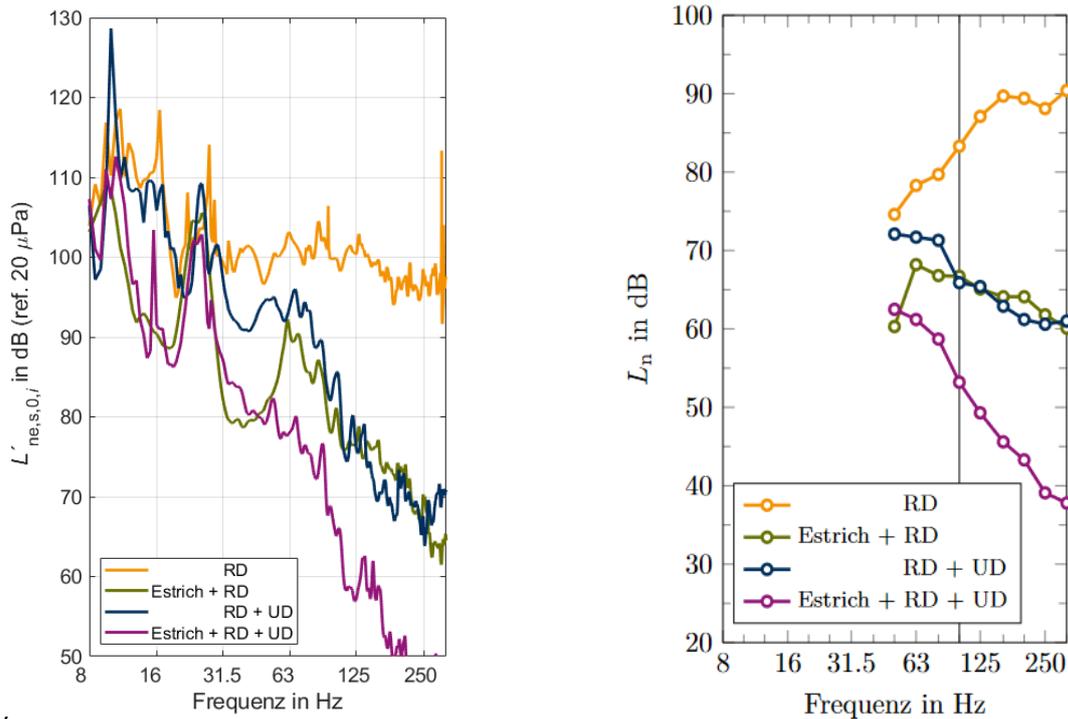


Abbildung 7: $L'_{ne,s,0,i}$ (s. Gleichung(8)) für die vier verschiedenen Varianten der Holzbalkendecke. Als Vergleich sind auch die Terzspektren des Norm-Trittschallpegels bis 315 Hz dargestellt (ab dem 50 Hz Terzband) [6].

3.2. Konstruktion der Decke

Holzdecken können vereinfacht als Masse-Feder-Systeme verstanden werden (s. Abb. 8).

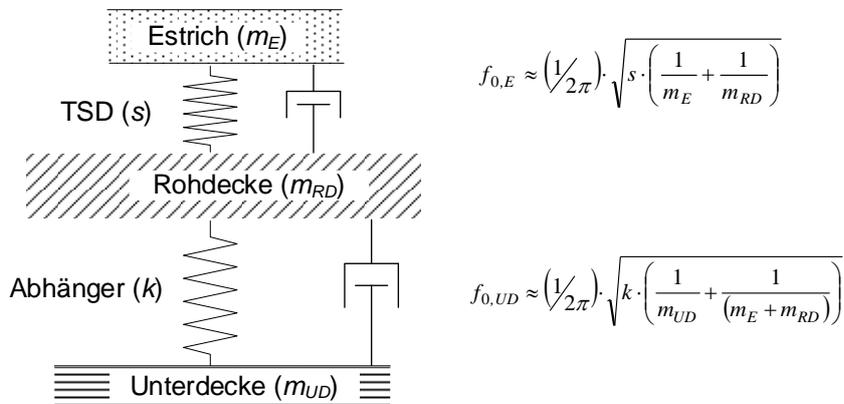


Abbildung 8: Schematische Skizze des mechanischen Systems einer Decke mit schwimmendem Estrich und Unterdecke.

Die konstruktiven Einflüsse können zusätzlich vertieft durch die Untersuchung der Biegeschwingungen bei tiefen Frequenzen untersucht werden. Hierzu sind im folgenden Schwingungsbilder für die unterschiedlichen Schalen einer Brettspertholzdecke mit schwimmendem Estrich und abgehängter Unterdecke gezeigt.

Bei tiefen Frequenzen schwingen alle 3 Schalen als ein gesamtes System. Mit zunehmender Frequenz entkoppeln die Schalen oberhalb der jeweiligen Resonanzfrequenzen und bilden Schwingformen aufgrund der eigenen Abmessungen, Randbedingungen und Materialeigenschaften aus.

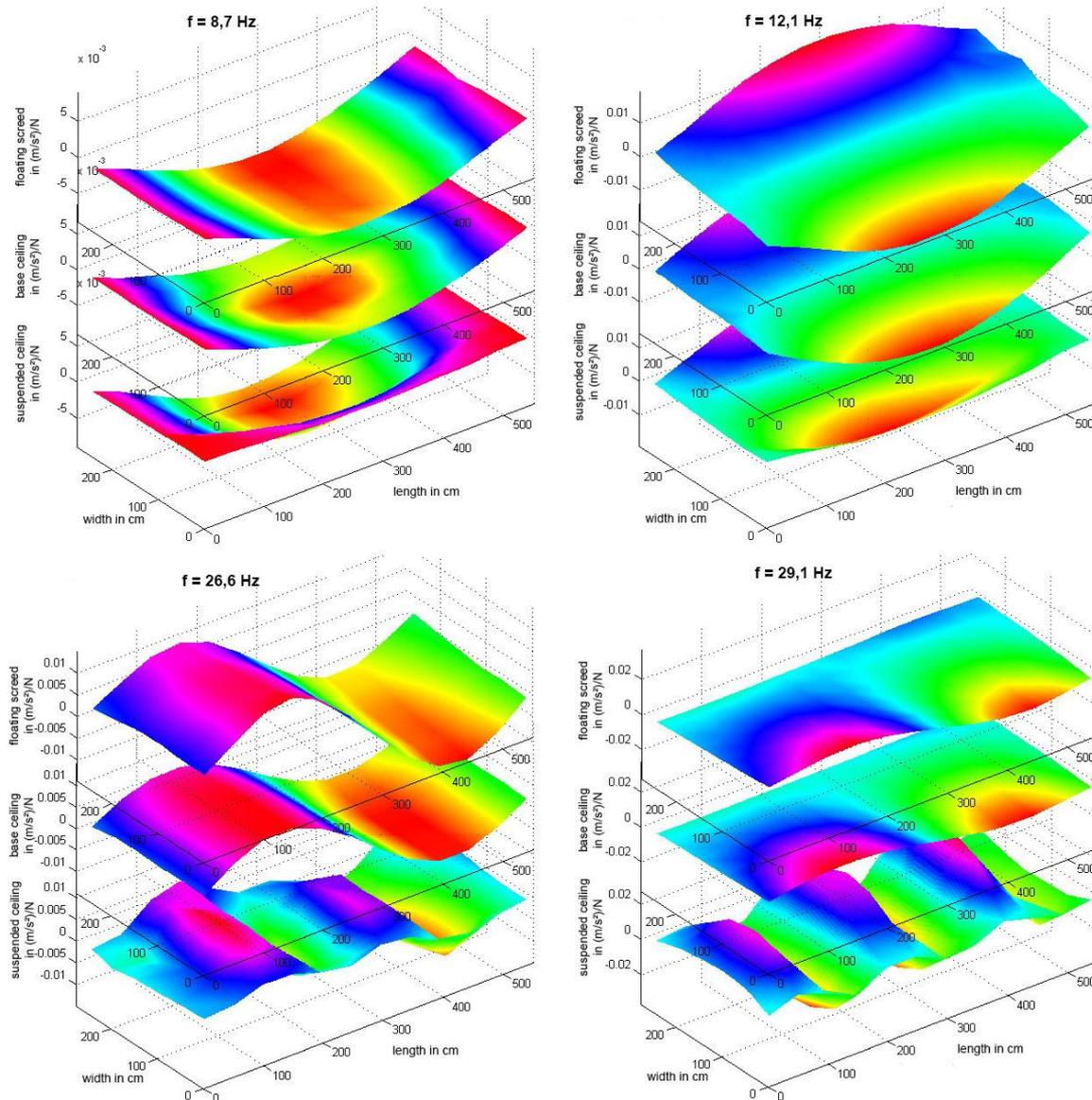


Abbildung 9: Die vier ersten Eigenmoden einer Brettsperrholzdecke; zu sehen sind jeweils die Schwingformen des schwimmenden Estrich (oben), der tragenden Brettsperrholzdecke selbst (Mitte) sowie einer abgehängten Unterdecke aus Gipskarton (unten). Während bei den ersten beiden Eigenschwingungen bei 8,7 Hz und bei 12,1 Hz alle drei Deckenkomponenten noch konphas schwingen, hat sich bei den höheren Eigenmoden die Unterdecke «verselbstständigt». Für den übertragenen Schall in den unteren Raum ist natürlich das aus dem Gesamtsystem resultierende Schwingungsverhalten der Unterdecke maßgeblich [7].

4. Lautheit als bessere Bewertungsgröße

Der Norm-Trittschallpegel bei der Anregung durch das Norm-Hammerwerk oder auch andere akustische Bewertungsgrößen wie z.B. der A-bewertete, maximale Schalldruckpegel geben Unterschiede nicht linear skaliert mit der subjektiven Lautstärkewahrnehmung wieder. Nur bei 1 kHz ist die Aussage korrekt, dass eine Erhöhung von 10 dB einer Verdopplung in der Wahrnehmung bedeutet. Die Lautheit in Sone hingegen stellt eine lineare Skala der Lautstärkewahrnehmung dar. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Lautheit und Messungen des Trittschallpegels in einem funktionalen Zusammenhang stehen und ineinander überführt werden können [8] [9]. Vor allem in der Beratung stellt die Lautheit deshalb eine zu beachtende Größe dar, die durchaus als Ergänzung zum Norm-Trittschallpegel herangezogen werden kann.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Frage, ob wir hören was wir planen, muss bei einer Betrachtung des bewerteten Norm-Trittschallpegels tatsächlich mit «nein» beantwortet werden. Typische Anregungsquellen von Decken haben die maßgeblichen Anregungskomponenten im Frequenzspektrum unter 100 Hz und werden so vom Einzahlwert des Norm-Trittschallpegels nicht «erkannt». Abhilfe schafft die zusätzliche Berücksichtigung des Spektrumanpassungswertes $C_{1,50-2500\text{Hz}}$. Um nun vor allem in diesem tiefen Frequenzbereich die Entwicklung von Deckensystemen zu optimieren, können Übertragungsfunktionen herangezogen werden, die die Körperschallübertragung ganz allgemein abbilden. Das Norm-Hammerwerk ist dabei nur ein Spezialfall. So können beliebige Anregungsquellen betrachtet und der resultierende Schalldruckpegel rechnerisch abgeschätzt und bewertet werden. Gemessene Übertragungsfunktionen stammen eigentlich aus der Frequenztransformation der gemessenen Impulsantwort. Mit letzteren kann durch eine Faltung im Zeitbereich mit beliebigen Kraft-Zeitverläufen von Anregungen das Geräusch im Empfangsraum zu auralisieren, also hörbar zu machen. Das wäre der Schritt, wo wir die Frage ob wir hören was wir planen, mit «ja» beantworten können.

6. References

- [1] Schöpfer F, Schanda U (2021) Analyse der tieffrequenten Trittschallübertragung mittels Übertragungsfunktionen. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (ed) Fortschritte der Akustik - DAGA
- [2] Möller K (2019) Tieffrequenter Trittschall – Ermittlung eines Bewertungskriteriums auf Basis akustischer Daten. Studienarbeit, Technische Hochschule Rosenheim
- [3] Weinzierl J (2021) Messung und Vergleich von Kraftspektren unterschiedlicher Deckenanregungen. Studienarbeit, Technische Hochschule Rosenheim; Hochschule für Technik Stuttgart
- [4] DIN EN 15657:2017-10 Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen
- [5] prEN 12354-5:2022 Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 5: Installationsgeräusche
- [6] Silberbauer VE (2019) Analyse der Trittschalldämmung von Holzbalkendecken bei Anregung durch stationäre und instationäre Schallquellen. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Rosenheim
- [7] Völkl R, Schanda U, Kohrmann M et al. (2013) Simultaneous operational vibration analysis of different layers of lightweight timber floors. In: Proceedings of Inter-Noise 2013
- [8] Rabold A (2011) Trittschalldämmung richtig bewerten. In: Forum Holzbau (ed) 1. Internationale Schall & Akustiktag
- [9] Weber K (2021) Lautheit als Messgröße für die Trittschallübertragung. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Rosenheim