

## Tieffrequenter Trittschall – Stand der Wissenschaft und Technik

Berndt Zeitler<sup>1</sup>, Martin Schneider<sup>1</sup>, Ulrich Schanda<sup>2</sup>, Christoph Höller<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hochschule für Technik Stuttgart, Email: berndt.zeitler@hft-stuttgart.de

<sup>2</sup> Technische Hochschule Rosenheim, Email: ulrich.schanda@th-rosenheim.de

<sup>3</sup> Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Email: christoph.hoeller@oth-regensburg.de

### Einleitung

Der Schutz vor tieffrequentem Trittschall ist schon seit langem ein Thema in Fachkreisen, gewinnt in letzter Zeit weltweit aber immer mehr an Bedeutung. In zwei groß angelegten Studien aus Südkorea [1, 2] wurde gezeigt, dass Trittschall die Hauptstörquelle im Gebäude ist. Dabei gehen 80% der Beschwerden auf Geher und rennende und springende Kinder zurück. Aktuell wird in vielen Ländern nach Lösungen zur Reduzierung der Belästigung durch tieffrequenten Trittschall gesucht. Dazu gehört die Bestimmung geeigneter Messmethoden und Kenngrößen, die auch mit der subjektiven Wahrnehmung korrelieren. Sowohl Simulations- und Auralisierungsmethoden als auch die Verbesserung von Messmethoden und Anregungsquellen, die sich in den verschiedenen Ländern stark unterscheiden, werden untersucht. Die Ergebnisse all dieser Untersuchungen sind für Normungsarbeiten und zur Festlegung geeigneter nationaler und internationaler Anforderungsgrößen sehr bedeutsam. Dieser Beitrag liefert eine Übersicht der durchgeführten Untersuchungen zur Messung und Beurteilung von tieffrequentem Trittschall.

Der durch gehende Personen erzeugte Trittschall wirkt hauptsächlich im tiefen Frequenzbereich am störendsten. Gründe sind zum Einen die Anregung selbst, da diese im Frequenzbereich unter 100 Hz die höchsten Kraftpegel erzielt. Weiterhin weisen alle zwei- oder mehrschaligen Deckenkonstruktionen eine Masse-Feder-Masse-Resonanz auf; die Resonanzfrequenz liegt meist im o.g. Frequenzbereich. Die Trittschalldämmung ist in der Resonanz deutlich verschlechtert, erst oberhalb der Resonanzfrequenz erhöht sich diese. Zuletzt wird oftmals berichtet, dass der Grundgeräuschpegel in Wohnungen sehr niedrig ist und gleichzeitig die Lärmsensitivität der Bewohner zunimmt.

### Trittschallentstehung und Kenngrößen

Typisch störende Trittschallquellen sind menschliche Geher, hüpfende Kinder, auf den Boden fallende Objekte oder Möberrücken. Bei der Entstehung und der Beurteilung von Trittschall reicht es im Gegensatz zu Luftschall nicht aus, nur die Schallenergie in Sender- und Empfangsraum zu betrachten. Stattdessen liegt bei Trittschall ein komplexes Zusammenspiel zwischen Anregungsquelle und Empfängerstruktur bzw. übertragendem Bauteil vor. Eine gegebene Trittschallquelle kann aus diesem Grund sehr verschiedene Schallpegel erzeugen, je nachdem ob sie auf einer massiven Empfängerstruktur oder im Leichtbau eingesetzt wird. Diese Problematik beeinflusst auch die Wahl der Messmethoden und Messgrößen. Da es nicht

möglich ist, eine immer gleiche Anregung unabhängig vom zu messenden Bauteil zu erzeugen (in Bezug auf die eingeleitete Energie), werden stattdessen normierte Anregungsquellen verwendet und der durch diese Quellen erzeugte Schallpegel im Empfangsraum betrachtet.

### (Nachbildende) Normative Quellen

Man unterscheidet zwischen transienten und quasi-stationären Quellen. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über gebräuchliche Quellen. Einige Quellen sind auch in Abbildung 1 dargestellt. In Tabelle 2 sind die Vor- und Nachteile der verschiedenen Quellen dargestellt.

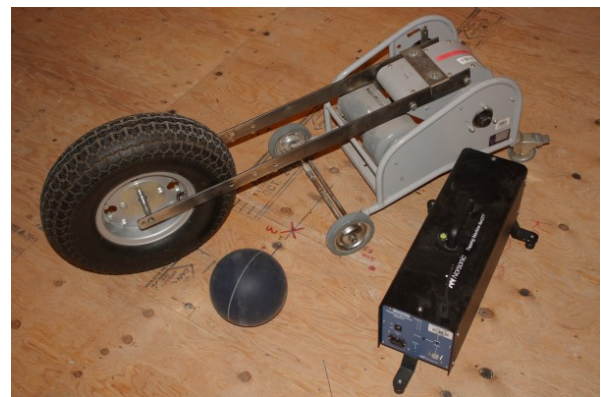


Abbildung 1: Quellen: v.l.n.r. Bang Machine, Ball, NHW

	leicht	schwer
hart	Norm-Hammerwerk <sup>s</sup> (NHW)	Hanteln <sup>t</sup> Bowlingkugel <sup>t</sup>
weich	modifiziertes NHW <sup>s</sup>	Ball <sup>t</sup> Bang Machine <sup>t</sup>

Tabelle 1: Übersicht über Trittschallquellen (<sup>t</sup> Transient, <sup>s</sup> Quasi-Stationär). Das modifizierte NHW entspricht dem NHW auf einer elastischen Schicht (DIN EN ISO 10140-5).

Quelle	Energieeinleitung		Aufwand
	tiefreq.	hochfreq.	
NHW	mittel	hoch	gering
Mod. NHW	gering	gering	mittel
Bang Machine	Zu hoch*	gering	hoch
Ball	hoch	gering	gering

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Quellen. (\*nichtlinear im Leichtbau)

## Trittschallübertragung

Trittschall wird über leichte sowie schwere Bauteile, wie zum Beispiel Treppen [3], Balkone [4] und Decken übertragen. Diese Bauteile besitzen oft einen schwimmenden Estrich zur Entkopplung oder sind selbst entkoppelt angebracht. In diesem Beitrag wird der Fokus auf Decken gelegt.

Im tieffrequenten Bereich findet die Übertragung vorwiegend über den direkten Weg durch die trennende Decke statt.

- Im Massivbau sind die Stoßstellendämm-Maße im tieffrequenten Bereich durch die geringe Modendichte und -kopplung sehr hoch [5], was üblicherweise zu einer hohen Flankenschalldämmung führt.
- Im (Holz-)Leichtbau weisen Direktübertragung und Gesamtübertragung unwesentliche Unterschiede im tieffrequenten Bereich auf [6].

Vor diesem Hintergrund ist es angemessen, zur Beschreibung der tieffrequenten Trittschallproblematik Werte und Untersuchungen zur Direktübertragung heranzuziehen und die Flankenübertragung zu vernachlässigen.

### (Normative) Kenngrößen

Bei den Kenngrößen werden für die quasi-stationären Quellen (z.B. NHW) energieäquivalente Größen verwendet, für die transienten Quellen (z.B. Ball) dagegen überwiegend A-bewertete Maximalpegel.

### Europa

In den meisten Europäischen Ländern wird zur Festlegung der Mindestanforderungen die Kenngröße  $L'_{n,w}$  oder  $L'_{nT,w}$  der ISO 717-2 verwendet [7]. Nur zwei Länder (NL und SE) gewichten bei den Mindestanforderungen die tiefen Frequenzen durch Verwendung der Anpassungsterme,  $C_I$  und  $C_{I,50-2500}$  (abgekürzt  $C_{I,50}$ ), stärker [7]. Für erhöhte Anforderungen werden dagegen in allen Ländern außer Italien, der Türkei und Deutschland Anpassungsterme verwendet. In Frankreich vergibt seit 2018 die Organisation QUALITEL Zertifikate zur erhöhten akustischen Wohnqualität (Anforderung von  $L'_{nT,w}$  und  $L'_{nT,w} + C_{I,50} \leq 55$  dB).

### Asien

In Japan werden neben dem Norm-Hammerwerk auch der normierte Ball und die Bang Machine flächendeckend eingesetzt. Angesichts der in Japan vorherrschenden Massivbauweise und hohen Anforderungen an den Trittschallschutz ermöglichen die beiden transienten Quellen die Einleitung von hohen Energien auch im tieffrequenten Bereich. Zur Bewertung werden die maximalen Schalldruckpegel in Oktavbändern ausgewertet: Für die schweren/weichen Trittschallquellen (Ball und Bang Machine) wird die Kenngröße  $L_{i,Fmax}$  „heavy-weight floor impact sound insulation (63–500Hz)“ laut JIS A 1418-2 und JIS A 1419-2 herangezogen.

In Südkorea werden die gleichen Trittschallquellen und ähnliche Messmethoden wie in Japan verwendet (KS F 2810-2), jedoch werden die Einzahlwerte (aus KS F 2863-2) anders berechnet ( $L_{i,Fmax,Aw}$  „inverse fast and A-weighted maximum impact sound pressure level“).

### Nordamerika

In Nordamerika gibt es keine baurechtlichen Anforderungen an den Schutz gegen tieffrequenten Trittschall. Die für den Mindest-Schallschutz maßgebliche IIC-Bewertung berücksichtigt nur Frequenzen ab 100 Hz. Auch die erhöhten Anforderungen gemäß ASHRAE Standard 189.1 erfassen nicht den tieffrequenten Trittschall. Es existieren jedoch Entwürfe für neue ASTM-Standards: „Determination of Low-frequency Impact Noise Ratings“ definiert die sog. LIIC (Low Frequency Impact Insulation Class) und das LIR (Low Frequency Impact Rating). LIIC/LIR sind Komplemente zu HIIC/HIR – diese sind bereits in ASTM E3222 festgelegt worden und decken den Frequenzbereich zwischen 400 Hz und 3150 Hz ab. LIIC/LIR decken den Bereich zwischen 50 Hz und 80 Hz ab (der Bereich 100 Hz bis 315 Hz ist also nicht erfasst). Die Korrelation zwischen den neuen Metriken und der subjektiven Wahrnehmung ist allerdings noch nicht systematisch hergestellt worden. Daneben existiert ein Entwurf zu „Field Measurement of the Reduction of Impact Sound from Heavy Impact Sources When Using Floor Coverings“. Diese Norm soll die Messung von Trittschall durch schwere/harte Trittschallquellen vereinheitlichen.

## Korrelation zwischen objektiven Parametern und subjektiven Empfindungen

### Außerhalb Europa

In Japan und Südkorea werden vorwiegend die schweren/weichen Trittschallquellen verwendet. Die Korrelation zwischen den Einzahlwerten und der Lästigkeit durch Geher ohne Schuhe ist sehr hoch. Eine japanische Studie [8] von 26 Holzbalkendecken in 12 Gebäuden mit Estrich und Bodenbelägen und 17 Probanden hat einen subjektiven Vergleich zwischen Zwickers Lautheit (N5 Perzentil) und  $L_{iA,Fmax}$  (Ball aus 10 cm und 100 cm Höhe und Bang Machine) durchgeführt. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  war in beiden Fällen sehr hoch, nämlich für  $L_{iFavg,Fmax}$ ,  $R^2 = 0,96$  und für Loudness (N5),  $R^2 = 0,99$ .

In Südkorea konnte in einer großen Untersuchung im Leicht- und Massivbau [9] mit über 200 Probanden in Korea und weiteren 40 im UK ebenfalls gezeigt werden, dass  $L_{iA,Fmax}$  die höchste Korrelation aufweist (hier beim Vergleich empfundene Lästigkeit zu fallendem Ball aus 100 cm Höhe bzw. zum Springen eines Erwachsenen). Bei Springen im Leichtbau war  $R^2 \approx 0,85$ , und für den Ball im Leichtbau und Massivbau  $R^2 \approx 0,94$ .

Die Korrelation der Lästigkeit von Gehern (mit harten und mit weichen Schuhen sowie Socken) zu schweren/weichen (Ball und Bang Maschine) und zu leichten/harten (NHW) Quellen wurde in einer Studie von Holzdecken, ohne schwimmenden Estrich oder Fußbodenbelag, in Ka-

nada ermittelt [10]. Die höchste Korrelation zwischen der Lästigkeit von Gehern ohne Schuhe bzw. dem aus 10 cm Höhe fallengelassenen Ball (dies entspricht der Kraft eines springenden oder laufenden Kindes [1]) wurde für  $L_{n,w} + C_{I,50}$  gefunden ( $R^2 = 0,83$  bzw.  $R^2 = 0,96$ ). Die in [10] gezogene Schlussfolgerung ist, dass das NHW genauso gut funktioniert wie der Ball. Der Grund, dass das NHW auch für den Geher mit weicher Sohle oder Socken eine hohe Korrelation zur Lästigkeit zeigt, obwohl die Quellen ganz andere Impedanzen haben, ist, dass die Holzbalkendecke tieffrequent (bis ca. 500 Hz) viel höhere Impedanzen hat als die Quellen [11], sodass eine Kraftquellsituation vorliegt.

## Innerhalb Europa

Im Norden Europas wurden schon viele Untersuchungen zum tieffrequenten Trittschall durchgeführt. In der Doktorarbeit von Kylliäinen aus Finnland [12] wurde im Massivbau (265 mm Hohlbeton-Decken) mit unterschiedlichen Bodenbelägen die Korrelation von Einzahlwerten aus Messungen mit dem NHW zur Lästigkeit von Trittschallquellen (Gehern mit harten Schuhen, weichen Schuhen, Socken, Flummi, und Stuhlrücken) bestimmt. Der Einzahlwert,  $L'_{n,w} + C_{I,50}$  korreliert sehr gut mit Gehern mit weichen und harten Schuhen sowie mit Stuhlrücken ( $R^2$  von ca. 0,65–0,82). Schlechter waren jedoch die Ergebnisse bei Gehern auf Socken und dem Flummi ( $R^2 \approx 0,28$ ). Von Kylliäinen neu entwickelte und optimierte Einzahlwerte korrelierten mit den einzelnen Quellen etwas besser. Ein für alle Quellen optimierter Einzahlwert  $L'_{n,w} + C_{I,opt}$  hatte ein  $R^2$  von 0,35–0,92 für die einzelnen Quellen.

Mehrere größere skandinavische Untersuchungen (AcuWood, Aku20, AkuLite) unter anderem zum subjektiven Empfinden von Trittschall wurden von Hagberg in [13] zusammengefasst. Dabei wurde im Massivbau sowie im Leicht-Holzbau aus Fragebögen und Probandenversuchen die Korrelation zwischen Einzahlwerten (errechnet aus Messungen mit dem NHW) und der Lästigkeit durch Geher bestimmt. Die Daten wurden für die verschiedenen Bauweisen zusammengefasst, es wurde nicht zwischen Holz- und Massivbau unterschieden. In dieser Studie gab es die beste Korrelation zwischen der Lästigkeit von Gehgeräuschen und der Verwendung von normativen Größen, wenn die Frequenzbänder bis 25 Hz berücksichtigt wurden ( $L'_{n,w,25}$ ), das Bestimmtheitsmaß war aber nicht deutlich höher.

Trotz dieser Ergebnisse vertritt Hagberg nicht die Ansicht, dass immer bis 25 Hz gemessen werden sollte. Stattdessen schlägt er die Verwendung von  $L'_{nT,w} + C_{I,50}$  vor (mit  $R^2 = 0,58$ ) vor, da diese Beurteilungsgröße global standardisiert ist, schon viele Daten und Erfahrungen damit vorliegen, und diese Größe für Stakeholder aus der Praxis (Hersteller und Industrie) akzeptabel wäre. Zwar ist die Größe nicht die perfekte Lösung bezüglich der tiefen Frequenzen, jedoch viel besser als  $L'_{nT,w}$  oder  $L'_{n,w}$  und damit eine deutliche Verbesserung, die vermutlich schnell globale Akzeptanz finden würde.

Vor einiger Zeit wurde in Deutschland der gleiche Schluss von Rabold et al. [14] gezogen. In dieser Studie wurden jedoch nur Holzbalkendecken mit schwimmendem Estrich, teilweise mit Unterdecke, untersucht. Die Decken hatten  $L_{n,w}$ -Werte zwischen 35 und 65 dB, bildeten also ein breites Qualitätsspektrum ab. Anstatt Befragungen und subjektive Untersuchungen durchzuführen wurden hier psychoakustische Größen betrachtet. Zwickers Lautheit  $L_N$  wurde als Grundlage verwendet. Zuerst konnte festgestellt werden, dass  $L_{A,F,max}$  sehr gut mit Zwickers Perzentil-Lautheit  $L_N$  korreliert. Weiterhin wurde festgestellt, dass  $L_{n,w} + C_{I,50}$  gut mit  $L_{A,F,max}$  korreliert ( $R^2 = 0,74$ ). Daraus lässt sich schließen, dass  $L_{n,w} + C_{I,50}$  eine angemessene Einzahlgröße zur Beschreibung der Lästigkeit ist.

Um einen Zielwert für den Trittschallpegel zu bestimmen, wurde die Anforderung des Innenraumpegels angesetzt zu  $L_{AF,max,n} \leq 35 - 37$  dB(A). Dieser Wert entspricht einem  $L'_{n,w} + C_{I,50} \leq 53$  dB. Der große Vorteil dieser Bewertungsgröße ist, dass  $L'_{n,w} + C_{I,50}$  aus NHW-Messungen bestimmt werden kann. Es ist also keine Umstellung der Anregungsart oder der Bewertungskurven notwendig.

## Empfehlungen (für Deutschland)

### Zur Trittschallquelle

Es ist wichtig den tief- und hochfrequenten Bereich mit einer oder mehreren Trittschallquellen und -Kennwerten abbilden zu können.

Viele Untersuchungen haben zwar ergeben, dass der Ball die Lästigkeit im tieffrequenten Bereich mit  $L_{iA,F,max}$  oder  $L_{iFavg,F,max}$  sehr gut abbildet, jedoch nicht im hochfrequenten Bereich. Das NHW dagegen deckt den gesamten bauakustischen Frequenzbereich ab. Es leitet im gesamten Frequenzbereich genügend Energie ein um auch sehr hoch dämmende Decken tief- und hochfrequent beurteilen zu können. Es wird deshalb von den Autoren als Trittschallquelle empfohlen.

### Zur Kenngröße

Einige Untersuchungen haben gezeigt, dass es im Holzbau sinnvoll wäre, Frequenzen bis 25 Hz zu berücksichtigen. Da aber der Aufwand sehr hoch ist und die Akzeptanz vermutlich sehr gering ist, wird empfohlen eine gute Zwischenlösung, die eine sehr hohe Korrelation zu der subjektiven Empfindung gezeigt hat, zu verwenden, nämlich  $L'_{nT,w} + C_{I,50}$ .

Wir schließen uns also der Empfehlung des DEGA-Fachausschusses Bau- und Raumakustik [15] an, dass die Übertragung von Gehgeräuschen/Trittschall insbesondere unter Berücksichtigung des Frequenzbereiches zwischen 50 Hz und 100 Hz durch die Kenngröße  $L'_{nT,w} + C_{I,50}$  beschrieben werden kann und soll.

### Zu konstruktiven Lösungen

Im *Massivbau* ist der derzeitige Ansatz zur Reduktion tieffrequenten Trittschalls die Abstimmung der Estrich-Resonanzfrequenz auf unter 50 Hz. Hierfür ist eine dynamische Steifigkeit von  $s' < 10$  MN/m<sup>3</sup> anzustreben mit einer flächenbezogenen Masse des Estrich von

$m'' > 100 \text{ kg/m}^2$ . Auch abgehängte Unterdecken sollten nach Möglichkeit eine Resonanzfrequenz  $f_r < 50 \text{ Hz}$  haben.

Im *Holzbau* muss unterschieden werden zwischen Holzmassivdecken und Holzbalkendecken. Bei Holzbalkendecken hat sich herausgestellt [6], dass die dynamische Steifigkeit der Trittschalldämmung bei schwimmenden Estrichen eine deutlich schwächere Auswirkung auf den  $L_{n,w} + C_{I,50}$  als auf den  $L_{n,w}$  alleine hat. Deshalb können durchaus auch steifere Trittschalldämmungen verwendet werden, insbesondere wenn die Verlegung von Trockenestrich dies erfordert. Dies gilt nicht bei Holzmassivdecken; hier gelten sowohl für den schwimmenden Estrich als auch für die Unterdecke die gleichen Optimierungskriterien wie für den Massivbau. Für beide Holzdeckentypen gilt, dass sich eine Rohdeckenbeschwerung, vorzugsweise als biegeweiche Schüttung, verbessernd auf den  $L_{n,w} + C_{I,50}$  auswirkt; eine Verdopplung der flächenbezogenen Masse der Beschwerung kann mit 3 dB angesetzt werden. Mit Abstand am besten erweist sich bei Holzbalkendecken eine Optimierung der abgehängten Unterdecke; eine doppelte Beplankung mit schweren Platten und ein abgestimmtes Abhängesystem ermöglicht eine Masse-Feder-Resonanzfrequenz der Unterdecke unter 20 Hz. Damit sind Verbesserungen von über 10 dB im  $L_{n,w} + C_{I,50}$  erzielbar [16]. Auch sollte der Hohlraum möglichst voll mit Hohlraumdämmung ausgefüllt sein.

In Japan erzielen schwimmende Estriche auf Holzrahmen und Gummifüßen auf CLT auch im tieffrequenten Bereich (63 Hz Oktave) Verbesserungen von 5-10 dB [17].

Für extreme Belastungen wie z.B. *Crossfit*-Studios sollten speziell angefertigte Fitnessmatten mit hoher Dämpfung und niedriger dynamischer Steifigkeit verwendet werden.

In einer Untersuchung in Kanada zum tieffrequenten Trittschall von Holzbalkendecken [18], unter Verwendung von NHW, Ball und Bang Machine wurde festgestellt, dass der Trittschallpegel in 63 Hz-Oktavband (Einzahlwert gemäß JIS A 1418) am höchsten ist. Der hohe Pegel konnte um 5-10 dB verringert werden. Dazu sollte die Masse des schwimmenden Estrichs möglichst hoch sein, damit u.a. die Trittschallmatte komprimiert wird und die Entkopplung bei einer Frequenz unterhalb von 50 Hz stattfindet. Die Decke sollte möglichst steif sein, z. B. durch einen geringeren Abstand der Träger zueinander und zusätzliche Querstreben zwischen den Trägern. Als Unterdecke sollte eine möglichst schwere (z.B. dreifach beplankte), entkoppelte GK-Decke verwendet werden.

## Literatur

- [1] Jeon, J. Y. u. a.: Review of the impact ball in evaluating floor impact sound. *Acta Acustica united with Acustica* 92 (2006), S. 777–786
- [2] Jeon, J. Y. u. a.: A quantification model of overall dissatisfaction with indoor noise environment in residential buildings. *Applied Acoustics* 71 (2010), S. 914–921
- [3] Scheck, J.; Gibbs, B.: Impacted lightweight stairs as structure-borne sound sources. *Applied Acoustics* 90 (2015), S. 9–12
- [4] Kluth, S. u. a.: Schwingverhalten von thermisch getrennten Balkonplatten. In: 46. Deutsche Jahrestagung für Akustik, Hannover, 2020. 2020
- [5] Poblet-Puig, J.; Guigou-Carter, C.: Catalogue of vibration reduction index formulas for heavy junctions based on numerical simulations. *Acta Acustica united with Acustica* (2017)
- [6] Rabold, A.: Planungs- und Nachweisverfahren von Holzdecken unter Berücksichtigung der tieffrequenten Trittschallübertragung. In: 46. Deutsche Jahrestagung für Akustik, Hannover, 2020. 2020
- [7] Rasmussen, B.: Building acoustic regulations in Europe – Brief history and actual situation. In: *Baltic-Nordic Acoustics Meeting*. 2018
- [8] Ryu, J. u. a.: Relation between annoyance and single-number quantities for rating heavy-weight floor impact sound insulation in wooden houses. *J. Acoust. Soc. Am.* 129 (2011), S. 3047–3055
- [9] Jeong, J. H. u. a.: Single-Number Quantities of Heavy-weight Impact Sound Insulation. *Acta Acustica united with Acustica* 105 (2019), S. 5–8
- [10] Gover, B. N. u. a.: Subjective Ranking of Footstep and Low-Frequency Impact Sounds on Lightweight Wood-Framed Floor Assemblies. In: *Proceeding of Forum Acusticum*, Aalborg, Denmark, 2011. 2011, S. 1755–1760
- [11] Zeitler, B. u. a.: On the relevance of impact source impedance at low frequencies. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics*, ICA, Montreal 2013. 2013
- [12] Kylliäinen, M.: New single-number quantities for evaluation of impact sound insulation. In: *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen, Germany, September 2019. 2019
- [13] Hagberg, K.: Acoustic requirements vs experienced sound in wood structures. In: *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen, Germany, September 2019. 2019, S. 6983–6988
- [14] Rabold, A. u. a.: Korrelation zwischen Geher und Norm-Hammerwerk bei der Trittschallübertragung. In: 37. Deutsche Jahrestagung für Akustik, Düsseldorf, 2011. 2011
- [15] DEGA Fachausschuss Bau- und Raumakustik: Memorandum „Tieffrequente Schallübertragung von schwimmenden Estrichen (Entwurf)“
- [16] Rabold, A. u. a.: Schalltechnische Optimierung von Unterdeckenabhängern. In: 45. Deutsche Jahrestagung für Akustik, Rostock, 2019. 2019
- [17] Hiramitsu, A. u. a.: Influence of floor finish structure on floor impact sound insulation in CLT model building. In: *Proceedings of Internoise 2019*. 2019
- [18] Zeitler, B. u. a.: Methods to control low frequency impact noise in wood-frame construction. In: *Proceedings of Acoustics 08*, Paris, France. 2008