

Messung und Berechnung der Körperschallübertragung am Bauteilstoß von Massivholzelementen

Simon Mecking, Tobias Kruse, Ulrich Schanda

Hochschule Rosenheim, 83024 Rosenheim, Deutschland, Email: simon.mecking@fh-rosenheim.de

Einleitung

Verglichen mit Gebäuden in Mauerwerks- und Betonbauweise ist die schalltechnische Planung eines Bauobjektes in Holzbauweise eine deutlich größere Herausforderung. Die Gründe hierfür liegen unter anderem im Mangel von Planungswerkzeugen für den Schallschutz. Geeignete computergestützte Planungshilfen, die eine Simulation bereits im frühen Planungsentwurf für das gesamte Bauwerk ermöglichen, könnten den Planungsaufwand drastisch reduzieren. Eine Möglichkeit der Berechnung stellt die Verwendung eines gekoppelten FEM und SEA-basierten Modells für die Luft- und Trittschalldämmung in der Bausituation dar, das sowohl die direkte Übertragung der Trennbauteile als auch die Übertragung der Flankenbauteile berücksichtigt. Für die SEA-basierte Berechnung der Schalldämmung nach EN 12354 werden als Eingangsdaten die Stoßstellendämm-Maße der Bauteilstöße benötigt. Der Beitrag zeigt aktuelle Ergebnisse zur Messung von Stoßstellendämm-Maßen und zur Berechnung mithilfe eines kommerziellen SEA-Berechnungsprogramms.

Laboraufbau

Der Prüfstand an der Hochschule Rosenheim ist für die Durchführung von Betriebsschwinganalysen, der *Power-Injection*-Methode und der Bestimmung von Stoßstellendämm-Maßen an Massivholzelementen konzipiert [6]. Damit sind Untersuchungen an T- und L-förmigen Bauteilverbindungen mit realistischen Bauteilabmessungen möglich. Der Bauteilstoß kann mit einer maximalen Zusatzlast von 20 kN/m belastet werden. Zur Struktur Anregung bei den Messungen wird ein Modal-Schwingerreger mit einem logarithmischen Gleitsinus-Signal betrieben. Jedes Bauteil wird an zwei Positionen angeregt.

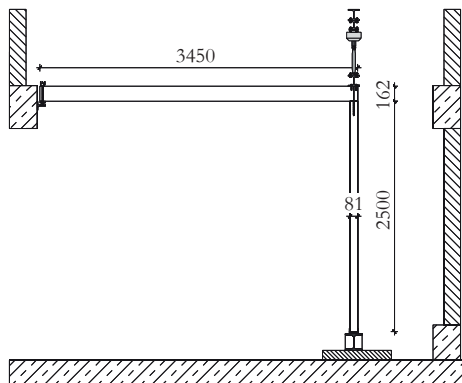


Abbildung 1: L*-förmiger Bauteilstoß bestehend aus Wand (Subsystem 2) und Decke (Subsystem 1) im Prüfstand.

Tabelle 1: Materialeigenschaften der Brettsperrholzelemente aus Abb. 2 mit der Rohdichte $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ bei der Holzfeuchte $u = 10 \pm 2$. [11, 6]

	E_x, E_y, E_z in N/mm^2	G_{xy}, G_{xz}, G_{yz} in N/mm^2	$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$ [-]
Decke (1)	8170	459	0,035/0,018
	2948	168	0,045/0,010
	137	103	0,037/0,020
Wand (2)	10 529	459	0,035/0,018
	408	168	0,045/0,010
	137	103	0,037/0,020

Materialeigenschaften

Brettsperrholz (BSPH) kann über ein vereinfachtes Materialmodell als orthotropes Material mit neun unabhängigen elasto-mechanischen Materialparameter beschrieben werden [4]. Die E-Moduln wurden mithilfe der Betriebsschwinganalyse aus den ersten Moden und Eigenfrequenzen der Elemente bestimmt. Die daraus bestimmten Materialparameter sind in Tab. 1 zusammengefasst. Bei der Messung der Dämpfung eines Subsystems wird ein Gesamtverlustfaktor ermittelt. Dieser wird summativ aus Anteilen der (internen) Materialdämpfung, der Dämpfung aus Reibung, Kopplung und Abstrahlung gebildet (Gl. 1). Wird die Körperschall-Nachhallzeit $T_{s,j}$ des Elementes j gemessen kann aus Gl. 2 der Gesamtverlustfaktor $\eta_{tot,j}$ berechnet werden. Die direkte Messung des internen Verlustfaktors η_{jj} ist nicht möglich. Für eine experimentelle Näherung werden die BSPH-Elemente freihängend gemessen. In diesem Fall kann der Kopplungsverlustfaktor η_{coupl} vernachlässigt werden. Der Strahlungsverlustfaktor η_{rad} kann aus der Messung des Abstrahlgrades berechnet werden. Untersuchungen in [9] zeigten, dass von freihängenden BSPH-Elementen η_{rad} mehr als eine Zehnerpotenz kleiner ist als η_{tot} . Daher kann angenommen werden, dass bei dieser experimentellen Anordnung der Hauptteil von η_{tot} des BSPH-Elemente auf den internen Verlustfaktor η_{jj} zurückzuführen ist.

$$\eta_{tot,j} = \eta_{jj} + \eta_{fric} + \eta_{coupl} + \eta_{rad} \quad [-] \quad (1)$$

$$\eta_{tot,j} = \eta_{jj} + \sum \eta_{ji} \approx \frac{2,2}{f \cdot T_{s,j}} \quad [-] \quad (2)$$

Stoßstellendämm-Maße

Die Kenntnis des Stoßstellendämm-Maßes K_{ij} in Gl. 3 ist zur Vorhersage des Flankenschalldämm-Maßes nach dem SEA-Ansatz der EN 12354 notwendig. Es wird mithilfe der richtungsgemittelten Schnellepegeldifferenz, der äquivalenten Kantenabsorptionslänge a der beiden Subsysteme, der Stoßstellenlänge l_{ij} und der Referenzfrequenz $f_{ref} = 1000 \text{ Hz}$ berechnet.

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \cdot \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i \cdot a_j}} \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

$$a_i = \frac{\pi^2 S_i \eta_{tot,i}}{c_0} f \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

L-förmiger Bauteilstoß

Am Beispiel eines L-förmigen Bauteilstoßes (Abb. 2a) werden die Gesamtverlustfaktoren der beiden Subsysteme in Abb. 3 und die Schnellepegeldifferenz $\overline{D_{v,12}}$ in Abb. 4a als Eingangsdaten für die Berechnung von K_{12} nach Gl. 3 präsentiert. Anhand von zwei Varianten der geschraubten Bauteilverbindung wird der Einfluss von Elastomerlager auf diese Größen gezeigt.

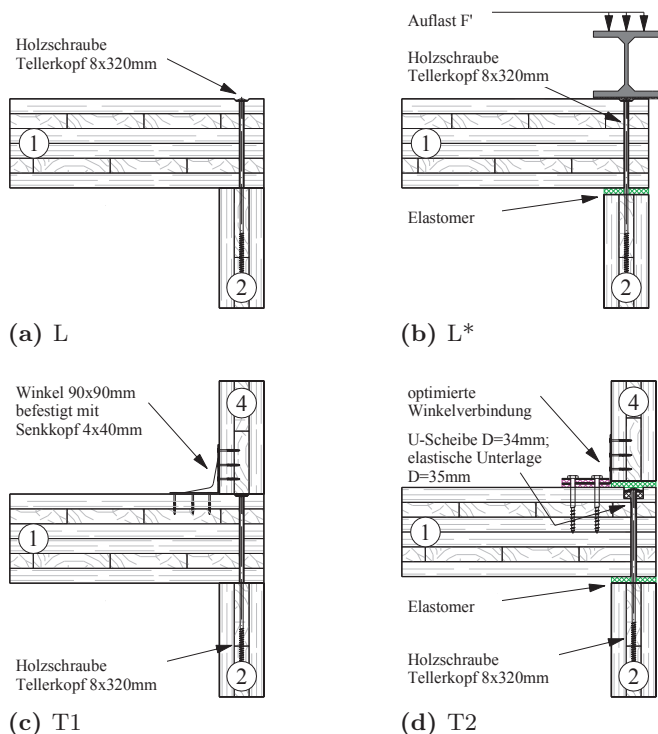
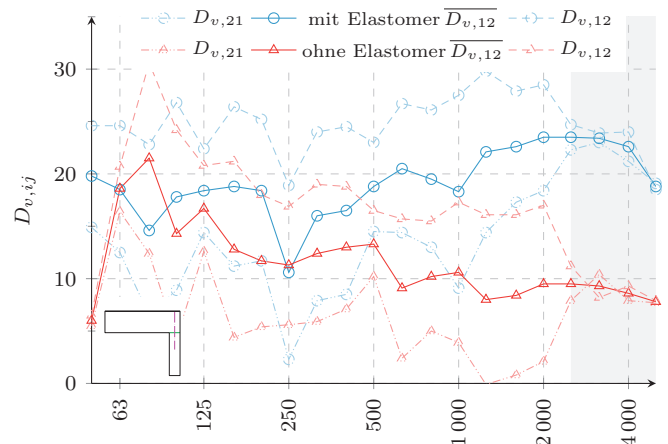


Abbildung 2: L- und T-förmige Bauteilverbindungen. In der Variante (L*) sind aufgrund der Zusatzbelastung zwei Übertragungswege vorhanden. Der Abstand zwischen den Verbindungsmitteln beträgt 40 cm.

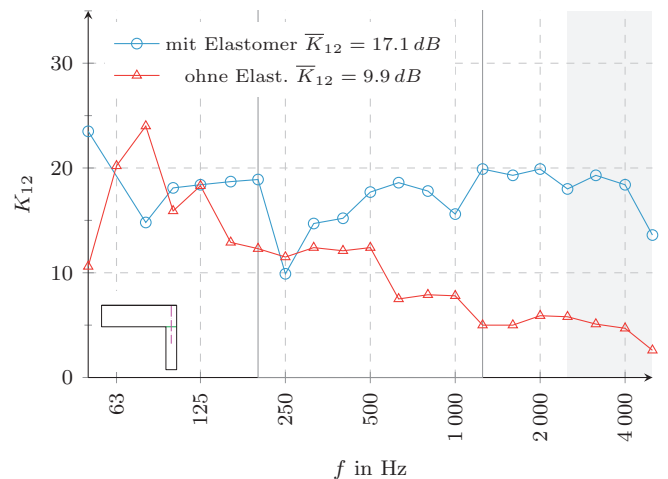
Abbildung 3 zeigt die Erhöhung von $\eta_{tot,2}$ (Wand) bei tiefen Frequenzen durch die Verwendung eines Elastomerlagers in der Stoßfuge, jedoch keine Erhöhung von $\eta_{tot,1}$ (Decke). Dagegen zeigt $\overline{D_{v,12}}$ in Abb. 4a ein Anstieg der Differenzen zwischen den beiden Varianten zu

höheren Frequenzen oberhalb von 160 Hz mit Ausnahme von 250 Hz. Der Unterschied in den richtungsabhängigen Schnellepegeldifferenzen $D_{v,12}$ und $D_{v,21}$ ist u. a. auf das flächenbezogene Massenverhältnis $m'_1/m'_2 = 2$ der beiden Subsysteme zurück zu führen [8]. Die resultierenden K_{12} in Abb. 4b bestätigen die geringere Schallübertragung über die Stoßstelle hinweg in mittleren und hohen Frequenzbereich beim Einsatz der Elastomerlager.

Bei der Variation der Zusatzlast F' an der L*-förmigen Bauteilverbindung mit Elastomer (Abb. 2b) zeigen sich nur geringfügige Unterschiede sowohl im Frequenzverhalten von K_{ij} als auch im Einzahlwert (Tab. 2). Dabei ist K_{ij} im Fall der höheren Pressung geringfügig kleiner. Diese Beobachtung zeigte sich schon bei [10].



(a) Schnellepegeldifferenz



(b) Stoßstellendämm-Maß

Abbildung 4: Einfluss der Elastomerlager am L-Stoß (Abb. 2a). $\overline{K_{ij}}$ ist der arithmetische Mittelwert von K_{ij} ($f \in [200/1250] \text{ Hz}$). Im grauen Bereich liegt ein Signal-zu-Rausch-Abstand $\leq 10 \text{ dB}$ vor.

T-förmiger Bauteilstoß

Ein T-Stoß hat drei Übertragungswege. Zur Verdeutlichung des Einflusses von elastischen Lagerungen auf die Schallübertragung der einzelnen Pfade wurden zwei extreme Varianten (Abb. 2c-2d) untersucht.

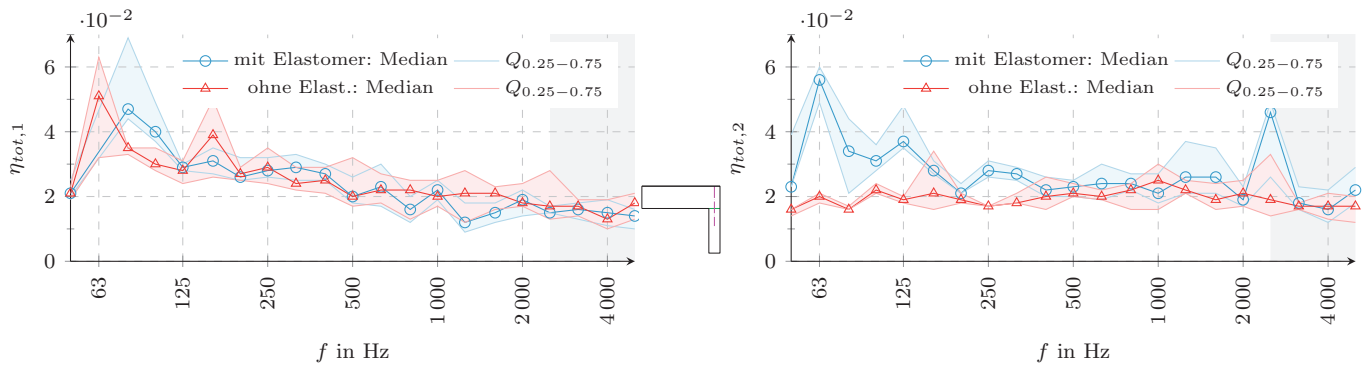


Abbildung 3: Einfluss der Elastomerlager am L-Stoß (Abb. 2a) auf die Gesamtverlustfaktoren von Decke (1) und Wand (2).

Die Variante T1 stellt eine starre Bauteilkopplung dar und hat keine elastischen Lagerungen zwischen den Bauteilen und Verbindungsmitteln. In Variante T2 sind dagegen sowohl zwischen Bauteil 1 und 2 sowie zwischen Bauteil 1 und 4 Elastomerlager eingesetzt. Zusätzlich sind die Verbindungsmittel (Winkel und Tellerbauschrauben) elastisch entkoppelt. Diese Art von *weich gelagerten* Verbindungsmitteln sind am Markt verfügbar.

Abb. 5 zeigt die Unterschiede der Stoßstellendämm-Maße dieser Varianten für jeden der Übertragungswege. Den größten Einfluss der elastischen Lagerungen zeigt dabei der Weg 24 zwischen den beiden Wänden mit einem Unterschied von \bar{K}_{24} von ca. 14 dB.

K_{12} und K_{14} sind sowohl im spektralen Verhalten im mittleren und hohen Frequenzbereich als auch als Einzahlwert bezogen auf die jeweilige Stoßvariante sehr ähnlich. Die Erhöhung der Werte für die K_{ij} bei Nutzung der Elastomere ist deutlich und ergibt eine Differenz von ca. 7–8 dB der Einzahlwerte. Unterhalb von 200 Hz trifft das nicht zu. Dort ist K_{14} der beiden Varianten sehr ähnlich. Dagegen ist K_{12} bei Nutzung der Bauwinkel mit elastischen Lagerungen (T2) größer.

Tabelle 2: Einzahlwerte der Stoßstellendämm-Maße \bar{K}_{ij} bei einem flächenbezogenen Massenverhältnis $m'_1/m'_2 = m'_1/m'_4 = 2$ aus den Messungen nach [2].

	T1	T2	L	L*
Weg	o.El.	m.El.	o.El./m.El.	$F' = 10/20 \frac{kN}{m}$
\bar{K}_{12} u. \bar{K}_{14}	12	20	10 / 17	22 / 21
\bar{K}_{24}	17	31	-	-

SEA Berechnung

Die Software VAOne[®] wird zur Erstellung eines einfachen SEA-Modelles des L-förmigen Bauteilstoßes ohne Elastomerlager (Abb. 2a) genutzt. Das System wird in zwei Subsysteme unterteilt und mit den orthotropen Materialeigenschaften aus Tab. 1 beschrieben. Zunächst ist der interne Verlustfaktor $\eta_{jj} = \eta_{ii} = 1,9\%$ für beide Subsysteme als konstant angenommen. Oberhalb von 315 Hz sind in beiden Subsysteme mindestens fünf Moden je Terzband vorhanden.

Bei nur zwei Subsystemen mit Anregung von Subsystem i

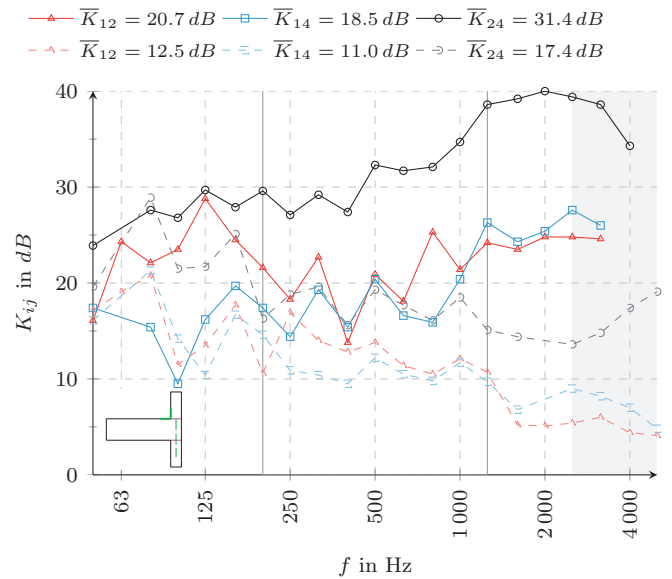


Abbildung 5: Stoßstellendämm-Maße ohne (T1: - -) und mit Elastomerlager (T2: -). \bar{K}_{ij} ist der arithmetische Mittelwert von $K_{ij}(f \in [200/1250] \text{ Hz})$. Im grauen Bereich liegt ein Signal-zu-Rausch-Abstand ≤ 10 dB vor. [5]

kann die Energiegleichung näherungsweise mit Gl. 5 [1] beschrieben werden. In diesem Fall kann η_{ij} aus den Messungen bestimmt werden über das Verhältnis der Energien E der beiden Subsysteme und dem gemessenen $\eta_{tot,j}$.

$$\eta_{ij} = \frac{E_j}{E_i} \cdot (\eta_{ji} + \eta_{jj}) = \frac{m_j \cdot \langle \dot{v}_j^2 \rangle}{m_i \cdot \langle \dot{v}_i^2 \rangle} \eta_{tot,j} \quad [-] \quad (5)$$

Die Berechnung von $K_{i \rightarrow j}$ mit η_{ij} (Gl. 6) nach [7] ist im Gegensatz zur Gl. 3 von der Messrichtung abhängig. Um ein richtungsunabhängiges K_{ij} zu berechnen wird der arithmetische Mittelwert der beiden Richtungen verwendet (Gl. 7). Der Vergleich von Gl. 5-6 mit Gl. 3 zeigt, dass bei $K_{i \rightarrow j}$ zusätzlich die Massen m und Koinzidenzfrequenzen f_c der Subsysteme erforderlich sind.

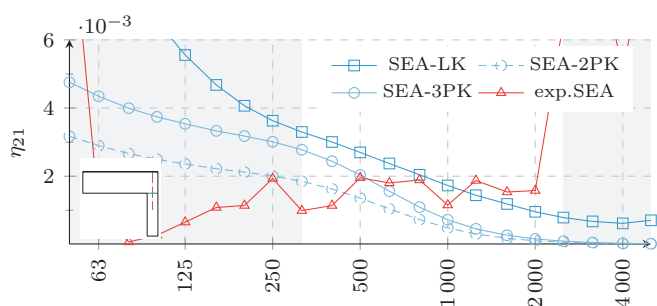
$$K_{i \rightarrow j} = -10 \lg \left(\eta_{ij} \frac{\pi^2 S_i}{c_0 l_{ij}} \sqrt{\frac{f_{c,i}}{f_{c,j}} \frac{f_{ref}}{f}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

$$K_{ij} = \frac{K_{i \rightarrow j} + K_{j \rightarrow i}}{2} \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

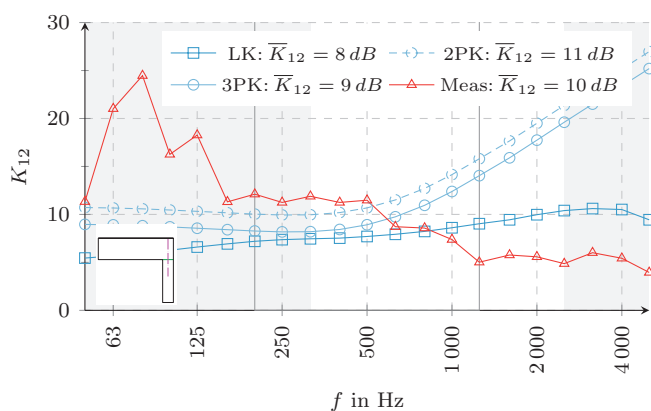
VAOne[®] bietet verschiedene Standardkopplungen, sog. Linien- und Punktkopplungen an. Als ersten Modellansatz werden folgende Standardvarianten getestet:

- Linienkopplung (LK)
- Punktkopplung: 2-Punkt (2PK) und 3-Punkt (3PK)

Als Anregung eines Subsystems i im SEA-Modell wird der räumliche gemittelte Schnellepegel $L_{v,i}$ des äquivalenten angeregten Bauteils i aus den Messungen vorgegeben. Für die o.g. Varianten der Standardkopplungen wird η_{ij} durch das Programm VAOne[®] berechnet. Abb. 6a zeigt die Resultate von η_{21} aus den Modellrechnungen verglichen mit dem η_{21} aus der experimentellen SEA nach Gl. 5. Im unteren Frequenzbereich zwischen 315 Hz und 2500 Hz stimmt die Annahme der 3PK am besten mit dem η_{21} aus den Messungen ermittelt überein. Oberhalb von 630 Hz liefert die Annahme der Linienkopplung die größere Übereinstimmung. Eine weitere Variante mit einer Punktkopplung je Schraubverbindung führt zu einem zu hohen η_{21} . In der entgegengesetzten Richtung sind die Unterschiede von η_{12} zu den aus den Messungen größer. Die resultierenden K_{ij} aus beiden Richtungen nach Gl. 7 sind in Abb. 6b dargestellt. Demnach führt eine Kombination aus Punkt- im tieffrequenten und Linienkopplung im hochfrequenten Bereich zur höchsten Übereinstimmung mit den Messungen. Dieses Frequenzverhalten bleibt physikalisch unbegründet. Die Einzahlwerte liegen in der richtigen Größenordnung.



(a) Kopplungsverlustfaktoren



(b) Stoßstellendämm-Maße

Abbildung 6: Verschiedene Kopplungen des SEA-Modells und der Messungen nach Gl. 5-6 des L-Stoßes (Abb. 2a). Im linken, grauen Bereich sind die Moden je Terzband ≤ 5 und im rechten liegt ein Signal-zu-Rausch-Abstand ≤ 10 dB vor.

Zusammenfassung

Es wurden Stoßstellendämm-Maße K_{ij} für verschiedene Bauteilstöße von BSPH-Elementen gemessen. Diese zeigen eine gute Übereinstimmung zu anderen Literaturangaben (kurze Übersicht: [8]). Bei den Stoßstellen wurde der Einfluss von Elastomerlagern untersucht. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss auf die K_{ij} . Eine Berechnung der K_{ij} mithilfe von Kopplungsverlustfaktoren η_{ij} , welche aus einem SEA-Modell resultieren, zeigen eine ausreichende Übereinstimmung. Weitere Schritte der Modellierung zur Überprüfung dieser Erkenntnisse und zur Abbildung von Elastomeren sind notwendig.

Der Beitrag ist Teil des gemeinsam von der TU München, der HS Rosenheim und dem ift Rosenheim durchgeführten DFG-AiF Forschungsvorhabens *Vibroakustik im Planungsprozess für Holzbauten*. Das IGF-Vorhaben 17328 N/1 der Forschungsvereinigung HS Rosenheim wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] R. Craik: Prediction of Sound Transmission through Buildings using SEA. J Sound Vib 4 (1982) 505-516.
- [2] DIN EN ISO 10848-1: Messung der Flankenübertragung von Luftschall und Trittschall. Berlin, 2006.
- [3] E. Gerretsen: Vibration Reduction Index K_{ij} , a new Quantity. Proc. InterNoise 1996, 1475-1480.
- [4] A. Gülzow: Zerstörungsfreie Bestimmung der Biegesteifigkeit. Diss., ETH Zürich, 2008.
- [5] T. Kruse: Stoßstellendämmung und Ausbreitungsdämpfung von Brettsperholzbauteilen. HS Rosenheim, 2015.
- [6] S. Mecking: Bauteilstöße im Holzmassivbau. HS Rosenheim, 2014.
- [7] prEN 12354-1: Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. 2013.
- [8] A. Rabold, u.a.: SEA based prediction for integrated vibroacoustical design optimization of multi-storey buildings. Proc. EuroNoise, 2015.
- [9] S. Schoenwald, u.a.: Sound insulation performance of Cross Laminated Timber Building Systems. Proc. InterNoise 2013.
- [10] M. Schramm: Vertikale Flankenübertragung bei Holzmassivdecken. HS Rosenheim, 2008.
- [11] M. Kohrmann, u.a.: Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken. Bericht zum AiF Forschungsvorhaben *Vib Wood*, TU München und HS Rosenheim, 2014.
- [12] C. Winter, u.a.: Modelling the Sound Transmission across Junctions. Proc. EURO DYN, 2014.