

Modellierung der Schallübertragung einer Gipsfaserständerkonstruktion innerhalb einer Finite Element Umgebung und Validierung durch Laservibrometrie

Maximilian Neusser¹, Armin Wilfling², Franz Dolezal² und Herbert Müllner³

¹ TU Wien Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, 1040 Wien,

E-Mail: maximilian.neusser@tuwien.ac.at

² Holzforschung Austria, 1030 Stadt

³ Versuchsanstalt am TGM, 1200 Wien

Einleitung

Leichte Bauelemente sei es aus mineralisch Gebundenen Werkstoffen oder aus Holzwerkstoffen stellen einen immer prominenteren Anteil der verbauten Baukonstruktionen dar. Neben dieser Entwicklung ist die derzeit international geführte Diskussion der Erweiterung der Deskriptoren zur Beschreibung der bauakustischen Performance eine Herausforderung für die Planer und die Industrie. Derzeitig normativ regulierte Simulations- und Rechenmodelle sind nicht in der Lage die bauakustische Performance und somit das besondere physikalische Verhalten solcher Konstruktionen im tiefen Frequenzspektrum <250 Hz zu prognostizieren und stellen somit eine Unsicherheit innerhalb von Forschung und Entwicklung dar. Die Messung und Analyse der Schallübertragung eines frei gelagerten Gipsfaserständerkonstruktionselements mittels Laservibrometrie erlaubt eine Abbildung des Bauteils innerhalb der Finiten Elementumgebung in unterschiedlichen Detaillierungsgraden.

Prüfanordnung

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Bestimmung und Auswahl eines Geeigneten Modells zur Abbildung der Vibrationsenergieübertragenden Eigenschaften der Verbindung zwischen der Gipsfaserplatte und des Holzstehers. Um diese Eigenschaften der Schraubverbindung zu bestimmen wurde der Prüfkörper an der Stehermitte mittels Shaker angeregt. Das Anregungsspektrum entspricht weißem Rauschen. Auf der dem Steher abgewandten Seite wurde mittels Laservibrometrie die Schnelle Verteilung an der Gipsfaserplattenoberfläche gemessen und somit die Übertragungsfunktion bestimmt. Das über die Oberfläche gemittelte Ergebnis in Form der mechanischen Impedanz dient als Validierungsgrundlage für die folgend beschriebenen Simulationsmodelle.

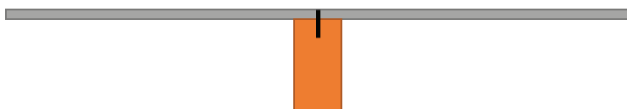


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Prüfkörpergeometrie bestehend aus einer Gipsfaserplatte mit der Dimension 1250x1500x12.5mm und eines damit verschraubten Holzstehers in der Dimension 100x60x1250mm

Der jeweilige Probekörper bestehend aus einer Gipsfaserplatte und einem Holzstehers wurde auf einer Galgenkonstruktion an einem Entkopplungssystem für abgehängte Decken frei hängend montiert. Der Shaker steht auf einem Stativ und ist mittels Stinger und Kraftsensor an den Prüfkörper gekoppelt.



Abbildung 2: Darstellung der Konstruktion zur Abhängung der Probekörper und des Versuchsaufbaus

Neben der entkoppelten Aufhängung sorgt die Empfangsraumseitige Aufstellung von Shaker und die Senderaumseitige Aufstellung von Rahmen für eine weitere Entkopplungsebene. Somit wird eine Einleitung von Vibrationen anders als über den Shaker Kopf effektiv verhindert (siehe Abbildung 2).

Materialdaten

Die Materialdaten der Gipsfaserplatte und des Holzstehers wurden in Anlehnung an das Verfahren in [1] gewonnen wobei die dynamischen E-Module als Einzahlgröße über den für diese Untersuchung gesamten relevanten Frequenzbereich von 15-500Hz angesetzt wurden. Zur Abbildung der Dämpfungseigenschaften wurde der Verlustfaktor durch die Bestimmung der Körperschallnachhallzeit entsprechend [2] über das Frequenzspektrum bestimmt. Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigen die gewählten Materialparameter für die Modellierung in der FEM Umgebung.

Tabelle 1: Materialparameter - Holz

E-Modul in N/mm ²	8950
Querkontraktionszahl	0.3
Rohdichte in kg/m ³	400
Isotropischer Verlustfaktor	0.011 (bei 500Hz)

Tabelle 2: Materialparameter - Gipsfaserplatte

E-Modul in N/mm ²	4150
Querkontraktionszahl	0.18
Rohdichte in kg/m ³	1200
Isotropischer Verlustfaktor	0.014 (bei 500Hz)

Materialmodellierung

Die Formulierung der Partiellen Differenzialgleichung zur Bestimmung der Verschiebungen und Spannungen der Materialdomänen ist entsprechend Gleichung 1 in der FEM Umgebung umgesetzt. Die Modellierung der Gipsfaserplatte und des Holzstehers beruht auf der Annahme das die Werkstoffe sich linear elastisches und isotropes verhalten. Für solche Materialien lässt sich der Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen über das Hookshe Gesetz (siehe Gleichung 2) über den Elastizitätstensor C definieren.

$$-\rho\omega^2\bar{u} = \nabla\sigma + F_V \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_0 + C : (\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (2)$$

Dieser Elastizitätstensor enthält in seinen Komponenten die zuvor bestimmten Materialdaten und in seinen komplexen Anteilen den per [2] bestimmten Verlustfaktor (siehe Gleichung 3)

$$C_c = (1 + i\eta) \cdot C \quad (3)$$

Parameteridentifikation

Der erste Schritt zur Modellierung der Schallenergieübertragung über die Schraubverbindung stellt die Identifikation der notwendigen Parameter dar, die das Modell aufweisen muss um alle auf die Übertragung relevanten Einflüsse darstellbar zu machen. Hierzu wurden unterschiedliche Konstruktionsvarianten mit variierenden Schraubenabständen, Schraubenpositionierungen und Anzugsmomenten der Schrauben vermessen und dessen mechanische Impedanz mittels Laservibrometrie bestimmt. Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der gemessenen mechanischen Impedanz von Konstruktionen entsprechend Abbildung 1 mit unterschiedlichen Schraubenabständen und Positionierungen. Es ist ein deutlicher Unterschied in den resonanten und nicht resonanten Anteilen der Übertragungsfunktion von bis zu 15dB in Abhängigkeit des Schraubenabstands erkennbar. Der Schraubenabstands und die Positionierung der Schraube entlang der Verbindung stellen somit wesentliche Parameter für die Modellierung des Schwingungsverhaltens einer verschraubten Konstruktion dar.

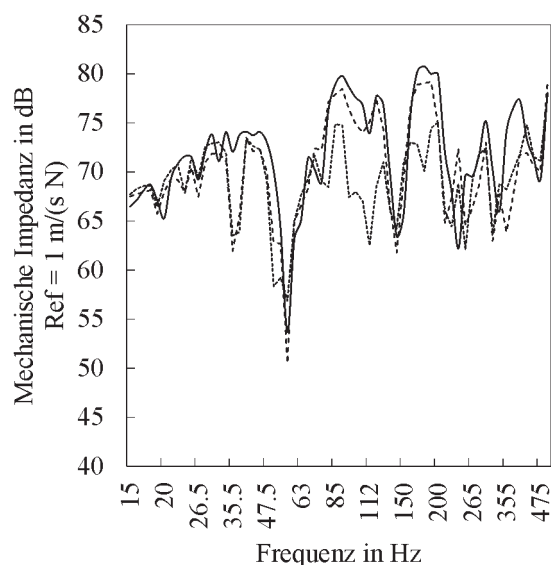


Abbildung 3: Vergleich der gemessenen mechanischen Impedanz der Konstruktion mit unterschiedlichen Schraubenabständen (55cm punktiert, 27.5cm strichliert und 12.75cm durchgezogen)

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigt den Einfluss des Anzugsmoments, am Beispiel einer Konstruktion entsprechend Abbildung 1 mit drei und elf Schrauben, auf die Übertragungsfunktion. Bei jeweils gleicher Schraubenanzahl wurde ein unterschiedliches Anzugsmoment von 1 bzw. 5Nm aufgebracht. Es konnte ein Unterschied von bis zu 5dB in der mechanischen Impedanz der Konstruktionen messtechnisch aufgezeigt werden. Neben der Anzahl und der Position der Schrauben stellt somit das Anzugsmoment einen weiteren wesentlichen Parameter für die Modellierung einer Schraubverbindung dar.

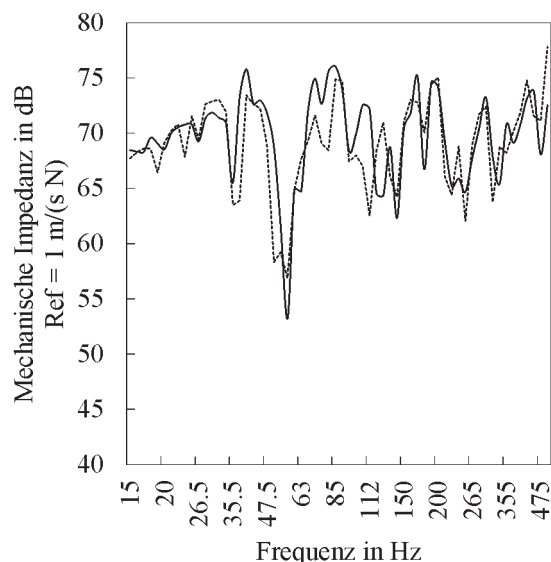


Abbildung 4: Vergleich der gemessenen mechanischen Impedanz der Konstruktion mit 3 Schrauben, 55cm Schraubenabstand und unterschiedlichen Schraubenanzugsmoment (5Nm durchgezogen, 1Nm punktiert)

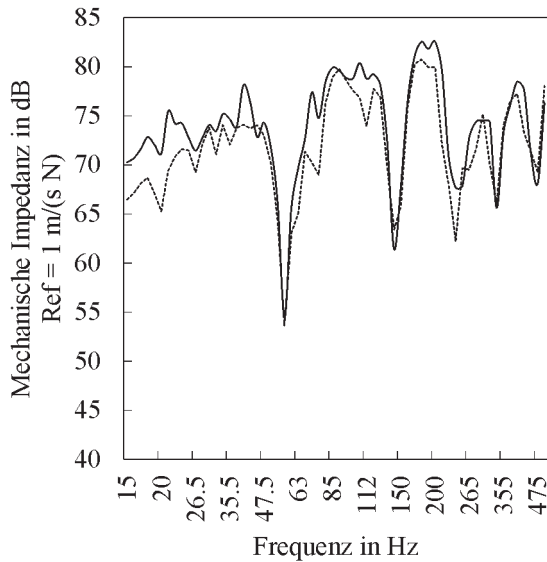


Abbildung 5: Vergleich der gemessenen mechanischen Impedanz der Konstruktion mit 11 Schrauben, 12.75cm Schraubenabstand und unterschiedlichen Schraubenanzugsmoment (5Nm durchgezogen, 1Nm punktiert)

Modellierung der Schraubverbindung

Die Literatur bietet unterschiedliche Möglichkeiten der Modellierung der Schraubverbindung wobei am häufigsten im betreffenden Frequenzbereich von einer Linienförmigen Verbindungsmodellierung (Modell d) ausgegangen wird und erst in höheren Frequenzbereichen des Spektrums >500Hz zu einer Punktförmigen Modellierung (Modell b) übergegangen wird.

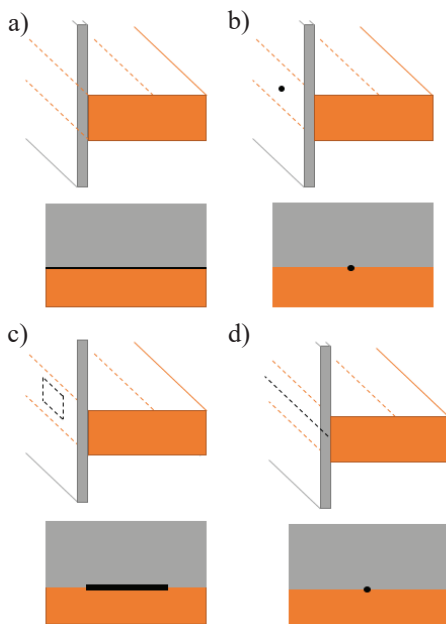


Abbildung 6: Schematische Darstellung der untersuchten Modellierungsvarianten von Schraubverbindungen in Finite Element Simulationsumgebungen

Abbildung 7 zeigt den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den unterschiedlichen Modellierungsansätzen der Schraubverbindung nach Abbildung 6. Es ist zu erkennen, dass alle Modelle nicht in der Lage sind das Schwingungsverhalten der gewählten Konstruktion ausreichend genau über das untersuchte Frequenzspektrum wiederzugeben. Die größten Unterschiede treten entgegen der Erwartung im Frequenzbereich zwischen der ersten Plattenresonanz bei 55 Hz und 112 Hz auf. Eine größere Abweichung der Mechanischen Impedanz über 200 Hz wurde durch die Autoren erwartet konnte aber nicht festgestellt werden.

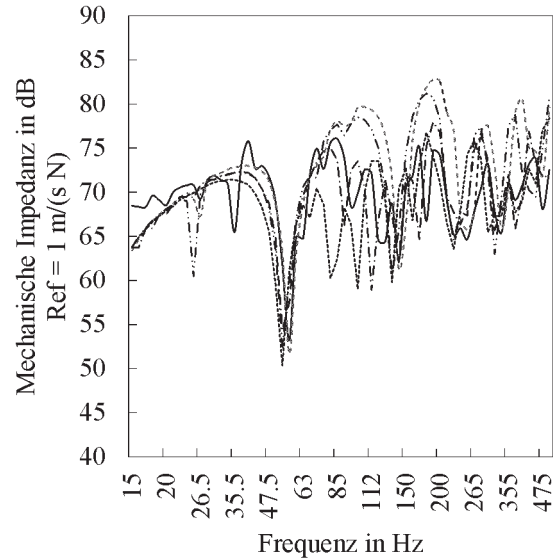


Abbildung 7: Vergleich der gemessenen mechanischen Impedanz der Konstruktion mit drei Schrauben 55cm Schraubenabstand und 5Nm Anzugsmoment (durchgezogen) und den Simulationsergebnissen mit unterschiedlichen Schraubenmodellen (Modell a - - - , Modell b ····, Modell c - · - ·, Modell d - - -)

Keines der in Abbildung 6 dargestellten Modelle bietet alle zuvor beschriebenen Parameter für eine physikalisch korrekte Abbildung der Verbindung innerhalb der Simulationsumgebung. Weiteres lässt sich vermuten, dass unterschiedliche Schraubengeometrie wie z.B. Schraubenkopfdurchmesser d_w , Schraubenlänge l_f und Gewindesteigung P erheblichen Einfluss auf die zu erwartende Steifigkeit und Schwingungsverhalten der Konstruktion zeigen. Um alle diese Einflüsse abbildbar zu machen wurde ein Modell in Anlehnung an [3] entwickelt. Das Modell bildet die Schraube über einen äquivalent steifen Träger ab, wodurch eine effiziente Implementierung in die FEM Umgebung gewährleistet wird.

$$F_{\text{Vorspannung}} = \frac{M_{\text{Anzugsmoment}}}{0.16 \cdot P} \quad (4)$$

$$A_{\text{Schale}} = \frac{\pi}{4} \left(d_w + \frac{l_f}{5} \right)^2 \quad (5)$$

Die beiden Schalenelemente durch die die Einspannung der Platte an dem Schraubenkopf und der Schraubenspitze abgebildet werden kann weisen keine wesentliche Verformung in Dickenrichtung auf und können somit ebenso mit wenigen Elementen effizient diskretisiert werden. Die in Abbildung 8 dargestellte Vorspannkraft in Abhängigkeit des Anzugsmoments (unter Vernachlässigung der Reibung zwischen Schraubenkopf und Platte) und die Fläche der Schalenelemente berechnen sich in Anlehnung an [3] laut Gleichung 4.

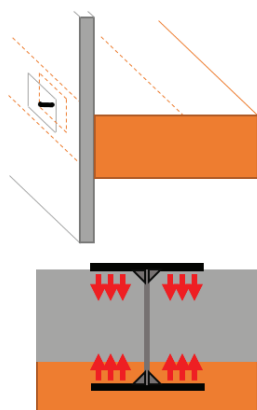


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Schraubenmodellierung für Modell e in der Finite Elemente Umgebung

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 9 und 10 zeigt den Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messungen in Form der mechanischen Impedanz der Beispielkonstruktionen. Es wurden unterschiedliche Schraubenabstände untersucht und in allen Fällen ein zufriedenstellende Abweichungen von max. 3dB erzielt werden.

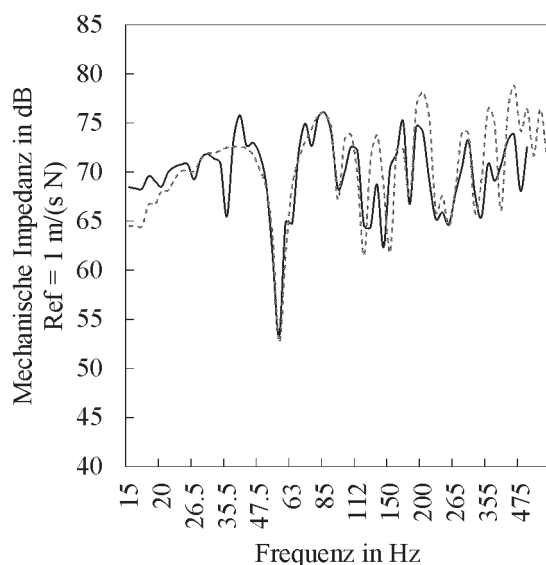


Abbildung 9: Vergleich zwischen Messung mit drei Schrauben, 55cm Schraubenabstand und 5Nm Anzugsmoment (durchgezogene Linie) und Simulationsergebnis – Modell e (gestrichelte Linie)

Allgemein ist zu beobachten das es durch vermutliche Imperfektionen der Konstruktionen wie z.B. Anisotropie, Homogenität und sonstigen Geometrie Abweichungen zur Anregung von Moden während der Messung gekommen ist die so in den Simulationsergebnis in dieser Form nicht zu erkennen sind. Generell lässt sich eine Vergrößerung der Abweichung in Richtung der höheren Frequenzen des untersuchten Spektrums beobachten, was für eine zu grobe Diskretisierung innerhalb der Simulationsumgebung zu sprechen kann.

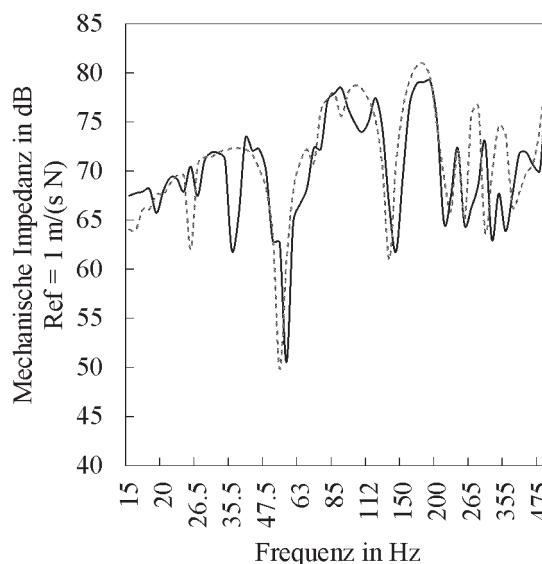


Abbildung 10: Vergleich zwischen Messung mit fünf Schrauben, 27.5 cm Schraubenabstand und 5Nm Anzugsmoment (durchgezogene Linie) und Simulationsergebnis – Modell e (gestrichelte Linie)

Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch den Vergleich der gemessenen und simulierten mechanischen Impedanz der Beispielkonstruktion konnte gezeigt werden das mit dem präsentierten Schraubenmodell das Schwingungsverhalten der verschraubten Konstruktion über das Frequenzspektrum zwischen 15Hz und 500Hz innerhalb der Finite Elemente Simulationsumgebung gut nachvollzogen werden kann. In einem nächsten Schritt wird das Schraubenmodell zur Abbildung der Schallenergieübertragung in doppelschaligen Konstruktionen mit Holz und Metallstehern angewandt und weiter validiert.

Literatur

- [1] OENORM EN ISO 10848-1:2006-08-01 Akustik - Messung der Flankenübertragung von Luftschall und Trittschall zwischen benachbarten Räumen in Prüfständen - Teil 1
- [2] ISO/PAS 16940, Glass in building - Glazing and airborne sound insulation - Measurement of the mechanical impedance of laminated glass, 2008.
- [3] VDI-Richtlinie 2230 (1977)
- [4] Yamamoto A., Theory and Design of Bolt Joints, (1977), pp. 30-69, Yokendo