Analyse der tieffrequenten Trittschallübertragung mittels Übertragungsfunktionen

Fabian Schöpfer[1], Ulrich Schanda[1]

[1] *Labor für Schallmesstechnik, Technische Hochschule Rosenheim, Email: fabian.schoepfer@th-rosenheim.de*

Einleitung

Die tieffrequente Trittschallübertragung ist seit Jahren ein viel diskutiertes Thema. Dabei ist die Diskussion nicht nur für den Holzbau beschränkt, sondern ist auch bei Massivdecken verstärkt in den Fokus gerückt [siehe z.B. 1–3]. Aus konstruktiver Sicht des Trennbauteils ist der schwimmende Estrich in der Regel das Mittel, die Trittschallübertragung zu minimieren. Durch die Resonanz des Estrichs und der maßgeblich im tieffrequenten Bereich stattfindenden Anregung durch Begehen der Decke ist der Nutzen allerdings limitiert und es treten immer wieder Probleme bei der tieffrequenten Trittschallübertragung auf. Neben den konstruktiven Eigenschaften der Trenndecke können gegebenenfalls auch die Eigenmoden der Trenndecke und des Empfangsraumes einen ungünstigen Einfluss haben. Dieser Aspekt wurde schon an einigen Stellen untersucht und wird im Rahmen dieses Beitrags auf der Grundlage von gemessenen Übertragungsfunktionen zur Diskussion aufgegriffen.

Trittschall und Übertragungsfunktionen

Zur Messung des Norm-Trittschallpegels wird die Trenndecke mit dem Norm-Hammerwerk breitbandig im bauakustischen Frequenzbereich angeregt. Dabei zeigt sich durch den üblichen Einsatz eines schwimmenden Estriches der bekannte spektrale Verlauf eines mit steigender Frequenz fallenden Spektrums oberhalb der Masse-Feder-Resonanz. Meist ist der bewertete Norm-Trittschallpegel unabhängig von der Bauweise in der Regel begründet durch die Überschreitungen in den tiefen Terzfrequenzbändern und wird häufig noch erhöht durch die Berücksichtigung des Spektrumsanpassungsterms $C_{\mathrm{I},50-2500}$. In [3, 4] wurden Beschwerdefälle untersucht und aufgezeigt, dass die Probleme bei Frequenzen unter 100 Hz auftreten.

Bei üblicher Wohnnutzung treten vielfältige Anregespektren auf, wobei das Begehen von Trenndecken die wichtigste Anregung darstellt. Mit Socken, barfuß oder weichen Sohlen ist das Anregespektrum begrenzt auf Frequenzen unter 100 Hz. Dadurch hat sich in den vergangenen Jahren der $L'_{\mathrm{n,w}} + C_{\mathrm{I},50-2500}$ bzw. $L'_{\mathrm{n}T,\mathrm{w}} + C_{\mathrm{I},50-2500}$ als wichtige Planungsgröße zur Sicherstellung einer zufriedenstellenden subjektiven Wahrnehmung der Trittschallübertragung herausgestellt, die eine Anwendung normierter Messmethoden erlaubt. [siehe z.B. 5–7].

Mit der Verwendung von alternativen Anregequellen wie dem Gummiball oder dem modifizierten Hammerwerk lässt sich ein Anregespektrum nachbilden, das dem durch Begehen der Decke nahe kommt. Alle normativen Anregequellen stellen eine Absolutmessung des jeweils resultierenden Schalldruckpegels im Empfangsraum dar. Die

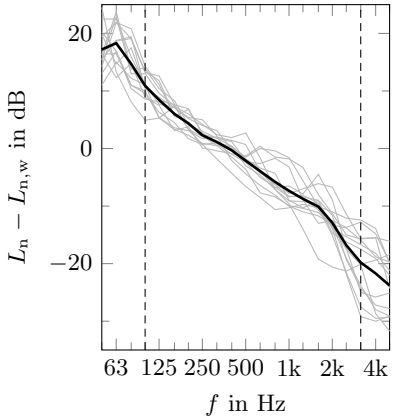

Abbildung 1: Norm-Trittschallpegel von 14 Reklamationsfällen. Daten aus [4].

tatsächlich eingeleitete Kraft ist dabei in der Regel nicht bekannt, obwohl es Ansätze gibt, diese zum Beispiel für das Norm-Hammerwerk zu modellieren. Ein Ansatz hierfür sowie eine Übersicht über verschiedene Modelle ist in [8] beschrieben.

Durch die Kenntnis der anregenden Kraft kann eine Übertragungsfunktion zwischen dem Schalldruckpegel und der Kraft betrachtet werden. Für die Luftschallübertragung und auch für Geräusche aus gebäudetechnischen Anlagen [9] werden Pegeldifferenzen, also im Grunde Übertragungsfunktionen in Terzbandbreite zwischen der Sende- und Empfangsseite verwendet. Dies erlaubt eine Trennung zwischen der Übertragung durch das Gebäude und der Quelle. Im Falle der Schallpegeldifferenz kann unter der Kenntnis des Schallleistungspegels im Senderaum der Schalldruckpegel im Empfangsraum berechnet werden. Analog können Übertragungsfunktionen zwischen der eingeleiteten Körperschallleistung in ein Bauteil und dem Schalldruckpegel im Empfangsraum verwendet werden um beliebige Körperschallquellen fiktiv in das Gebäude zu setzten und den Schalldruckpegel zu bestimmen [10, 11]. Dies ist im Gegensatz zum Luftschall komplizierter da die Gebäudestruktur am Krafteinleitungspunkt, im Gegensatz zur Luft, deutlich variieren kann.

Dieser Gedanke lässt sich auch ergänzend zu Messungen mit dem Norm-Hammerwerk auf den Trittschall übertragen. In [12] wurde ein Norm-Hammerwerk modifiziert um die eingeleitete Kraft zu messen und so die Übertragungsfunktion zu bestimmen. Mit der Kenntnis der Übertragungsfunktion kann der resultierende Schalldruckpegel für jede beliebige Anregequelle berechnet werden, sofern auch die Daten der Quelle bekannt sind.

Die eingeleitete Körperschallleistung lässt sich im allgemeinen Fall durch folgende Gleichung bestimmen [13]:

$$W = \frac{1}{2} |\hat{\underline{F}}_\mathrm{b}|^2 \frac{|\underline{Y}_\mathrm{S}|^2}{|\underline{Y}_\mathrm{S} + \underline{Y}_\mathrm{R}|^2} \operatorname{Re}\{\underline{Y}_\mathrm{R}\} \tag{1}$$

Dabei ist F_b die blockierte Kraft und Y_S bzw. Y_R die Quell- (Source) bzw. Empfänger- (Receiver) Admittanz. Diese drei Eingangsdaten sind also im allgemeinen Fall erforderlich. Ist die Admittanz der Empfangsstruktur wesentlich kleiner als die Quellenadmittanz, geht der Anpassungsterm gegen eins und kann vernachlässigt werden. Man spricht hier von einer Kraftquellensituation.

$$W = \frac{1}{2} |\hat{\underline{F}}_\mathrm{b}|^2 \operatorname{Re}\{\underline{Y}_\mathrm{R}\} \tag{2}$$

Für diesen Fall kann mit der gemessenen Trittschallübertragung mit dem Norm-Hammerwerk, der Schalldruckpegel einer beliebigen Quelle einfach mit der blockierten Kraft der betrachteten Quelle, $L_{F\mathrm{b,Quelle}}$, bestimmt werden. Bedingung dabei ist, dass auch für die Quelle die Kraftquellensituation gegeben ist.

$$L'_{\mathrm{n,Quelle}} = L'_\mathrm{n} + L_{F\mathrm{b,Quelle}} - L_{F\mathrm{b,NHW}} \tag{3}$$

In [14] wurde gezeigt, dass dies für das Hammerwerk und den Gummiball bei tiefen Frequenzen auch bei vergleichsweise leichten Decken gegeben ist.

Relevanter Frequenzbereich

Übliche Spektren des Norm-Trittschallpegels (vor allem Beschwerdefälle, siehe Abbildung 1) zeigen, dass der relevante Frequenzbereich in etwa unter 250 Hz liegt. Dabei wird die Decke jeweils breitbandig mit dem Norm-Hammerwerk angeregt.

Viele übliche Anregequellen bei einer Wohnnutzung weisen zudem ein Anregespekten auf, die maßgebliche Anteile bei tiefen Frequenzen haben. Kürzlich wurde im Rahmen einer Studienarbeit [15] ergänzend zu früheren Untersuchungen Kraftspektren unterschiedlicher Quellen gemessen und analysiert. Abbildung 2 zeigt einen Auszug der Ergebnisse. Für die Messungen wurde eine Kraftmessplatte verwendet die zunächst auf einem Untergrund mit sehr niedriger Admittanz (Tiefgaragenbodenplatte) und im zweiten Schritt auf einer Holzbalkendecke mit Schüttung und schwimmend verlegtem Trockenestrich befestigt wurde. Die Ergebnisse sind nur bis 315 Hz dargestellt, da bereits in diesem Terzband die ersten Biegeeigenformen der Kraftmessplatte auftreten. Zu erkennen ist das leicht steigende Spektrum des Norm-Hammerwerks und die mit der Frequenz stark abfallen Spektren für das modifizierte Hammerwerk, den Gummiball und einen Geher. Es ist im Vergleich der beiden Messungen zu erkennen, dass sich die Kraftspektren auf der Holzbalkendecke von der Tiefgaragenmessung unterscheiden.

Abbildung 3 zeigt Daten aus [16]. Hier wurde der Schalldruckpegel für das Norm-Hammerwerk und einen Geher in der selben Situation gemessen. Die Spektren sind bezogen auf den Pegel im 50 Hz Terzband um die Pegel anzupassen, da in diesem Fall der spektrale Verlauf betrachtet

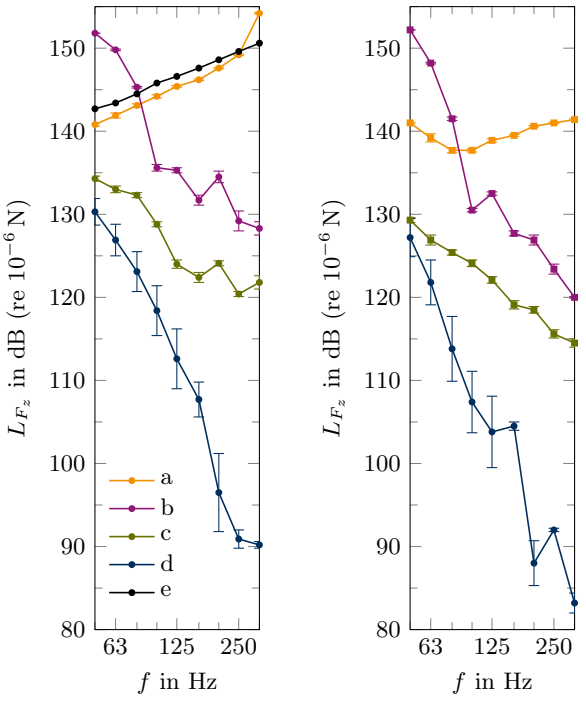

Abbildung 2: Kraftspektren verschiedener Quellen korrigiert aus [15]. Links: gemessen auf Fundament mit niedriger Admittanz. Rechts: gemessen auf einer Holzbalkendecke mit Schüttung und Trockenestrich. (a) Norm-Hammerwerk, (b) Gummiball ($h = 1$ m), (c) modifiziertes Norm-Hammerwerk, (d) Geher mit Socken, (e) Norm-Hammerwerk (Theorie elastischer Stoß).

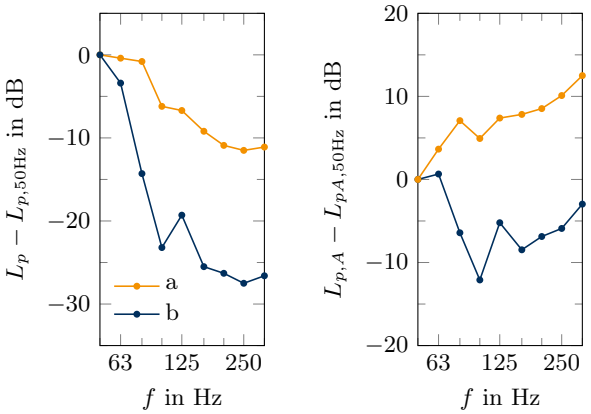

Abbildung 3: Gemessene Schalldruckpegel aus [16]. Links: (a) L_n für das Norm-Hammerwerk, (b) $L_{\mathrm{F,max}}$ für den Gummiball. Rechts: A-bewerte Spekren aus dem linken Diagramm.

werden soll. Dabei zeigt sich, dass auch die A-bewerteten Spektren des Geher immer noch ein im Mittel mit der Frequenz fallendes Spektrum aufweisen, wohingehen das Spektrum des A-bewerteten Norm-Trittschallpegels mit der Frequenz steigt.

Analyse von Übertragungsfunktionen

Vor allem im tiefen Frequenzbereich können Eigenfrequenzen der Decke oder Raummoden einen Einfluss auf den Trittschallpegel haben [17, 18]. Gemessene Übertragungfunktionen beinhalten alle Informationen von der Anregung bis zur Übertragung und Abstrahlung hin zum

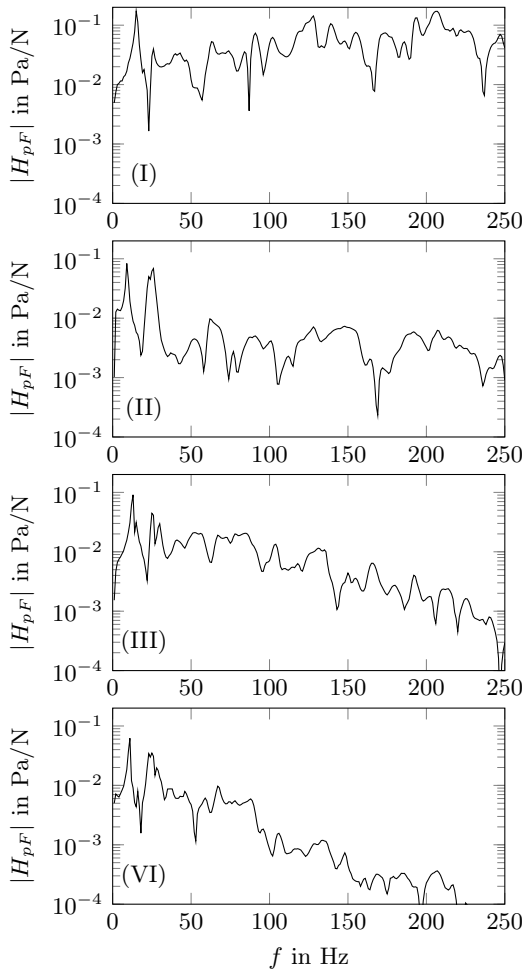

Abbildung 4: (I): Rohdecke, (II): Rohdecke plus Schüttung und Trockenestrich, (III): Rohdecke plus Unterdecke (Federschiene), (VI): Rohdecke plus Schüttung und Trockrenestrich und Unterdecke (Federschiene)

Schallfeld im Empfangsraum. An einem Prüfaufbau einer Holzbalkendecke mit vier verschiedenen Aufbauten wurden Übertragungsfunktionen gemessen (Abbildung 4). Dabei ist bei allen vier Varianten die erste Biegeeigenmode der Decke zu erkennen die sich durch die zusätzlichen Aufbauten hin zu tieferen Frequenzen verschiebt. Bei ≈26 Hz tritt auch bei allen Daten eine Spitze auf die einer Raummode im Empfansraum zugeordnet werden kann. Bei ≈40 Hz ist der Einfluss von Deckenmoden quer zur Balkenrichtung zu erkennen der sich bei den Varianten mit zusätzlichen Aufbauten nicht (2 und 4) bzw. nicht so deutlich (3) zeigt. Die Unterdecke ist bei (3 und 4) im Bereich von ≈80 Hz erkennbar.

Anwendung von Übertragungsfunktionen

Durch die Trennung von Quelle und Gebäude kann unter Kenntnis der relevanten Eingangsdaten der Schalldruckpegel nach Gleichung (4) berechnet werden.

$$p = F_\mathrm{b} \, \frac{|\underline{Y}_\mathrm{S}|}{|\underline{Y}_\mathrm{S} + \underline{Y}_\mathrm{R}|} \, H_{pF} \tag{4}$$

Für den Fall, dass die Quelladmittanz wesentlich höher als die Strukturadmittanz der Decke ist, kann der Anpassungsterm vernachlässigt werden und der Schalldruck

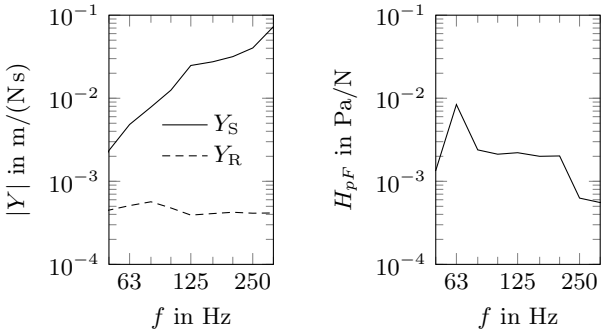

Abbildung 5: Links: Admittanz des Gummiballs (aus [19]) und Admittanz der Decke. Rechts: gemessene Übertragungsfunktion

kann nach Gleichung (5) berechnet werden.

$$p = F_\mathrm{b} \, H_{pF} \tag{5}$$

Die gemessene Übertragungsfunktion wird nun verwendet um beispielhaft für den Gummiball den Schalldruck nach den Gleichungen (4) und (5) zu berechnen. Für die blockierte Kraft wird dabei die Messung aus [15] (siehe Abbildung 2) verwendet. Die Strukturadmittanz wurde auf dem Deckenaufbau gemessen. Es wäre an dieser Stelle aber auch denkbar, die charakteristische Admittanz aus den Materialeigenschaften des Trockenestrichs anzusetzen. Die Quelladmittanz wurde von Susumu Hirakawa [19] zur Verfügung gestellt. Die relevanten Eingangsdaten sind in Abbildung 5 dargestellt. Abbildung 6 zeigt den gemessenen und berechneten Schalldruckpegel. Dabei ist zu erkennen, dass zwischen den Berechbnungsvariaten quasi kein Unterschied zu erkennen ist, da die Quelladmittanz im betrachteten Frequenzbereich wesentlich höher ist. Das lässt auch vermuten, dass dies für andere Quellen auch für leichte Holzdecken mit schwimmendem Estrich zutrifft. Bei einem Zementestrich wäre von einer noch kleineren Struckturadmittanz auszugehen.

Beim Vergleich mit der Messung zeigt sich im Bereich von 125 Hz eine Abweichung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die gemessene Übertragungsfunktion nur die Kraft senkrecht zur Decke (in z-Richtung) beinhaltet. Sieht man sich jedoch die Messung der Kraftkomponenten des Balls auf der Holzbalkendecke an (Abbildung 6, so ist zu erkennen, dass in diesem Bereich auch von den Sensoren in x- und y-Richtung Kräfte in ähnlicher Größenordnung gemessen wurden. Die Übertragungsfunktion wurde durch eine reine Anregung der z-Komponente mit dem Hammer gemessen weshalb nur diese der Berechnung berücksichtigt wird.

Zusammenfassung

Die tieffrequente Trittschallübertragung gewinnt aktuell große Aufmerksamkeit. Dabei werden vermehrt ergänzende Messungen mit alternativen normativen Anregequellen wie dem Gummiball eingesetzt um üblichen Anregespektren beim Begehen der Decke nahe zu kommen. Alle Messungen sind jedoch Absolutmessungen des Schalldruckpegels für die jeweilige Quelle. Vor allem im Bereich der gebäudetechnischen Anlagen sind in den vergangenen

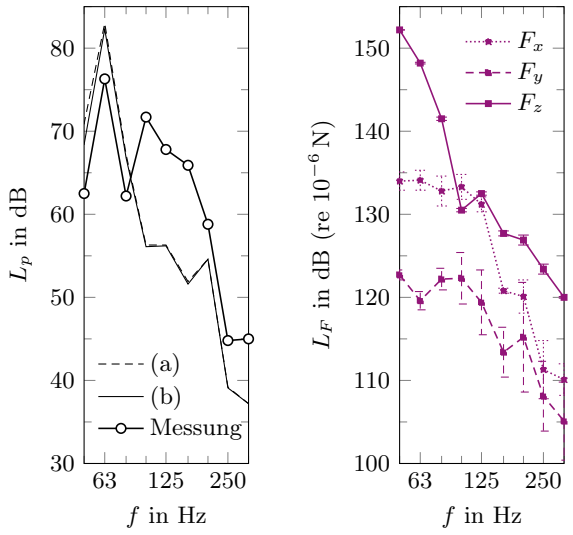

Abbildung 6: Links: gemessener Schalldruckpegel im Vergleich zur Berechnung nach (a) Gleichung (4) und (b) Gleichung (5). Rechts: Gemessene Kraftkomponenten des Gummiballs auf der Holzbalkendecke mit Schüttung und schwimmendem Trockenestrich [15]

Jahren vermehrt Übertragungsfunktionen in den Fokus gerückt. Diese erlauben eine Trennung der Quelle und der Übertragung im Gebäude. Somit kann unter Kenntnis der relevanten Eingangsdaten der Schalldruck für beliebige Quellen berechnet werden. Zudem bieten Übertragungsfunktionen vielfältige Möglichkeiten zum Beispiel zu detaillierten Analyse der Übertragung vor allem im tieffrequenten Bereich. Sie stehen dabei nicht in Konkurrenz zu den etablierten Messverfahren mit dem Norm-Hammerwerk, bieten jedoch eine ergänzende Möglichkeit zur Analyse. Weitere Anwendungszwecke können zum Beispiel auch die Auralisation von Gehgeräuschen sein, die in diesem Beitrag noch nicht gezeigt wurden.

Danksagung

Die Autoren danken Konstantin Möller [4], Johanna Weinzierl [15], Veronika Silberbauer [16] und Susumu Hirakawa [19] für die zur Verfügung gestellten Daten.

Literatur

[1] Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Hrsg.: DEGA Memorandum 0106 - Tieffrequente Schallübertragung von schwimmenden Estrichen. 2020

[2] Wolf, M.; Burkhart, C.: Vermeidungsstrategien und Ansätze einer Vermeidung des Estrichdröhnens. In: Fortschritte der Akustik - DAGA (14.–17. März 2016). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Aachen, 2016

[3] Langner, N. u. a.: Ursachen und Verbesserungspotenzial des Phänomens der tieffrequenten Trittschallgeräusche bei klassischen schwimmenden Estrichen auf Stahlbetondecken im Wohnungsbau. Kurzberichte aus der Bauforschung 3.4 (2015), S. 8–11

[4] Möller, K.: Tieffrequenter Trittschall – Ermittlung eines Bewertungskriteriums auf Basis akustischer Daten. Studienarbeit. Technische Hochschule Rosenheim, 2019

[5] Rabold, A. u. a.: Korrelation zwischen Geher und Norm-Hammerwerk bei der Trittschallübertragung. In: Fortschritte der Akustik - DAGA. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Düsseldorf, 2011

[6] Hagberg, K. G.: Acoustic requirements vs experienced sound in wooden structures. In: Proceedings of ICA 2019 (9.–13. Sep. 2019). Aachen, Germany, 2019

[7] Zeitler, B. u. a.: Tieffrequenter Trittschall – Stand der Wissenschaft und Technik. In: Fortschritte der Akustik - DAGA (16.–19. März 2020). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Hannover, 2020

[8] Rabold, A. u. a.: Modelling the excitation force of a standard tapping machine on lightweight floor structures. Journal of Building Acoustics 17.3 (2010), S. 175–197

[9] DIN EN ISO 10848-1:2018-02: Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall, Trittschall und Schall von gebäudetechnischen Anlagen zwischen benachbarten Räumen im Prüfstand und am Bau: Teil 1: Rahmendokument

[10] Schöpfer, F. u. a.: Measurement of transmission functions in lightweight buildings for the prediction of structure-borne sound transmission from machinery. Acta Acustica united with Acustica 103 (2017), S. 451–464

[11] Villot, M.: Predicting In Situ Sound Levels Generated by Structure-Borne Sound Sources in Buildings. Acta Acustica united with Acustica 103.5 (2017), S. 885–886

[12] Olsson, J.; Linderholt, A.: Low frequency force to sound pressure transfer function measurements using a modified tapping machine on a light weight wooden joist floor. In: WCTE. Vienna, Austria, 2016

[13] DIN EN 15657:2017-10: Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen

[14] Zeitler, B.; Schneider, M.: Einfluss der Quellimpedanz auf die Trittschalldämmung bei tiefen Frequenzen. In: Fortschritte der Akustik - DAGA (19.–22. März 2018). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. München, 2018

[15] Weinzierl, J.: Messung und Vergleich von Kraftspektren unterschiedlicher Deckenanregungen. Studienarbeit. Technische Hochschule Rosenheim und Hochschule für Technik Stuttgart, 2021

[16] Silberbauer, V. E.: Analyse der Trittschalldämmung von Holzbalkendecken bei Anregung durch stationäre und instationäre Schallquellen. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Rosenheim, 2019

[17] Burkhart, C.: Tieffrequenter Trittschall - Messergebnisse, Mögliche Ursachen. In: Fortschritte der Akustik - DAGA. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Bochum, 2002

[18] Burgenmeister, J.: Einfluss von Struktur- und Raummoden auf die tieffrequente Trittschallübertragung einer Massivdecke mit schwimmendem Estrich. Bachelorarbeit. Hochschule für Technik Stuttgart, 2011

[19] Hirakawa, S.: Prediction of impact sound transmission with heavy impact sources in heavyweight buidlings. PhD thesis. Liverpool: University of Liverpool, 2018