

Tiefe Frequenzen – ja, Sie sind wichtig!

Markus Müller-Trapet
National Research Council
Ottawa, Canada



Berndt Zeitler
HFT Stuttgart
Stuttgart, Deutschland



Tiefe Frequenzen – ja, Sie sind wichtig!

1. Einleitung

Obwohl die Bauordnungen in vielen Ländern Anforderungen an den Schallschutz stellen, gibt es weiterhin eine beträchtliche Anzahl an Beschwerden der Bewohner. Ein potentieller Grund dafür ist, dass die bestehenden Verfahren zur Bewertung des Schallschutzes nicht ausreichend mit der durch die Bewohner empfundenen Lästigkeit in Verbindung stehen. Mehrere Ansätze zur Verbesserung der standardisierten Kenngrößen sind in den letzten Jahren gemacht worden [15]. Ein Thema, das bei diesen Untersuchungen immer wieder aufkommt, ist die Berücksichtigung von tiefen Frequenzen.

Was den Luftschall angeht, ist besonders die Popularität von Heimkinosystemen mit Subwoofern ein Grund für einen Anstieg der tieffrequenten Lärmbelästigung. Beim Trittschall leiten viele Quellen tieffrequenten Schall in die Struktur ein. Wahrscheinlich kann sich jeder das dumpfe Klopfen vorstellen, was durch Schritte oder springende Kinder entsteht. Diese Krafteinleitung hängt jedoch von der Interaktion von Trittschallquelle und Struktur ab und ist daher sehr schwierig vorherzusagen. In vielen Studien hat sich jedoch gezeigt, dass gerade dieser (tieffrequente) Trittschall der störendste Faktor in Wohngebäuden ist.

Die meisten Bewertungsverfahren der Schalldämmung berücksichtigen Frequenzen ab 100 Hz aufwärts. Jedoch gerade im Holzbau gibt es signifikante Beiträge der Schallanregung und -übertragung unterhalb von 100 Hz [0].

Die Physik der Schallübertragung macht eine gute Schalldämmung bei tiefen Frequenzen sehr aufwendig und kostspielig, wenn nicht gar unmöglich. Zudem ist eine gute Bestimmung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen sehr schwierig, da in üblicherweise eher kleinen Wohnräumen (weniger als 100 m³) ein weit höherer Aufwand nötig ist, um valide Messdaten zu erheben. Viele der Materialien und Konstruktionen, für die es aus alten Studien Messdaten gibt, haben erst gar keine Information bei tiefen Frequenzen, was eine gute Planung schwierig macht.

Dieser Beitrag beleuchtet das Problem tieffrequenter Schallübertragung im Hinblick auf verschiedene Aspekte: zum einen werden die theoretischen Grundlagen von Luft- und Trittschall im Hinblick auf dieses Problem geschildert (Kapitel 2). Zum anderen wird eine psychoakustische Studie zur empfundenen Lästigkeit von Trittschall vorgestellt und die Ergebnisse werden vor allem im Kontext der Kenngrößen, die für die Bauordnung benötigt werden, analysiert (Kapitel 3). Mögliche Lösungsansätze werden in Kapitel 4 kurz aufgezählt.

2. Grundlagen der Luft- und Trittschalldämmung

Schall breitet sich in Luft und in Körpern als Wellen aus. Die Wellen höherer Frequenz haben eine kürzere Wellenlänge. Ein Teil des Schalls wird bei einer Änderung der Ausbreitungsgeometrie oder des -materials (Impedanzsprung) reflektiert, absorbiert und transmittiert. Der jeweilige Anteil ist frequenzabhängig. Die tieffrequenten Wellen mit ihren langen Wellenlängen „sehen“ kleine und leichte Hindernisse nicht und breiten sich auch ohne viel Dämpfung aus. Die hochfrequenten Wellen mit ihren kurzen Wellenlängen werden stark von Gegenständen beeinflusst. Das heißt, dass Bauelemente für Wellen mit hoher Frequenz größere Hürden darstellen als für Wellen mit tieferer Frequenz. In anderen Worten, ist in den meisten Fällen die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen schlechter als bei hohen Frequenzen. Die Luftschalldämmung beruht hauptsächlich auf der Reflektion des eintreffenden Schalls wegen der Änderung des Material (von Luft zu Festkörper), die dadurch die Transmission reduziert. Die flächenbezogene Masse eines Bauteils spielt dabei eine wesentliche Rolle.

Wie laut es im Empfangsraum ist und empfunden wird, wird natürlich auch vom Frequenzgang der Quelle beeinflusst. Wenn zudem die Schalldämmung bei der Frequenz niedrig ist, bei der die Quelle den höchsten Schalldruck erzeugt, wird das Geräusch am Empfängerort bei der Frequenz noch lauter und störender sein. Einige Frequenzgänge von Verkehrsgereuschen die vor der Fassade aufgenommen wurden [0], auch Spektren genannt, werden in Abbildung 1 dargestellt.

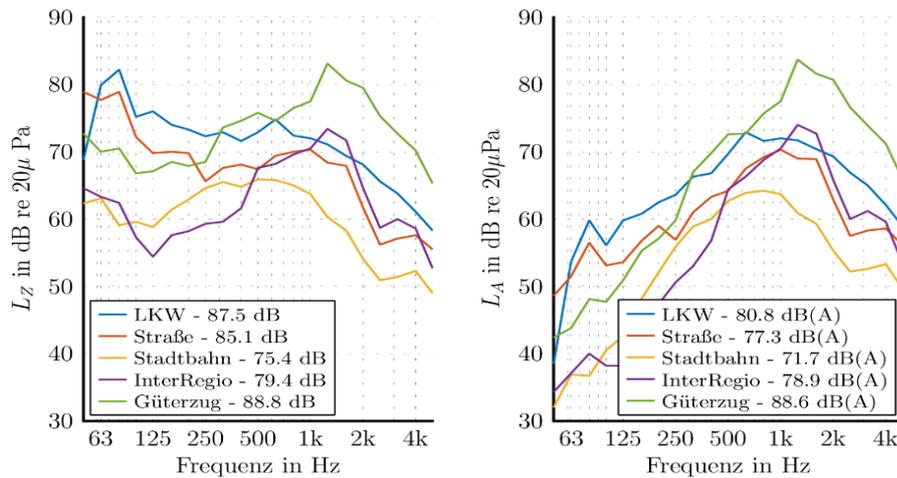


Abbildung 1: Außenschallpegel von unterschiedlichen Verkehrsmitteln. Links Z-Bewertet und rechts A-Bewertet

Vorgestellt werden hier nicht die absoluten Pegel, sondern die Form der Spektren. Im linken Diagramm zeigt sich, dass der Verkehrslärm mit linearer Z-Frequenzbewertung einen starken tieffrequenten Anteil besitzt, vor allem die LKWs und Autos. Nach der A-Bewertung, welche das Lautstärke-Empfinden bei mittleren Pegeln gut abbildet, sinkt die Relevanz der tiefen Frequenzen im Außenbereich und die Reihenfolge der lautesten Quellen bezogen auf den Summenschallpegel ändert sich. Nach der A-Bewertung ist der InterRegio lauter als die Straße. Es bleibt jedoch abzuwarten, ob die tiefen Frequenzen nach der Schallübertragung in den Innenraum nicht doch wieder eine wichtige Rolle spielen. Dazu wird hier auf das Luftschalldämm-Maß R kurz eingegangen.

2.1. Luftschalldämmung

Das Schalldämm-Maß beschreibt den zehnfachen Logarithmus von eintreffender zu durchgelassener Schalleistung ($R = 10 \log (W_e/W_d)$). Wenn der einfache Fall einer biegeweichen Masse betrachtet wird, kann das Bergersche Massengesetz angesetzt werden. Dieses besagt, dass die Schalldämmung pro flächenbezogener Massenverdopplung um 6 dB erhöht wird (siehe Abbildung 2). Genauso steigt das Schalldämm-Maß bei einer Frequenzverdopplung um 6 dB. Letzteres veranschaulicht nochmal warum die tiefen Frequenzen schlechter gedämmt werden als die hohen. Wenn also das Schalldämm-Maß erhöht werden soll, kann die flächenbezogene Masse erhöht werden. Dies macht aber nur zu einem gewissen Maß Sinn; denn soll die Schalldämmung eine Halbierung der empfundenen Lautstärke hervorrufen, muss das Schalldämm-Maß um etwa 10 dB erhöht werden, also zwei Mal die flächenbezogene Masse verdoppelt werden (6 dB + 6 dB). In anderen Worten muss die Dicke des Bauteils auf das Vierfache gesteigert werden, von z.B. einer 20 cm dicken Wand zu einer unrealistischen Wanddicke von 80 cm.

Dass 10 dB eine Verdopplung oder Halbierung der empfundenen Lautstärke hervorrufen gilt für Töne. Die empfundenen Lästigkeit ist nicht ganz so einfach zu definieren, vor allem bei komplexeren Geräuschen. Ergebnisse zum Empfinden komplexerer Geräusche werden später durch subjektive Untersuchungen vorgestellt, jedoch wird bis dahin davon ausgegangen, dass A-bewertete Pegel das Empfinden gut repräsentieren.

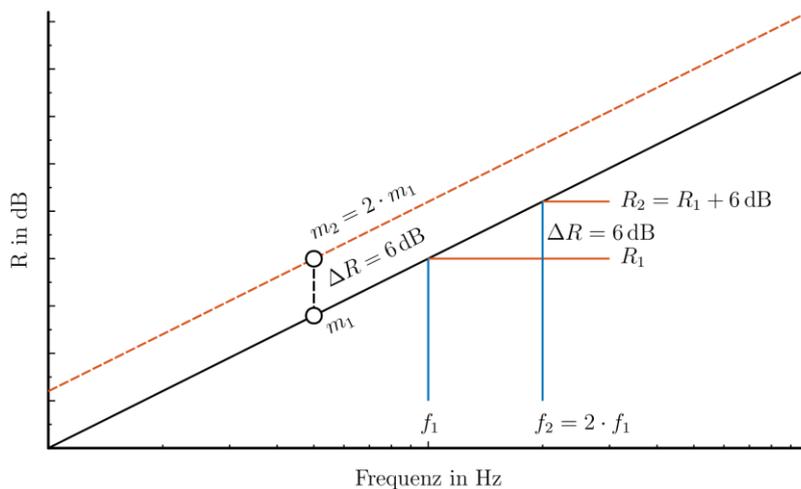


Abbildung 2: Schalldämm-Maß R: Bergersches Masse Gesetz mit 6 dB Erhöhung pro Massen und Frequenz Verdoppelung

Eine elegantere Methode die Schalldämmung zu verbessern ist durch die Entkopplung der Übertragung durch z.B. Zweischaligkeit oder Vorsatzschale. Einfach gesehen kann das Grundbauteil als Masse gesehen werden, die Luft oder das Material im Hohlraum zwischen den Schalen als Feder, und die äußere Schale (z.B. Gipskarton oder Mörtel) als weitere Masse, zusammen also ein Masse-Feder-Masse System. Tieffrequent schwingen beide Bauteile gleich, jedoch wirkt sich die zugefügte Masse (m_2'') vorteilhaft auf das Schalldämm-Maß aus, laut Bergerschem Massegesetz $\Delta R = 20 \log((m_1'' + m_2'')/m_1'')$. Hochfrequent sind die Massen bzw. Elemente voneinander entkoppelt, so dass wenig Schall übertragen wird – die Verbesserung der Schalldämmung steigt mit der Frequenz (siehe Abbildung 3). Bei einer Frequenz jedoch, der Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenz (f_R), schwingen beide Massen stärker als eine alleine und es kommt zu einer Verschlechterung der Schalldämmung. Hochfrequent sieht man in der Realität, z.B. wegen Körperschallbrücken, eine Stagnation der Verbesserung und sie übersteigt einen bestimmten Wert trotz steigender Frequenz nicht mehr.

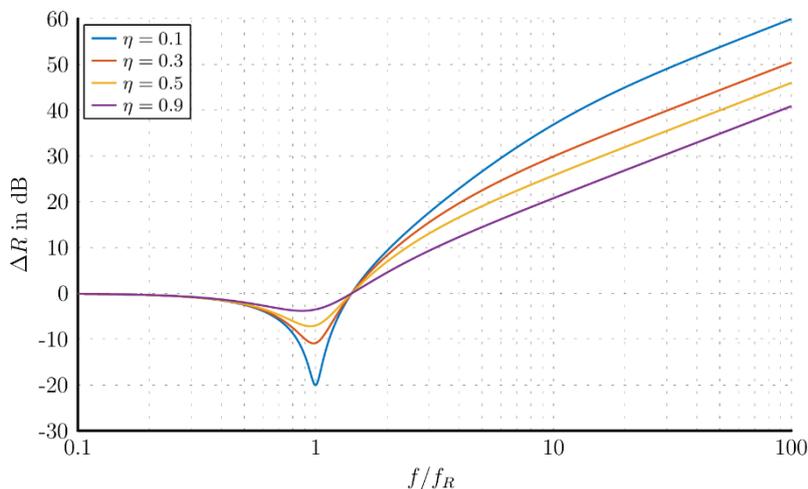


Abbildung 3: Verbesserung des Schalldämm-Maßes ΔR durch Entkopplung mit einer Vorsatzschale und einem Verlustfaktor von 10% bis 90%. Der Zugewinn an Masse wird hier noch nicht berücksichtigt.

Je nachdem wie hoch die Verluste sind, wird der Einbruch tiefer oder geringer ausfallen. Hohe Verluste sind für den Einbruch bei der Resonanzfrequenz hilfreich, reduzieren jedoch die Verbesserung zu den hohen Frequenzen hin. Da hochfrequent die Schalldämmung schon sehr gut ist, kann meistens dieser Nachteil in Kauf genommen werden. Die Resonanzfrequenz sollte jedoch tief abgestimmt werden, sodass es über einen großen Frequenzbereich zu einer Verbesserung der Schalldämmung kommt. Die Resonanzfrequenz lässt sich folgendermaßen bestimmen:

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s'' \left(\frac{1}{m''_1} + \frac{1}{m''_2} \right)},$$

wobei s'' die flächenbezogene Steifigkeit der Zwischenschicht (abhängig von Dicke und Material), und m''_1 und m''_2 die flächenbezogenen Massen der inneren und äußeren Elemente sind.

Mit dem Verständnis zum Schalldämmmaß kann jetzt der Innenraumpegel aus den Außenraumpegeln bestimmt werden (siehe Abbildung 4). Hierzu wird als Beispiel die Schalldämmung einer fünfplagigen Brettsperrholz (CLT - Cross Laminated Timber) Wand mit zwei Lagen Gipskarton ($90\text{kg/m}^2 + 2 \times 10\text{kg/m}^2$) ohne und mit der theoretischen Vorsatzschale (20kg/m^2) mit einer Resonanzfrequenz bei 63 Hz und Verlustfaktor von 30% verwendet.

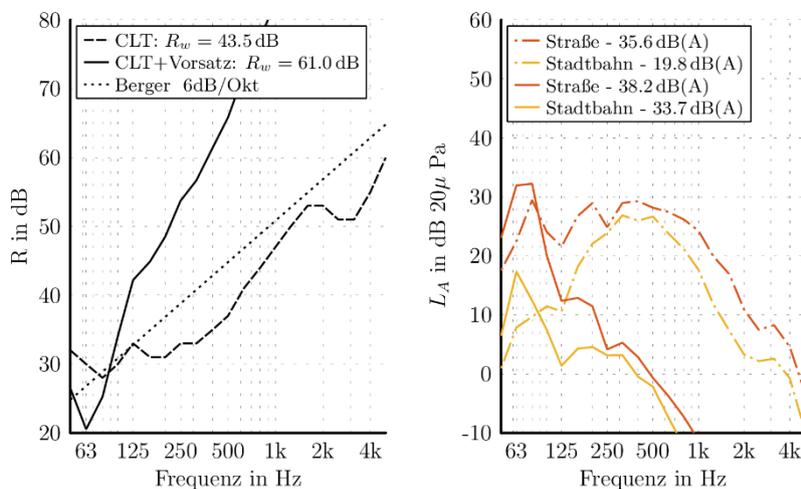


Abbildung 4: Links: Schalldämm-Maß einer Massivholzwand ohne ('-') und mit ('-') theoretischer Vorsatzschale und nach Berger gerechnet ('·'). Rechts: A-gewichteter Innenraumpegel des Verkehrslärms (Straße und Stadtbahn) nach Transmission durch Wand ohne und mit Vorsatzschale.

Der Innenraumpegel wurde mit der Annahme eines diffusen Innenraums mit einer äquivalenten Absorptionsfläche A von 10 m^2 berechnet ($L_{\text{in}} = L_{\text{auß}} - R + 10\log(S/A)$, wobei $S=12.5\text{ m}^2$ die Fläche der Wand ist). Hier geht es wiederum nicht um die absoluten Pegel, sondern um die Form der Spektren. Im linken Diagramm sieht man, dass durch die Vorsatzschale das Schalldämm-Maß tieffrequent verschlechtert wurde, hochfrequent jedoch wie erwartet stark steigt. Im rechten Diagramm sieht man, dass die tiefen Frequenzen obwohl schon A-gewichtet wieder an Wichtigkeit gewinnen, weil die Schalldämmung tieffrequent niedrig ist, sogar noch mehr mit der zusätzlichen Vorsatzschale ('-'). Im Innenraum werden also maßgeblich die tiefen Frequenzen gehört.

2.2. Trittschall

Um die Qualität des Trittschallschutzes zu beurteilen wird nicht wie beim Schalldämm-Maß eine Leistungsbilanz herangezogen, sondern der Schalldruckpegel im Empfangsraum wird evaluiert. Dennoch treten hier ähnliche Phänomene auf.

Fangen wir wieder bei den Quellen an. Zur Beurteilung des Trittschallschutzes wird üblicherweise mit einem Normhammerwerk (NHW) die Decke angeregt. Dabei fallen fünf 500g schwere Hämmer von 40 mm mit einer Gesamtfrequenz von 10 Hz auf die zu untersuchende Decke. Der Schallpegel im Empfangsraum wird dabei aufgenommen. Das in Terzen theoretisch erwartete Kraftspektrum ($L_F = 150 + 10 \cdot \log(f/1000\text{Hz})$) kann laut [0] in Abbildung 5 gesehen werden.

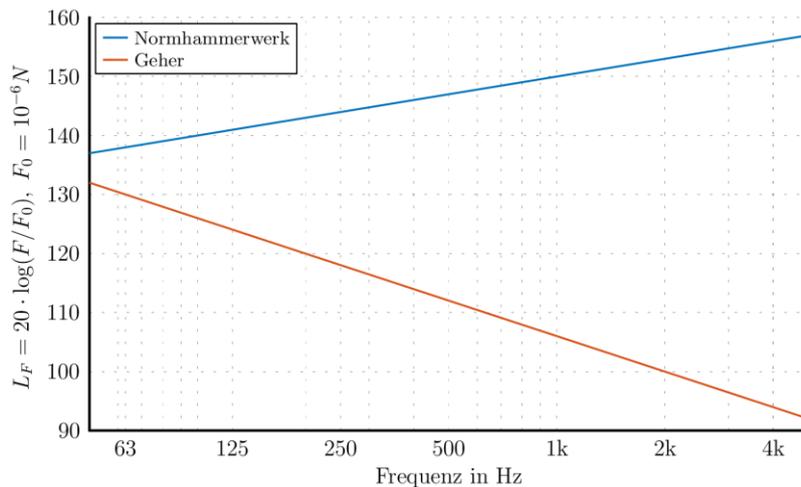


Abbildung 5: Vereinfachte blockierte Kraft des Normhammerwerks (~ 3 dB/Okt) und eines Geher (~ -6 dB/Okt)

Bei einem idealen Dirac Stoß wären alle Frequenzen gleichermaßen stark angeregt, was bei der Darstellung in Terzen zu einer Steigung der Kurve von 3 dB/Okt führt. Dabei ist zu sehen, dass die tiefen Frequenzen keine besondere Rolle spielen, eher umgekehrt. Wenn aber nicht als Quelle das NHW sondern ein Geher verwendet wird wie bei $[0, 0]$ gemessen, wurde hier als Vereinfachung eine Gerade mit einem Abfall von 6 dB/Okt angesetzt. Wegen der Quelle werden nun die tiefen Frequenzen wieder wichtiger. Eine normative Quelle, die schwere und weiche Gummiball beschrieben in $[0]$, wurde extra von $[0]$ entwickelt um einen ähnlichen Kraft- und Impedanzverlauf wie der Geher $[0,0]$ zu haben.

Wie viel sich das Spektrum nach der Trittschallübertragung verändert zeigt die blaue Kurve in der Linken Abbildung 6, in der der Norm-Trittschallpegel ($L_n = L + 10 \log(A/A_0)$), mit L als Pegel im Empfangsraum, A die äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum und $A_0 = 10 \text{ m}^2$, des gleichen CLT Bauteils dargestellt wird. Da es sich um eine transiente Anregung handelt, wird mit dem Ball nicht der L_n gemessen, sondern der zeitlich fast bewertete Maximalpegel ($L_{i,Fmax}$).

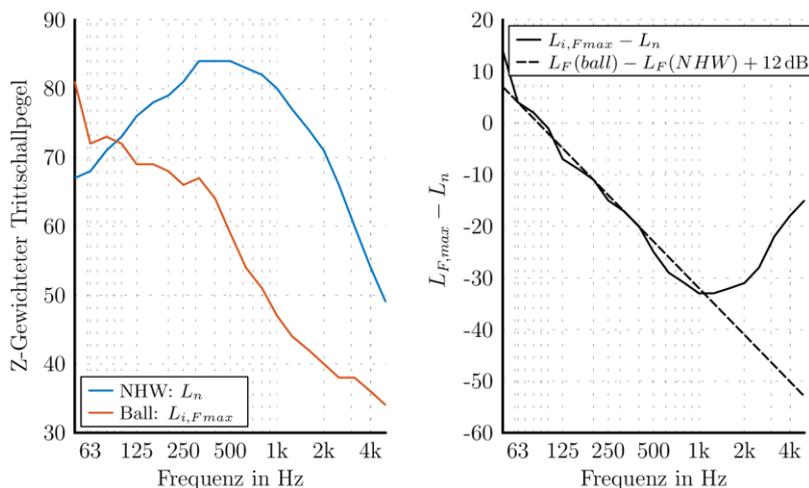


Abbildung 6: Links: Auf CLT Decke L_n mit dem NHW und $L_{i,Fmax}$ mit dem Ball gemessen. Rechts: Vergleich der Differenzen der Schallpegel im Empfangsraum ($L_{i,Fmax} - L_n$) und der Blockierten Kräfte (Ball-NHW).

Durch Anregung mit dem NHW sind die tiefen Frequenzen weiterhin nicht sehr relevant, jedoch aber durch Anregung mit dem Gummiball. Der Normtrittschallpegel L_n steigt sogar im mittleren Frequenzbereich wegen der hohen Abstrahlung um die Koinzidenzfrequenz. Der $L_{i,Fmax}$ fällt stetig mit steigender Frequenz. Obwohl diese beiden Trittschall-Größen nicht ganz vergleichbar sind, wurde die Differenz in der Rechten Figur gebildet (durchgezogene Linie). Die Differenz ist mit der Differenz der Kräfte von Geher und NHM um 12 dB nach oben verschoben (gestrichelte Linie) sehr ähnlich. Beide haben erfreulicher Weise, außer

sehr tief und sehr hochfrequent die gleiche Steigung von -9 dB/Okt. Um das Empfinden etwas abschätzen zu können werden die Trittschallpegel wieder mit einer A-Bewertung in Abbildung 7 (gestrichelte Linien) dargestellt.

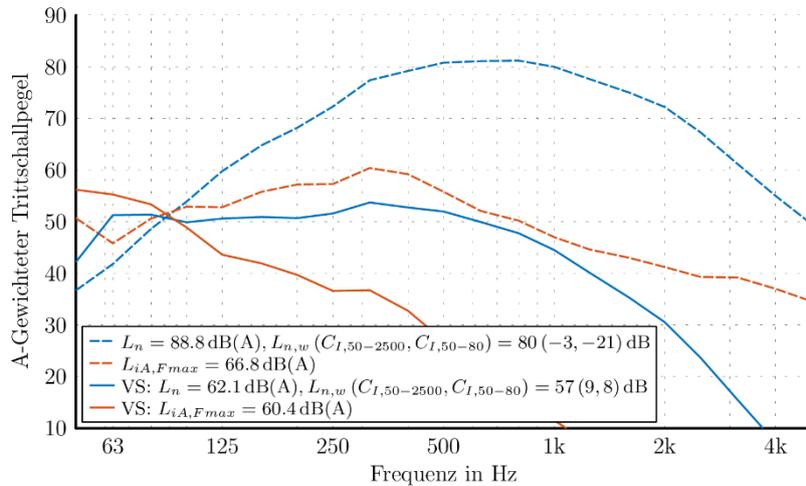


Abbildung 7: A-Bewertete Trittschallpegel (L_n -Blau, $L_{iA,Fmax}$ -Rot) auf CLT Decke ohne (gestrichelt) und mit (durchgezogen) abgehängter Decke.

Die tiefen Frequenzen haben nun bei beiden Arten von Trittschallpegeln an Bedeutung verloren. Jedoch muss dazu gesagt werden, dass die Decke ohne eine Art Vorsatzschale mit einem Norm-Trittschallpegel von $L_{n,w}=80$ dB nicht einsetzbar ist. Sobald eine vernünftige Vorsatzschale – in diesem Beispiel eine theoretische abgehängte Decke mit der gleichen Verbesserung wie die Vorsatzschale der CLT Wand – angebracht wird, werden die tiefen Frequenzen wieder bedeutsamer (durchgezogene Linien).

Es können durch diese messtechnische und theoretische Untersuchung mit Verwendung der A-Bewerteten Innenraumpegel und Trittschallpegel nur richtungsweisende Annahmen über das Empfinden gemacht werden: Tiefe Frequenzen sind wichtig. Genauer auf das Empfinden kann durch eine subjektive Studie eingegangen werden indem hoffentlich auch die gleiche Antwort gefunden werden kann.

3. Psychoakustische Untersuchung zum Trittschall

Üblicherweise basieren die Anforderungen in der Bauordnung auf den Einzahlkennwerten, die aus standardisierten Labor- oder Feldmessungen gewonnen werden. Da jedoch zuletzt die Bewohner der Gebäude der ausschlaggebende Faktor für die Lärmbelastung sind, muss die von den Bewohnern empfundene, also subjektive Lästigkeit mit den objektiven Einzahlkennwerten in Verbindung gesetzt werden.

Dies wird mit speziell ausgelegten psychoakustischen Hörversuchen realisiert, bei denen Probanden unter meist kontrollierten Bedingungen verschiedene Hörbeispiele im Hinblick auf die Lästigkeit bewerten. Die subjektiven Bewertungen werden dann mit den objektiven Messdaten aus dem Labor verglichen. Solche psychoakustischen Studien sind insbesondere dann wichtig, wenn es um die Einführung neuer Bewertungskenngrößen, z.B. speziell für tiefe Frequenzen, geht, für die (noch) keine standardisierten Kenngrößen existieren.

Eine solche psychoakustische Studie für den Trittschallschutz von Holzdeckenaufbauten wird im Weiteren beschrieben.

3.1. Vermessene Deckenaufbauten

Die in dieser Studie vermessenen Aufbauten basierten auf einem 175mm tiefen, 5-lagigen Cross-Laminated Timber (CLT) Massivholz-Element und einer Holzbalkendecke aus 16 mm dicken OSB-Platten auf 240 mm tiefen Doppelstegträgern. Für beide Arten von Aufbauten wurden Variationen mit verschiedenen Auflagen getestet, die in Tabelle 1 beschrieben sind. Als sichtbarer Abschluss der Decke wurden eine oder mehrere Lagen 16 mm Rigipsplatten verwendet, die für die Trägerdecke mit Federschiene angebracht wurden. Auf dem CLT Element wurden die Rigipsplatten direkt angebracht.

Tabelle 1: Untersuchte Holzdeckenaufbauten

	Grundelement	
	175mm CLT	240mm Doppelstegträger
	ohne	ohne
Auflagen	Klicklaminat auf 2 mm Gummimatte	25mm Zementestrich
	38 mm Beton auf 2 mm Gummimatte	25mm Zementestrich auf 3 mm Filzmatte
	38 mm Beton auf 8 mm Schaumstoff	25mm Zementestrich auf 6 mm Akustikmatte
	Klicklaminat auf 2 mm Gummimatte + 38 mm Beton auf 8 mm Schaumstoff	25mm Zementestrich auf 25 mm Gummimatte
	100 mm Beton auf 23 mm Gummimatte	

Da die Messdaten aus zwei getrennten Testserien erhoben wurden, gab es keine Überschneidungen zwischen den Auflagen für die beiden Grundelemente.

3.2. Messaufbau

In dieser Studie wurden im Deckenprüfstand am National Research Council (NRC) in Ottawa sowohl standardisierte Messungen durchgeführt, als auch in einem modifizierten Empfangsraum Aufnahmen für eine subjektive Studie gemacht. Der Deckenprüfstand am NRC besteht aus zwei entkoppelten, vertikal angeordneten Hallräumen mit einem Raumvolumen von etwa jeweils 175 m³ (Abbildung 8, links). In jedem der Hallräume wird der Schalldruck an acht verschiedenen Positionen mit Mikrofonen gemessen. Dieser Deckenprüfstand wird für alle standardisierten Messungen von Luft- und Trittschall nach ISO und ASTM Normen benutzt. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden für Luftschall mit vier Lautsprechern in jedem Hallraum gemessen. Der Trittschall wurde sowohl mit dem Normhammerwerk als auch mit dem in ISO 10140-3 beschriebenen Gummiball gemessen. Alle Messdaten wurden in den Terzbändern mit Mittenfrequenz von 25 Hz bis 10 kHz ausgewertet.

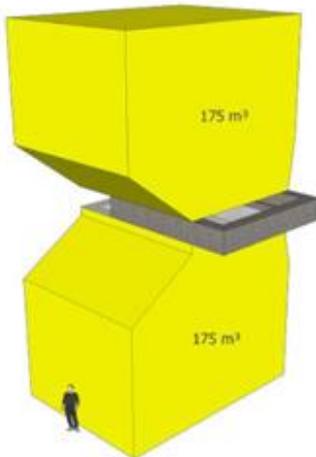


Abbildung 8: Deckenprüfstand am NRC: Anordnung der Hallräume (links) und Aufbau zur Aufnahme für die subjektive Studie im unteren Hallraum (rechts)

Im normalen Zustand hat der untere Hallraum des Deckenprüfstands eine Nachhallzeit zwischen 2 und 4 Sekunden. Für den subjektiven Hörversuch musste diese Nachhallzeit auf etwa 0.5 Sekunden reduziert werden, um die Halligkeit in den Aufnahmen einer realistischen Wohnzimmersituation anzugleichen. Dazu wurden im unteren Empfangsraum große Schaumstoffplatten verlegt. Abbildung 9 zeigt die gemessenen Nachhallzeiten.

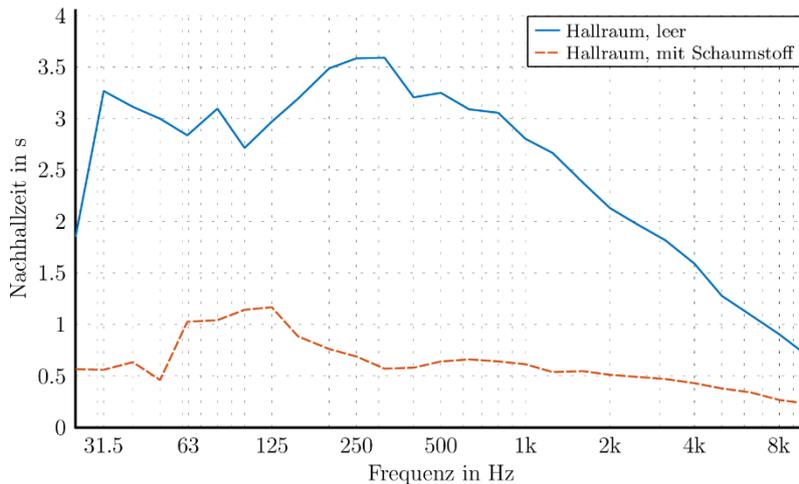


Abbildung 9: Nachhallzeit im Hallraum, im leeren Zustand und mit reduzierter Nachhallzeit.

Im unteren Hallraum erlaubt ein akustisch transparentes Zwischengitter den Aufbau von Aufnahmeegeräten nah unterhalb des im Prüfstand befindlichen Prüfobjekts. Auf dieser Zwischentage wurden sowohl ein Kunstkopf (B&K HATS Type 4128-C) als auch ein vierkanaliges Sennheiser AMBEO VR Ambisonics-Mikrofon platziert (Abbildung 8, rechts). Mit diesen beiden Empfängern wurden alle Aufnahmen des Trittschalls für die Hörversuche durchgeführt.

Insgesamt wurden fünf verschiedene Szenarien mit Trittschallquellen auf jedem Deckenaufbau aufgenommen:

- Standard-Gummiball aus 10 cm und 100 cm Höhe
- Gehen mit Schuhen und auf Socken
- Einzelschläge des Normhammerwerks

Die Geher bewegten sich bei den Aufnahmen in Form einer Acht, zentriert im Mittelpunkt des Deckenaufbaus.

3.3. Hörversuch

Der Hörversuch fand im reflexionsarmen Raum am NRC statt. Die aufgenommenen Trittschallgeräusche wurden für den Hörversuch über einen Ambisonics-Lautsprecheraufbau mit acht Monitorlautsprechern und 3 Subwoofern wiedergegeben. Der Aufbau war bis zu einer unteren Frequenz von 20 Hz entzerrt. Ein Foto des Aufbaus ist in Abbildung 10 zu sehen. Um die Probanden nicht durch den Anblick der Lautsprecher abzulenken, wurden diese hinter Vorhängen versteckt.

Der Hörversuch wurde von 26 Probanden im Alter zwischen 19 und 60 Jahren (Mittelwert 38 Jahre, Standardabweichung 10 Jahre) durchgeführt. Jeder Proband wurde einem audiometrischen Test unterzogen, um das Hörvermögen der Probanden zu dokumentieren. Keiner der Probanden hatte merkliche Hörverluste.

Der eigentliche Hörversuch dauerte im Durchschnitt etwa 20 Minuten pro Proband. Die aufgenommenen Geräusche für 12 verschiedene Deckenaufbauten wurden in zufälliger Reihenfolge präsentiert, wobei die Geräusche in fünf Abschnitten (einem pro Quellentyp) sortiert waren. Für jedes Geräusch sollte die empfundene Lästigkeit auf einer Skala von 0 bis 100 angegeben werden.



Abbildung 10: Lautsprecheraufbau für den Hörversuch

3.4. Ergebnisse der Standardmessungen

Die standardisierten Einzahlwerte, die in dieser Studie betrachtet wurden, sind in Tabelle 2 aufgezählt. Zusätzlich zu den standardisierten Einzahlwerten wurden auch einige andere Bewertungsmethoden untersucht, vor allem da die meisten Standards keine Daten unterhalb von 100 Hz bewerten.

Tabelle 2: Einzahlwerte zur Bewertung von Trittschall

Einzahlwert	Benötigte Messdaten	Messobjekt	Frequenzbereich	Standard
L_{n,w,C_I}	L_n	Hammerwerk	100 Hz - 3150 Hz	ISO 717-2
$C_{I,50-2500}$	L_n	Hammerwerk	50 Hz - 2500 Hz	ISO 717-2
$C_{I,50-80}$	L_n	Hammerwerk	50 Hz - 80 Hz	-
$C_{I,AL}$	L_n	Hammerwerk	20 Hz - 2500 Hz	-
IIC	L_n	Hammerwerk	100 Hz - 3150 Hz	ASTM E989
HIIC	L_n	Hammerwerk	400 Hz - 3150 Hz	ASTM E3222
LIIC	L_n	Hammerwerk	50 Hz - 80 Hz	ASTM E3207
$L_{i,A,L}$	L_n	Hammerwerk	50 Hz - 3150 Hz	JIS 1419-2
$L_{i,F,max,H}$	$L_{i,F,max}$	Gummiball	50 Hz - 630 Hz	JIS 1419-2
$L_{i,C,F,max,H}$	$L_{i,F,max}$	Gummiball	50 Hz - 630 Hz	

Ein Problem bei der Untersuchung von tieffrequentem (Tritt-) Schall ist die Tatsache, dass die Messunsicherheit zu tiefen Frequenzen hin steigt. Dies gilt insbesondere bei kleinen Räumen, wie sie bei Messungen im Feld zu finden sind, da in kleinen Räumen die Modendichte bei Frequenzen unterhalb von 100 Hz deutlich niedriger ist. Ein Beispiel ist in Abbildung 11 gezeigt, in der die erweiterte Messunsicherheit (95% Konfidenzintervall) für Empfangspegel dargestellt ist. Die Daten zeigen die Ergebnisse im Hallraum des NRC (etwa 175 m³ Volumen) für Messungen von Trittschall mit dem Normhammerwerk und dem Gummiball, und für Luftschall bei Messungen des Schalldämmmaßes, sowie die Vorhersage mit der Theorie nach Davy [0].

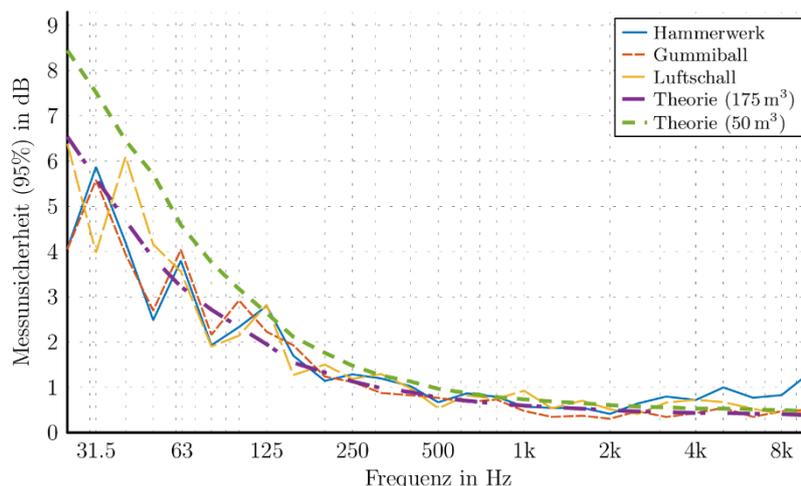


Abbildung 11: Erweiterte Messunsicherheit (95% Konfidenzintervall) bei Empfangspegeln für Trittschall und Luftschall, sowie theoretische Vorhersage für große und kleine Räume

Es zeigt sich, dass die theoretische Vorhersage sehr gut mit den tatsächlichen Ergebnissen übereinstimmt. Die theoretische Vorhersage für einen kleinen Raum mit 50 m^3 Volumen zeigt eine Messunsicherheit, die bei tiefen Frequenzen etwa 1 bis 2 dB höher liegt als bei großen Räumen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass gerade Einzelkennwerte, die sehr tiefe Frequenzen berücksichtigen, mit großer Unsicherheit behaftet sind, und daher eventuell nur bedingt praktisch von Nutzen sind. Zum Beispiel wäre in kleinen Räumen der bewertete Trittschallpegel mit dem spektralen Anpassungswert ($L_{n,w} + C_1$ oder $C_{150-2500}$) mit einer Unsicherheit von etwa 0.5 dB messbar; mit dem Akulite Anpassungswert, der Daten bis 25 Hz bewertet, läge die Unsicherheit bei 2 dB. Der im kürzlich geschaffenen ASTM Standard E3207 [0] definierte tieffrequente Term LIIC («low-frequency impact insulation class») führt in kleinen Räumen sogar zu einer Messunsicherheit von 5.5 dB.

3.5. Ergebnisse des Hörversuchs

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Messdaten können nun mit den Lästigkeitsbewertungen der Probanden aus dem Hörversuch verglichen werden. Bei der Auswertung dieser Daten werden üblicherweise die Ergebnisse für eine bestimmte Kenngröße gegenüber den über die Probanden gemittelten Lästigkeitsbewertungen aufgetragen. Mittels einer Regressionsanalyse kann dann bestimmt werden, wie gut diese Kenngröße die empfundene Lästigkeit vorhersagen kann. Dies ist im Endeffekt das Ziel der Kenngrößen, gerade im Hinblick auf die Vorschriften in der Bauordnung.

Da in dieser Studie fünf verschiedene Trittschallquellen benutzt wurden, gibt es dementsprechend für jede der Quellen einen Satz an Ergebnissen. Beispielhaft ist in Abbildung 12 die Lästigkeit gegenüber der Kenngröße $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$ für die Ergebnisse mit dem Gummiball aus 10 cm Höhe dargestellt. Die Regression wurde mit einer S-förmigen Funktion durchgeführt, die zusätzlich in der Abbildung gezeigt ist. Für die Regressionsanalysen wurde die S-Kurve auf den Wertebereich der Lästigkeit von 0 bis 100 beschränkt, so dass die einzigen freien Parameter der Zentralwert x_0 (bei dem eine Lästigkeit von 50 erreicht wird) und die Steigung k (um x_0) bleiben.

Es zeigt sich, dass in diesem Beispiel die standardisierte Kenngröße eine hohe Korrelation zu der empfundenen Lästigkeit aufweist. Dies ist auch an dem hohen Bestimmtheitsmaß von 0.94 zu erkennen.

Die Analyse, wie sie in Abbildung 12 zu sehen ist, muss nun für jede Trittschallquelle und jede Kenngröße, die untersucht werden soll, durchgeführt werden. Für eine kompakte Analyse der Daten, wird im Weiteren alleine das Bestimmtheitsmaß aus der Regressionsanalyse gezeigt.

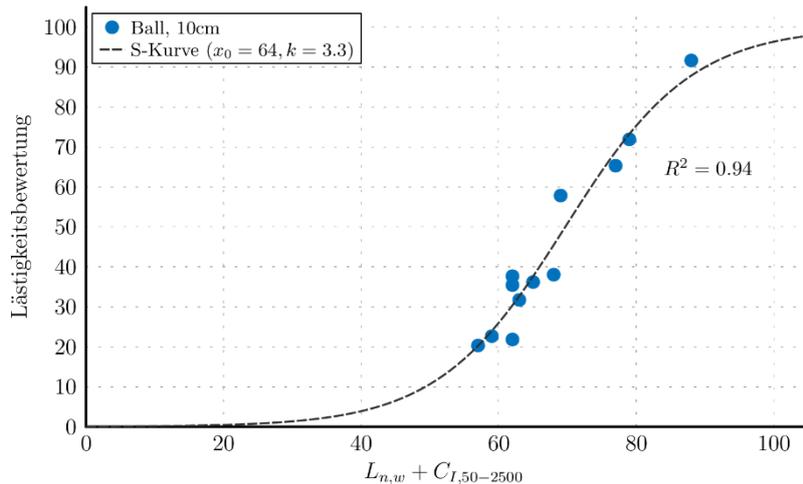


Abbildung 12: Empfundene Lästigkeit als Funktion der Kenngröße $L_{n,w} + C_{I,50-2500}$. Die S-förmige Regressionskurve ist ebenfalls dargestellt.

In ist das Bestimmtheitsmaß aus der Regressionsanalyse für die fünf untersuchten Trittschallquellen gezeigt. Die verschiedenen Balken zeigen hierbei die Ergebnisse für vier verschiedene Kenngrößen: der bewertete normalisierte Trittschallpegel für das Normhammerwerk $L_{n,w}$, ohne und mit spektralen Adaptionswerten $C_{I,50-2500}$ und $C_{I,50-80}$, und der maximale A-bewertete Schalldruckpegel für die Messung mit dem Gummiball, $L_{iA,Fmax}$ (siehe Tabelle 2). Hierbei muss betont werden, dass die Kenngröße $L_{n,w} + C_{I,50-80}$ als einzige in dieser Aufzählung nicht standardisiert ist.

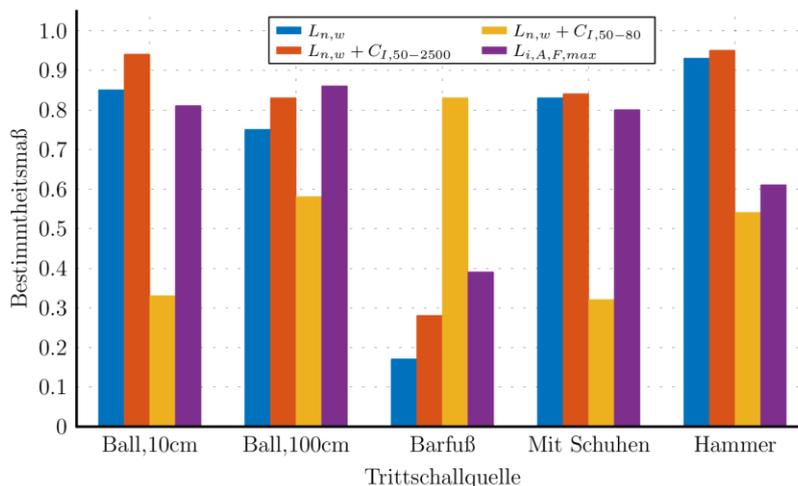


Abbildung 13: Bestimmtheitsmaß für die fünf untersuchten Trittschallquellen und für vier verschiedene standardisierte Kenngrößen

Man kann erkennen, dass die standardisierten Kenngrößen allgemein eine sehr gute Vorhersage der Lästigkeit bieten, da die Bestimmtheitsmaße fast alle bei über 0.8 liegen. Für die meisten Trittschallquellen ist die Kenngröße $L_{n,w} + C_{I,50-2500}$ am besten zur Vorhersage der empfundenen Lästigkeit geeignet, insbesondere für Hammerschläge mit dem Normhammerwerk und Ballwürfe aus einer Höhe von 10 cm. Für Ballwürfe aus 100 cm Höhe ist der Wert $L_{iA,Fmax}$ etwas besser geeignet. Die Ergebnisse für Gehen mit Schuhen sind für die drei standardisierten Größen statistisch nicht voneinander zu unterscheiden.

Die Ergebnisse für das Barfußgehen zeigen, dass keine der standardisierten Kenngrößen eine gute Vorhersage der empfundenen Lästigkeit bietet. Die Bestimmtheitsmaße sind alle kleiner als 0.4. Lediglich die Kenngröße mit dem spektralen Adaptionswert, der nur den Schalldruckpegel im Oktavband von 63 Hz beinhaltet, $L_{n,w} + C_{I,50-80}$, weist ein hohes Bestimmtheitsmaß von über 0.8 auf. Dies bedeutet, dass das dumpfe Dröhnen von Barfußgang, meist dominiert vom Auftreten mit der Ferse, nicht mit standardisierten Kenngrößen erfasst wird.

Zusätzlich zu den Kenngrößen in Abbildung 13 wurden die weiteren Kenngrößen aus Tabelle 2 untersucht. Die Ergebnisse für den IIC verhalten sich ähnlich wie die für $L_{n,w}$, wobei das Bestimmtheitsmaß für den IIC immer leicht niedriger ist. Das liegt an der 8-dB-Regel, die beim IIC nach wie vor berücksichtigt wird. Der hochfrequente IIC, HIIC, liefert sehr ähnliche Ergebnisse wie für den IIC. Der tieffrequente IIC, LIIC, führt zu exakt den gleichen Bestimmtheitsmaßen wie der $L_{n,w}+C_{I,50-80}$. Die ist nicht überraschend, da beide Werte direkt miteinander in Verbindung stehen: $LIIC = 160 - (L_{n,w}+C_{I,50-80})$.

Der spektrale Adaptionwert aus dem Akulite-Projekt [0] führte generell nicht zu einem höheren Bestimmtheitsmaß als andere Adaptionswerte, außer beim Gehen mit Schuhen, für das das Bestimmtheitsmaß um etwa 0.05 höher ausfällt. Als Beispiel für eine einfachere Bewertungsmethode hat sich der $L_{iA,L}$ -Wert, also der A-bewertete Summenpegel mit dem Normhammerwerk, als mindestens so gut wie der $L_{n,w}$ erwiesen.

Für die Kenngrößen aus den Messungen mit dem Gummiball bietet der C-bewertete Maximalpegel, $L_{iC,Fmax,H}$, eine ähnlich gute Vorhersage der Lästigkeit für Barfußgehen wie der tieffrequente Adaptionsterm für $L_{n,w}$.

Die gute Korrelation der $L_{n,w}$ -Kenngröße mit dem tieffrequenten Adaptionwert ist nicht überraschend, wenn man die effektiven Schalldruckpegel an der Hörposition für die verschiedenen Trittschallquellen als Funktion der Frequenz betrachtet. Diese Information ist in Abbildung 14 als Mittelwert über die Aufbauten zu sehen.

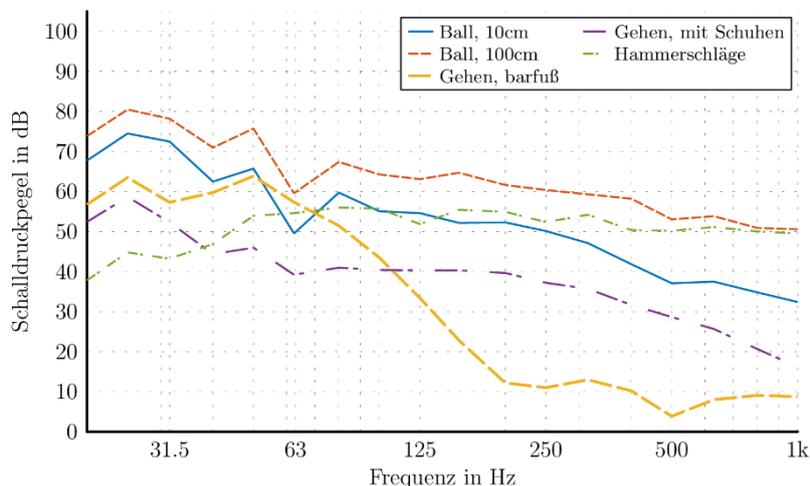


Abbildung 14: Schalldruckpegel an der Hörposition gemittelt über alle Aufbauten für die fünf untersuchten Trittschallquellen

Es zeigt sich, dass die Barfußgehgeräusche nur Pegel unterhalb von 200 Hz erzeugen, und sich der Großteil der Energie im Bereich unterhalb von 80 Hz befindet. Selbst die Pegel mit dem Gummiball, bei dem die Kraftanregung weitestgehend im tieffrequenten Bereich stattfindet, tragen noch so viel im Bereich über 100 Hz bei, dass der Einzahlkennwert mit A-Bewertung nicht gut mit der empfundenen Lästigkeit für Barfußgehen korreliert. Wie jedoch zuvor erwähnt, kann dies durch die C-Bewertung statt der A-Bewertung verbessert werden.

4. Maßnahmen und Empfehlungen

Wie schon in den Grundlagen erläutert benötigt es zur Erhöhung der Luft- und Trittschalldämmung eine ausreichende (flächenbezogene) Masse und eine möglichst tief abgestimmte Entkopplung durch Vorsatzschalen. Wie anhand der A-Bewerteten Innenraumpegel zu sehen war, ist mit dem gleichen Aufbau die Luftschalldämmung oft unkritischer als die Trittschalldämmung. Das heißt, dass wenn ausreichende Maßnahmen für den Trittschall erfüllt worden sind, der Luftschallschutz gewährleistet sein sollte.

Um im Holzbau eine ausreichend hohe flächenbezogene Masse zu erzielen, werden Schütungen verwendet [0]. Bei der Entkopplung ist darauf zu achten, dass sie wirklich genügend tief abgestimmt werden [0] ansonsten können sie mehr (akustischen) Schaden

anrichten als sie Vorteile bringen. Genauso ist darauf zu achten, dass wenn auf dem Übertragungsweg mehrere Vorsatzschalen verwendet werden, sie wenn möglich unterschiedliche Resonanzfrequenzen oder hohe Dämpfungen besitzen, sodass der Einbruch nicht noch stärker ausgeprägt wird. In einigen Fällen lassen sich auch abgestimmte Tilger [0] oder Helmholzabsorber [0,0] zur Schwingungsminimierung ansetzen.

Die Ergebnisse der objektiven und subjektiven Untersuchungen zeigen, dass die Qualität der Luft- und Trittschalldämmung von den Quellen abhängig ist. Für die meisten Trittschallquellen wird als objektive Größe $L_{n,w}+C_{I,50-2500}$ zur Charakterisierung der Decken empfohlen.

5. Literatur

- [1] Ljunggren, F.; Simmons, C.; Hagberg, K.; "Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound", *Applied Acoustics*, Vol. 85, p. 57 - 68, 2014
- [2] ISO 717-2: Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 2: Impact sound insulation
- [3] ASTM E989-18: Standard Classification for Determination of Single-Number Metrics for Impact Noise
- [4] ASTM E3222-20: Standard Classification for Determination of High-frequency Impact Sound Ratings
- [5] ASTM E3207-21: Standard Classification for Determination of Low-Frequency Impact Noise Ratings
- [6] JIS A 1419-2: Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Floor impact sound insulation
- [7] Davy, J. L., "The ensemble variance of random noise in a reverberation room", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 107, No. 3, p. 361 - 373, 1986
- [8] Pietruschka, D. et. al., *Energetische und akustische Sanierung von Wohngebäuden – vom Altbau zum akustisch optimierten Passivhaus*, 2011
- [9] Tachibana, H.; Tanaka, H.; Yasuoka, M.; Kimura, S.: Development of new heavy and soft impact source for the assessment of floor impact sound insulation of buildings. *Proceedings of Inter-Noise 98*, 1998
- [20] Scheck, J.; Fischer, H.-M.; Kurz, R.; *Anregevorgänge bei leichten Treppenkonstruktionen*, *Fortschritt der Akustik*, Hamburg, DAGA 2001
- [31] Blödt, A.; Rabold, A.; Halstenberg, M.; *Schallschutz im Hochbau – Grundlagen und Vorbemessung*, *Holzbau Deutschland-Institut e.V.*, 2019
- [42] Amiryarahmada, N., *Dissertation, A Virtual Design Studio for Low-Frequency Sound from Walking in Lightweight Buildings*, Chalmers University, Gothenburg, Sweden 2019
- [53] Cremer, L., Heckl, M., *Körperschall*, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995
- [64] A. Rabold, C. Châteauvieux-Hellwig, S. Mecking, *Optimierung von Holzdecken in Bezug auf die DIN 4109*, 10. Europäischer Kongress EBH 2017
- [75] Zeitler, B.; Nightingale, T.; King, F.; *Methods to control low frequency impact noise in wood-frame construction*, *Acoustics 08*, Paris, 2008
- [86] DIN EN ISO 10140-5, *Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 5: Requirements for test facilities and equipment*, 2021
- [97] Link, U.; Schanda, U.; Schramm, M.; Wolf, M.; *Helmholtzresonatoren zur Absorption tieffrequenten Trittschalls*, 37. Deutsche Jahrestagung für Akustik – DAGA, Düsseldorf, 2011
- [108] Schanda, U.; *Resonant systems for the absorption of low frequency impact noise and for damping of low frequency vibrations*, *Forum Acusticum*, Aalborg, 2011
- [119] Schoenwald, S.; Zeitler, B.; Nightingale, T.; *Prediction of the Blocked Force at Impact of Japanese Rubber Ball Source*, *Acta Acustica united with Acustica* 97(4):590-598