

Übertragungsfunktionen im Holzbau

Fabian Schöpfer¹, Andreas R. Mayr¹, Ulrich Schanda¹

¹ Labor für Schallmesstechnik, Hochschule Rosenheim, Email: fabian.schoepfer@fh-rosenheim.de

Einleitung

Zum Nachweis des gesetzlich geforderten Schallschutzes bei haustechnischen Anlagen ist die Kenntnis der von diesen Anlagen ausgehenden Schallemissionen und deren Übertragung im Gebäude erforderlich. Hierfür steht mit der DIN EN 12354-5:2009-10 [1] ein validiertes Berechnungsverfahren zur Verfügung, das derzeit aber nur im Massivbau anwendbar ist. Für den Holzbau fehlen entsprechende Planungshilfen derzeit noch gänzlich. Aufbauend auf bestehenden Ansätzen wurde das Konzept von Übertragungsfunktionen aufgegriffen, um ein praxistaugliches, tabellarisches Ingenieurverfahren zu entwickeln. Hierfür wurde das Projekt *Übertragungsfunktionen im Holzbau* im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau beantragt, das nun seit Ende 2016 an der Hochschule Rosenheim bearbeitet wird. Der Schwerpunkt des Projektes liegt in der messtechnischen Erfassung von Übertragungsfunktionen in Holzhäusern, um die Basis für das angestrebte empirische Verfahren zu legen. Durch die Beteiligung von vier Partnern aus der Holzbaubranche mit unterschiedlichen Unternehmensschwerpunkten werden verschiedene Holzbaukonstruktionen und Gebäudetypen abgedeckt. Die vorgeschlagenen Messverfahren wurden kürzlich in der DIN EN ISO 10848-1:2018-02 [2] aufgenommen und dienen als Grundlage zur Erfassung der Daten auch über dieses Projekt hinaus. In diesem Beitrag wird dieses Projekt vorgestellt und Zwischenergebnisse präsentiert.

Motivation und Ziel

Die normativen Werkzeuge zur Prognose des von haustechnischen Anlagen verursachten Schalldruckpegels basieren auf dem Konzept der Trennung von Quelle und Gebäude. Die Körperschallemission von Geräten wird im Rahmen der Quellencharakterisierung unabhängig vom Gebäude untersucht. Hierfür stehen in der kürzlich veröffentlichten, überarbeiteten Version der DIN EN 15657:2017-10 [3] Verfahren zur Verfügung. Diese Norm beschreibt auch die Bestimmung der Körperschalleistung, welche in einer definierten Einbausituation übertragen wird. Dieser sogenannte installierte Körperschalleistungspegel, $L_{W,inst}$ dient als Eingangsgröße für die Prognose der Übertragung im Gebäude.

Für haustechnische Geräusche sind Mindestanforderungen in der ebenfalls kürzlich erschienenen Überarbeitung der DIN 4109-1:2018-01 [4] an maximal zulässige A-bewertete Schalldruckpegel, $L_{AF,max}$, definiert.

Der für die Prognose der Übertragung relevante Teil 5 der EN 12354 befindet sich seit 2017 in Überarbeitung, wobei ein wesentliches Ziel die Ausweitung der Anwendbarkeit auf den Leichtbau ist. Hier sind verschiedene An-

sätze denkbar, die von Villot [5] zusammenfasst wurden. Dabei wurde auch der Vorschlag aufgegriffen, die Gesamtübertragung global durch Übertragungsfunktionen zu beschreiben, welcher im Rahmen des vorliegenden Projektes verfolgt wird. Die entsprechenden Vorarbeiten in Bezug auf das Messverfahren sind ausführlich in [6] bzw. in der DIN EN ISO 10848-1:2018-02 [2] beschrieben.

Neben weiterführenden Untersuchungen zur Körperschallanregung ist das wesentliche Ziel des Projektes die zeitnahe Entwicklung eines praxistauglichen Verfahrens, um den Schalldruckpegel in schutzbedürftigen Räumen in Holzbauten, induziert durch haustechnische Anlagen, abschätzen zu können. Die Grundlage stellen dabei gemessene Übertragungsdaten dar, die im Rahmen von Gebäudemessungen ermittelt werden. Um verschiedene Konstruktionsvarianten abzubilden, wird das Projekt mit vier Partnern aus dem Holzbaubereich bearbeitet, welche die entsprechenden Gebäude für Messungen bereitstellen.

Definition: Transmission function, D_{TF}

Die relevante Größe zur Beschreibung der Gesamtübertragung ist in der DIN EN ISO 10848-1:2018-02 [2] als *transmission function*, D_{TF} , definiert. Für eine Anregung am Punkt k , gilt

$$D_{TF,k} = L_{av,k} - L_{W,k} \quad (1)$$

wobei $L_{W,k}$ der Pegel der eingebrachten Leistung am Anregungspunkt k ist. $L_{av,k}$ ist der räumlich gemittelte Schalldruckpegel in einem Empfangsraum für die Punktanregung mit $L_{W,k}$ am Punkt k . Die Gesamtübertragung umfasst dabei alle beteiligten Übertragungswege von der Punktanregung bis zum räumlich gemittelten Schalldruckpegel im Empfangsraum.

Für mehrere Anregungspunkte K , kann eine mittlere Gesamtübertragung, $D_{TF,av}$, wie folgt berechnet werden:

$$D_{TF,av} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{k=1}^K 10^{0.1 D_{TF,k}}}{K} \right) \quad (2)$$

Durch den Bezug auf die Nachhallzeit ist die Gesamtübertragung als *standardized spatial-average transmission function*, $D_{TF,av,nT}$ definiert.

$$D_{TF,av,nT} = D_{TF,av} - 10 \lg \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (3)$$

dabei ist T die Nachhallzeit im Empfangsraum und T_0 die Bezugsnachhallzeit von 0.5 s. In gleicher Weise kann die äquivalente Absorptionsfläche A_{eq} herangezogen werden um eine *normalized spatial-average transmission function*, $D_{TF,av,n}$, zu bestimmen.

Gebäudemessungen

Unter Anwendung des oben beschriebenen Verfahrens wurden Übertragungsfunktionen in Gebäuden in Holzbauweise gemessen. Bisher wurden Messungen in neun Gebäuden durchgeführt, wobei acht in Holzrahmenbauweise und eines in Holzmassivbauweise mit Außenbauteilen in Rahmenbauweise ausgeführt sind. Die Objekte umfassten fünf Einfamilienhäuser, zwei Bürogebäude, ein Wohnhaus mit mehreren Wohneinheiten sowie ein Gästehaus.

Um Daten für das angestrebte empirische Modell abzuleiten, wurden ähnliche Übertragungswege unabhängig vom konstruktiven Aufbau der beteiligten Bauteile gruppiert. Abbildung 1 zeigt sechs Gruppen für verschiedene Übertragungswege. Dabei sind die Daten unter 50 Hz nach Gleichung (2) berechnet. Im und oberhalb des 50 Hz Terzbandes sind die Ergebnisse nach Gleichung (3) dargestellt. Wie in [6] beschrieben, wird im Rahmen der Gebäudemessungen auf eine Anregung mit einem Modalhammer zurückgegriffen. Es konnte gezeigt werden, dass mit transienter und stationärer Anregung die selben Ergebnisse erzielt werden. Durch die Anregung mit dem Modalhammer ist aufgrund des Anregungsspektrums der Frequenzbereich nach oben limitiert. In diesem Fall werden die gemessenen Daten bis 1000 Hz ausgewertet [siehe 6]. Da die maßgeblichen Anregungskomponenten von typischen gebäudetechnischen Anlagen bei tiefen Frequenzen liegen, ist der Frequenzbereich über 1000 Hz aus bisheriger Erfahrung vernachlässigbar. Die Übertragungsfunktionen wurden ab 20 Hz ausgewertet. Hierzu wurden Eckpegel mitgemessen und wie in [6] beschrieben gewichtet.

Aufbauend auf diese Daten sind in Abbildung 2 Spektren dargestellt, welche die sechs Gruppen aus Abbildung 1 qualitativ repräsentieren. Diese vereinfachten Spektren stehen dabei jeweils tendenziell für den ungünstigen Fall, sie orientieren sich deshalb am 75 %-Quantil der in Abbildung 1 abgebildeten Daten. Liegen wie in Gruppe (c) nur zwei Datensätze vor, wurde der größere verwendet.

Es ist zu sehen, dass die horizontale Übertragung bei Wänden mit Einfachständerwerk (a) ohne und (b) mit Vorsatzschale im Frequenzbereich von 63 Hz bis 125 Hz sehr ähnlich ist. Wie erwartet ist durch die zusätzliche Vorsatzschale, die ebenfalls in Holzrahmenbauweise konstruiert ist, bei hohen Frequenzen eine Verbesserung erkennbar. Je nach Ausbildung der Entkopplung der Vorsatzschale kann bei tiefen Frequenzen eine Verschlechterung eintreten.

Die direkte Übertragung über Kommunwände mit getrenntem Ständerwerk (c) weist im tiefen Frequenzbereich geringfügig niedrigere und damit günstigere Werte im Vergleich zum Einfachständerwerk auf. Hier ist auch die Masse-Feder-Masse Resonanz des Doppelwandsystems die limitierende Eigenschaft. Zu hohen Frequenzen ist eine deutliche Verbesserung aufgrund der getrennten Ständerwerke erkennbar.

Diagonale (d) und vertikale Übertragung (e) in Gebäuden mit Einfachständerwerk weisen generell ein sehr ähn-

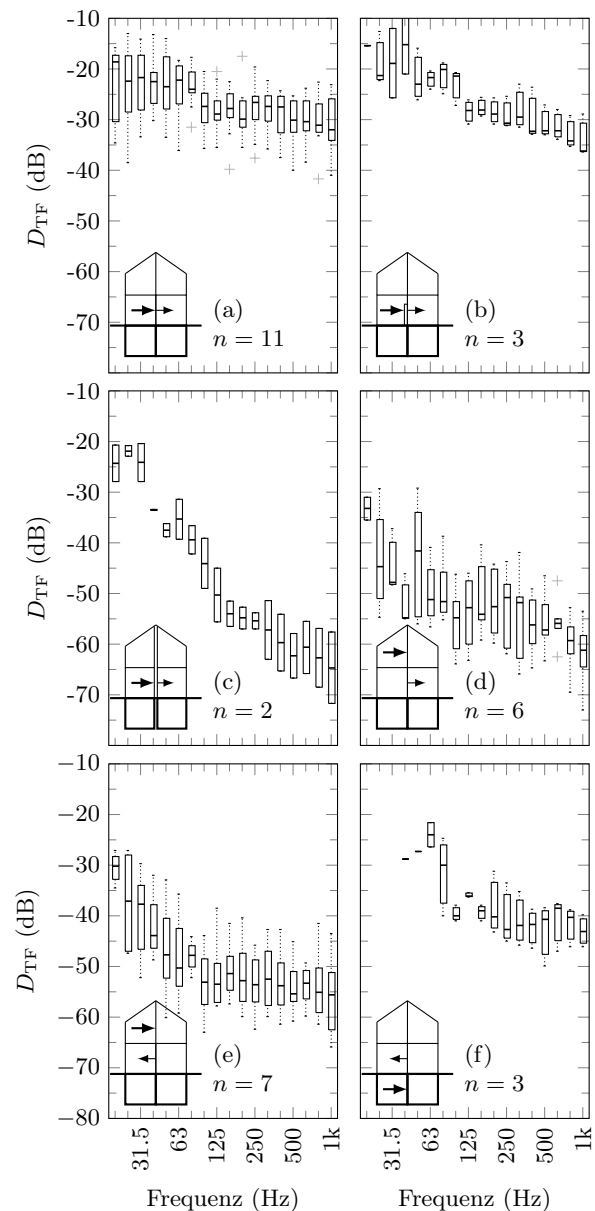


Abbildung 1: Übersicht über gemessene Übertragungsfunktionen im Holzrahmenbau.

liches Verhalten auf. Die Werte der vertikalen Übertragung liegen allerdings tendenziell höher, da der Übertragungsweg auf die gegenüberliegende Wandseite entfällt.

Gruppe (f) zeigt Daten für die Übertragung von massiven Kellerwänden (Beton oder Mauerwerk) auf diagonalem oder vertikalem Weg in die Holzrahmenkonstruktion im Erdgeschoss. Hier sind bei tiefen Frequenzen keine Daten vorhanden, da die schweren Wände nicht ausreichend angeregt werden konnten um genügend Signal-zu-Rausch-Abstand für die Schalldruckmessung zu erzielen. Die vorhandenen Daten weisen im Vergleich zur diagonalen und vertikalen Übertragung in reiner Holzrahmenkonstruktion (Gruppe (d) und (e)) relative hohe Werte auf. Hier ist zu berücksichtigen, dass D_{TF} mit der installierten Leistung gebildet wird, wodurch nur die Körperschallübertragung im Gebäude, unabhängig von der Anregbarkeit der Wände oder Decken beschrieben

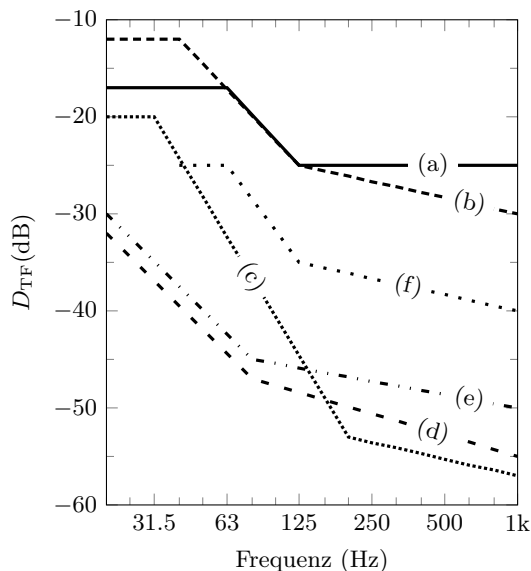


Abbildung 2: Qualitative, zusammengefasste Spektren der sechs in Abbildung 1 gezeigten Messdaten.

wird. Die deutlich niedrigere Anregbarkeit (Admittanz) der Kellerwände im Vergleich zu Holzrahmenbauwänden kommt deshalb hier nicht zu tragen. Dies wird im folgenden Beispiel verdeutlicht.

Anwendung an einem fiktiven Beispiel

In diesem Abschnitt wird die Anwendung der gemessenen und qualitativ zusammengefassten Übertragungsdaten aus Abbildung 2 anhand einer fiktiven Quelle beschrieben.

Wie zum Beispiel in [7] oder [8] ersichtlich, weisen typische gebäudetechnische Geräte Anregespektren mit maßgeblichen Komponenten bei tiefen Frequenzen auf. Für die Aktivität (hier die freie Schnelle v_f) der fiktiven Quelle wurde aus diesem Grund ein mit der Frequenz abfallendes Spektrum gewählt (siehe Abbildung 3 links), das gemäß bisheriger Erfahrung im Bereich üblicher Geräte liegt. Für die Admittanz der Quelle wurde ein frequenzunabhängiger Wert von $1 \times 10^{-4} \text{ m}/(\text{N s})$ gewählt. Dies entspricht in etwa der Größenordnung eines kompakten, wandhängenen Lüftungsgerätes wie in [8] gezeigt.

In Abhängigkeit der Empfangsstruktur kann nun für diese Quelle nach Gleichung (4) [siehe 3] die installierte Leistung berechnet werden.

$$L_{W,\text{inst}} = \left[10 \lg \left(\frac{\text{Re}\{Y_{R,\text{eq}}\} Y_0}{|Y_{S,\text{eq}}|^2 + |Y_{R,\text{eq}}|^2} \right) \right] \text{dB} + L_{vf} - 60 \text{ dB} \quad (4)$$

Dabei ist L_{vf} der Pegel der freien Schnelle von der fiktiven Körperschallquelle und $Y_{S,\text{eq}}$ deren Admittanz (Source). Dies entspricht dabei der Näherung, dass die Quelle einen äquivalenten Kontaktpunkt mit der Struktur hat. Entsprechend ist $Y_{R,\text{eq}}$ die Admittanz der Empfangsstruktur an diesem Punkt. (Receiver) und Y_0 die Bezugsadmittanz von $1 \text{ m}/(\text{N s})$.

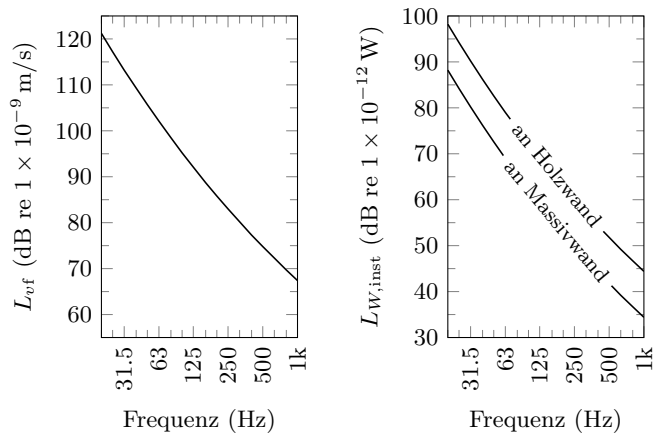


Abbildung 3: Daten der fiktiven Quelle. Links: Pegel der freien Schnelle, L_{vf} . Rechts: Installierter Körperschallleistungspegel, $L_{W,\text{inst}}$, der Quelle mit $Y_S = 1 \times 10^{-4} \text{ m}/(\text{N s})$ an einer Holzrahmenbauwand ($Y_R = 1 \times 10^{-4} \text{ m}/(\text{N s})$) sowie an einer Massivwand ($Y_R = 5 \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{N s})$).

In Abbildung 3 ist die installierte Leistung $L_{W,\text{inst}}$ für zwei verschiedene Empfangsstrukturen dargestellt. Dabei entspricht eine Admittanz von $1 \times 10^{-4} \text{ m}/(\text{N s})$ in der Größenordnung einer Holzständerwand im Bereich der Wandriegel [siehe z.B. 9] und $5 \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{N s})$ einer Massivwand (z.B. 10 cm Betonplatte, [siehe z.B. 3]). Dabei ist erkennbar, dass der installierte Körperschallleistungspegel für die gleiche Quelle an einer schweren Massivwand geringer ist.

Die installierte Leistung dieser fiktiven Quelle dient nun als Eingangsgröße um durch Umstellen von Gleichung (1) den Schalldruckpegel in den Übertragungssituationen aus Abbildung 2 zu berechnen. Dabei wurde für die Gruppen (a) bis (e) die installierte Leistung an einer Holzrahmenbauwand verwendet, da hier das angeregte Bauteil ebenfalls eine Wand in Holzbauweise war. Für die Gruppe (f) wurde die installierte Leistung an einer Massivwand verwendet, da diese Übertragungssituation von einem Sendebauteil im Keller, also einer Mauerwerks- oder Betonwand ausgeht. Die resultierenden Schalldruckpegel für die sechs Gruppen sind in Abbildung 4 als A-bewertete Spektren dargestellt.

Hierbei ist zu sehen, dass für die gleiche Körperschallquelle bei der Übertragung vom massiven Kellergeschoss ins Erdgeschoss in Holzrahmenbauweise (f) ein ähnlicher Schalldruckpegel zu erwarten ist als bei der Übertragung über ein Geschoss in reiner Holzbauweise (Gruppe (d) und (e)), obwohl die Übertragungsfunktionen deutlich voneinander abweichen, wie dies in Abbildung 2 ersichtlich ist.

Zur weiteren Vergleichbarkeit wurde der A-bewertete Summenpegel von 20 Hz bis 1000 Hz für die Gruppen (a) bis (e) berechnet. Dabei ist zu sehen, dass für die horizontale Übertragung mit Vorsatzschale durch mögliche Resonanzen bei tiefen Frequenzen ein höherer A-bewerteter Summenpegel resultiert als ohne Vorsatzschale. Für ein getrenntes Ständerwerk liegt der Summenpegel für

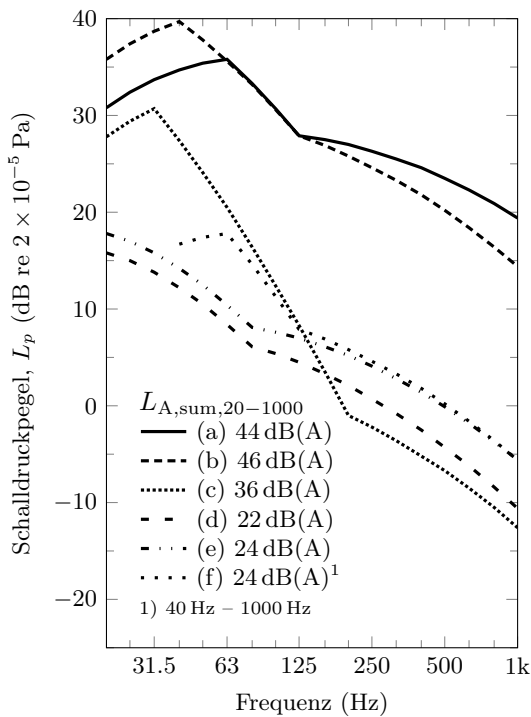


Abbildung 4: Resultierende A-bewertete Schalldruckpegel für eine fiktive Quelle (siehe Abbildung 3) in den in Abbildung 2 dargestellten Übertragungssituationen.

diese Quelle mit starken tieffrequenten Anteilen um etwa 10 dB unter dem Wert für ein Einfachständerwerk. Die A-bewerteten Summenpegel für die Übertragung über ein Geschoss (diagonal oder vertikal) liegen für die gewählte fiktive Quelle etwa 20 dB unter dem Summenpegel bei horizontaler Übertragung über eine Wand mit Einfachständerwerk. Für Gruppe (f) liegt mit 24 dB(A) der kleinste A-bewertete Summenpegel vor. Dabei ist allerdings zu beachten, dass dieser im Frequenzbereich von 40 Hz bis 1000 Hz gebildet wurde, da aufgrund des zu geringen Signal-zu-Rausch-Abstandes in den Terzbändern unter 40 Hz keine Daten für D_{TF} zur Verfügung standen.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde das derzeit an der Hochschule Rosenheim laufende Projekt *Übertragungsfunktionen im Holzbau* vorgestellt. Das maßgebliche Ziel dieses Projektes besteht darin, die Grundlagen für ein empirisches Prognosemodell basierend auf gemessenen Übertragungsfunktionen (*transmission functions*, D_{TF}) zu legen. Erste Zwischenergebnisse der bisher durchgeführten Gebäudemessungen geben einen ersten Überblick typischer Übertragungssituationen für Gebäude in Holzbauweise. Auf dieser Grundlage wurden qualitativ repräsentative Übertragungsfunktionen für ähnliche Übertragungswege abgeleitet, welche den aktuellen Datensatz abbilden. Diese wurden herangezogen, um für eine fiktive Körperschallquelle einen A-bewerteten Schalldruckpegel zu bestimmen. Ohne Bewertung der absoluten Pegel, zeigt der Vergleich der A-bewerteten Summenpegel der Übertragungssituationen untereinander doch erste interessante Ergebnisse auf.

Im weiteren Projektverlauf wird der bestehende Datensatz in Kooperation mit den beteiligten Industriepartnern noch weiter ausgebaut. Dadurch sollen weitere Gruppen von Übertragungsfunktionen erstellt oder bestehende Gruppen weiter verfeinert werden. Dabei liegt der Fokus verstärkt auf Übertragungssituationen mit Wohneigentumstrennung. Desweiteren ist geplant, die Anregung auf massiven Bauteilen zu optimieren, um auch hier bei tiefen Frequenzen Übertragungsdaten messen zu können.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde im Rahmen des Forschungsprojektes *Übertragungsfunktionen im Holzbau*, gefördert vom Bundesamt für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) in der Förderinitiative Zukunft Bau (Förderkennzeichen: SWD-10.08.18.7-16.39), erarbeitet. Die Autoren danken den Projektpartnern Bau-Fritz GmbH & Co. KG, Huber & Sohn GmbH & Co. KG, Regnauer Hausbau GmbH & Co. KG, Züblin Timber Aichach GmbH. Dank gilt auch der Firma Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH für die Unterstützung in der Messtechnik.

Literatur

- [1] DIN EN 12354-5:2009-10: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 5: Installationsgeräusche
- [2] 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
- [3] DIN EN 15657:2017-10: Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen
- [4] DIN 4109-1:2018-01: Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderung
- [5] 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
- [6] 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
- [7] Scheck, J. u. a.: Messung und Prognose der Luft- und Körperschallübertragung von gebäudetechnischen Anlagen im Massivbau. In: Fortschritte der Akustik - DAGA. (14.–17. März 2016). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Aachen, 2016
- [8] Schöpfer, F. u. a.: Ansätze zur Prognose des Installationspegels im Holz-Leichtbau. In: Fortschritte der Akustik - DAGA. (6.–9. März 2017). Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Kiel, Germany, 2017
- [9] Mayr, A. R.; Gibbs, B. M.: Approximate method for obtaining source quantities for calculation of structure-borne sound transmission into lightweight buildings. *Applied Acoustics* 110 (2016), S. 81–90