

# Prognose von Schalldruckpegeln in Leichtbauten nach DIN EN 12354-5 unter Verwendung der charakteristischen Quellgrößen einer Körperschallquelle

Albert Vogel<sup>1</sup>, Jörg Arnold<sup>2</sup>, Oliver Kornadt<sup>1</sup>, Conrad Völker<sup>2</sup>, Volker Wittstock<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Kaiserslautern, E-Mail: [albert.vogel@bauing.uni-kl.de](mailto:albert.vogel@bauing.uni-kl.de)

<sup>2</sup> Bauhaus-Universität Weimar, E-Mail: [joerg.arnold@uni-weimar.de](mailto:joerg.arnold@uni-weimar.de)

<sup>3</sup> Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig

## Einleitung

Haustechnische Anlagen in Wohn- und Bürogebäuden, wie Pumpen, Heizungsanlagen, Gaskompressoren, Lüftungsgeräte oder Klimaanlage, können sehr störend sein, wenn sie Lärm verursachen. Die Untersuchung der zugehörigen Entstehung und Ausbreitung von Körperschall ist aus diesem Grund vor dem Geräteeinbau anhand einer Körperschallprognose durchzuführen und damit auch eines der zentralen Problemstellungen bei der Auslegung der Geräteanordnung sowie der Dimensionierung von Bauteilen.

## Prognose von Schalldruckpegeln nach DIN EN 12354-5

Die Vorhersage des Schalldruckpegels infolge einer Körperschallquelle kann nach DIN EN 12354-5 [1] erfolgen, wobei ein normierter Gesamt-Schalldruckpegel  $L_n$  als Summe der energetischen Anteile aller vorhandenen Übertragungswege rechnerisch ermittelt wird. Dafür wird der anteilige Schalldruckpegel für jeden Übertragungsweg zwischen dem Bauteil  $i$ , an dem die Quelle befestigt ist, und den im Empfangsraum abstrahlenden Bauteilen  $j$  separat nach Gl. (1) bestimmt.

$$L_{n,s,j} = L_{Ws,inst,i} - D_{saj} - R_{ij,ref} - 10 \lg \frac{S_i}{S_{ref}} - 10 \lg \frac{A_{ref}}{4} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

- $L_{n,s,i,j}$  - Schalldruckpegel für die Übertragung zw. den Bauteilen  $i$  und  $j$  – die Summe aller beteiligten Bauteile ergibt den Gesamtschalldruckpegel
- $L_{Ws,inst,i}$  - installierter Körperschalleistungspegel
- $D_{as,i}$  - Ausdruck zur Anpassung der Körperschallanregung am Bauteil  $i$  an eine Luftschallanregung
- $R_{ij,ref}$  - Flankenschalldämmkoeffizient für die Luftschallübertragung von Bauteil  $i$  zu Bauteil  $j$  mit Bezug auf eine Bauteilfläche von  $S_{ref} = 10 \text{ m}^2$
- $S_i$  - Fläche des Bauteils  $i$  mit der befestigten Quelle
- $S_{ref}$  - Bauteil-Bezugsfläche,  $S_{ref} = 10 \text{ m}^2$
- $A_{ref}$  - Bezugs-Absorptionsfläche,  $A_{ref} = 10 \text{ m}^2$

Neben der genauen Kenntnis der Übertragungsstruktur und deren spezifischen Eigenschaften ist für die Prognose des sich ausbreitenden Körperschalls ebenfalls relevant, die in die Gebäudestruktur eingeleitete Körperschalleistung  $L_{Ws,inst}$  ausreichend genau zu charakterisieren. Dies macht eine präzise Quellencharakterisierung erforderlich. Körperschallquellen können sehr verschieden hinsichtlich ihres

Schwingungsverhaltens und ihrer mechanischen Verbindung zur Empfangsstruktur sein, was ein allgemein anwendbares Charakterisierungsverfahren erforderlich macht.

Zur Unsicherheit der gesamten Prognoserechnung sind in [1] nur wenige Informationen enthalten. Für die Bestimmung von charakterisierenden Parametern beliebiger Körperschallquellen ist in Tabelle 2 der [1] eine Unsicherheit von 5 dB angegeben. Für die Prognose der Einleitung und Schallübertragung im Gebäude sind ebenfalls 5 dB als Unsicherheit angegeben, was bei Unabhängigkeit beider Werte zu einer Gesamtunsicherheit von insgesamt 7 dB führt.

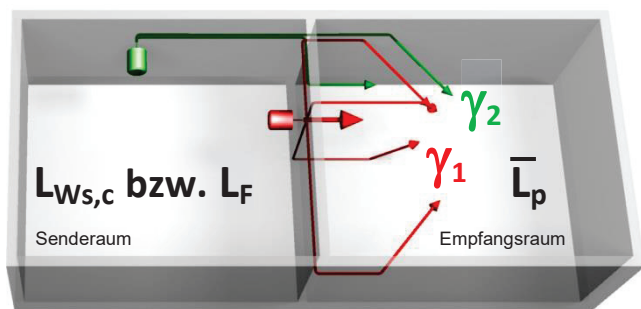
## Charakterisierung der Körperschallquellen

Die Charakterisierung von Körperschallquellen kann mit der *Two-Stage-Method* (TSM) [2] durchgeführt werden. Die Charakterisierung erfolgt dabei durch die quellspezifischen Parameter Kurzschlusskraft  $F_b$  und Freie Schnelle  $v_{sf}$  bzw. der sich daraus ableitbaren Quellmobilität  $Y_s$ .

*Two-Stage* bedeutet hier zwei mögliche Bewegungszustände der Quelle: der *Kraftquellen-Zustand* und der *Schnellequelle-Zustand*. Ist die Quelle an einer sehr schweren und steifen Empfangsplatte montiert, liegt der Zustand Kraftquelle vor. Dadurch kann die charakteristische Quellgröße Kurzschlusskraft  $F_b$  bestimmt werden. Im Fall der Schnellequelle ist die Körperschallquelle an eine sehr leichte Struktur montiert und die Quellgröße Freie Schnelle  $v_{sf}$  kann ermittelt werden [3,4,5].

## Charakterisierung der Übertragungswege

Die Schallweiterleitung über die Gebäudestruktur bis hin zur Schallabstrahlung im Empfangsraum und der Ausbildung eines diffusen Schallfeldes wird mit den drei letzten Termen der Gl. (1) gemäß [1] separat für jeden beteiligten Übertragungsweg beschrieben. Alternativ lässt sich das Gesamt-Schallübertragungsverhalten einer Gebäudestruktur auch mit Hilfe einer Übertragungsfunktion  $H$  in einer einzigen Größe zusammenfassen, wobei auf eine Unterteilung in einzelne, voneinander unabhängige Übertragungswege verzichtet wird. Eine solche Übertragungsfunktion lässt sich sowohl direkt aus dem Prognoseverfahren nach [1] ableiten als auch messtechnisch im Gebäude erfassen. Dafür kann bspw. die Übertragungsfunktion über die messtechnisch sehr gut erfassbaren Größen Schalldruck  $p$  im Empfangsraum (Systemantwort) und eine die Struktur anregende Kraft  $F$  (Systemanregung) gemäß Gl. (2) bestimmt werden. In-Situ-Messungen haben dabei den entscheidenden Vorteil, dass alle am Bau auftretenden Übertragungspfade simultan und unabhängig von der Bauweise richtig erfasst werden, ohne das Strukturverhalten im Detail zu kennen.



**Abbildung 1:** Skizze zu relevanten Schallübertragungswegen für Var.1: Quellankopplung am gemeinsamen Trennteil (rot) und Var.2: Quellankopplung am flankierenden Bauteil (grün) bei der messtechnischen Bestimmung des Übertragungsmaßes  $\gamma$

Der in einer Prognose zu bestimmende Installationspegel stellt einen mittleren Schalldruckpegel im Empfangsraum dar. Aus diesem Grund ist der Schalldruck an mehreren Positionen im Empfangsraum als mittlerer Schalldruck zu erfassen. Durch anschließende Pegelbildung und Terzmittelung werden die beteiligten Übertragungsfunktionen gemäß Gl. (2) in ein Übertragungsmaß  $\gamma$  überführt [6]. Zudem kann das Übertragungsmaß als arithmetischer Mittelwert  $\bar{\gamma}$  über verschiedene Anregepositionen angegeben werden [6,7], um allgemeingültige Aussage zum Schall-Übertragungsverhalten unabhängig von der exakten Anregeposition treffen zu können. Dies ist vor allem bei Leichtbaukonstruktionen mit stark inhomogenen Bauteilaufbauten sinnvoll.

$$H(f) = \frac{p(f)}{F(f)} \rightarrow \gamma = \bar{L}_p - L_F \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

- $\bar{L}_p$  - mittlerer Schalldruckpegel im Empfangsraum
- $L_F$  - Kraftpegel mit Bezugskraft  $F_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N}$

### Untersuchungen zur Körperschallübertragung

Die Anwendbarkeit experimentell bestimmter Übertragungsmaße sowie mit der *Two-stage-methode* ermittelter Kenngrößen zur Charakterisierung von Körperschallquellen in einem Prognoseverfahren zum Installationspegel wurde in Untersuchungen durch Berechnungen und Labormessungen überprüft. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

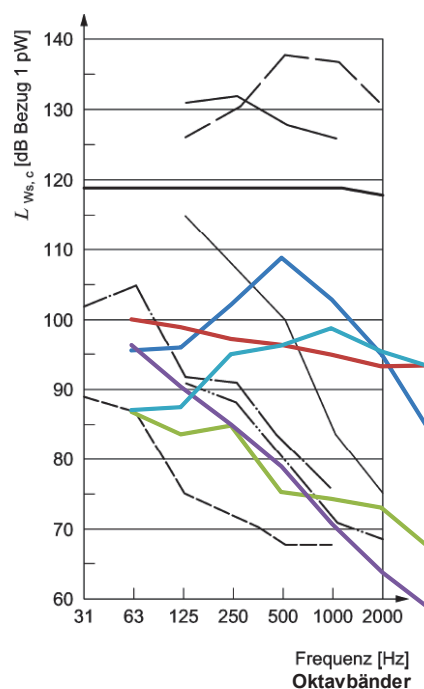
#### Charakteristische Körperschalleistung

Für Körperschallquellen, die mit TSM charakterisiert worden, kann nach [1] mit der Freien Schnelle  $v_{sf}$  sowie der Quellmobilität  $Y_S$  der charakteristische Leistungspegel  $L_{Ws,c}$  nach Gl. (3) berechnet werden:

$$L_{Ws,c} = 10 \cdot \lg \frac{v_{sf}^2}{W_{ref}} \frac{1}{|Y_S|} \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

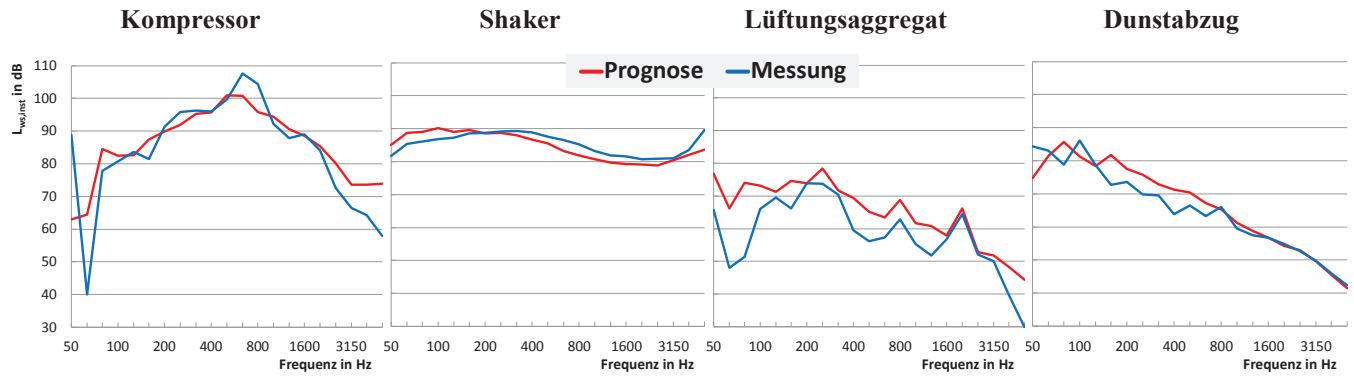
- $L_{Ws,c}$  - Charakteristischer Körperschalleistungspegel
- $v_{sf}$  - Freie Schnelle
- $W_{ref}$  - Bezugsleistung  $10^{-12} \text{ W}$
- $Y_S$  - Quellmobilität

Vergleicht man die in [1] beispielhaft gegebenen Werte für den charakteristischen Leistungspegel exemplarischer Körperschallquellen mit den in dieser Untersuchung mittels TSM bestimmten Leistungspegeln, so liegen die Werte in einem ähnlichen Bereich. Eine in Abbildung 2 verdeutlichte Besonderheit ist, dass die aus [1] übernommenen Quelldaten (schwarze Linien) auf der Annahme beruhen, dass die Quellen entweder als reine Kraft- oder als reine Schnellequelle angesehen werden. Dies wäre der Fall, wenn sich Empfangs- und Quellmobilität stark voneinander unterscheiden (*Schnellequelle*  $\rightarrow$  Quellmobilität ist sehr viel kleiner als Empfangsmobilität; *Kraftquelle*  $\rightarrow$  Quellmobilität ist sehr viel größer als Empfangsmobilität). Die in der Untersuchung charakterisierten Quellen (farbige Linien) stellen dagegen Quellen dar, die weder als reine Kraft- noch als reine Schnellequelle angesehen werden müssen und somit allgemein gültige Größen darstellen, unabhängig von der Art des Quellenverhaltens am Empfänger.



- Waschmaschine Schleudern; D.5;  $Y_{ref} = 10^{-3} \text{ Ns/m}$
- Heizkessel; D.5;  $Y_{ref} = 10^{-3} \text{ Ns/m}$
- Gewindeschneidmaschine; D.9;  $Z_s = 2\pi f \cdot 0,5 \text{ m/Ns}$
- Kompressor
- Shaker
- Momenten-Quelle
- Dunstabzug
- Lüftungsaggregat
- Aufzugmaschine auf elastischen Abstützungen; D.10;  $Z_s = 10^6 \text{ m/Ns}$
- Geschirrspüler; D.5;  $Y_{ref} = 10^{-3} \text{ Ns/m}$
- Badewannen-Befüllung; D.5;  $Y_{ref} = 10^{-3} \text{ Ns/m}$
- Bohren; D.5;  $Y_{ref} = 10^{-3} \text{ Ns/m}$

**Abbildung 2:** Charakteristische Körperschalleistungspegel  $L_{Ws,c}$  nach [1] sowie für verschiedene messtechnisch untersuchte Körperschallquellen



**Abbildung 3:** Installierter Körperschallleistungspegel  $L_{ws,inst}$  auf einem Empfangsbauteil für verschiedene Quellen; Vergleich zwischen Prognoserechnung nach [1] (rot) sowie Messung mittels Empfangsplattenmethode (blau)

**Vergleich des installierten Körperschallleistungspegels: berechnet – gemessen**

Der installierte Körperschallleistungspegel  $L_{ws,inst}$  nach [1] beschreibt die von einer Quelle in ein Empfangsbauteil eingetragene Körperschallleistung. Diese ist abhängig von deren charakteristischen Körperschallleistungspegel  $L_{ws,c}$  sowie dem Verhältnis der Quellmobilität  $Y_s$  und der Mobilität des Empfangsbauteils  $Y_i$  in Form von  $D_{c,i}$

$$L_{ws,inst} = L_{ws,c} - D_{c,i} \quad [dB] \quad (4)$$

$$D_{c,i} = 10 \lg \frac{|Y_s|^2 + |Y_i|^2}{|Y_s| \cdot \text{Re}\{Y_i\}} \quad [dB] \quad (5)$$

- $L_{ws,inst}$  - in das Empfangsbauteil eingeleiteter Körperschallleistungspegel
- $D_{c,i}$  - Kopplungsterm zum Mobilitätenverhältnis
- $Y_s$  - Mobilität der Quelle
- $Y_i$  - Mobilität des Empfangsbauteils

Einen Vergleich zwischen mittels Empfangsplattenmethode gemessener und prognostizierter Leistung auf einer Leichtbauwand ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Leistungspegelunterschiede fallen für die meisten untersuchten Körperschallquellen vergleichsweise gering aus. Nur beim Lüftungsaggregat ergaben sich größere Unterschiede, was vermutlich auf dessen vergleichsweise geringe Schwingungsaktivität zurückzuführen ist.

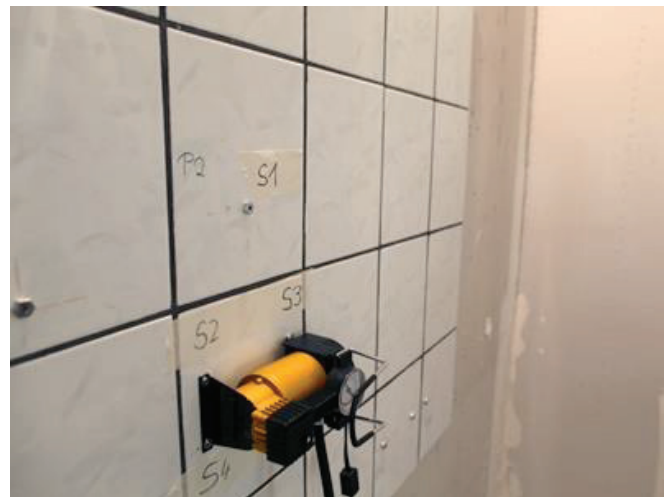
**Bestimmung des Übertragungsmaßes**

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der TSM zur Quellencharakterisierung wurde eine Quelle in einer realen Gebäudesituation untersucht (Abbildung 4). Dafür wurde ein Kompressor im Leichtbauprüfstand der PTB Braunschweig gemäß der Var.2 der Abbildung 1 an die flankierende Wand zwischen 2 benachbarten Räumen montiert. Zur Charakterisierung der Schallübertragung über die beiden relevanten Übertragungswege wurde ein mittleres Übertragungsmaß messtechnisch bestimmt. Dabei wurden neben den Montagepunkten des Kompressors unterschiedliche Ankopplungspunkte in Ständernähe der Leichtbauwand sowie in Plattenmitte berücksichtigt.

Gemäß dem in [6] beschriebenen Verfahren wurde das Übertragungsmaß anschließend auf eine Bezugs-Impedanz des Empfangsbauteils ( $Z_0=400\text{kg/s}$ ), eine Bezugs-Nachhallzeit ( $T_0=0,5\text{s}$ ) sowie die Luftschalldämmung der aktivierten Übertragungswege normiert. Zur Beschreibung der Luftschalldämmung der beiden relevanten Übertragungswege (Var.2 der Abbildung 1) wurden die Flankenschalldämmkoeffizient  $R_{ij}$  mit dem Intensitätsverfahren nach DIN EN ISO 15186-2 als Bau-Intensitätsschalldämm-Maße für flankierende Bauteile messtechnisch bestimmt und in der Prognoserechnung berücksichtigt.

**Vergleich des Schalldruckpegels im Empfangsraum: berechnet – gemessen**

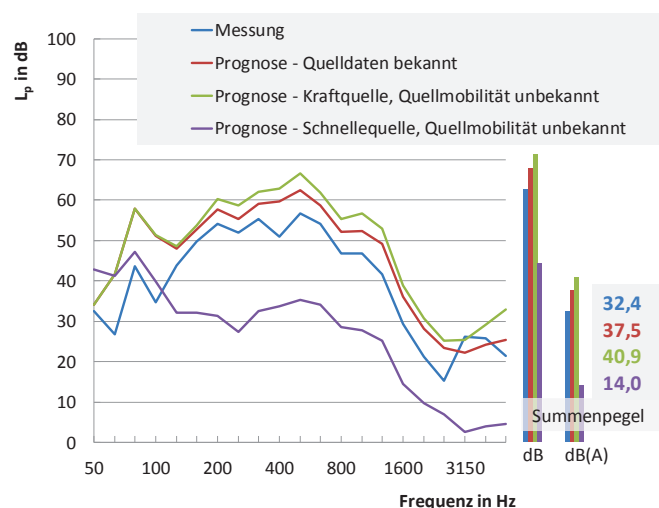
Im Anschluss an die Charakterisierung des Übertragungsweges anhand eines normierten Übertragungsmaßes sowie der Erfassung der Quellkenngößen mittels TSM wurde der Kompressor an die flankierende Wand des Leichtbauprüfstandes montiert (Abbildung 4) und der sich einstellende Schalldruckpegel bei eingeschaltetem Gerät gemessen.



**Abbildung 4:** Reale Körperschallquelle (Kompressor) im Senderaum des Leichtbauprüfstands der PTB Braunschweig

Für die Prognose des entstehenden Schalldrucks im Empfangsraum können nach [1] verschiedenen Annahme für die Körperschallquelle angewendet werden. So sind je nach

angenommenem Schwingungsverhalten der Quelle – Kraft- oder Schnellequelle – verschiedene Quellimpedanzen gegeben. Abbildung 5 zeigt den Vergleich zwischen den dadurch verschiedenen prognostizierten Schalldruckpegeln sowie den tatsächlich messbaren. Die beste Übereinstimmung mit der Messung (blaue Kurve) kann durch die Verwendung der mit TSM bestimmten Quellparameter erzielt werden (rote Kurve). Der prognostizierte Schalldruckpegel ist dabei im Mittel ca. 3-5 dB größer als der gemessene, was für die Abschätzung eine „sicher Seite“ bedeutet.



**Abbildung 5:** Schalldruckpegel im Empfangsraum; Vergleich zwischen gemessenen und mittels  $\gamma$  berechneten Pegeln unter Berücksichtigung der nach [1] möglichen Annahmen für Quellparameter

Für den untersuchten Fall der installierten Körperschallquelle agiert diese ähnlich einer Kraftquelle (grüne Kurve), allerdings ist die Schalldruckprognose mit gemessenen Quellparametern im mittleren und hohen Frequenzbereich um 2 bis 5 dB besser.

Vergleicht man die Unterschiede zwischen Prognose und Messung mit den in Tabelle 2 in [1] gegebenen Unsicherheiten für die Schalldruckprognose, so sind die bei dieser Untersuchung festgestellte Abweichung geringer. In [1] werden als Unsicherheit für die Bestimmung der Eingangsdaten jeweils für Quelle und Übertragungsweg 5 dB angegeben, was zu einer Gesamtunsicherheit von 7 dB führt, wenn die Parameter unabhängig voneinander ermittelt wurden. In [8] wird gezeigt, dass Quelldaten durch Anwendung von TSM mit einer Unsicherheit von ca. 4 dB ermittelt werden können. Die Prognose der Schalldruckpegel ergibt im Mittel eine um ca. 1 dB kleinere Abweichung als die in [1] angegebene Gesamtunsicherheit von 7 dB für Schalldruckprognosen infolge von Körperschallquellen.

## Zusammenfassung

In den durchgeführten Untersuchungen wurden Körperschallquellen mit der *Two-Stage-Method* charakterisiert. Der Vergleich von berechnetem und gemessenem installiertem Körperschallleistungspegel auf einer Empfangsplatte ergab eine gute Übereinstimmung. Für eine ausgewählte Körperschallquelle wurde anschließend mit den ermittelten Quell-

parametern und der Charakterisierung des Übertragungsweges anhand eines messtechnisch bestimmten Übertragungsmaßes der mittlere Schalldruckpegel im benachbarten Empfangsraum prognostiziert sowie direkt gemessen.

Die Verwendung von mittels TSM bestimmter Querkenngrößen ergab dabei die beste Übereinstimmung, wobei der berechnete Wert systematisch über dem Messwert lag. In Bezug zu den in DIN EN 12354-5 angegebenen Unsicherheiten für die Schalldruckprognose fielen die ermittelten Unterschiede zwischen Prognoserechnung und Messung etwas kleiner aus.

## Literatur

- [1] DIN EN 12354-5:2009: Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Teil 5: Installationsgeräusche. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [2] Gibbs, B.M.; Qi N.; Moorhouse A. T.: A practical characterisation for vibro-acoustic sources in buildings. *Acta Acustica united with Acustica*, 93 (2007) pp. 84-93.
- [3] Vogel, A.; Wittstock, V.; Kornadt, O.; Scholl, W.: Anwendung des Zwei-Plattenverfahrens zur Charakterisierung von Körperschallquellen. In: *Proceedings DAGA (2014)* Oldenburg.
- [4] Vogel, A.; Wittstock, V.; Kornadt, O.; Scholl, W.: Application of the two-stage method on the characterization of different structure-borne sound sources and a moment actor. In: *Proceedings INTER-NOISE (2013)* Innsbruck, Austria.
- [5] Vogel, A.; Wittstock, V.; Kornadt, O.; Scholl, W.: Measurement and prediction of structure-borne sound power in plate-shaped building elements. In: *Proceedings INTER-NOISE (2012)* New York, USA.
- [6] Arnold, J.; Kornadt, O.: Beschreibung körperschallinduzierter Schalldruckpegel mit Hilfe von Übertragungsfunktionen. In: *Bauphysikkalender (2014)*. S. 641-663, Ernst und Sohn, Berlin.
- [7] Kornadt, O.; Arnold, J.; Wittstock, V.; Scholl, W.: Prediction of the sound pressure level caused by technical equipment in buildings by analyzing transfer functions. In: *Proceedings INTER-NOISE (2012)* New York, USA.
- [8] Vogel, A.; Wittstock, V.; Kornadt, O.; Scholl, W.: Assessment of the uncertainties using the “two-stage method” for the characterization of structure-borne sound sources. In: *Proceedings INTER-NOISE (2015)* San Francisco, USA.

## Danksagung

Die Versuche wurden durchgeführt an der Bauhaus-Universität Weimar sowie an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig.

Gefördert wurden die Untersuchungen vom Ministerium für Bildung und Forschung.