

Charakterisierung von Körperschallquellen mit flächigem Kontakt zum Bauwerk

Jasmin Amann, Agostino Troll, Lutz Weber

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

E-Mail: jasmin.amann@ibp.fraunhofer.de

Einleitung

Für Sanitärinstallationen gelten strenge bauaufsichtliche Schallschutzanforderungen. Daher lassen viele Sanitärhersteller die Geräuschentwicklung ihrer Produkte vorab in einem bauakustischen Prüfstand testen. Allerdings beschränken sich die Untersuchungen in Deutschland fast ausschließlich auf Gebäude in Massivbauweise. Für den Leichtbau liegen demgegenüber bislang kaum Messdaten vor. Aus diesem Grund wurden vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) im Rahmen eines vom BBSR geförderten Forschungsvorhabens Untersuchungen dazu durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, am Beispiel von Holzbalkendecken einen genaueren Einblick in die Einleitung und die Übertragung von Körperschall durch Sanitärobjekte im Leichtbau zu gewinnen und daraus, wenn möglich, ein einfaches Verfahren zur Prognose des resultierenden Installations-Schallpegels abzuleiten.

Einen zentralen Bestandteil der durchgeführten Untersuchungen bildete die Charakterisierung der vorhandenen Quellen, bei denen es sich, wie z. B. bei den betrachteten Duschwannen, überwiegend um Installationen mit flächigem Kontakt zum Bauwerk handelte.

Charakterisierung von Körperschallquellen

Die maßgebenden akustischen Eigenschaften einer Körperschallquelle sind die freie Schnelle v_f und die Quellenadmittanz \underline{Y}_S . Ist zudem die Eingangsadmittanz des angeregten Bauteils \underline{Y}_R bekannt, kann die über einen translatorischen Einpunktkontakt in eine Struktur eingeleitete Leistung W_Q nach [1] mit Gleichung 1 berechnet werden.

$$W_Q = \frac{|\tilde{v}_f|^2}{|\underline{Y}_S + \underline{Y}_R|^2} \operatorname{Re}(\underline{Y}_R) \quad [\text{W}] \quad (1)$$

Bei Körperschallquellen im Massivbau liegt eine Kraftquellensituation vor ($\underline{Y}_S \gg \underline{Y}_R$). Diese Näherung ermöglicht eine vereinfachte Charakterisierung einer Körperschallquelle mit beliebigem Kontakt zum Bauwerk mit der Empfangsplattenmethode nach [2]. Dabei wird der Körperschallquelle eine charakteristische Empfangsplattenleistung zugeordnet (Abbildung 1 oben).

Liegen Quellen- und Eingangsadmittanz, wie z.B. im Leichtbau, in derselben Größenordnung ($\underline{Y}_S \approx \underline{Y}_R$) müssen Körperschallquellen vollständig charakterisiert werden, damit die eingeleitete Leistung berechnet werden kann. Dies kann über die direkte Bestimmung der Quellgrößen

(v_f und \underline{Y}_S) nach [2] erfolgen. Die direkte Bestimmung der Quellgrößen setzt jedoch einen Punktkontakt zur Empfängerstruktur voraus (Abbildung 1 links).

Die direkte Bestimmung der Quellenadmittanz bei Körperschallquellen mit flächigem Kontakt zum Bauwerk ist eine Herausforderung, da die üblichen Vorgehensweisen hier nicht verwendet werden können (Abbildung 1 unten rechts).

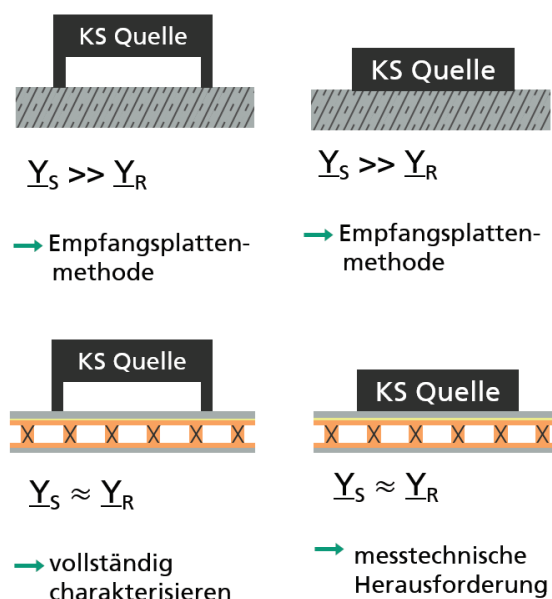


Abbildung 1: Körperschallquelle mit Punktkontakt auf Massivdecke (oben links), mit flächigem Kontakt auf Massivdecke (oben rechts), mit Punktkontakt auf Holzbalkendecke (unten links) und mit flächigem Kontakt auf Holzbalkendecke (unten rechts).

In diesem Tagungsbeitrag wird ein Ansatz zur Bestimmung der Quellenadmittanz einer Körperschallquelle mit flächigem Kontakt zum Bauwerk auf Basis von Übertragungsfunktionen vorgestellt. Neben dem messtechnischen Vorgehen und den Ergebnissen werden außerdem Vergleiche zwischen Prognosen (mit Quellgrößen aus dem vorgestellten Ansatz) und Messungen gezeigt, um auf diese Weise die Anwendbarkeit des Verfahrens zu überprüfen.

Ansatz mit Übertragungsfunktionen

Die Idee des Ansatzes ist es, die Quellenadmittanz einer flächigen Quelle durch eine äquivalente Punktadmittanz anzunähern. Dies soll mit einem Vergleichsverfahren auf der Basis von gemessenen Übertragungsfunktionen geschehen, um ein praxisgerechtes Vorgehen anzustreben. Dazu sind mehrere Annahmen notwendig.

Unter anderem wird angenommen, dass Gleichung 1 zur Approximation einer Quelle mit flächigen Kontakt verwendet werden kann und die Eingangsadmittanz des angeregten Bauteils (Decke) rein reell ist ($Y_R = \text{Re}(Y_R)$).

Ausgehend von diesen Vereinfachungen kann die Quellenadmittanz ermittelt werden, wenn die freie Schnelle der Quelle, die Eingangsadmittanz der Decke und die in die Decke eingeleitete Leistung bekannt sind. Die verwendete Vorgehensweise ist im Folgenden in fünf Schritten beschrieben.

Im ersten Schritt wird die freie Schnelle der Quelle nach [2] gemessen. Hierzu wird die Quelle frei gelagert und die Schnelle an den Kontaktpunkten zum Bauwerk bestimmt.

Im zweiten Schritt wird die Eingangsadmittanz der Decke nach [3] ermittelt. Dazu wird die Decke mit einem elektrodynamischen Schwingungserreger (Shaker) angeregt und Schnelle \underline{v} und Kraft \underline{F} am Einleitungsort gemessen. Die Admittanz \underline{Y} ergibt sich aus dem Quotienten von Schnelle und Kraft.

$$\underline{Y} = \frac{\underline{v}}{\underline{F}} \quad [\text{m}/(\text{Ns})] \quad (2)$$

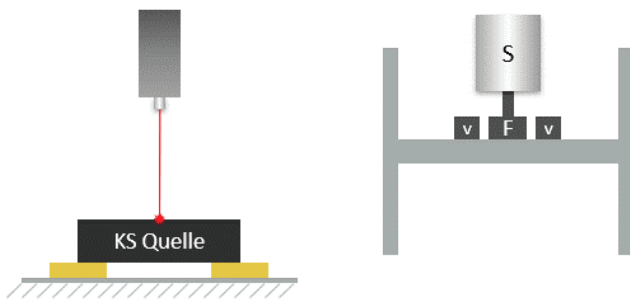


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Messung der freien Schnelle (links) und zur Messung der Eingangsadmittanz (rechts).

Im dritten Schritt wird die räumlich gemittelte Übertragungsfunktion $D_{TF,av}$ der Decke nach [4] bestimmt. Diese Übertragungsfunktion stellt einen Zusammenhang zwischen dem räumlich gemittelten Schalldruckpegel L_{av} im Empfangsraum und dem Körperschall-Leistungspegel der Quelle L_W an K Anregungspositionen her. Für die Messung wird die Decke an mehreren Stellen der Kontaktfläche zwischen Quelle und Bauwerk mit einem Shaker angeregt und die Schnelle und die Kraft am Einleitungsort bestimmt. Der Körperschall-Leistungspegel der Quelle an einer Anregungsposition $L_{W,k}$ ergibt sich aus der Pegelbildung vom Realteil des Kreuzleistungsspektrums von Kraft und Schnelle mit dem Bezugswert der Körperschall-Leistung $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

$$L_{W,k} = 10 \lg(\text{Re}\{\underline{F}\underline{v}^*\}/W_0) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

Die Übertragungsfunktion für eine Anregungsposition $D_{TF,k}$ ergibt sich aus der Pegeldifferenz des räumlich gemittelten

Schalldruckpegels im Empfangsraum $L_{av,k}$ und dem Körperschall-Leistungspegels des Shakers an dieser Position.

$$D_{TF,k} = L_{av,k} - L_{W,k} \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

Durch energetische Mittelung über alle Anregungspositionen erhält man eine gemittelte Übertragungsfunktion für die betrachtete Decke.

$$D_{TF,av} = 10 \lg\left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K 10^{D_{TF,k}/10}\right) \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

Im vierten Schritt wird der räumlich gemittelte Schalldruckpegel der Quelle $L_{av,Q}$ im Empfangsraum bestimmt. Weil die Übertragungsfunktion der Decke bekannt ist, kann mit Gleichung 6 ein äquivalenter Körperschall-Leistungspegel $L_{W,Q}$ für die flächige Quelle bestimmt werden.

$$L_{W,Q} = L_{av,Q} - D_{TF,av} \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

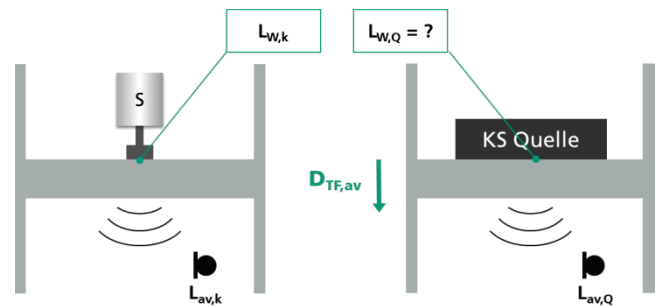


Abbildung 3: Versuchsaufbau des Vergleichsverfahrens. Ermittlung der Übertragungsfunktion (links). Ermittlung des äquivalenten Körperschall-Leistungspegels für eine flächige Quelle (rechts).

Im fünften Schritt kann durch Umformen von Gleichung 1 der Betrag der Quellenadmittanz bestimmt werden. Werden die Messungen mit zwei unterschiedlichen Empfängerstrukturen durchgeführt, können theoretisch Real- und Imaginärteil der Quellenadmittanz bestimmt werden.

Messtechnische Untersuchungen

Der oben beschriebene Ansatz wurde messtechnisch auf mehrere Quellen und Empfängerstrukturen angewendet.

Bei den untersuchten Quellen handelt es sich um eine Kombination aus Prüfobjekt und Erreger, welche zusammen die Körperschallquelle bilden.

Es wurden folgende Prüfobjekte verwendet:

- Duschwanne mit Wannenträger
- Duschwanne mit Fußgestell

- verflieste EPS-Gefälledämmplatte auf einer Gummigranulat-Unterlage, Fläche 1,0 m x 1,0 m (vereinfachte Nachbildung einer bodenebenen Duschfläche)
- Spanplatte mit Bitumenkern auf einer Trittschalldämmplatte aus Mineralwolle, Fläche 1,0 m x 1,0 m (teilflächiger Trockenestrich)

Die Anregung erfolgte einerseits mit einem Shaker und andererseits mit einem Normhammerwerk, so dass sich insgesamt acht verschiedene Körperschallquellen ergeben (vier Prüfobjekte mit je zwei Anregungsarten).



Abbildung 4: Körperschallquellen am Beispiel der Duschwanne mit Wannenträger. Anregung mit Shaker (links) sowie Normhammerwerk (rechts).

Die Messungen wurden an zwei Empfängerstrukturen durchgeführt:

- 140 mm Stahlbetondecke mit 320 kg/m²
- 19 mm MDF-Platte mit 15 kg/m²

Die Messungen der freien Schnellen erfolgten mit einem Laser-Doppler-Vibrometer auf der Unterseite der Quellen, bei freier Lagerung. Abbildung 5 zeigt die flächengemittelten freien Schnellen aller acht Quellen.

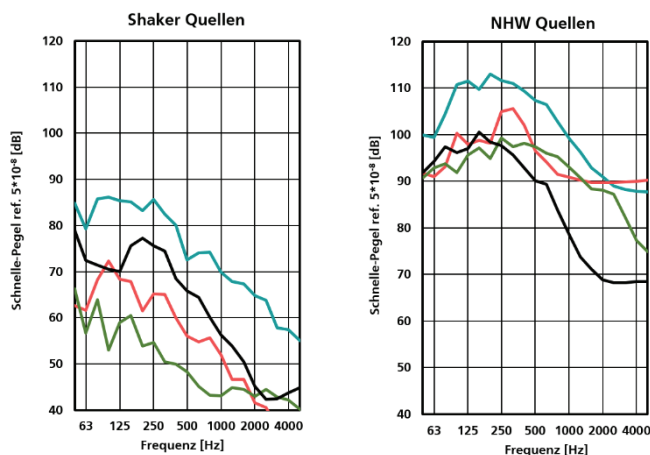


Abbildung 5: Flächengemittelte freie Schnelle der Körperschallquellen: Duschwanne mit Wannenträger (blau), Duschwanne mit Fußgestell (rot), EPS-Gefälledämmplatte (grün) und Spanplatte (schwarz).

Die Bestimmung der Eingangsadmittanzen erfolgte, wie oben beschrieben, mit Shaker-Anregung aus dem Quotienten von Schnelle und Kraft (Gleichung 2). Für beide Empfängerstrukturen wurde eine flächengemittelte Admittanz bestimmt.

Die Bestimmung der räumlich gemittelten Übertragungsfunktionen der beiden Empfängerstrukturen erfolgte, wie oben beschrieben, durch Messung der räumlich gemittelten Schalldruckpegel und der Körperschall-Leistungspegel mit Shaker-Anregung. Dabei wurde jeweils über 6 Anregungspositionen und 6 Empfängerpositionen gemittelt.

Der räumlich gemittelte Schalldruckpegel der Quelle $L_{av,Q}$ wurde für alle acht Quellen und beide Empfängerstrukturen bestimmt.

Um den Real- und Imaginärteil der komplexen Quellenadmittanz zu ermitteln, wurden die Messergebnisse an den beiden Empfängerstrukturen in einem Gleichungssystem zusammengefasst. Leider ließ sich das Gleichungssystem nicht bei allen Frequenzen lösen, weil die Eingangswerte teilweise zu große Fehler aufwiesen. Deshalb wurden die Messwerte für den Real- und Imaginärteil nur zur Orientierung herangezogen und für die weiteren Untersuchungen der aus den Messungen auf der Betondecke ermittelte Betrag der Quellenadmittanz verwendet. Abbildung 6 zeigt den Betrag der Quellenadmittanz in Pegeldarstellung.

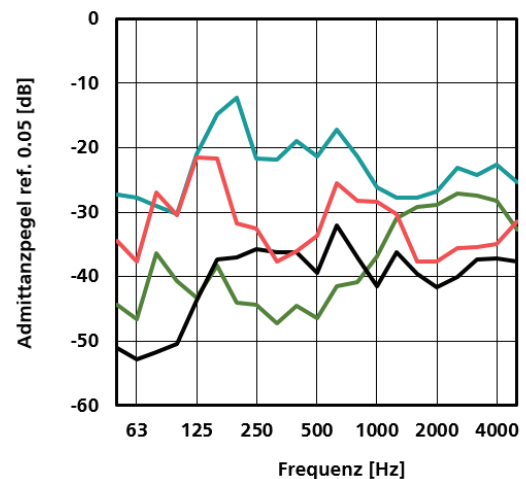


Abbildung 6: Betrag der Quellenadmittanz für die vier untersuchten Prüfobjekte bei Shaker-Anregung: Duschwanne mit Wannenträger (blau), Duschwanne mit Fußgestell (rot), EPS-Gefälledämmplatte (grün) und Spanplatte (schwarz).

Validierung

Um zu überprüfen, ob sich der von einer Körperschallquelle in einer anderen Einbausituation erzeugte Schallpegel mit den ermittelten Quellgrößen (v_f und $|Y_S|$) hinreichend genau vorherberechnen lässt, wurde eine Validierung durchgeführt. Dazu wurden Messung und Rechnung für verschiedene Einbausituationen verglichen. Die Vergleiche erfolgten für alle acht Quellen auf vier verschiedenen Holzbalkendecken:

- Holzbalken-Rohdecke (HBD)
- Holzbalkendecke mit Unterdecke (HBD_UD)

- Holbalkendecke mit schwimmendem Estrich (HBD_SE)
- Holbalkendecke mit Unterdecke und schwimmendem Estrich (HBD_SE_UD)

Die Messungen des räumlich gemittelten Schalldruckpegels für die acht Quellen wurden in einem bauakustischen Prüfstand ohne Flankenübertragung durchgeführt. Die Prognosen erfolgten durch Kombination der nach Gleichung 1 berechneten in die Decke eingeleiteten Körperschall-Leistung mit der für die verschiedenen Decken nach Gleichung 5 ermittelten Übertragungsfunktion.

Abbildung 7 zeigt den Vergleich zwischen Prognose und Messung für die Spanplatte mit Mineralwolle-Unterlage auf der Holzbalken-Rohdecke bei Shaker-Anregung. Der Gesamtschallpegel der beiden dargestellten Spektren unterscheidet sich um 2,2 dB.

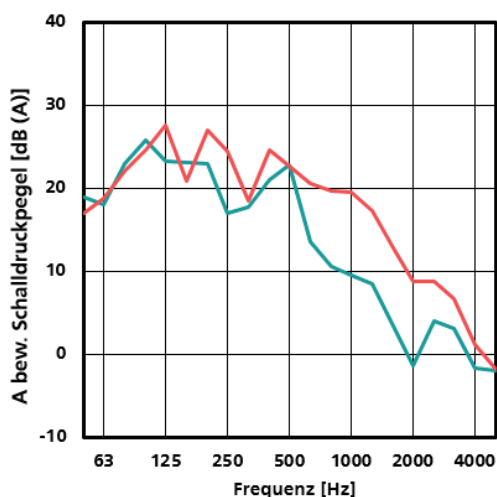


Abbildung 7: Vergleich Prognose (rot) und Messung (blau).

Abbildung 8 zeigt die Abweichungen der Einzählwerte zwischen Prognose und Messung für alle acht Quellen und vier Decken. Die Abweichungen zwischen den Prognosen und den Messungen liegen in einem Bereich von ± 5 dB.

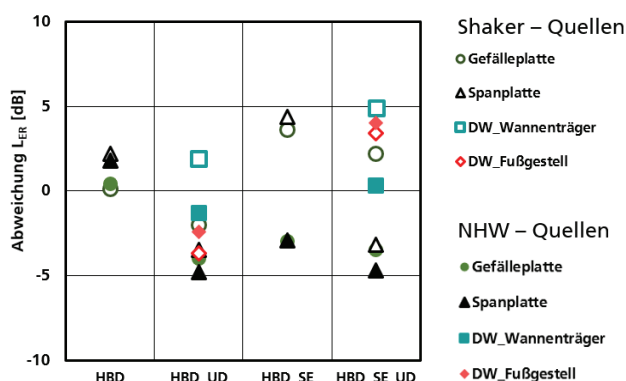


Abbildung 8: Abweichungen zwischen Prognose und Messung für alle acht Quellen und die vier betrachteten Holzbalkendecken.

Zusammenfassung

In diesem Tagungsbeitrag wird ein Ansatz zur Bestimmung der Quellenadmittanz von Körperschallquellen mit flächigem Kontakt zum Bauwerk auf der Basis von gemessenen Übertragungsfunktionen vorgestellt. Außerdem wird ein Verfahren präsentiert, mit dem sich der im Empfangsraum erzeugte Schallpegel rechnerisch vorherbestimmen lässt.

Aus den durchgeführten Untersuchungen geht hervor, dass das vorgestellte Prognoseverfahren trotz vieler Vereinfachungen brauchbare Ergebnisse liefert. Bei etwa dreißig exemplarisch durchgeführten Prognosen liegt die Abweichung zwischen Messung und Berechnung im Bereich von etwa ± 5 dB.

Danksagung

Die durchgeführten Untersuchungen wurden mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.16). Unser Dank gilt außerdem den an dem Vorhaben beteiligten Industriepartnern (Kunststofftechnik SCHEDEL GmbH und poresta systems GmbH).

Literatur

- [1] Mondot, J. M.; Petersson, B.: Characterization of structure-borne sound sources: The source descriptor and the coupling function. *Journal of Sound and Vibration* 114, 507-518.
- [2] DIN EN 15657:2017-10 Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen.
- [3] ISO 7626-2:2015-04 Schwingungen und Stöße - Experimentelle Bestimmung der mechanischen Admittanz - Teil 2: Messungen mit Einpunkt-Translationserregung mit einem befestigten Schwingungserreger.
- [4] 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.