

Experimentelle und numerische vibroakustische Untersuchung der Trittschallübertragung durch eine Brettsper Holzdecke in einem Schulgebäude

Thomas Furtmüller¹, Maximilian Billmaier², Michael Kawrza³, Christoph Adam⁴

¹ Universität Innsbruck, 6020 Innsbruck, Österreich, Email: thomas.furtmueller@uibk.ac.at

² iC consulenten Ziviltechniker GesmbH, 1120 Wien, Österreich, Email: m.billmaier@ic-group.org

³ Universität Innsbruck, 6020 Innsbruck, Österreich, Email: michael.kawrza@uibk.ac.at

⁴ Universität Innsbruck, 6020 Innsbruck, Österreich, Email: christoph.adam@uibk.ac.at

Einleitung

Dieser Beitrag befasst sich mit der Trittschallübertragung über eine Brettsper Holzdecke in einem Schulgebäude. Diese trennt, wie in Abb. 1 ersichtlich, eine Turnhalle im 2. OG von den darunter liegenden Klassenzimmern. Obwohl der bewertete Normtrittschall-

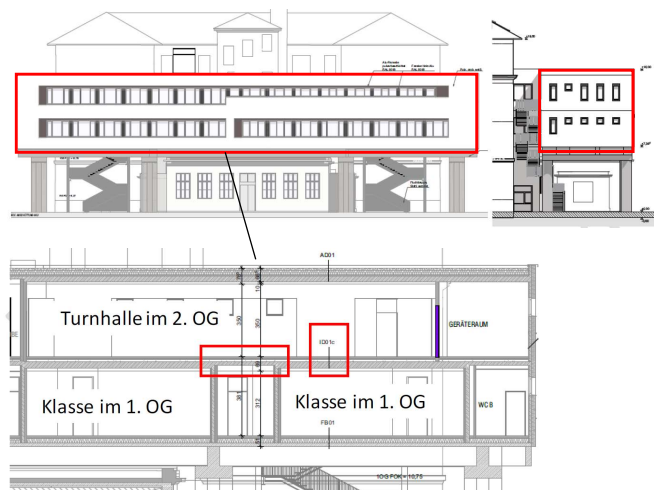


Abbildung 1: Gebäudepläne mit Ausschnitt der betrachteten Brettsper Holzdecke.

pegel mit $L'_{n,w} = 33$ dB sehr gut ist, gibt es dennoch Beschwerden hinsichtlich der Trittschallbelastigung in den Klassenzimmern. Da die Überschreitungen der Bezugskurve des Normtrittschallpegels im Bereich < 150 Hz ausgeprägt sind, liegt hier offensichtlich ein niederfrequentes Trittschallproblem vor. Um diesem auf den Grund zu gehen, wurden sowohl experimentelle und numerische Untersuchungen angestellt.

Experimentelle Untersuchungen

Abbildung 2 zeigt den Versuchsaufbau für die experimentellen Untersuchungen. Der Turnsaalboden wurde einer experimentellen Modalanalyse (EMA) unterzogen. Dabei erfolgte die Anregung mit einem elektrodynamischen Schwingerreger vom Typ APS 400 mit 35 kg oszillierender Masse (F in Abb. 2), die Schwingungsantwort wurde über Beschleunigungssensoren vom Typ Brüel&Kjaer 4508 in einem regelmäßigen Raster gemessen (ACC). Die Auswertung der Messdaten zeigt, dass sich die Deckenbereiche über den beiden Klassenzimmern entkoppelt verhalten. Daher wird in weiterer Folge exemplarisch nur der in Abb. 2 schattierte Bereich (Auswertebereich) betrach-

tet. Für die im nächsten Abschnitt vorgestellten numerischen Simulationen wurde ebenfalls nur dieser Deckenbereich modelliert. Im darunterliegenden Klassenzimmer

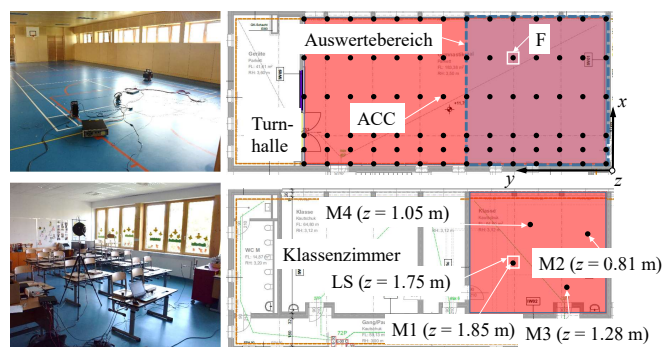


Abbildung 2: Versuchsaufbauten der Experimentellen Modalanalyse (oben) und der raumakustischen Versuche (unten).

wurde das raumakustische Verhalten durch Rauschanregung im Frequenzbereich 30-200 Hz mittels omnidirektionalem Lautsprecher Qsources Qohm untersucht (LS). Die Schalldrücke wurden an vier Positionen mit Mikrofonen vom Typ GRAS 46 AE gemessen, wobei sich Mikrofon M1 in unmittelbarer Umgebung des Lautsprechers befand. Abbildung 3 zeigt sechs identifizierte Eigenfrequen-

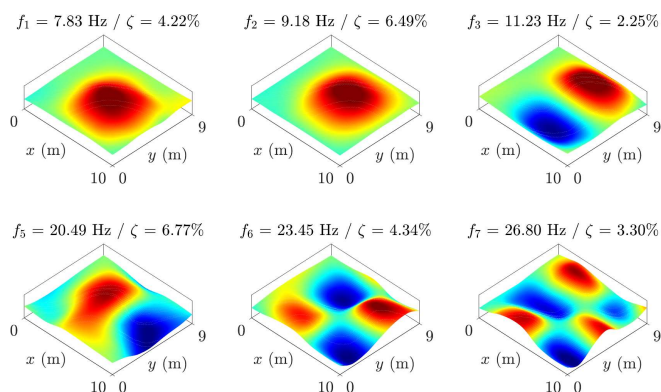


Abbildung 3: Sechs identifizierte Eigenfrequenzen, Dämpfungen und Eigenschwingungsformen aus der EMA.

zen f_i ($i = 1, \dots, 6$), Dämpfungswerte ζ und Eigenschwingungsformen aus der EMA. Es fällt auf, dass die beiden ersten Moden eine ähnliche Eigenschwingungsform aufweisen. Dies kann auf eine Beeinflussung des Schwingungsverhaltens durch den Schwingerreger zurückgeführt werden. In Abb. 4 sind Terzbandpegel des Schalldrucks

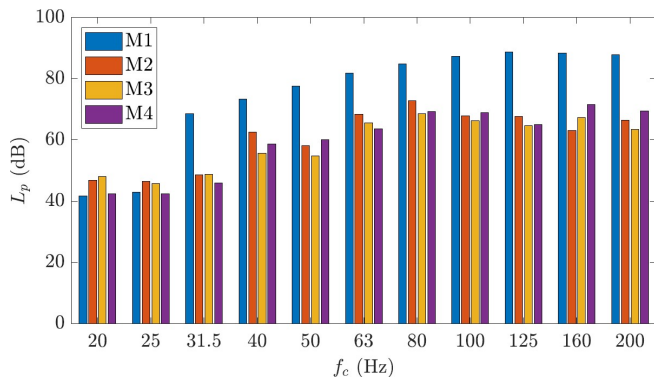


Abbildung 4: Terzbandpegel des Schalldrucks an den vier Messmikrofonen.

an den vier Messmikrofonen bei Rauschanregung im Klassenzimmer dargestellt. Anhand der Schallpegeldifferenz zwischen Mikrophon 1 und den drei restlichen kann auf das Energiedissipationsverhalten im Klassenzimmer geschlossen werden.

Numerische Untersuchungen

Für die numerischen Simulationen wurde ein Finite Element (FE)-Modell des Deckenaufbaus entsprechend Abb. 5 verwendet. Die Brettsper Holzdecke wurde dabei durch Plattenelemente diskretisiert, die durch den verwendeten höherwertigen kinematischen Ansatz in der Lage sind, das Schwingungsverhalten über einen weiten Frequenzbereich genau zu beschreiben [1]. Der schwim-

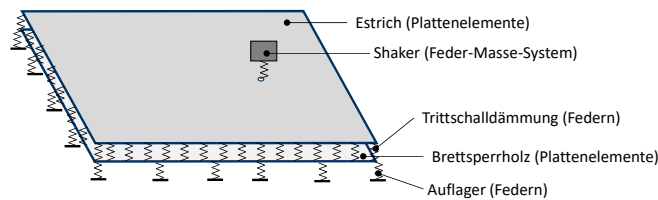


Abbildung 5: FE-Modellierung des Deckenaufbaus.

mende Estrich wurde mittels Standardplattenelementen diskretisiert und über Federn an die Brettsper Holzplatte gekoppelt. Auch für die Lagerung der Decke wurden Federn verwendet. Um die beiden ersten identifizierten Moden auch in der Simulation abbilden zu können, musste der Schwingerreger (Shaker) als Feder-Masse-Dämpfer-System modelliert werden. Zur Anpassung des FE-Modells an die experimentell bestimmten Daten wurde das auf der Bayes'schen Statistik basierende Transitional Markov Chain Monte Carlo Verfahren [2] verwendet. Als anzupassende Parameter wurden dabei der Elastizitätsmodul in Faserrichtung $E_{1,BSP}$, die Schubmoduli $G_{12,BSP}$ und $G_{23,BSP}$ sowie die Dichte ρ_{BSP} (einschließlich der Schüttung) für das Brettsper Holz verwendet. Außerdem wurde die Dicke des Estrichs h_{Est} , die Drehfederwirkung γ_{TSD} und die dynamische Steifigkeit s_{dyn} der Trittschalldämmung, die zwei Auflagersteifigkeiten k_1 und k_2 und die Eigenfrequenz f_{Shaker} des Feder-Masse-Dämpfer-Systems als variabel angenommen. Basierend auf a priori gleichverteilt angesetzten Parametern ergeben sich durch das Verfahren die in Abb. 6 dargestellten

a posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Es lassen

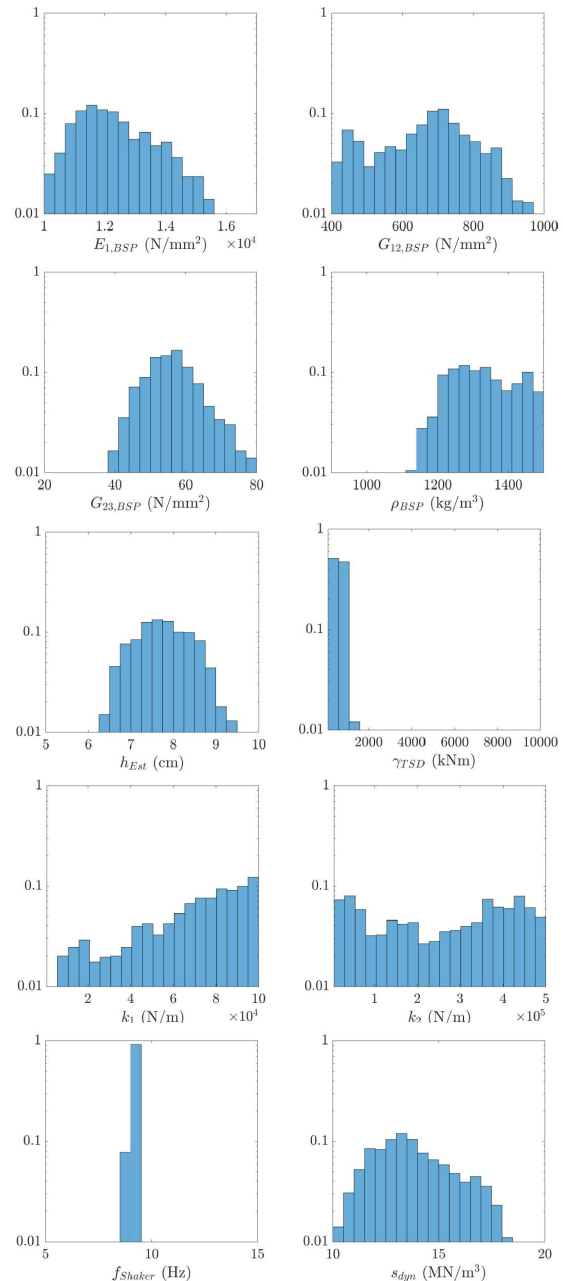


Abbildung 6: A posteriori Verteilung der Parameter.

sich dabei Parameter mit einem relativ eindeutigen Wert (γ_{TSD} und f_{Shaker}), mit größerer Varianz (z.B. $E_{1,BSP}$) sowie solche, die im Rahmen des gewählten Modells keinen wesentlichen Einfluss haben (z.B. k_2), unterscheiden. Unter Verwendung der jeweils wahrscheinlichsten Parameter ergeben sich die in Abb. 7 dargestellten Eigenschwingungsformen und Eigenfrequenzen. Die Simulation gibt hierbei Auskunft über die Eigenschwingungsformen am Estrich (pro Teilbild oben dargestellt) und an der Brettsper Holzplatte (unten dargestellt). Die Eigenschwingungsformen aus EMA und Simulation stimmen gut überein, und die Abweichung der numerisch ermittelten Eigenfrequenzen von denen aus der EMA beträgt nur $|\Delta f| < 3\%$. Zur Simulation des raumakustischen Verhaltens des Klassenzimmers wurde das in Abb. 8

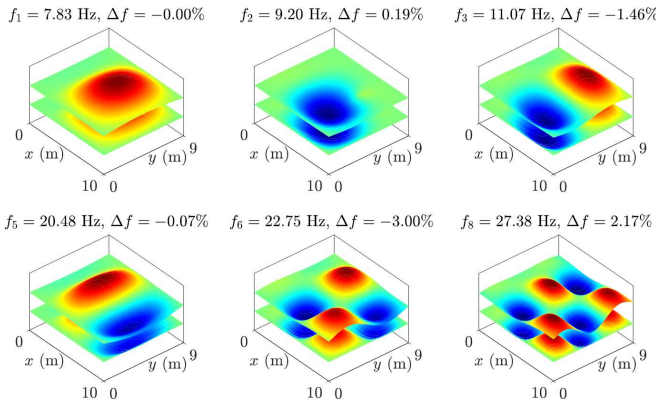


Abbildung 7: Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen aus der FE-Simulation.

dargestellte FE-Modell verwendet. Die Geometrie wird hierbei stark vereinfacht durch einen quaderförmigen Bereich berücksichtigt, dessen Oberflächen eine Impedanz $Z = p/v$ zufolge eines Feder-Dämpferelements pro Flächeneinheit aufweisen. Mit $c = 35 \text{ kNs/m}^3$ und $k =$

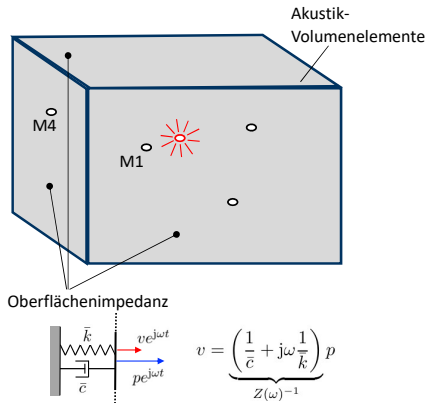


Abbildung 8: FEM-Modellierung des Klassenzimmers.

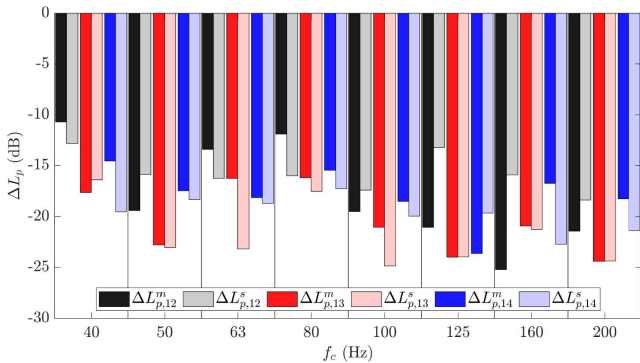


Abbildung 9: Schalldruckpegeldifferenzen von Mikrophon 1 zu den Mikrophonen 2 bis 4 aus Messung und Simulation.

40 MN/m^3 ist die Abweichung zwischen den Ergebnissen aus EMA und Simulation am kleinsten. Dies zeigt Abb. 9 anhand der Terzbandpegeldifferenzen $\Delta L_{p,1k}$ zwischen Mikrophon 1 (in unmittelbarer Nähe zum Lautsprecher) und den Mikrophonen $k = 2, 3, 4$. Ein hochgestelltes m entspricht dabei den Daten aus der Messung, ein

hochgestelltes s simulierten Werten. Im Mittel beträgt im Terzbandbereich von 40 bis 200 Hz die Differenz 2 dB. Die Kopplung der beiden FE-Teilsysteme, d.h. jenes der Struktur (mit dem Vektor der Lagekoordinaten \mathbf{x} , Index s) und jenes des akustischen Bereichs (Variablen \mathbf{p} , Index f), führt im Zeitbereich auf folgendes Differentialgleichungssystem zur Lösung der vibroakustischen Problemstellung,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{fs} & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{K}_{sf} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_s \\ \mathbf{f}_f \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Es wurde die Antwort des Systems im eingeschwungenen Zustand im Frequenzbereich zufolge der Anregung durch Schläge eines Normhammerwerks auf die Estrichplatte, d.h. in \mathbf{f}_s , ermittelt. Neben der Lösung des gekoppelten Systems nach Gl. 1, wurden zwei Näherungsberechnungen zur Beurteilung der Schallimmission im Klassenzimmer durchgeführt: Zum einen eine sequentielle Berechnung, bei der zunächst die Beschleunigungen der Brettsperrholzplatte durch Lösung des Strukturteils in Gl. 1 ermittelt werden, welche dann als Belastung auf das akustische Teilsystem angesetzt werden. Hierdurch werden die beiden Koppelmatrizen \mathbf{M}_{fs} und \mathbf{K}_{sf} vernachlässigt, der Zeitaufwand für die numerische Simulation aber erheblich reduziert. Zum anderen wird die Raumakustik vollständig vernachlässigt, indem die Schallabstrahlung der Brettsperrholzplatte ins Fernfeld mittels Rayleigh-Integral gelöst wird [3]. Dies stellt die schnellste Berechnungsart dar. Ergebnisse dieser drei Be-

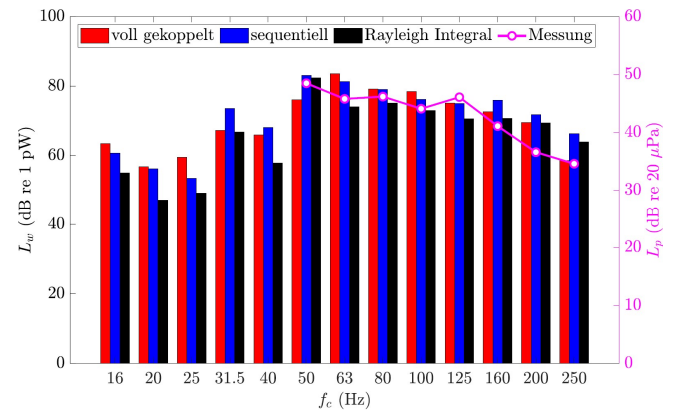


Abbildung 10: Emittierte Schalleistungen L_w aus numerischen Simulationen für verschiedene Berechnungsverfahren, Schalldruckpegel L_p aus Versuch.

rechnungsvarianten sind in Abb. 10 anhand der Terzbandpegel der Schalleistung L_w an der Brettsperrholzdecke dargestellt. Wird das Ergebnis der voll gekoppelten Berechnung als Referenzlösung angesehen, ergeben sich bei der sequentiellen Berechnungen Abweichungen in einzelnen Terzbändern bis zu 6 dB, während diese bei Berechnung mittels Rayleigh-Integral bis zu 10 dB ausmachen. Zum Vergleich sind in Abb. 10 die experimentellen Terzbandpegel des Schalldrucks L_p aus dem Normtrittschallversuch gezeigt, anhand der die grundsätzliche Übereinstimmung des Frequenzinhalts im experimentell

betrachteten Frequenzbereich ab 50 Hz zu erkennen ist. Abbildung 11 zeigt Ergebnisse aus Berechnungen, bei

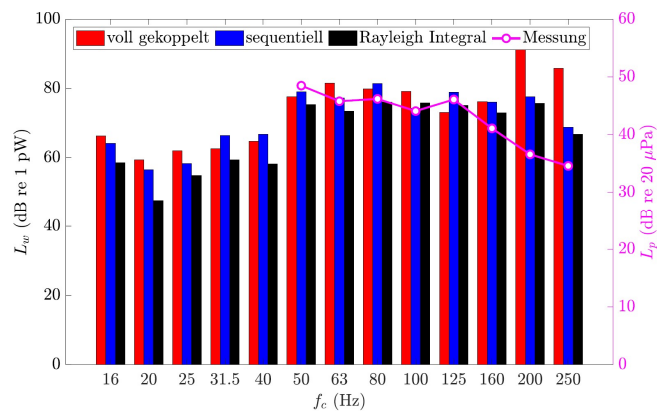


Abbildung 11: Emittierte Schalleistungen L_w aus numerischen Simulationen für verschiedene Berechnungsverfahren bei Berücksichtigung von drei punktuellen Schallbrücken.

denen drei Knoten im Randbereich der beiden Platten (Estrich bzw. Brettspertholz) starr miteinander verbunden sind um Schallbrücken zu simulieren. Es zeigt sich im Vergleich zu Abb. 10 eine erhöhte Schallemission erst ab 200 Hz. Da der Frequenzinhalt nunmehr nicht mehr mit dem aus dem Versuch übereinstimmt, kann daraus geschlossen werden, dass Schallbrücken für das gegenständliche Trittschallproblem weniger verantwortlich sind. Der Einfluss von alternativen Deckenaufbauten

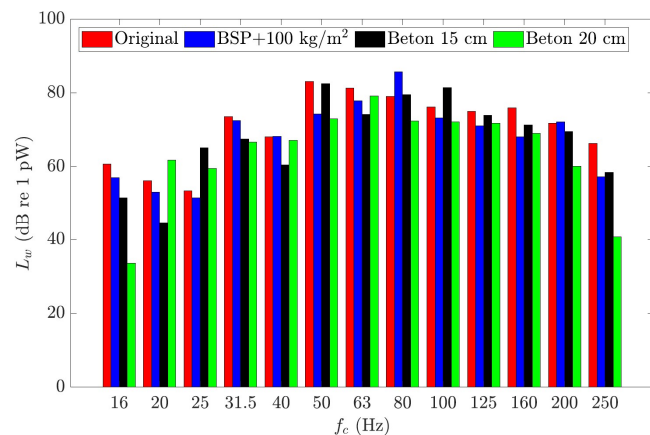


Abbildung 12: Emittierte Schalleistungen L_w aus numerischen Simulationen für alternative Deckenaufbauten.

wird in Abb. 12 untersucht. Neben der emittierten Schalleistung des originalen Deckenaufbaus sind Ergebnisse einer Brettspertholzdecke mit zusätzlicher Schüttung mit 100 kg/m^2 flächenbezogener Masse, sowie anstatt der Holzdecke einer Stahlbetondecke mit 15 bzw. 20 cm Dicke dargestellt. Sämtliche Varianten zeichnen sich durch eine insgesamt erhöhte Masse des Deckenaufbaus aus und zeigen daher eine reduzierte Schallabstrahlung, wenn gleich sich auch in einzelnen Terzbändern durch das Verschieben von Eigenfrequenzen erhöhte Pegel im Vergleich zum Originalaufbau ergeben. Zuletzt wird die Auswirkung von mechanischen Schwingungstilgern (Tuned Mass Damper, TMD), die an der Brettspertholzdecke befestigt

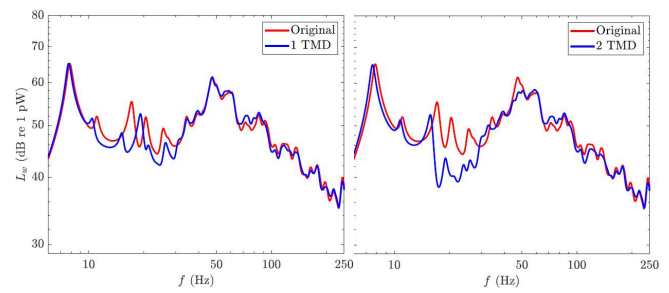


Abbildung 13: Emittierte Schalleistungen L_w aus numerischen Simulationen bei Anordnung von einem bzw. zwei Schwingungstilgern (TMD).

sind, auf die Schallabstrahlung anhand Schmalbandpegel der Schalleistung untersucht. Modelliert wurden diese als Feder-Masse-Dämpfer-System mit jeweils einem Freiheitsgrad. Die Ergebnisse in Abb. 13 beruhen auf einem bzw. zwei TMD mit Eigenfrequenzen von jeweils 48 Hz, die im Bereich der größten modalen Auslenkungen der Brettspertholzplatte bei diesen Frequenzen angeordnet sind. Im Bereich der Eigenfrequenz der TMD ergibt sich bei Verwendung von zwei TMD eine Verbesserung, während diese bei einem TMD ausbleibt. Andererseits verbessert sich die Schallabstrahlung durch die Schwingungstilgerung in einem niedrigerfrequenten Bereich von 20-30 Hz in größerem Ausmaß.

Schlußfolgerungen

Dieser Beitrag befasste sich mit Finite Elemente (FE) Simulationen der Trittschallübertragung über eine Brettspertholzdecke in einem Schulgebäude, basierend auf experimentellen Untersuchungen. Es wurde gezeigt, dass, um diese möglichst realistisch abbilden zu können, eine Berücksichtigung der raumakustischen Situation im Empfangsraum erfolgen sollte, d.h. ein vibroakustisches System zu betrachten ist. Als Kompromiss zwischen Rechengenauigkeit und -aufwand kann eine sequentielle Berechnung der beiden Teilsysteme erfolgen. FE Berechnungen zeigten, dass für die gegenständliche Trittschallbelastung Schallbrücken mit großer Wahrscheinlichkeit nicht verantwortlich sind. Weiters konnte die Auswirkung verschiedener alternativen Deckenaufbauten im niederfrequenten Bereich untersucht werden. Die im Rahmen einer Vorstudie entstandenen Ergebnisse zur Auswirkung von Schwingungstilgern auf die Schallabstrahlung lassen den Schluss zu, dass für ein besseres Verständnis dieser noch weiterführende, systematische Untersuchungen anzustellen sind.

Literatur

- [1] Furtmüller, T. und Adam, C.: An accurate higher order plate theory for vibrations of cross-laminated timber panels. *Composite Structures* 239 (2020), 112017
- [2] Ching, J. und Chen, Y.: Transitional Markov Chain Monte Carlo Method for Bayesian Model Updating, Model Class Selection and Model Averaging. *Journal of Engineering Mechanics* 133 (2007), 816-832
- [3] Fahy, F. und Gardonio, P.: *Sound and Structural Vibration*. 2nd Ed. Academic Press, Oxford, UK (2007)