Messung und Prognose der Luft- und Körperschallübertragung von gebäudetechnischen Anlagen im Massivbau

Jochen Scheck, Steffi Reinhold, Philipp Eschbach, Heinz-Martin Fischer
Hochschule für Technik Stuttgart, 70174 Stuttgart, E-Mail: jochen.scheck@hft-stuttgart.de

Einleitung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird die von Sanitärinstallationen und Klimageräten ausgehende Schallübertragung untersucht. Das wesentliche Ziel ist die Bereitstellung von Möglichkeiten zur Vorherberechnung der Schallübertragung in Gebäuden, welche eine Labor-Charakterisierung hinsichtlich der Luft- und Körperschallübertragung erfordert. Hierzu wurden Untersuchungen am Empfangsplattenprüfstand und im reflexionsarmen Raum durchgeführt, welche Eingangsdaten für die Prognose nach DIN EN 12354-5 [1] liefern. Die Berechnungsmodelle für die Luft- und Körperschallübertragung wurden für Prognosen in einem gebäudeähnlichen Prüfstand verwendet und mit in-situ Messungen verglichen.

Rechenmodell nach DIN EN 12354-5

Gebäudetechnische Anlagen emittieren sowohl Luft- als auch Körperschall. Das Prognoseverfahren nach DIN EN 12354-5 ermöglicht es, sowohl die Luft- als auch die Körperschallübertragung im Massivbau vorherzuberechnen, vorausgesetzt, dass Eingangsdaten für die Quellen zur Verfügung stehen. Für die Luftschallübertragung wird die Luftschallleistung der Quelle L_W als Eingangsgröße benötigt (Abbildung 1). Das Übertragungsmodell greift auf DIN EN 12354-1 zurück. Die Gesamtübertragung ergibt sich aus der energetischen Summation der einzelnen Übertragungswege über die Anregung der m Bauteile im Senderaum (Index i) und Abstrahlung der n Bauteile im Empfangsraum (Index n) nach (1):

$$L_{n,a} = 10\lg \sum_{i=1,j=1}^{m,n} 10^{L_{n,a,ij}/10} \qquad (1)$$

Die einzelnen Übertragungswege werden nach (2) berechnet:

$$L_{n,a,ij} = L_W - D_{s,i} - R_{ij,ref} - 10\lg\frac{S_i}{S_{ref}} - 10\lg\frac{A_{ref}}{4} \qquad (2)$$

dabei ist $D_{s,i}$ das Verhältnis der auf das Bauteil i auftreffenden Schallleistung zur Gesamtschallleistung der Quelle.

Zur Prognose der Körperschallübertragung wird die im Senderaum am Bauteil i installierte Körperschallleistung der Quelle $L_{Ws,inst,i}$ als Eingangsgröße benötigt (Abbildung 2). Ist eine Quelle an mehr als an einem Bauteil befestigt, wird die installierte Körperschallleistung in jedes Bauteil im Senderaum benötigt und die Gesamtübertragung ergibt sich analog zum Luftschall über die energetische Summation aller Übertragungswege nach (3).

$$L_{n,s} = 10\lg \sum_{i=1,j=1}^{m,n} 10^{L_{n,s,ij}/10} \qquad (3)$$

Die einzelnen Übertragungswege werden nach (4) berechnet:

$$L_{n,s,ij} = L_{Ws,inst,i} - D_{sa,i} - R_{ij,ref} - 10\lg\frac{S_i}{S_{ref}} - 10\lg\frac{A_{ref}}{4} \qquad (4)$$

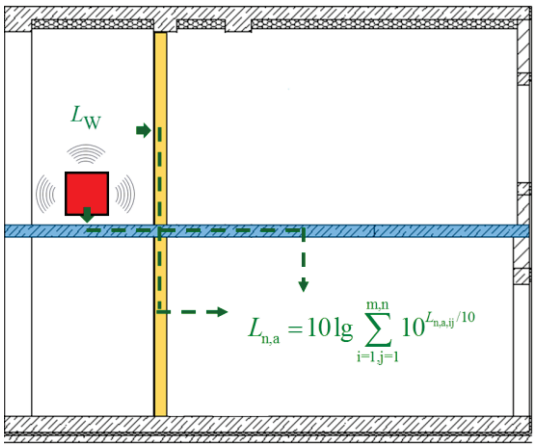

Abbildung 1: Prognose der Luftschall-Übertragung nach DIN EN 12354-5 am Beispiel der im Prüfstand untersuchten Übertragungssituation.

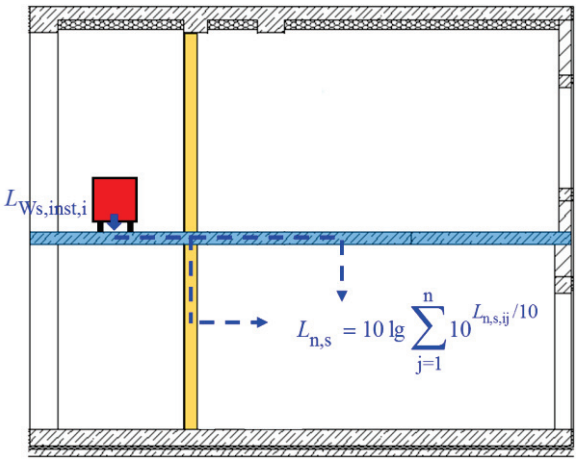

Abbildung 2: Prognose der Körperschall-Übertragung nach DIN EN 12354-5 für eine bodenstehende Quelle.

Die am Bauteil i installierte Leistung kann aus der charakteristischen Körperschallleistung und dem Admittanz-Verhältnis von Bauteil und der zur Charakterisierung verwendeten Empfangsplatte bestimmt werden (5):

$$L_{Ws,inst,i} = L_{W,char,i} + 10\lg\frac{Y_{\infty,inst,i}}{Y_{\infty,rec}} \qquad (5)$$

Voraussetzung für die Anwendbarkeit von (5) ist, dass die Admittanz der Quelle wesentlich größer ist, als die der

Empfangsstruktur (Kraftquellensituation). Diese Voraussetzung ist im Massivbau für alle bislang an der HFT Stuttgart untersuchten Quellen erfüllt.

Der Anpassungs-Term $D_{sa,i}$ bewirkt eine Umrechnung der Körperschall-Leistung in eine äquivalente Luftschall-Leistung, so dass zur Berechnung der flankierenden Übertragung ebenfalls auf DIN EN 12354-1 zurückgegriffen werden kann.

Körperschall-Charakterisierung

Die Empfangsplattenmethode nach DIN EN 15657-1 [2] ermöglicht eine praktikable Charakterisierung von Körperschallquellen mit beliebig vielen Kontaktpunkten und Kontaktgeometrien. Die übertragene Leistung W_{rec} in die Empfangsplatte i ergibt sich aus einer Leistungsbilanz nach (6):

$$W_{rec,i} = \omega \cdot m_i \cdot \tilde{v}_i^2 \cdot \eta_i \qquad (6)$$

Um eine unabhängige Quellen-Charakterisierung zu erhalten, erfolgt eine Normierung auf die gemittelte Admittanz der Empfangsplatte an den Kontaktpunkten nach (7).

$$W_{char,i} = W_{rec,i} \cdot \frac{Y_{\infty,rec}}{\mathrm{Re}\left\{\overline{Y}_{rec,i}\right\}} \qquad (7)$$

Die charakteristische Körperschall-Leistung kann nach (5) in die im Gebäude installierte Körperschall-Leistung als Eingangsgröße für DIN EN 12354-5 umgerechnet werden.

Des Weiteren kann die Kurzschlußkraft aus der Empfangsplattenleistung bestimmt werden (8).

$$\tilde{F}_i^2 = \frac{W_{rec,i}}{\mathrm{Re}\left\{\overline{Y}_{rec,i}\right\}} \qquad (8)$$

Diese kann als Eingangsgröße zur Prognose der Körperschallübertragung nach DIN EN 12354-2 verwendet werden [3].

Mit der charakteristischen Admittanz der Empfangsplatte $Y_{\infty,rec} = 5 \cdot 10^{-6}\ Ns/m$ ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen charakteristischer Körperschall-Leistung und Kurzschlußkraft (9):

$$L_{W,char,i} = L_{F,i} + 53\,dB \qquad (9)$$

Für transiente Betriebszustände können Frequenzspektren der charakteristischen Körperschallleistung bzw. der Kurzschlußkraft für diskrete Zeitintervalle bestimmt werden. Das Verfahren hierzu ist in [4] am Beispiel der WC-Spülung beschrieben.

Luftschall-Charakterisierung

Die Bestimmung der Luftschallleistung erfolgte für die Klimageräte im reflexionsarmen Halbfreifeldraum nach dem Hüllflächenverfahren der DIN EN ISO 3744 [5]. Bei der Vorwandinstallation spielt nur die Körperschallübertragung eine Rolle.

Untersuchte Quellen

Abbildung 3 zeigt die untersuchte Vorwandinstallation mit den Sanitärkomponenten: Badewanne, Waschbecken und WC. Der Anschluss der Vorwandinstallation an Boden und Wand erfolgt über Montagewinkel mit Korkunterlage. Durch Betätigung der Sanitärkomponenten, z.B. Auslösen der WC-Spülung, wird die Vorwandinstallation zur aktiven Quelle und es erfolgt eine Körperschalleinleitung simultan in bis zu drei Bauteile.

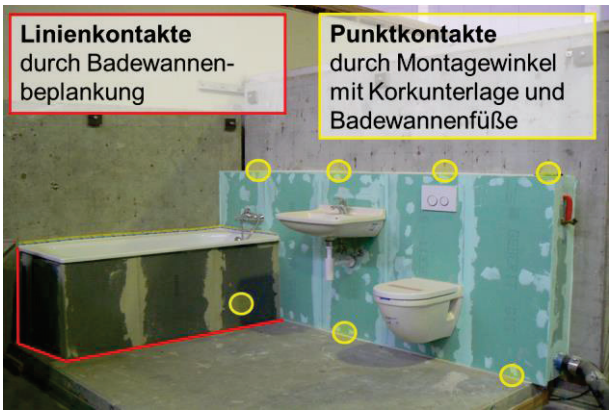

Abbildung 3: Vorwandinstallation mit Sanitärkomponenten am Empfangsplattenprüfstand.

Für die Prognose der diagonalen Übertragung im Gebäude wird die charakteristische Körperschallleistung für die Übertragung in Boden und Installationswand benötigt. Diese ist in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt. Das Frequenzspektrum für die WC-Spülung wurde für das Auslösen des Spülvorgangs bestimmt (worst case) [4].

Bei allen Sanitärkomponenten sind die tieffrequenten Anteile dominant. Badenwannenbrause und WC-Spülung weisen die höchsten Leistungen auf. Dies bestätigt Erfahrungen aus der Praxis, wonach diese Sanitärkomponenten am ehesten Probleme verursachen. Beim Betrieb der Badewannenbrause erfolgt die maßgebliche Körperschalleinleitung in den Boden. Beim Auslösen der WC-Spülung sind die Einträge in Boden und Wand in der gleichen Größenordnung.

Beispielhaft für die 8 untersuchten Klimageräte ist in Abbildung 6 ein Lüftungszentralgerät mit integrierter Wärmepumpe dargestellt. Des Weiteren untersucht wurden ein Mikro KWK mit Stirling Motor und integriertem Gas-Brennwertgerät, ein Lüftungsgerät mit Wärmerück-gewinnung, zwei Luft/Wasser Wärmepumpen (eines bestehend aus Außen und Innenmodul), ein Mikro BHKW und ein Hybrid Wärmepumpensystem bestehend aus Gas-Heizgerät und Wärmepumpe. Zwei der Geräte sind bodenstehend, die restlichen wandhängend.

In Abbildung 7 sind die Frequenzspektren der charakteristischen Körperschall-Leistung dargestellt. Auch bei den Klimageräten sind die tieffrequenten Anteile dominant. Bei allen Geräten treten infolge des „Innenlebens“ (Drehzahl von Ventilatoren etc.) markante Spitzen in den Frequenzverläufen auf. Im Vergleich zu den Sanitärkomponenten sind die Leistungen tieffrequent um bis zu 30 dB höher.

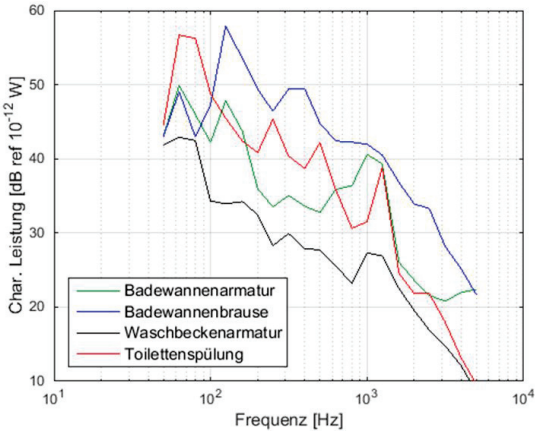

Abbildung 4: Körperschall-Leistungen beim Betrieb der Sanitärkomponenten – Boden.

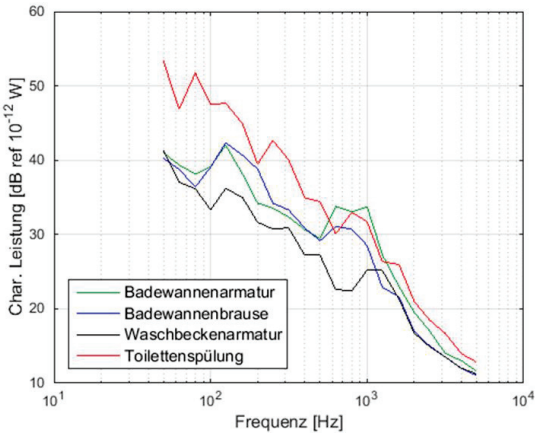

Abbildung 5: Körperschall-Leistungen beim Betrieb der Sanitärkomponenten – Wand.

Abbildung 8 zeigt die Frequenzspektren der Luftschall-Leistung. Im Vergleich mit der Körperschall-Leistung ergibt sich eine andere Hierarchie der Geräte, da die Körperschallübertragung maßgeblich von der Beschaffenheit der Kontaktpunkte abhängt, für die Luftschallabstrahlung ist die Beschaffenheit des Gehäuses maßgeblich.

Abbildung 6: Lüftungsgerät mit Wärmepumpe am Empfangsplattenprüfstand und im reflexionsarmen Raum.

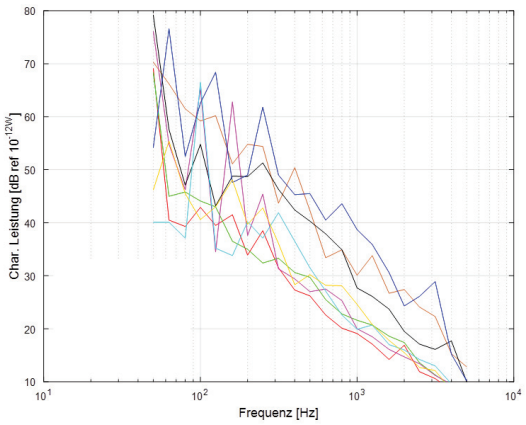

Abbildung 7: Körperschall-Leistungen der Klimageräte.

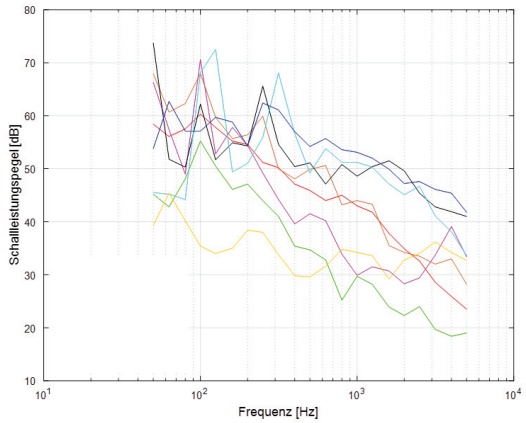

Abbildung 8: Luftschall-Leistungen der Klimageräte.

Vergleich Prognose und Messung

Zur Validierung der Prognosemodelle nach DIN EN 12354 (Teile 1, 2 und 5) wurde ein gebäudeähnlicher Installationsprüfstand als Referenzgebäude verwendet. Der Prüfstand hat eine 180 mm dicke Stahlbetondecke, als Installationswände waren Kalksandsteinwände mit m‘ = 220 kg/m² (RDK 2.0, d = 115 mm) eingebaut. Für die horizontale, vertikale und diagonale Übertragung wurden sämtliche für die Prognose relevanten Größen messtechnisch bestimmt.

Abbildung 9 zeigt den Vergleich von gemessener und berechneter Luftschalldämmung für die diagonale Übertragung. Oberhalb 250 Hz stimmen Prognose und Messung sehr gut überein, tieffrequente Abweichungen sind auf mangelnde Diffusität von Strukturen und Räumen zurückzuführen. Der Vergleich der Flankendämm-Maße R_v ergab ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Prognose und Messung. Damit ist die Grundvoraussetzung für die Prognose nach DIN EN 12354-5 mit den Eingangsdaten der untersuchten Quellen gegeben. In-situ Messungen wurden bislang für die Vorwandinstallation durchgeführt, für die Klimageräte muss dies noch erfolgen.

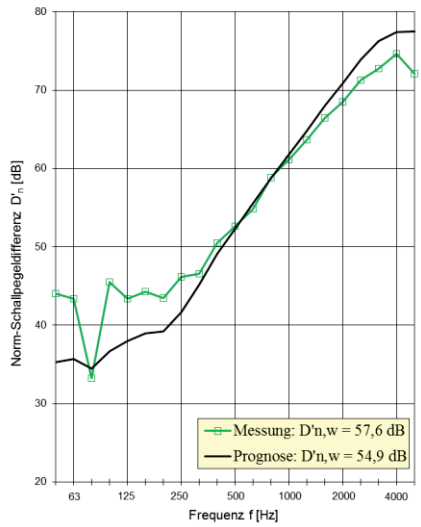

Abbildung 9: Messung und Prognose der Luftschalldämmung für diagonale Übertragung nach DIN EN 12354-1.

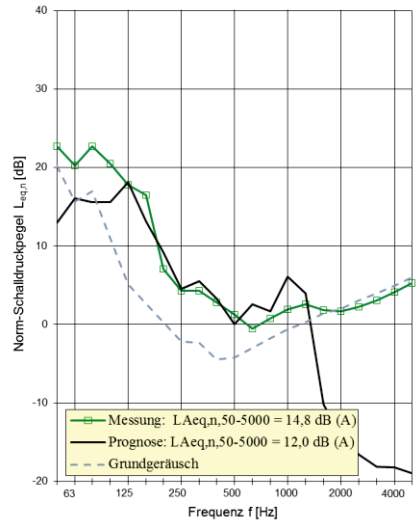

Abbildung 10: Messung und Prognose der Körperschallübertragung im gebäudeähnlichen Prüfstand – Badenwannenarmatur – diagonale Übertragung.

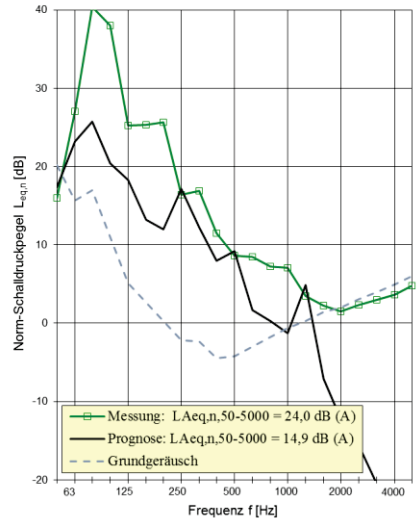

Abbildung 11: Messung und Prognose der Körperschallübertragung im gebäudeähnlichen Prüfstand – WC-Spülung – diagonale Übertragung.

In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind exemplarisch für die bisher durchgeführten Vergleiche Ergebnisse für die Badewannenarmatur und für die WC-Spülung dargestellt. Für die Badenwannenarmatur ergibt sich im auswertbaren Frequenzbereich bis 1250 Hz (Messergebnisse oberhalb im Grundgeräusch) eine sehr gute Übereinstimmung. Bei der WC-Spülung unterschätzt die Prognose die Messung deutlich. Teil der Erklärung hierfür ist, dass bei diagonaler Übertragung im Prüfstand ein zusätzlicher Körperschalleintrag in die untere Wand durch das Abwasserfallrohr erfolgt [4]. Dieser Anteil an der Gesamtübertragung wird bei der Charakterisierung der Vorwandinstallation am Empfangsplattenprüfstand nicht berücksichtigt. Die Prognose der horizontalen Übertragung ergab eine ähnlich gute Übereinstimmung wie für die Badewannenbrause und für ein in [6] untersuchtes Duschelement.

Zusammenfassung

Am Beispiel einer Vorwandinstallation und von Klimageräten wurde das Verfahren zur messtechnischen Charakterisierung und Prognose der Schallübertragung in Gebäuden nach DIN EN 12354-5 aufgezeigt. Die Vorwandinstallation beim „Betriebszustand“ WC-Spülung ist die bei weitem komplexeste Körperschallquelle, da eine zeitvariante Körperschalleinleitung in mehrere Bauteile erfolgt. Erste Prognoseergebnisse für die Vorwandinstallation sind in Anbetracht der Unsicherheiten vielversprechend. Letztere gilt es noch näher zu untersuchen.

Danksagung

Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Literatur

[1] DIN EN 12354-5: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 5: Installationsgeräusche, (2009)

[2] DIN EN 15657-1: Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden - Messung des Luft- und Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand - Teil 1 (2009)

[3] Scheck, J., Gibbs, B.M.: Impacted lightweight stairs as structure-borne sound sources, Applied Acoustics, 2014

[4] Reinhold, S., Scheck, J., Fischer, H.-M., Ruff, A., Hopkins, C.: Charakterisierung und Prognose der Körperschallübertragung von Vorwandinstallationen im Massivbau, DAGA 2015, Nürnberg

[5] DIN EN ISO 3744: Akustik - Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene, (2011)

[6] Ruff, A., Scheck, J., Fischer, H.-M.: Schallübertragung eines bodenebenen Duschelements, DAGA 2016, Aachen