Messungen der Körperschallintensität in einer Holzrahmenbaustruktur

Fabian Schöpfer[1], Carl Hopkins[2], Andreas R. Mayr[1], Ulrich Schanda[1]
[1] *Labor für Schallmesstechnik LaSM, Hochschule Rosenheim, Deutschland, Email: fabian.schoepfer@fh-rosenheim.de*
[2] *Acoustics Research Unit, School of Architecture, University of Liverpool, UK*

Einleitung

In den vergangenen Jahren hat der Holzbau auch im mehrgeschossigen Wohnungsbau an Bedeutung gewonnen. Zur Gewährleistung des Schallschutzes zwischen fremden Wohneinheiten sind Werkzeuge zur Berechnung der Schallübertragung in leichten Baustrukturen, wie zum Beispiel Holzrahmenbaukonstruktionen nötig. Solche Prognosemodelle müssen für Ingenieuranwendungen robust sein und auf abstrahierten, einfachen Rechenmodellen beruhen. Um die komplexen Übertragungsmechanismen in solchen Rechenmodellen abbilden zu können, ist jedoch zunächst eine detaillierte Kenntnis des Schwingungs- und Körperschallverhaltens dieser Konstruktionen nötig. In diesem Beitrag werden Ergebnisse von Untersuchungen an einer konkreten Rahmenbaukonstruktion vorgestellt. Hierzu wurde im Labor für Schallmesstechnik an der Hochschule Rosenheim ein Leichtbauprüfstand errichtet. Grundlage für ein Prognosemodell könnten Berechnungsmethoden wie die Statistische Energieanalyse (SEA) darstellen. Um deren Anwendbarkeit zu prüfen, wurde die Verteilung der Körperschallenergie in einer Holzrahmenbauwand bei Anregung durch eine Punktquelle untersucht. Dabei wurde die Abnahme der Oberflächenschnelle mit steigendem Abstand zum Anregungspunkt sowie der Energiefluss in der Struktur mithilfe von Körperschallintensitäts-Messverfahren analysiert.

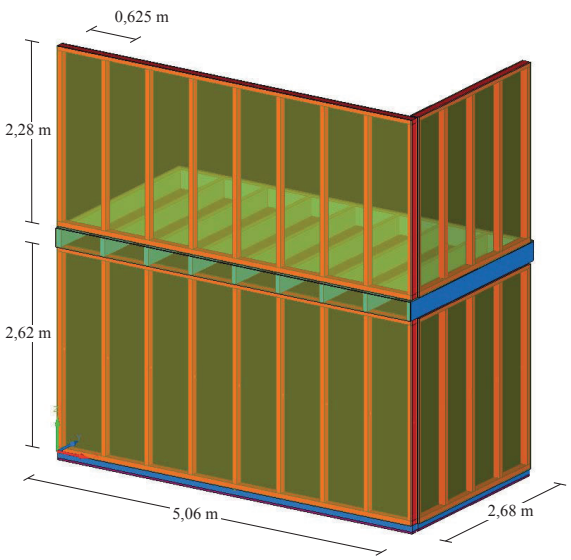

Abbildung 1: Konfiguration des Leichtbauprüfstandes

Leichtbauprüstand

Für die Untersuchungen wurde ein T-Stoß aus Holzrahmenbauwänden und einer Holzbalkendecke mit bauüblichen Dimensionen errichtet (s. Abb. 1). Die Rahmenkonstruktion wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Regnauer Hausbau erstellt und repräsentiert eine übliche Konstruktion in Bezug auf die Balkenquerschnitte und Achsabstände. Die Querschnitte betragen 9 cm x 6 cm für die Rahmenhölzer der Wände und 24 cm x 6 cm für die Deckenbalken. Der Achsabstand der Wände und Decken ist 62,5 cm. Auf die Rahmenkonstruktion wurde zunächst beidseitig eine Lage 19 mm starker Spanplatten mit einem regelmäßigen Abstand von 35 cm geschraubt. Die Holzbalkendecke wurde nur auf der Oberseite beplankt. Untereinander sind die Spanplatten durch Nut und Feder verbunden, der Stoß wurde nicht verklebt. In die Wandhohlräume zwischen den Holzständern wurde zunächst kein Dämmmaterial eingebracht. Der gesamte Prüfstand ist elastisch gelagert, um eine schalltechnische Entkopplung von angrenzenden Bauteilen zu erzielen.

Experimentelle Untersuchungen

Zur Anlayse des Schwingungsverhaltens der Holzrahmenbaustruktur wurden Untersuchungen zur Energieverteilung sowie zum Energiefluss an der großen Wand im unteren Geschoss des Prüfstandes durchgeführt (s. Abb. 1). Diese Wand hat eine Länge von 5,06 m, eine Höhe von 2,62 m und weist acht Gefache auf. Entlang des Bodens ist die Wand elastisch gelagert. An der Oberseite ist die Wand im T-Stoß mit der Holzbalkendecke und der darüber liegenden Wand verschraubt. An den beiden Kanten links und rechts ist die Wand frei.

Schwingungsverhalten der Rahmenbaustruktur

Die Anregung der Wand erfolgte an einem Ende mittels einer Punktquelle (Shaker) (s. Abb. 2). Die Schwingungsantwort wurde über ein regelmäßiges Raster auf der gesamten Wand gemessen. Das Messraster wurde dabei so gewählt, dass jeder sechste Punkt auf der Mittelachse eines Wandriegels lag. So ergaben sich für die gesamte Wand 24 x 49 Punkte für die Kartierung der Schwingschnelle. Mit dem verwendeten Anregesingal konnte auch bei den entferntesten Messpunkten ein ausreichender Signal-Rausch-Abstand im betrachteten Frequenzbereich gewährleistet werden.
Die Verteilung der Oberflächenschnellepegel ist in Abbildung 3 exemplarisch für vier Terzbänder dargestellt. Die gewählten Terzbänder repräsentieren vier, für das Schwingungsverhalten charakteristische,

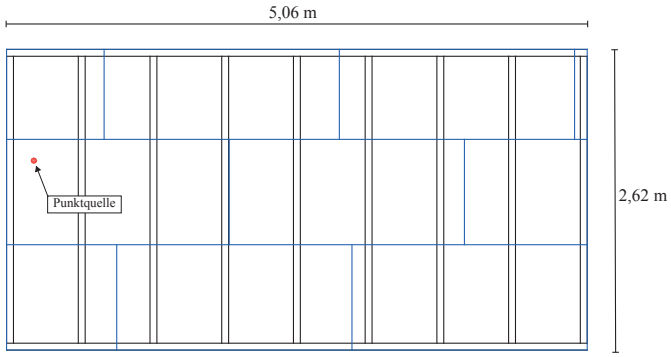

Abbildung 2: Zeichnung der untersuchten Wand.

Frequenzbereiche. Bei tiefen Frequenzen (hier 31,5 Hz) zeigt sich eine gleichmäßige Verteilung der Schwingschnelle. Lediglich zu den Rändern der Wand ist eine Abhnahme erkennbar, die durch die Lagerung der Wand unten und der Verschraubung im T-Stoß oben begründet ist. Bei 100 Hz ist deutlich erkennbar, dass das Schwingungsverhalten von der unter der Beplankungslage liegenden Rahmenkonstruktion beeinflusst wird. Die Schwingungsminima liegen hier auf den Wandriegeln. Im Gegensatz dazu ist bei mittleren und hohen Frequenzen (800 Hz bzw. 2500 Hz) kein Einfluss der Holzriegel erkennbar. Während sich bei 800 Hz eine gleichmäßige Abnahme mit steigender Entfernung von der Quelle einstellt, treten im 2500 Hz Terzband deutliche Sprünge der Schwingschnelle an den Spanplattenstößen auf.

Die dargestellten Eigenschaften der Struktur sind charakteristisch für eine Plattenstruktur mit regelmäßigen, aussteifenden Balken [1] [2]. Solange die Biegewellenlänge der 19 mm dicken Spanplatte bei tiefen Frequenzen lang gegenüber dem Abstand der Wandriegel ist, verhält sich die gesamte Wand annähernd wie eine Platte. Ist eine halbe Biegewellenlänge kleiner als der Ständerabstand, aber noch größer als der Abstand zwischen den Befestigungspunkten, kann die Verbindung zwischen Beplankungslage und Balken als Linienkontakt betrachtet werden. Dabei treten die Schwingungsminima auf den Wandriegeln auf. Bei 100 Hz beträgt eine halbe Biegewellenlänge der 19 mm dicken Spanplatte in etwa 0,4 m und liegt somit zwischen dem Abstand der Wandriegel (0,625 m) und dem Schraubenabstand (0,3 m). Bei mittleren und hohen Frequenzen ist der Abstand zwischen den Befestigungspunkten größer als eine halbe Biegewellenlänge, wodurch sich der Verbund zwischen Beplankungslage und Rahmenstruktur als Punktkontakt beschreiben lässt. Mit steigender Frequenz ist also zu beobachten, dass sich die Beplankungslage weitestgehend unabhängig von der darunter liegenden Rahmenstruktur verhält. Der Einfluss der Rahmenstruktur auf das Schwingungsverhalten kann also in die drei beschriebenden Frequenzbereiche unterteilt werden, siehe auch [1]. Bei hohen Frequenzen zeigt sich zusätzlich der Einfluss der Stöße zwischen den einzelnen Platten der Beplankungslage. Durch die geringe Schwingungsamplitude sowie die kurzen Biegewellenlängen in diesem Frequenzbereich ist eine verlustfreie Weiterleitung der Körperschallenergie über die nicht verklebten Nut- und Feder-Verbindungen nicht möglich. Dies begründet die Sprünge an den Plattengrenzen, die in Abbildung 3 bei 2500 Hz und andeutungsweise auch bei 800 Hz erkennbar sind.

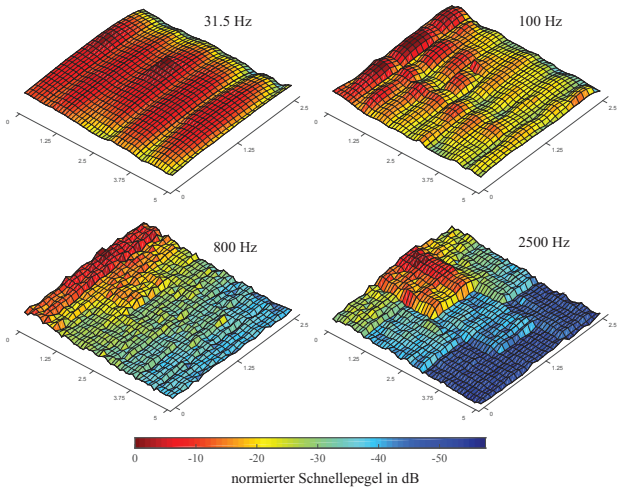

Abbildung 3: Verteilung der Schwingschnelle an 49x24 Punkten auf der Holzrahmenbauwand bei einer Punktanregung in einem Gefach für die Terzbänder 31,5 Hz, 100 Hz, 800 Hz und 2500 Hz. Die Schnellepegel wurden auf den Anregepunkt normiert. Die schwarzen Linien kennzeichnen die Lage der Wandriegel.

Energiefluss in der Struktur
Messung der Körperschallintensität

Die Kartierung der Schwingschnelle auf der Holzrahmenbauwand ermöglicht die Beschreibung des Schwingungsverhaltens. Dabei zeigt sich vor allem bei mittleren und hohen Frequenzen auch eine deutliche Pegelabnahme mit steigendem Abstand zur Quelle. Um die Schallübertragung in einer solchen Holzrahmenbaustruktur mit der Statistischen Energieanalyse beschreiben zu können, ist eine Einteilung in sogenannte Subsysteme nötig. Zur Festlegung möglicher Subsystemgrenzen wurde der Energiefluss in der Struktur mit Hilfe von Messverfahren zur Bestimmung der Körperschallintensität untersucht. Im Gegensatz zur Schallintensität in einem Luftschallfeld beschreibt die Körperschallintensität eine längenbezogene Energieflussdichte mit der Einheit Watt pro Längeneinheit. Zur Messung der Körperschallintensität wurde in diesem Fall die 2-Punkt-Methode nach Noiseux [3] angewandt. Diese ermöglicht die Bestimmung des Netto-Energieflusses an einem Punkt P_0 durch Messung der transveralen Schnelle an zwei Punkten. Diese beiden Punkte müssen in einem definierten Abstand vor und nach P_0 entlang der Richtung des Energieflusses platziert werden, wie in Abbildung 4 dargestellt.

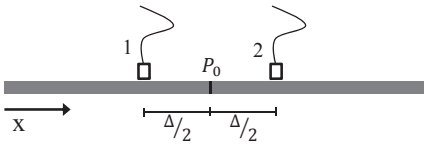

Abbildung 4: Setup der 2-Punkt-Methode

Der Netto-Energiefluss in x-Richtung am Punkt P_0 kann dann im Frequenzbereich nach Gleichung (1) [4] bestimmt werden.

$$I_x = -\frac{2\sqrt{Bm'}}{\Delta}\,\Im(G_{12}) \qquad \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}}\right] \qquad (1)$$

Dabei ist B die Biegesteifigkeit, m' die flächenbezogene Masse, Δ der Abstand zwischen den Sensoren und $\Im(G_{12})$ der Imaginärteil des Kreuzspektrums der Schnellen an den zwei gewählten Punkten. Um den Energiefluss auf der Platte in x- und y-Richtung zu ermitteln, wurden an jedem betrachteten Punkt zwei Sensorpaare platziert. Aus diesen beiden Komponenten lässt sich die Körperschallintensität dann für jede Position als Vektor mit Betrag und Richtung darstellen.

Für die Messungen wurden 24 Beschleunigungssensoren mit einer Masse von je 23 Gramm verwendet. Da die Sensormasse bei hohen Frequenzen einen Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Struktur hat, wurde die Obergrenze des betrachteten Frequenzbereiches auf 1000 Hz festgelegt, siehe auch [5]. Der limitierende Faktor bei der 2-Punkt-Methode ist analog zur Messung der Luftschallintensität die Wahl des Abstandes zwischen den beiden Sensoren. Dieser muss in Bezug auf die Biegewellenlänge so gewählt werden, dass die Ungenauigkeiten aus der Näherung der finiten Differenzen sowie der Phasenlage zwischen den beiden Sensoren gering ist. Im vorliegenden Fall wurde ein Abstand von 33 mm gewählt. Zur Abschätzung der Messungenauigkeit wurde in Voruntersuchungen der Phasengang zwischen den verwendeten Aufnehmerpaaren untersucht. Die Abweichung betrug $\pm 0{,}2$ Grad im Frequenzbereich von 50 Hz bis 1000 Hz mit einzelnen Ausreissern bis zu $\pm 1{,}0$ Grad. Bei einem Sensorabstand von 33 mm ist der kombinierte Fehler aus Phasenabweichung und den finiten Differenzen maximal $\pm 0{,}5$ dB im Bereich von 31,5 Hz bis 1000 Hz. Die maximale Winkelabweichung betrug ± 8 Grad bei 31,5 Hz und $\pm 1{,}5$ Grad bei 1000 Hz.

Die Körperschallintensität wurde pro Gefach an 4 x 18 Punkten bestimmt. Positionen auf den Wandriegeln wurden vernachlässigt, da die Näherungen der 2-Punkt-Methode Freifeldbedingungen voraussetzen [3]. Insgesamt wurden die resultierenden Intensitätsvektoren für 32 x 18 Punkte für acht Gefache schmalbandig ermittelt. Ähliche Untersuchungen wurden von Schoenwald [6] für drei Gefache durchgeführt. Die Ergebnisse wurden dann in Terzbändern zusammengefasst und sind für 31.5 Hz, 100 Hz und 800 Hz in Abbildung 5 dargestellt. Der Betrag der Intensitätsvektoren ist als normeirter Pegel farblich hinterlegt.

In allen drei dargestellten Terzbändern ist die Punktquelle im ersten Gefach durch die weglaufenden Intensitätsvektoren deutlich erkennbar. Betrachtet man das Muster der Vektoren in den übrigen Gefachen der Wand, zeigt sich bei 31,5 Hz eine gleichmäßige Ausrichtung entlang der Wand sowie eine geringe Abnahme der Intensitätspegel. Im 100 Hz Terzband treten Verwirbelungen auf, die ihre Ursache in der Ausbildung einer Eigenmode in diesem Freuqenzbereich hat. Zu höheren Frequenzen nehmen die Intensitätspegel mit steigender Entfernung von der Quelle deutlich ab.

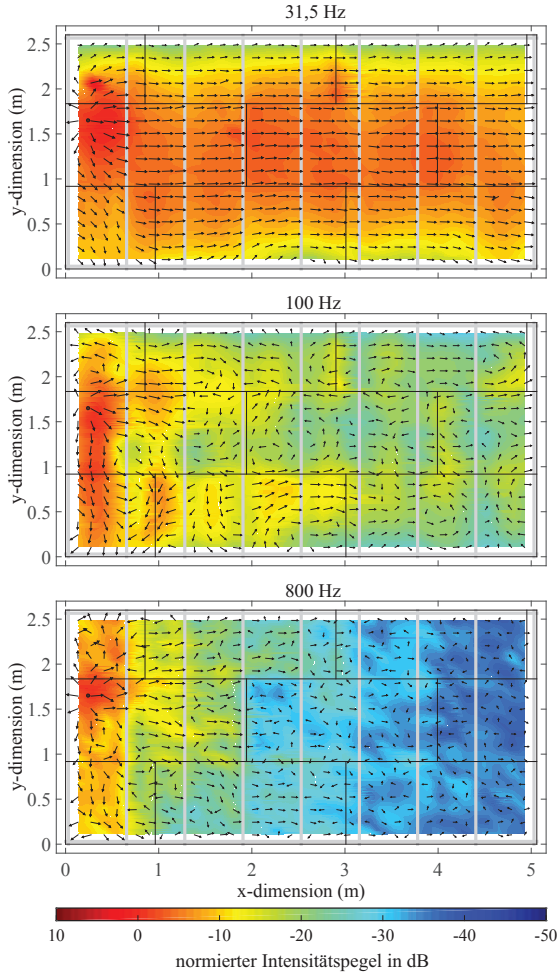

Abbildung 5: Visualisierung der Körperschallintensität; die grauen Linien deuten die Lage der Wandriegl an; die dünnen schwarzen Linien kennzeichnen die einzelnen Spanplatten.

In Bezug auf eine Einteilung in Subsysteme für die SEA wurde der Energieeintrag in die aufeinanderfolgenden Gefache untersucht. Hierzu wurden die x-Komponenten der Intensitätsvektoren nach jedem Wandriegel über die Wandhöhe aufsummiert und als Pegel, normiert auf das zweite Gefach dargestellt, siehe Abbildung 6. Hier zeigt sich im tiefen Frequenzbereich die geringe Abnahme von Gefach zu Gefach, wohingegen bei 100 Hz Schwankungen durch die erwähnten Verwirbelungen auftreten. Bei 800 Hz ist eine kontinuierliche Abnahme des Energieeintrages in jedes Gefach von etwa 3 dB bis 5 dB erkennbar.

Pegelabnahme in der zweischaligen Struktur

In den bisherigen Betrachtungen wurde das Schwingungsverhalten sowie der Energiefluss auf einer Seite der zweischaligen Wand untersucht. In Bezug auf die Körperschallausbreitung im Gebäude ist aber neben der Pegelabnahme entlang einer Wandseite vor allem auch die Pegelabnahme auf die andere Wandseite von Interesse. Hierzu wurde die Schwingschnelle zusätzlich auf der von der Körperschallquelle abgewandten Wandseite auf

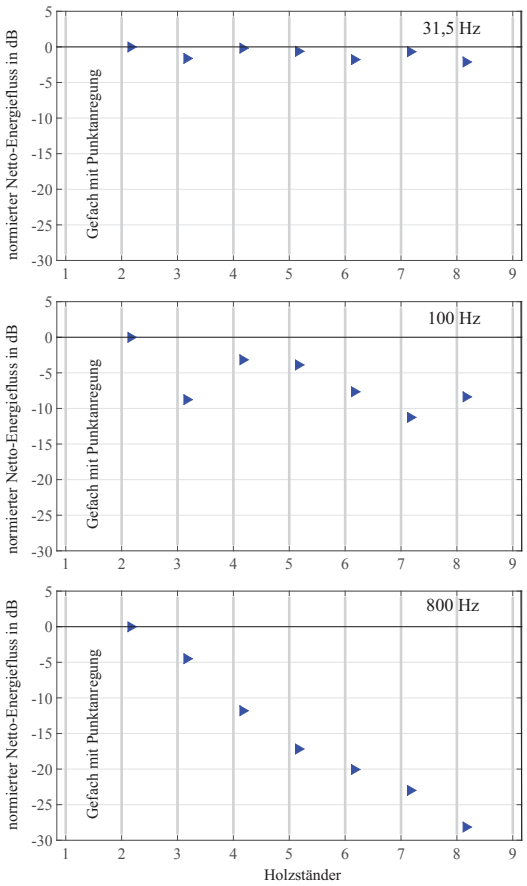

Abbildung 6: Energieeintrag in die aufeinander folgenden Gefache der Rahmenbauwand.

dem bereits erwähnten Messraster kartiert. Zusätzlich zum Anregepunkt im Gefach wurde eine Messung mit einer Punktanregung auf einem Wandriegel durchgeführt. Die normierten Pegel der Oberflächenschnelle sind für beide Wandschalen und beide Anregepositionen in Abbildung 7 dargestellt. Sowohl für die Gefachanregung als auch die Ständeranregung ist bei tiefen Frequenzen nur eine geringe Differenz zwischen angeregter und abgewandter Seite zu erkennen. Mit steigender Frequenz zeigen sich bei der Gefachanregung deutlichere Unterschiede zwischen den beiden Wandschalen als bei der Anregung auf einem Wandriegel.

Zusammenfassung

Durch die experimentellen Untersuchungen konnte das Schwingungsverhalten einer Holzrahmenbauwand, der Energiefluss in dieser Stuktur sowie die Pegelabnahme entlang der Wand und auf die von der Anregung abgewandte Wandseite der zweischaligen Konstruktion beschrieben werden. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen nun im Weiteren als Grundlage für die Berechnung der Körperschallübertragung in einer Holzrahmenstruktur mittels Statistischer Energieanalyse.

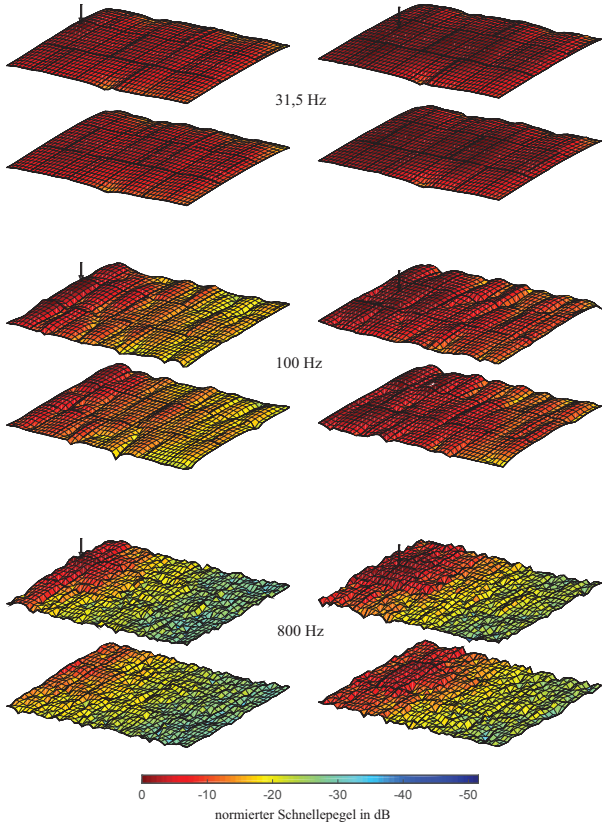

Abbildung 7: Verteilung der Schwingschnelle auf beiden Seiten der zweischaligen Holzrahmenbauwand für Gefachanregung (links) und Ständeranregung (rechts).

Danksagung

Dieser Beitrag wude im Rahmen des Projektes *Nachhaltiger Schallschutz gebäudetechnischer Anlagen in energetisch optimierten Gebäuden*, gefördert durch das BMBF im Rahmen der Förderlinie FHProfUnt erarbeitet.

Literatur

[1] T. R. T. Nightingale, I. Bosmans: Vibration response of lightweight wood frame building elements. Building Acoustics, v. 6 (3/4), 1999, p. 269-288.

[2] R. J. M. Craik, R. S. Smith: Sound transmission through lightweight parallel plates. Part II: structure-borne sound. Applied Acoustics, v. 61 (2), 2000, p. 247-269.

[3] D. U. Noiseux: Measurement of power flow in uniform beams and plates, Journal of the Acoustical Society of America, v. 47 (1), 1970, p. 238-247

[4] G. Pavic: Measurement of structure borne wave intensity. Part I: Formulation of the methods. Journal of Sound and Vibration, v. 49 (2), 1976, p. 221-230

[5] C. Hopkins: Sound Insulation. Elsevier, 1st edition, 2007.

[6] S. Schoenwald: Investigation of flanking sound transmission in lightweight building structures using a scanning laser vibrometer. Proceedings of Euronoise, 2009, Edinburgh, Scotland.