

# **Prognose von Körperschall aus haustechnischen Anlagen – ein robustes und einfaches Tabellenverfahren für den Holzbau**

Fabian Schöpfer  
Technische Hochschule Rosenheim  
Rosenheim, Deutschland





# Prognose von Körperschall aus haustechnischen Anlagen – ein robustes und einfaches Tabellenverfahren für den Holzbau

## 1. Einleitung

Neben der verbreiteten Anwendung für Einfamilienhäuser eröffnen sich für den Holzbau durch die Weiterentwicklung der konstruktiv-technischen Lösungen, aber auch aufgrund einer Ausweitung von baulichen Reglementierungen neue Märkte, zum Beispiel im mehrgeschossigen Wohnungsbau im urbanen Raum. Zudem gewinnt der Holzbau auch in der Gesellschaft als zukunftsweisende, nachhaltige und energiesparende Bauweise wachsenden Zuspruch. Dennoch bleibt ein hoher Wohn- und Arbeitskomfort neben den Aspekten der Nachhaltigkeit und Energieeffizienz ein wesentliches Qualitätskriterium. Hier spielt der bauliche Schallschutz eine tragende Rolle. Allerdings sind in Niedrigenergie- und Passivhauskonzepten meist gebäudetechnische Anlagen erforderlich, die im Betrieb ungewollte Geräuschemissionen verursachen können. Bei zentralen heiztechnischen Anlagen oder einer Wohneinheitentrennung ist der Schallschutz nicht nur gewünscht sondern auch geschuldet [1]. Aber auch im eigenen Wohnbereich gibt es Empfehlungen für maximale Schalldruckpegel [2, 3, 4] erzeugt durch heiztechnische Anlagen in der eigenen Wohnung [1]. Aus diesen Gründen ist es bereits in der Planungsphase notwendig, den zu erwartenden Schalldruck berechnen zu können.

Da Geräte und Anlagen mit der Gebäudestruktur verbunden sind, können sie zusätzlich zum abgestrahlten Luftschall vom Gerätegehäuse auch direkt Vibrationen (Körperschall) in das Gebäude einleiten. Der Luft- und Körperschallanteil kann bei der Berechnung der Schallübertragung separat betrachtet werden. Der resultierende Schalldruckpegel ergibt sich dann aus der energetischen Summe der beiden Komponenten. In leichten Gebäudestrukturen ist dabei der anteilige Schalldruckpegel, verursacht durch Körperschallanregung, meist maßgeblich.

Die Beschreibung der Körperschalleinleitung und -übertragung ist im Vergleich zur Luftschallübertragung ungleich komplizierter, da die strukturdynamischen Eigenschaften von Quellen und Empfangsstrukturen in die Berechnung eingehen und zusätzlich deren Wechselwirkung berücksichtigt werden muss. Vor dem Hintergrund dieser Komplexität gibt es bisher nur erste Ansätze für Berechnungsmethoden die im Sinne einer praktikablen und effizienten Schallschutzplanung sind. Umfassend validierte und standardisierte Prognosewerkzeuge sind bisher leider nicht vorhanden.

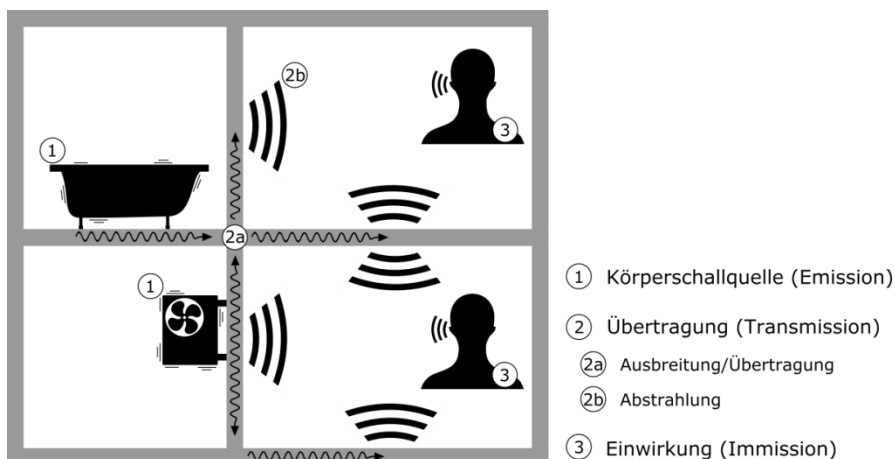


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Gesamtübertragung von der Quelle bis zur Einwirkung.

Dieser Beitrag zeigt die Weiterführung der bereits 2017 auf diesem Forum vorgestellten Arbeit [5]. 2017 wurde ein empirischer Ansatz zur Prognose vorgestellt. Dieser Ansatz basiert auf gemessenen Übertragungsdaten, sogenannten Übertragungsfunktionen, in Gebäuden in Holzbauweise. 2017 wurden erste Messdaten vorgestellt. Ergebnisse einer Fallstudie zeigten vielversprechende Ergebnisse. In der Zwischenzeit konnte dieser Ansatz durch eine Förderung der Forschungsinitiative Zukunft Bau weiterverfolgt werden. Nun werden die Ergebnisse von weiteren Gebäudemessungen ergänzend präsentiert und die Anwendung des Verfahrens anhand eines Beispiels aufgezeigt.

## 2. Theorie

### 2.1. Gesamtübertragung

Zur Prognose des Schalldruckpegels ausgehend von haustechnischen Anlagen ist es nötig den gesamten Übertragungsprozess zu beschreiben. Dabei sind sowohl die Kenntnis der Körperschallemission von der Quelle als auch die Kenntnis der Transmission in und durch die Gebäudekonstruktion notwendig. Zur Prognose wird die Emission und die Transmission durch das Gebäude separat behandelt (siehe Abbildung 2). Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz beschreibt dabei die Ausbreitung im Gebäude und Abstrahlung. Laborverfahren zur Bestimmung der benötigten Eingangsgröße, der installierten Körperschalleistung, sind in DIN EN 15657:2017-10 [6] beschrieben.

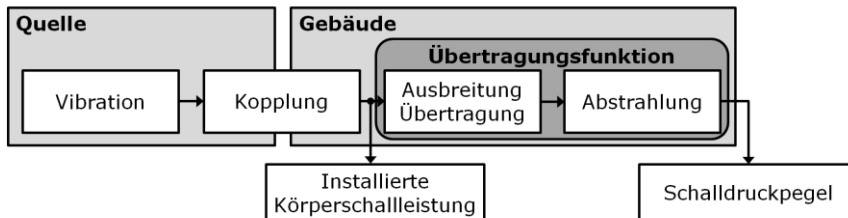


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Übertragungsprozesses.

### 2.2. Körperschalleistung als Eingangsgröße

Als Grundlage für das in Abschnitt 4 gezeigte Anwendungsbeispiel wird an dieser Stelle die Bestimmung der installierten Leistung,  $L_{W,inst}$ , kurz vorgestellt.

Die grundsätzliche Problemstellung dabei ist, dass die Anregung durch eine Körperschallquelle abhängig von der angekoppelten Struktur ist. Diese kann vor allem im Holzbau durch die Konstruktionsvielfalt stark variieren. Neben einer Größe zur Beschreibung der Quellaktivität, wird auch eine Größe benötigt, um die Kopplung zwischen Quelle und Struktur zu beschreiben. Die Aktivität der Quelle kann durch die Vibration an deren Ankopplungspunkten beschrieben werden, wenn die Quelle frei, also an keine Struktur angekoppelt ist. Diese Größe wird als Schwinggeschwindigkeit in (m/s) angegeben und als freie Schwinggeschwindigkeit,  $v_{sf}$  (in Pegelschreibweise  $L_{vf}$ ), bezeichnet. Für die Kopplung sind die mechanischen Admittanzen,  $Y$  (Einheit  $(m/s)N^{-1}$ , Kehrwert der mechanischen Impedanz) der Quelle und der Empfangsstruktur erforderlich. Die Methoden zur Bestimmung dieser Größen sind in DIN EN 15657:2017-10 beschrieben. Ausgehend davon kann die installierte Leistung nach Gleichung (1) berechnet werden.

$$L_{W,inst} = \left[ 10 \lg \left( \frac{\operatorname{Re}\{Y_{R,eq}\}}{|Y_{S,eq}|^2 + |Y_{R,eq}|^2} \right) \right] \text{dB} + L_{vf} - 60 \text{dB} \quad (1)$$

Die Indizes R und S stehen dabei für Receiver (Empfangsstruktur) und Source (Quelle). Der Index eq zeigt an, dass die Größen bei Quellen mit mehreren Kontaktpunkten auf einen äquivalenten, repräsentativen Wert reduziert sind.

## 2.3. Konzept Übertragungsfunktionen

Eine Übertragungsfunktion beschreibt das Verhältnis der Antwort eines Systems zur Systemanregung. Im Falle der Körperschallübertragung ausgehend von haustechnischen Anlagen wird die gesamte Übertragung durch das Gebäude von der Anregung bis zum Schalldruck dabei als «black-box» betrachtet. Aufgrund der Komplexität der Körperschallübertragung im Leichtbau stellt ein empirischer Ansatz basierend auf gemessenen Übertragungsfunktionen ein einfaches praktikables Verfahren dar, um eine Abschätzung des zu erwartenden Schalldruckes zu ermöglichen [siehe auch 10]. Im vorgestellten Ansatz wird der resultierende Schalldruck in Bezug zur installierten Leistung gesetzt.

Da sämtliche physikalischen Übertragungsmechanismen in der Übertragungsfunktion enthalten sind, ist diese zunächst einzigartig für jede Situation. Wenn es allerdings möglich ist, für gewisse Übertragungswege und Konstruktionsvarianten repräsentative Übertragungsfunktionen abzuleiten, könnte ein einfaches Werkzeug zur Abschätzung des zu erwartenden Schalldruckpegels basierend auf katalogisierten Daten geschaffen werden.

Aus diesem Grund wurde im Projekt «Übertragungsfunktionen im Holzbau» eine Vielzahl von Übertragungsdaten in Gebäuden in Holzbauweise messtechnisch erfasst. Dabei wurde das im folgenden Abschnitt beschriebenen Messverfahren verwendet.

## 2.4. Messung von Übertragungsfunktionen

Zur Bestimmung der Übertragungsfunktion wird die Gebäudestruktur mit einer bekannten oder definierten Kraft angeregt. Dies kann entweder durch einen Modalhammer oder einem Schwingerreger in Kombination mit einem Kraftsensor erfolgen. Parallel wird die Schwingungsantwort der Struktur an Anregungspunkt in Form der Schwingenschnelle gemessen, um die installierte Leistung dieser definierten Anregung berechnen zu können. Im Empfangsraum wird der Schalldruckpegel ebenfalls synchron erfasst. Durch mehrere Mikrofonpositionen wird ein räumlicher Mittelwert gebildet. Die Übertragungsfunktion kann dann in Pegelschreibweise einfach als Differenz für einen Anregepunkt  $k$  nach Gleichung (2) angegeben werden.

$$D_{TF,k} = L_{av,k} - L_{W,k} \quad (2)$$

Dabei ist  $D_{TF,k}$  die Übertragungsfunktion (Transmission function),  $L_{av,k}$  der räumlich gemittelte Schalldruckpegel im Empfangsraum und  $L_{W,k}$  der Pegel der installierten Leistung durch definierte Anregung. Kleine Werte für  $D_{TF,k}$  sind somit günstiger im Hinblick auf einen geringen resultierenden Schalldruckpegel.

Werden mehrere Anregepunkte,  $K$ , in einer Übertragungssituation erfasst, kann eine mittlere Übertragungsfunktion nach Gleichung (3) berechnet werden.

$$D_{TF,av} = 10 \lg \left( \frac{\sum_{k=1}^K 10^{0,1 D_{TF,k}}}{K} \right) \quad (3)$$

Zusätzlich können die Ergebnisse noch auf die raumakustischen Eigenschaften des Empfangsraumes nach Gleichung (4) normiert werden.

$$D_{TF,av,nT} = D_{TF,av} - 10 \lg \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (4)$$

Dabei ist  $T$  die gemessene Nachhallzeit und  $T_0$  die Bezugsnachhallzeit von 0,5 s.

Für eine ausführlichere Beschreibung des Verfahrens zur Ermittlung der Übertragungsfunktion sei an dieser Stelle auf [7 und 8] verwiesen.

## 3. Ergebnisse aus Gebäudemessungen

Im Rahmen von zwei Forschungsprojekten konnten bisher durch die Unterstützung der Industriepartner Messungen in insgesamt 19 Gebäuden durchgeführt werden. Dabei wurden sowohl Gebäude in Holzrahmenbau- als auch in Holzmassivbauweise betrachtet. Unter

den untersuchten Gebäuden waren elf Einfamilienhäuser, fünf Mehrfamilienhäuser zwei Bürogebäude sowie ein Sechsgeschoßer. Der gesamte Datensatz umfasst derzeit 120 Übertragungsfunktionen.

### 3.1. Kriterien zur Gruppierung

Um aus den Daten repräsentative Übertragungsfunktionen für ähnliche Situationen abzuleiten wurden folgende Kriterien herangezogen, um Gruppen zu bilden:

- Übertragungspfad (18 Varianten)
- Typ des angeregten Bauteils (7 Varianten)
- Konstruktion des angeregten Bauteils (9 Varianten)
- Vorsatzschale (3 Varianten)

Durch die Kombination dieser Kriterien ergeben sich für die vorliegenden Daten insgesamt 51 Kombinationen. Im nächsten Abschnitt werden exemplarisch 13 dieser Kombinationen gezeigt. Für diese 13 sind jeweils mindestens drei gemessene Übertragungsfunktionen vorhanden.

### 3.2. Gruppierte Datensätze

Im Folgenden werden Datensätze für folgende Übertragungssituationen gezeigt:

- Horizontale (direkte) Übertragung: Empfangsraum direkt hinter der angeregten Trennwand.
- Vertikale Übertragung: Empfangsraum über oder unter dem Raum in dem eine Wand angeregt wird.
- Diagonale Übertragung: Empfangsraum diagonal über oder unter der angeregten Wand.
- Übertragung vom Kellergeschoss (Anregung auf Betonwand) in darüber liegende Geschosse mit Holzbaukonstruktion.

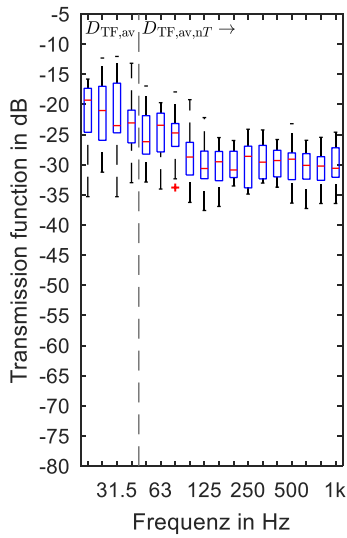
Aufgrund der noch geringen Stichprobengröße für jede Kombination wird die Darstellung mit Boxplots der Darstellung mit Mittelwert und Standardabweichung vorgezogen. Dabei stellt die Box den Interquartilsabstand und repräsentiert somit 50 % der Datensätze. Unter dem 50 Hz Terzband sind die Daten ohne Normierung auf die Nachhallzeit des Empfangsraumes dargestellt ( $D_{TF,av}$ , Gleichung (3)). Im und über dem 50 Hz Terzband sind die Daten normiert auf die Nachhallzeit dargestellt ( $D_{TF,av,nT}$ , Gleichung (4)). Unter den Abbildungen sind die Anzahl der für die jeweilige Gruppe vorhandenen Datensätze, die Zahl der Gebäude in denen diese erfasst wurden und die Zahl der Hersteller angegeben. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die volle Stichprobengröße nicht zwingend in jedem Terzband vorhanden ist, da zum Teil aufgrund von Grundgeräuscheinflüssen o.Ä. einzelne Terzbänder in der Datenauswertung verworfen werden mussten.

Abbildung 3 zeigt gruppierte Daten für horizontal/direkte Übertragung für vier verschiedene Trennwandkonstruktionen. Abbildung 4 zeigt gruppierte Daten für vertikale Übertragung wobei zwischen T- und X-Stößen als auch zwischen der Konstruktion des angeregten Bauteils unterschieden wird. Abbildung 5 zeigt Daten für diagonale Übertragung wobei zwischen X-Stößen und versetzten Stößen unterschieden wird. Abbildung 6 zeigt Daten für die Übertragung vom Kellergeschoss in darüber liegende Holzbaugeschosse. Dabei wird zwischen der Übertragung vom Kellergeschoss ins Erdgeschoss und vom Kellergeschoss ins erste Obergeschoss unterschieden.

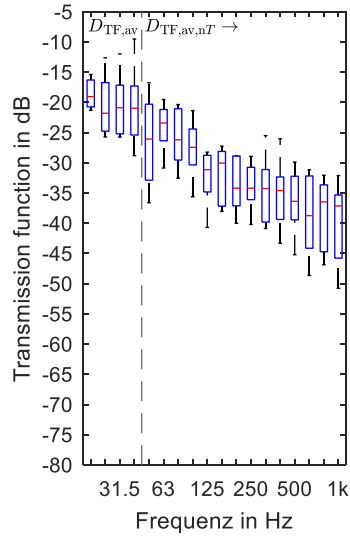
Aus den gezeigten Daten ist zu erkennen, dass der Interquartilsabstand in den einzelnen Gruppen zum größten Teil kleiner als 10 dB ist. Allerdings kann dieser in einzelnen Terzbändern auch bis zu 20 dB groß sein. Dennoch kann für jede Gruppe eine Charakteristik im Frequenzspektrum abgeleitet werden. So zeigt beispielsweise die horizontale Übertragung über eine Wand mit Einfachständerwerk ein leicht fallendes Spektrum bei tiefen- und mittleren Frequenzen, das zu hohen Frequenzen flacher wird. Für eine Doppelständerwand und direkter Übertragung zeigt sich ein stark fallendes Spektrum.

Auf dieser Grundlage wurden für jede Gruppe qualitativ charakteristische Spektren abgeleitet, die sich am 75% Quantil der Daten orientieren und somit tendenziell auf der sicheren Seite liegen.

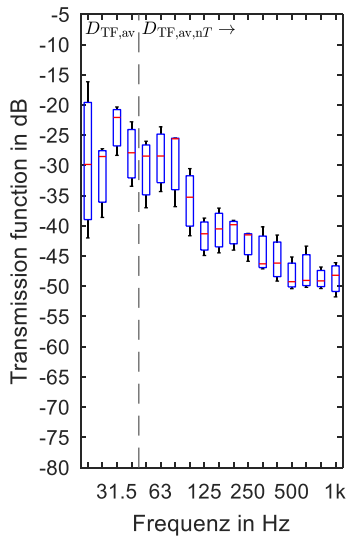
Diese qualitativen Spektren sind in Abbildung 7 für acht Gruppen dargestellt.



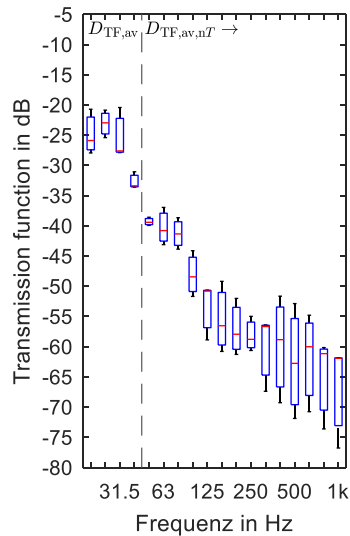
a) Einfachständerwerk, keine Vorsatzschale  
 Datensätze: 18  
 Gebäude: 11  
 Hersteller: 4



b) Einfachständerwerk, mit Vorsatzschale in Holzrahmenbauweise  
 Datensätze: 6  
 Gebäude: 6  
 Hersteller: 6

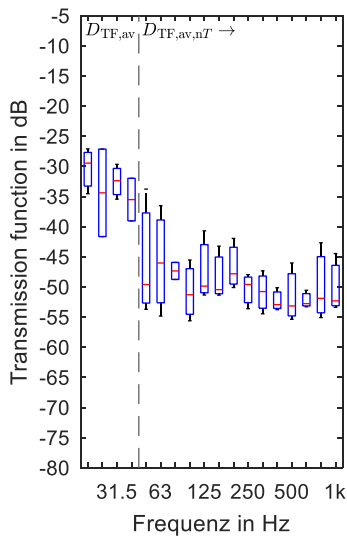


c) Einfachständerwerk mit (ggf. entkoppelter) Konterlattung  
 Datensätze: 3  
 Gebäude: 3  
 Herstellern: 3

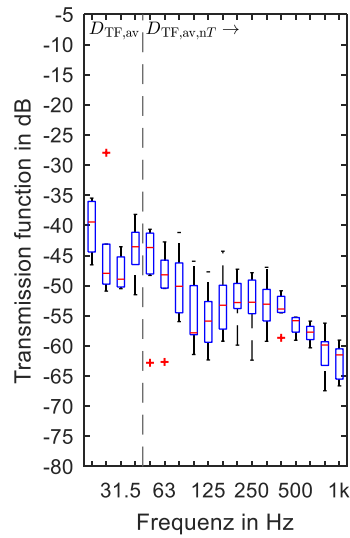


d) Wohnungstrennwand, getrennte Ständer  
 Datensätze: 3  
 Gebäude: 3  
 Hersteller: 3

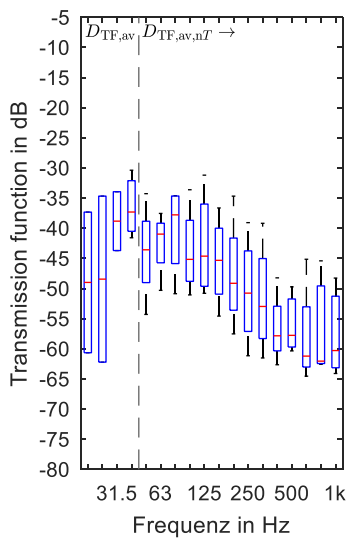
Abbildung 3: Übertragungspfad: Horizontal/direkt



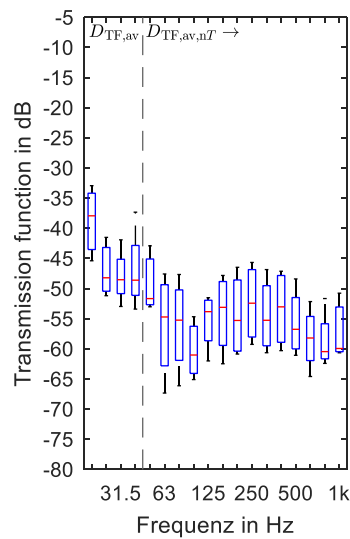
a) Außenwand Holzrahmenbauweise, keine Vorsatzschale  
 Datensätze: 3  
 Gebäude: 3  
 Hersteller: 1



b) Außenwand Holzrahmenbauweise mit Installationsebene  
 Datensätze: 7  
 Gebäude: 6  
 Hersteller: 2



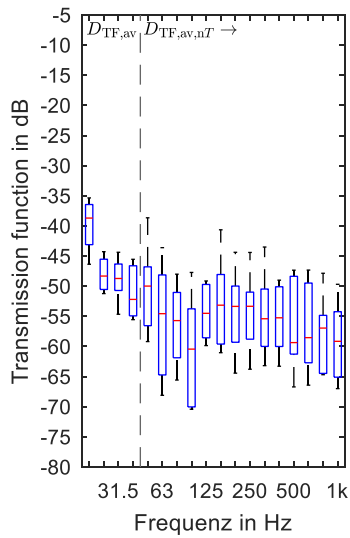
c) Außenwand Holzmassivbau, keine Vorsatzschale  
 Datensätze: 4  
 Gebäude: 4  
 Hersteller: 2



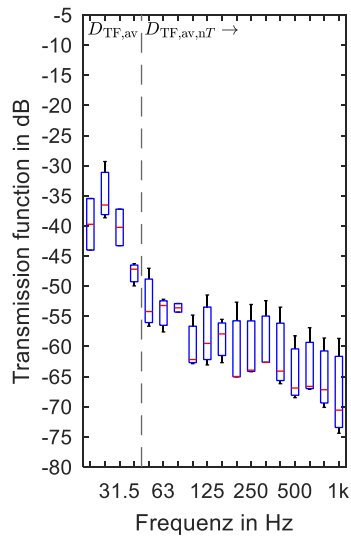
d) Innenwand (Kreuzstoß) Holzrahmenbauweise, keine Vorsatzschale  
 Datensätze: 4  
 Gebäude: 3  
 Hersteller: 1

Abbildung 4: Übertragungspfad: Vertikal

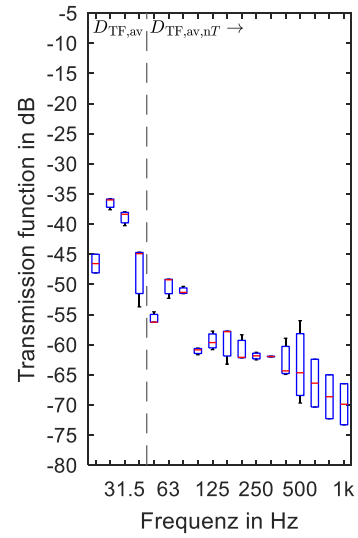




a) Kreuz-Stoß, Holzrahmen,  
keine Vorsatzschale  
Datensätze: 6  
Gebäuden: 6  
Hersteller: 4

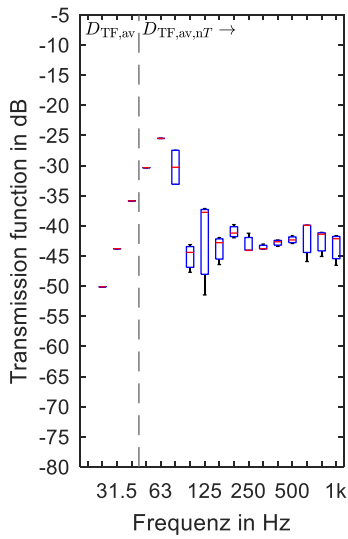


b) Versetzter Stoß, Holzrahmen,  
keine Vorsatzschale  
Datensätze: 3  
Gebäuden: 3  
Hersteller: 3

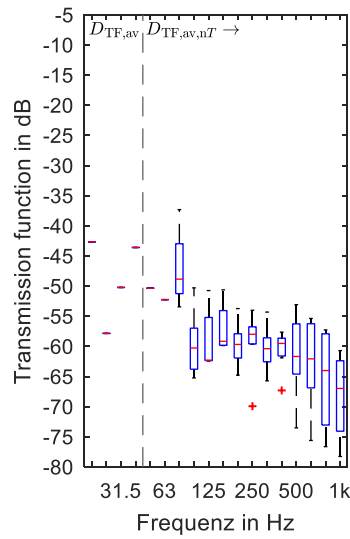


c) Versetzter Stoß, Holzrahmen,  
mit Vorsatzschale  
Datensätze: 3  
Gebäuden: 1  
Hersteller: 1

Abbildung 5: Übertragungspfad: Diagonal

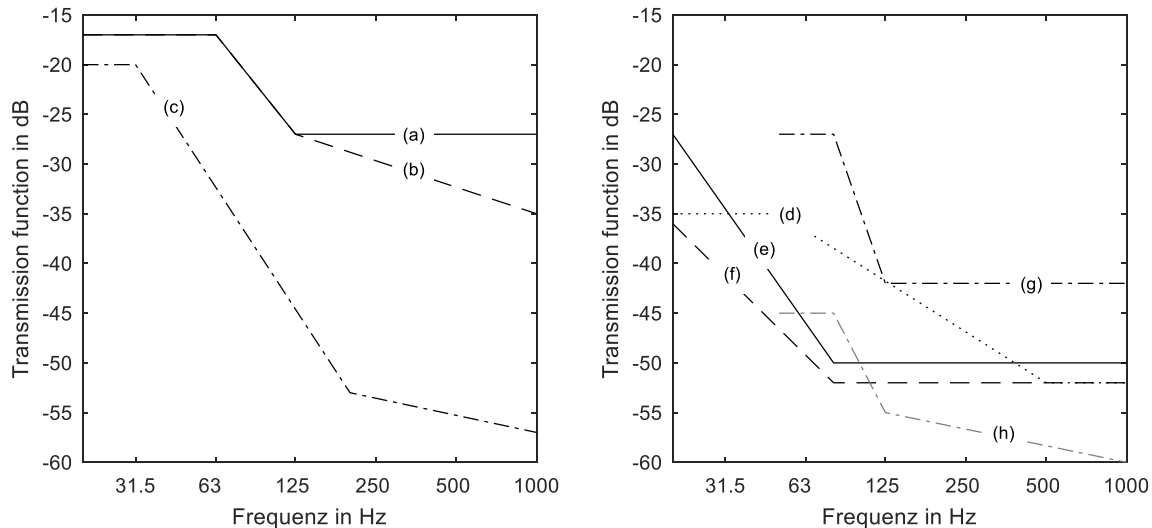


a) KG → EG, Anregung auf Außen-  
wand im Kellergeschoß  
Datensätze: 3  
Gebäude: 2  
Hersteller: 2



b) KG → 1. OG, Anregung auf Außen-  
wand im Kellergeschoß  
Datensätze: 9  
Gebäude: 5  
Hersteller: 3

Abbildung 6: Übertragungspfad: Vertikal vom Kellergeschoß in darüber liegende Geschosse in Holzbauweise. Anregung auf der Betonaußenwand im Kellergeschoß.



Übertragung horizontal/direkt:

- (a) Einfachständerwerk, keine Vorsatzschale (Abbildung 1a)
- (b) Einfachständerwerk, mit Vorsatzschale in Holzrahmenbauweise (Abbildung 1b)
- (c) Wohnungstrennwand, getrennte Ständer (Abbildung 1d)

Übertragung über ein oder mehrere Geschoße:

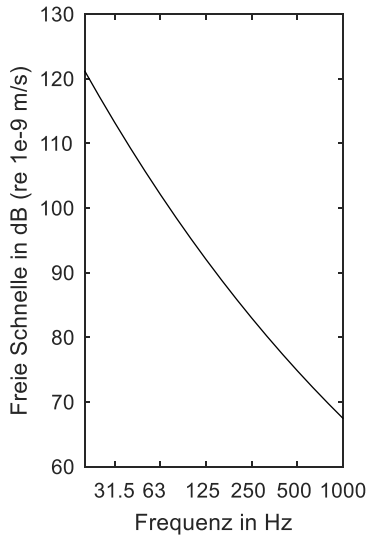
- (d) vertikal: Außenwand Holzmassivbau, keine Vorsatzschale (Abbildung 4c)
- (e) vertikal: Außenwand Holzrahmenbauweise, keine Vorsatzschale (Abbildung 4a)
- (f) diagonal: Kreuz-Stoß, Holzrahmen, keine Vorsatzschale (Abbildung 5a)
- (g) KG→EG (Abbildung 6a)
- (h) KG→EG (Abbildung 6b)

Abbildung 7: Qualitative, zusammengefasste Spektren basierend auf den gruppierten Datensätzen für acht exemplarische Situationen.

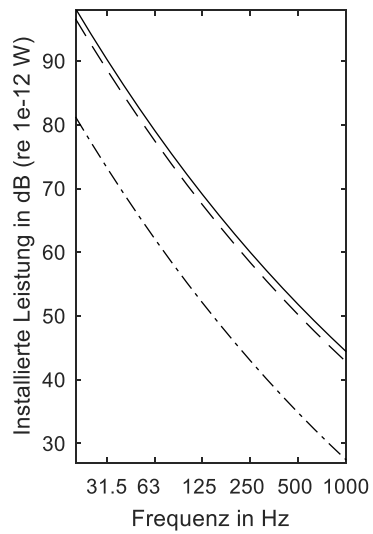
## 4. Anwendungsbeispiel

Die im vorherigen Abschnitt gezeigten qualitativen Spektren für einzelne Gruppen werden nun verwendet, um die Anwendung des empirischen Verfahrens am Beispiel vorzustellen. Hierfür wird eine fiktive Körperschallquelle verwendet. Da typische gebäude-technische Geräte Anregespektren mit maßgeblichen Komponenten im tieffrequenten Bereich aufweisen [11], wurde ein mit der Frequenz fallendes Spektrum der freien Schnelle gewählt (Abbildung 8 a)). Der Verlauf und die Größenordnung liegt erfahrungsgemäß im Bereich eines kompakten wandhängenden Gerätes. Für die Admittanz der Quelle wird ein frequenzunabhängiger Wert von  $1e-4 \text{ (m/s)N}^{-1}$  verwendet der ebenfalls in der Größenordnung eines kompakten wandhängenden Gerätes liegt.

In Abhängigkeit der Empfangsstruktur kann nach Gleichung (1) die installierte Leistung in der jeweiligen Situation berechnet werden. Hier werden näherungsweise drei Varianten unterschieden: I) Holzrahmenbauwand, II) Holzmassivwand und III) Betonwand. Für die Admittanzen der drei Wandtypen werden frequenzunabhängige Werte verwendet die im Mittel die jeweilige Konstruktion repräsentieren. Hier wurde auch Erfahrungen und Daten aus den Baumessungen zurückgegriffen. So wird für eine Holzrahmenbauwand eine Admittanz von  $1e-4 \text{ (m/s)N}^{-1}$ , für die Holzmassivbauwand  $4e-5 \text{ (m/s)N}^{-1}$  und die Betonwand  $1e-6 \text{ (m/s)N}^{-1}$  angesetzt. Somit ergeben sich für die drei Wandtypen drei verschiedene Spektren für die installierte Leistung, die in Abbildung 8 b) dargestellt sind. Diese Werte dienen nun als Eingangsdaten für die Prognose des Schalldruckpegels durch umstellen von Gleichung (2). So kann der zu erwartende Schalldruckpegel verursacht durch die gleiche Quelle für verschiedene Situationen verglichen werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt. Da es sich um eine fiktive Quelle handelt, sind Zahlenwerte dieses Beispiels eher relativ als absolut zu bewerten.

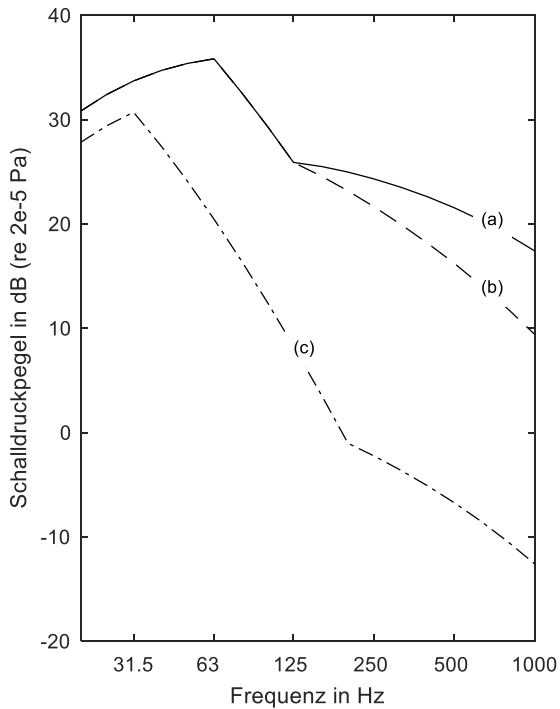


a) Freie Schnelle der fiktiven Körperschallquelle

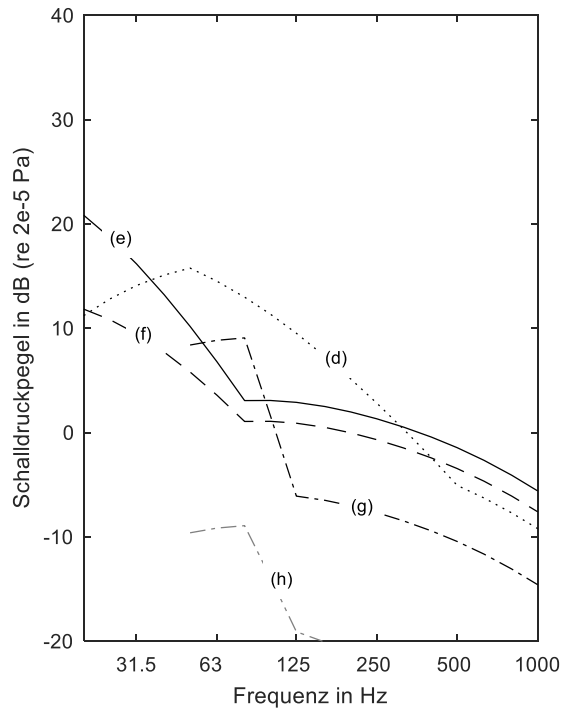


b) Installierte Leistung der fiktiven Quelle für:  
 Holzrahmenbauwand (voll)  
 Holzmassivwand (gestrichelt)  
 Betonwand (strichpunkt)

Abbildung 8: Eingangsdaten für fiktive Quelle



Übertragung horizontal/direkt:  
 (a) 43 dB(A) (20Hz bis 1000 Hz)  
 (b) 0 dB relativ zu (a)  
 (c) -7 dB relativ zu (a)



Geschoßübertragung:  
 (d) -20 dB relativ zu (a)  
 (e) -18 dB relativ zu (a)  
 (f) -25 dB relativ zu (a)  
 (g) 14 dB(A) (50 Hz bis 1000Hz)  
 (h) -17 dB relativ zu (g)

Abbildung 9: A-bewertete Schalldruckpegel für die fiktive Quelle aus Abbildung 8 in den Übertragungssituationen aus Abbildung 7. A-bewertete Summenpegel für (b) bis (f) sind relativ zum Summenpegel von (a) angegeben. (h) relativ zu (g) da für diese beiden Gruppen zu wenig Werte unter 50 Hz vorhanden sind.

## 5. Zusammenfassung

Im diesem Beitrag wurden ergänzende Baumessungen zum Beitrag von 2017 [5] vorgestellt. Die ergänzenden Daten fügen sich in die bereits 2017 vorgestellten Gruppen für ähnliche Übertragungssituationen ein. Allerdings konnte der Datensatz deutlich erweitert und die Gruppierungen verfeinert werden. So wurden bis jetzt 120 Übertragungsfunktionen gemessen werden. Aus den, für ähnliche Übertragungspfade und Konstruktionen gruppierten Daten wurden qualitativ charakteristische Spektren abgeleitet. Für diese Situationen wurde in einem Anwendungsbeispiel der resultierende Schalldruckpegel für eine fiktive Quelle berechnet. So kann ein erster Eindruck über die Übertragung für verschiedene Situationen mit der gleichen Quelle gewonnen werden.

## 6. Danksagung

Der Autor bedankt sich bei den Kooperationspartnern des Forschungsprojektes «Übertragungsfunktionen im Holzbau» für die Möglichkeit zur Durchführung von Baumessungen. Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen der Projektförderung des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau, Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-16.39, erarbeitet. Besonderer Dank gilt meinen Kollegen für die Unterstützung bei den Baumessungen.

## 7. Literatur

- [1] DIN 4109-1:2018-01. Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderung.
- [2] DIN 4109:1989-11 Beiblatt 2. Schallschutz im Hochbau - Hinweise für die Planung und Ausführung -Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz - Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- und Arbeitsbereich.
- [3] VDI 4100:2012-10. Schallschutz im Hochbau – Wohnungen – Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz.
- [4] Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (Ed.) (2015). DEGA Memorandum 0104 – Schallschutz im eigenen Wohnbereich.
- [5] Schöpfer, F. (2017). Körperschallübertragung im Holzbau Übertragungsfunktionen. HolzBauSpezial|Bauphysik 2017, Bad Wörishofen, Deutschland.
- [6] DIN EN 15657:2017-10. Akustische Eigenschaften von Bauteilen und Gebäuden - Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen.
- [7] Schöpfer, F., Hopkins, C., Mayr, A. R., & Schanda, U. (2016). Measurement of transmission functions in lightweight buildings for the prediction of structure-borne sound transmission from machinery. Submitted to Acta Acustica united with Acustica (12/2016).
- [8] DIN EN ISO 10848-1:2016-10 (Entwurf). Akustik – Messung der Flankenübertragung von Luftschall, Trittschall und Schall von Gebäudetechnischen Anlagen zwischen benachbarten Räumen im Prüfstand und am Bau: Teil 1: Rahmendokument.
- [9] DIN EN 12354-5:2009-10. Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 5: Installationsgeräusche; Deutsche Fassung EN 12354-5:2009.
- [10] Villot, M (2017). Predicting in-situ sound levels generated by structure-borne sound sources in buildings. Acta Acust united Ac 103(5), pp. 885-886.
- [11] Scheck, J., Reinhold, S., Eschbach, P., & Fischer, H.-M. (2016). Messung und Prognose der Luft- und Körperschallübertragung von gebäudetechnischen Anlagen im Massivbau. DAGA 2016, Aachen, Deutschland.