

# Bestimmung der Körperschalleistung und Prognoseberechnung von Installationsgeräuschen anhand von Daten aus Luftschallmessungen in einem Musterbau

Sven Öhler, Lutz Weber, Bernd Kaltbeitzel

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 70569 Stuttgart, E-Mail: sven.oehler@ibp.fraunhofer.de

## Einleitung

Die Schallübertragung durch Sanitärinstallationen in Bauten lässt sich nach EN 12354-5 berechnen, wobei die Norm nur einen allgemeinen Rahmen aufspannt, der durch weitere Modelle (z. B. Schalldämmung und Abstrahlgrad der Bauteile in Abhängigkeit der Frequenz) ergänzt werden muss. Als Eingangsgröße benötigt man die charakteristische Körperschalleistung der Quelle, die in-situ (z. B. in einem Musterbau-Installationsprüfstand) durch Anwendung des im normativen Anhang C der EN 15657 beschriebenen „Verfahrens des Schalleistungersatzes (Power substitution method)“ messtechnisch bestimmt werden kann. Bislang sind jedoch nur wenige Daten verfügbar, so dass das Berechnungsverfahren nach EN 12354-5 noch keinen Eingang in die Praxis gefunden hat.

Anstatt durch eine rechnerische Prognose erfolgt der Schallschutznachweis bei Sanitärinstallationen derzeit überwiegend durch Messungen in bauakustischen Installationsprüfständen. Gemessen wird hierbei der durch die geprüfte Installation im Empfangsraum hervorgerufene Luftschallpegel. Da der Installationsprüfstand im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP äußerst genaue und reproduzierbare akustische Messungen ermöglicht, liegt es nahe, den gemessenen Luftschallpegel zu nutzen, um daraus – in Anlehnung an das Verfahren des Schalleistungersatzes in EN 15657 – die Körperschalleistung der geprüften Installation zu bestimmen.

Im Folgenden wird die Anwendbarkeit des entwickelten Verfahrens zur Bestimmung der KS-Leistung von realen Sanitärprojekten (Duschwannen) diskutiert. Weiter werden die Messwerte aus dem Installationsprüfstand mit Ergebnissen von Prognoseberechnungen nach EN 12354-5 verglichen.

## Installationsgeräusche im Musterbau

Bei der Bestimmung der schallschutztechnischen Eigenschaften von Sanitärinstallationen zum Nachweis von Schallschutzanforderungen können Messungen in Musterbauten durchgeführt werden. Vor Allem im Geschosswohnungsbau, und wenn mehrere Bäder vergleichbar aufgebaut und ausgerüstet werden sollen, kann es sich lohnen zunächst ein Badezimmer fertigzustellen und anschließend die zu erwartenden Installationsschallpegel messtechnisch nachzuweisen. Sind die Anforderungen im Musterbad eingehalten, können die übrigen Bäder identisch aufgebaut und dafür der Nachweis des Musterbades stellvertretend angesetzt werden. Der Nachweis gilt formal jedoch nur für die tatsächlich gemessene Installation in Verbindung mit den baulichen Gegebenheiten sowie der Lage von Badezimmer zum schutzbedürftigen Raum.

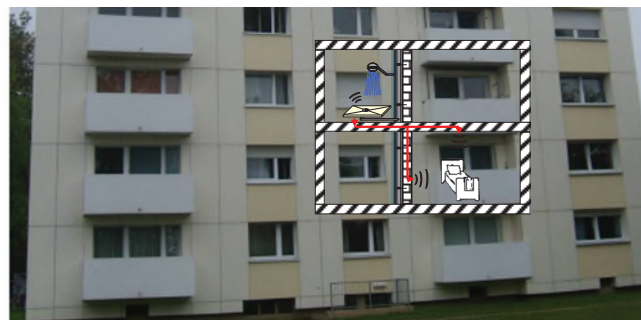


Abbildung 1: Musterbau-Installationsprüfstand als Gebäudeausschnitt aus dem Geschosswohnungsbau.

## Installationsgeräusche im Musterbauprüfstand

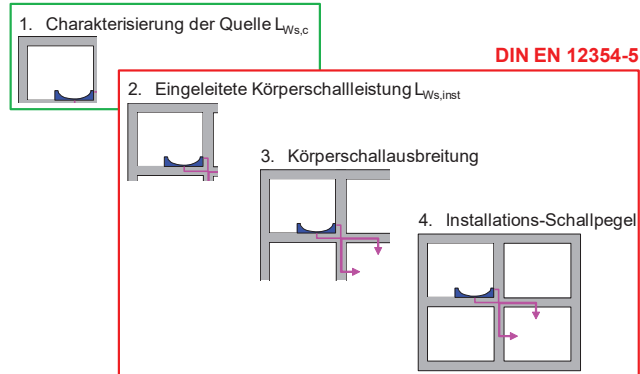
In der Regel sind Voruntersuchungen in Musterbädern am Bau, aus zahlreichen und naheliegenden Gründen (unterschiedliche Installationen, Messung nicht in den Bauablauf integrierbar, ...), jedoch weder möglich noch zielführend. Von größerer Bedeutung sind hingegen Prüfstandsmessungen an Sanitärinstallationen, wobei nahezu ausschließlich Messungen in Musterbau-Prüfständen (z. B. im Installationsprüfstand des Fraunhofer IBP in Stuttgart) durchgeführt werden. Dabei wird unter Prüfstandsbedingungen ein Ausschnitt aus dem Geschosswohnungsbau aufgebaut (vgl. Abbildung 1), wobei neben weiteren Voraussetzungen für bauakustische Prüfstandsmessungen die notwendigen Randbedingungen für die Messung häufig sehr niedriger Schalldruckpegel von Installationen einzuhalten sind. Den Ansatz für den Nachweis von Schallschutzanforderungen anhand von Ergebnissen aus Musterbau-Prüfständen beruht darauf, dass die bauliche Gegebenheit im Prüfstand eine praxisnahe „worst-case“ Bausituation darstellt. Man geht also davon aus, dass wenn die im Prüfstand gemessenen Installationsschallpegel die Schallschutzanforderungen einhalten, auch in der tatsächlichen Bausituation mindestens mit gleichen Werten gerechnet werden kann und die Anforderungen eingehalten sind.

An ihre Grenzen stößt diese Vorgehensweise, wenn Ergebnisse aus unterschiedlichen Prüfständen miteinander verglichen werden sollen. Weichen die baulichen Randbedingungen der Prüfstände voneinander ab, muss zwingend ein Bauakustiker zu Rate gezogen werden. Wichtig für Planer und Hersteller in der ständig schwelenden Debatte um steigende Baukosten, aufgrund akustischer Anforderungen, wird zunehmend die Feinabstimmung zwischen Bauwerk und Sanitärkomponenten. Damit können die Anforderungen zielgenau eingehalten werden ohne dabei das Maximum an kostspieligen, schallreduzierenden Maßnahmen ausschöpfen zu müssen.

## Prognoseberechnung von Installationsgeräuschen – Stand der Normung

Ziel ist es also, die akustischen Eigenschaften von Sanitärinstallationen losgelöst von den baulichen Gegebenheiten anzugeben, um anschließend rechnerisch beliebige Bausituationen und Übertragungspfade mit den Quelldaten in Verbindung setzen zu können. Erste Ansätze hierzu basieren auf Grundlage der Prognoseberechnungen der Luftschallübertragung in DIN EN 12354-1, deren erste Fassung im Jahr 2000 veröffentlicht wurde. Speziell für die Prognose von Installationsgeräuschen wurde im Jahr 2009 mit DIN EN 12354-5 erstmals ein Verfahren bereitgestellt. DIN EN ISO 12354-1 sowie die Teile 2 (Trittschalldämmung), 3 (Schalldämmung von Außenbauteilen) und 4 (Schallübertragung ins Freie) sind zuletzt 2017 überarbeitet worden. DIN EN 12354-5 befindet sich derzeit in Überarbeitung (und in der Erprobung). Gleichzeitig mit DIN EN 12354-5 wurde 2009 die Norm DIN EN 15657-1 veröffentlicht. Darin wird die Methode zur messtechnischen Bestimmung des Luft- und Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand beschrieben. Mit letztem Stand vom Oktober 2017 können mit den Verfahren in DIN EN 15657 nun Eingangsdaten für die Prognoseberechnung von Installationsgeräuschen nach DIN EN 12354-5 bereitgestellt werden (siehe Abbildung 2).

### DIN EN 15657



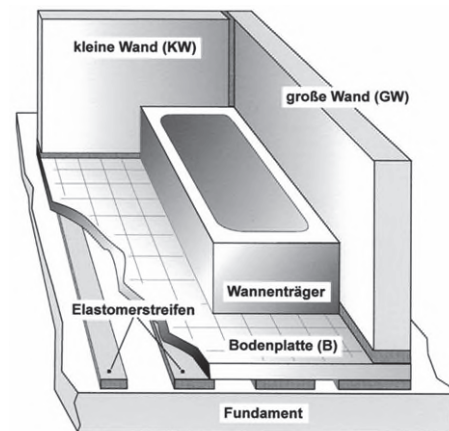
**Abbildung 2:** Verfahren zur Prognoseberechnung von Installationsgeräuschen nach DIN EN 12354-5 mit Eingangsdaten aus DIN EN 15657.

## Standard-Messverfahren nach DIN EN 15657

Grundsätzlich stehen für die Charakterisierung von Sanitärinstallationen als Körperschallquellen in EN 15657 drei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung.

- Direkte Messung: Die benötigten Quelldaten (freie Schwingenschnelle der Quelle  $v_f$  beim Betrieb der Quelle ohne Ankopplung an den Prüfstand und die Admittanz der Quelle  $Y_s$ ) können direkt gemessen werden. Diese Methode ist in der Praxis jedoch selten anwendbar.
- Indirekte Messung: Mit der Empfangsplattenmethode können freie Schnelle und Kurzschlusskraft  $F_b$  der Quelle bestimmt werden.
- Kombination aus direkter und indirekter Messung: Wohingegen die Messung der freien Schnelle häufig noch verlässliche Werte liefern kann, treten bei der

Messung der Kurzschlusskraft oft praktische Probleme auf. So kann z. B. die Schalleinleitung über den Rand einer Duschfläche in die angrenzende Wand nicht vernünftig bestimmt werden, weshalb sich hier die Anwendung der Empfangsplattenmethode empfiehlt.



**Abbildung 3:** Messaufbau zur Bestimmung der Körperschalleistung nach der Empfangsplattenmethode am Beispiel einer Badewanne mit EPS-Wannenträger.

Ein Empfangsplattenprüfstand besteht aus bis zu drei elastisch gelagerten und voneinander entkoppelten Platten. In obiger Abbildung 3 ist eine Raumecke aus massiven Empfangsplatten aus Beton nachgebildet, in der eine Badewanne montiert ist. Das Prüfobjekt wird dabei so praxisnah wie möglich montiert und in Betrieb genommen. Am Beispiel von Duschflächen, müssen diese mit allen Montagehilfen (z. B. Fußgestelle) und Schallschutzmaßnahmen (z. B. Schalldämmbänder) aufgebaut werden. Alle prüfstandseitigen Anschlüsse (Wände, Boden, ggf. schwimmender Estrich, etc.) müssen dem späteren bauseitigen Einbau (Abdichtung, Fliesen, Silikon) entsprechen. Der Betriebszustand, also die Geräuschanregung, richtet sich nach dem Sanitärobjekt selbst sowie nach nationalen Anforderungen für die Messung und Beurteilung von Installationsgeräuschen.

Anschließend wird die Körperschalleistung der Quelle  $L_{ws}$ , die in die einzelnen Platten eingeleitet wird, bestimmt.

$$L_{ws} = \left\{ 10 \lg \left( \frac{2 \pi f m \eta S}{f_0 m_0 S_0} \right) \right\} + L_{vs} - 60 \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

In obiger Gleichung (1) sind  $m$  die flächenbezogene Masse in  $\text{kg}/\text{m}^2$ ,  $\eta$  der gemessene Gesamtverlustfaktor und  $S$  die Fläche in  $\text{m}^2$  der jeweiligen Platte. Die Frequenz  $f$  in Hz sowie die Referenzwerte  $f_0 = 1 \text{ Hz}$ ,  $m_0 = 1 \text{ kg}/\text{m}^2$  und  $S_0 = 1 \text{ m}^2$  ergänzen den Inhalt der Klammer.  $L_{vs}$  ist der mittlere Schnellepegel auf der jeweiligen Platte, gemessen beim Betrieb der Quelle und beschreibt demnach die Messgröße, von der die Körperschalleistung des Prüfobjektes direkt abhängt.

## In situ-Messverfahren nach DIN EN 15657

In vielen Fällen ist der Einsatz eines Empfangsplattenprüfstandes zur Bestimmung der Körperschalleistung einer Quelle nicht praktikabel. Dann bietet sich das Schalleistungs-Ersatzverfahren (engl. „power substitution method“) an. Hierbei wird mit einer kalibrierten

Referenz-Körperschallquelle der Baukörper angeregt und die Übertragungsfunktion zwischen der direkt gemessenen Körperschalleistung der Referenzquelle  $L_{Wk}$  und dem Quadrat der resultierenden mittleren Schnelle auf dem angeregten Bauteil  $L_{vk}$  gebildet. Anschließend wird die reale Quelle in Betrieb genommen und wieder das Quadrat der resultierenden mittleren Schnelle auf dem angeregten Bauteil  $L_{vs}$  gemessen (vgl. Abbildung 4, blaues Dreieck). Damit kann der Körperschallleistungspegel der realen Quelle  $L_{Ws}$  nach folgender Beziehung ermittelt werden.

$$L_{Ws} = L_{vs} + [L_{Wk} - L_{vk}] \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

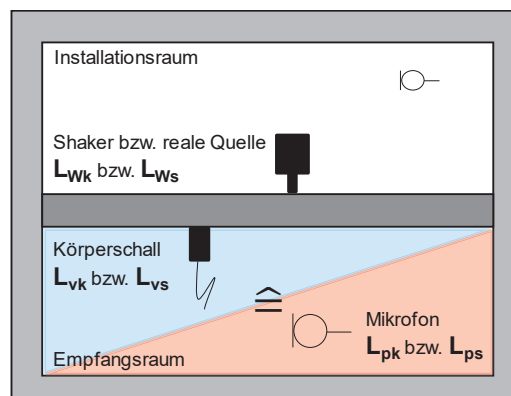
## Körperschalleistung aus Luftschallmessungen in einem Musterbauprüfstand

Die Anwendung von Gleichung (2) hat sich bereits in vielen Fällen als mindestens ebenbürtig zu der eingangs beschriebenen Empfangsplattenmethode erwiesen. Ein Nachteil beider Methoden ist in der Messung der mittleren Schnelle auf der Empfangsstruktur zu sehen. Der Vertrauensbereich bei Körperschallmessungen kann, sowohl bei tiefen Frequenzen u. a. aufgrund der starken Ortsabhängigkeit des Schallfeldes auf Bauteilen, als auch bei höheren Frequenzen u. a. aufgrund der Kopplungsresonanzen zwischen Körperschallaufnehmer und Bauteil, deutlich eingeschränkt sein.

Im Beitrag „Bestimmung der charakteristischen Körperschall-Leistung von Sanitärinstallationen durch Luftschallmessungen in einem Musterbau“ zur DAGA 2014 in Oldenburg [1] wurde ein Verfahren vorgestellt, bei dem das Schalleistungs-Ersatzverfahren, anstelle der Messung der mittleren Schnelle auf dem angeregten Bauteil, durch Luftschallmessungen  $L_{pk}$  und  $L_{ps}$  in einem angrenzenden Empfangsraum angewendet wurde (vgl. Abbildung 4). Dabei wurde das Verfahren an idealisierten Körperschallquellen erprobt und zeigte sehr vielversprechende Ergebnisse.

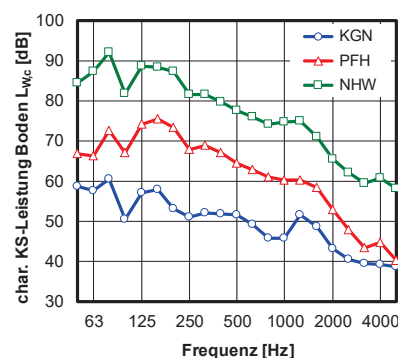
Nachfolgend wird die Anwendbarkeit der Methode zur Bestimmung der Körperschalleistung aus Luftschallmessungen in einem Musterbauprüfstand am Beispiel von Duschflächen auch an realen Sanitärobjekten bestätigt. Zunächst wurde hierbei die Übertragungsfunktion zwischen der in den Prüfstandsboden eingeleiteten, direkt gemessenen Körperschalleistung der Referenzschallquelle  $L_{Wk}$  (Shaker, rosa Rauschen) und des im vertikal unter dem Installationsraum ankommenden Luftschallpegels  $L_{pk}$  bestimmt (Abbildung 4). Anschließend wurden die gemessenen Installations-Schallpegel  $L_{ps}$ , der praxisgerecht im Installationsraum eingebauten Duschflächen mit der Körperschall-Luftschall-Übertragungsfunktion  $[L_{Wk} - L_{pk}]$  bestimmt.

$$L_{Ws} = L_{ps} + [L_{Wk} - L_{pk}] \quad [\text{dB}] \quad (3)$$



**Abbildung 4:** Messschemata der Körperschalleistung nach dem Schalleistungs-Ersatzverfahren in DIN EN 15657 (blaues Dreieck) und nach dem Schalleistungs-Ersatzverfahren aus Luftschallmessungen (rotes Dreieck).

Bei den untersuchten Duschflächen aus Stahlemail mit Montagerahmen mit einzelnen Aufstellfüßen wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass die Körperschalleinleitung im Wesentlichen über den Boden erfolgt und die Einleitung in die angrenzenden Wände in erster Näherung dem Boden zugeschlagen werden kann. Diese Annahme kann getroffen werden, wenn der Rand der Duschfläche umlaufend z. B. mit einem schallentkoppelnden Schaumstoffband beklebt wurde und vor anbringen der Silikonfuge der Fugenbereich sorgfältig mit einer passenden Schaumstoff-Rundschnur hinterfüllt wird. Dadurch wird die Körperschalleinleitung in die angrenzenden Wände minimiert und die Körperschallübertragung über den Boden überwiegt. Für die (stationäre) Geräuschanregung wurde das Körperschall-Geräuschnormal (KGN) und das Norm-Trittschallhammerwerk (NHW) eingesetzt. Zudem wurden die Duschflächen durch einzelne Schlagimpulse mit dem EMPA-Pendelfallhammer (instationär, PFH) angeregt. Dabei wurden die Spektren bei den jeweiligen Maximalwerten  $L_{AFmax}$  der einzelnen Schläge, für die Berechnung der KS-Leistung, terzweise ausgewertet und energetisch gemittelt. Das entspricht zwar nicht exakt der Auswertung, die die Schweizer Norm SIA 181:2006 für diese Messung vorsieht. Für die frequenzabhängige Darstellung von einzelnen Schallereignissen ist diese Vorgehensweise jedoch üblich und liefert terzweise wieder aufsummiert vergleichbare Werte für den Gesamtwert  $L_{H,tot}$  nach SIA 181.



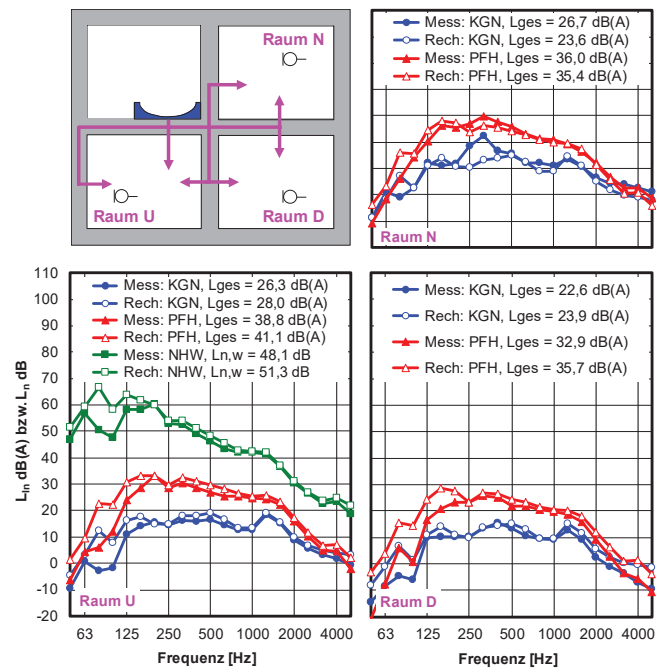
**Abbildung 5:** Charakteristische Körperschalleistung nach Gleichung (3) einer Duschfläche bei Geräuschanregung mit dem Körperschallgeräuschnormal (KGN), dem EMPA-Pendelfallhammer (PFH) und dem Norm-Trittschallhammerwerk (NHW).

## Prognoseberechnung mit Daten von Luftschallmessungen im Musterbauprüfstand

Inwiefern die Ergebnisse für die Körperschallleistung aus Luftschallmessungen der tatsächlich eingeleiteten Leistung entsprechen, kann für reale Quellen gar nicht oder nur mit hohem, messtechnischen Aufwand bestimmt werden. Im Grunde ist auch nicht die Körperschallleistung eines Sanitärobjekts die Zielgröße, sondern das durch Betrieb des Sanitärobjekts in einem schutzbedürftigen Raum resultierende Installationsgeräusch. Deshalb wurden nach den in DIN EN 12354-5 und DIN EN ISO 12354-1 beschriebenen Verfahren und anhand der ermittelten Körperschallleistungsdaten, Prognoseberechnungen für zu erwartende Installationsgeräusche und Trittschallpegel auf der Grundlage der Gebäudedaten für den Installationsprüfstand am Fraunhofer IBP durchgeführt.

Nachfolgende Größen wurden abweichend von den Vorschlägen in der DIN EN ISO 12354-1 bestimmt. Für die Berechnung der Stoßstellendämm-Maße wurde auf die aktuelleren Gleichungen in DIN 4109-32:2016-07 zurückgegriffen. Die Bestimmung des Abstrahlgrades der Bauteile erfolgte nach den Näherungsformeln (6.69) in [2], die im IBP an übliche Gebäude in Massivbauweise angepasst wurden. Die Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes  $R_w$  erfolgte zunächst nach DIN 4109-32. Anschließend wurde die Schalldämmkurve mittels eines vereinfachten Modells bestimmt, das ursprünglich von Gösele sowie Fasold, Sonntag und Winkler eingeführt [3, 4] und später im IBP weiterentwickelt wurde [5]. Das Modell wurde so angepasst, dass der resultierende  $R_w$ -Wert der Schalldämmkurve möglichst gut der entsprechenden Angabe aus DIN 4109 entspricht. Die Eingabe der erforderlichen Gebäudedaten für die Prognoseberechnung konnte dadurch, neben den Raumabmessungen, auf den jeweils verwendeten Baustoff (Stahl-, Leicht-, Poren- Beton, Kalksandstein oder Mauerziegel) sowie die flächenbezogene Masse des Bauteils beschränkt werden. Die Materialdaten der Baustoffe sind wiederum im Wesentlichen der DIN EN ISO 12354-1 entnommen.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Prognoseberechnung nach DIN EN 12354-5 für die in Abbildung 5 dargestellten Schalleistungsdaten und eine praxisgerecht eingebaute Stahlmail-Duschfläche sowie den Gebäudedaten im Installationsprüfstand am Fraunhofer IBP. Zum Vergleich sind die in den jeweiligen Prüfräumen N, U und D (neben, unter und diagonal zum Installationsraum) direkt gemessenen Installations-Schallpegel  $L_{AFeg,n}$  bei Anregung der Duschfläche mit dem Körperschall-Geräuschnormal (KGN) und der Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  bei Anregung mit dem Norm-Trittschallhammerwerk (NHW) dargestellt. Ergänzend sind die Ergebnisse aus Prognose und Messung für die instationäre Geräuschanregung der Duschfläche mit dem EMPA-Pendelfallhammer aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung.



**Abbildung 6:** Ergebnisse der Prognoseberechnung nach DIN EN 12354-5 anhand der in Abbildung 6 dargestellten Schalleistungsdaten für eine praxisgerecht eingebaute Stahlmail-Duschfläche sowie den Gebäudedaten im Installationsprüfstand am Fraunhofer IBP.

Abweichungen in den Ergebnissen, vor allem bei tiefen Frequenzen, sind, neben der angewendeten Näherung zur Bestimmung der KS-Leistung, im Wesentlichen in der Genauigkeit zur Bestimmung der Schalldämmung der Bauteile zu suchen.

### Ausblick

Vor Allem das Näherungsverfahren, bei dem lediglich die in den Boden eingeleitete Körperschallleistung berücksichtigt wird, birgt derzeit noch Einschränkungen in der Genauigkeit der Prognose. Aufgrund der Menge an verfügbaren Daten, bietet dies jedoch zunächst eine wichtige Möglichkeit das Prognoseverfahren der DIN EN 12354-5 einzuführen und zu erproben. In Zukunft werden jedoch alle beteiligten Übertragungswege (Boden und Wände) separat erfasst und bei der Berechnung berücksichtigt werden müssen. Um den Einfluss der theoretischen Gebäudedaten zu quantifizieren, sind Messungen in ausgeführten Bauten geplant.

### Literatur

- [1] Öhler S., Weber L.: Körperschall-Leistung aus Luftschallmessungen. DAGA 2014, Oldenburg
- [2] Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall. Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [3] Gösele, K.: Zur Luftschalldämmung von einschaligen Wänden und Decken. Acustica 20 (1968), S. 334 - 342.
- [4] Fasold, W., Sonntag, E., Winkler, H.: Bauphysikalische Entwurfslehre - Bau- und Raumakustik. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1987, Abschn. 7.5.1.4.
- [5] Weber, L.: Kriterien für die schalltechnisch günstige Ausführung von Wänden aus gelochten Mauersteinen, 1. Projektabschnitt. IBP-Bericht B-BA 3/2002 (2002).