

VibWood – Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken

Gerhard Müller
Technische Universität München
Lehrstuhl für Baumechanik
DE-München



VibWood – Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken

1. Einleitung

Aus vibroakustischer Sicht stellen leichte Deckenkonstruktionen, insbesondere Decken in Holzbauweise, aufgrund der Anregbarkeit durch Fußgänger, der Trittschallübertragung und des abgestrahlten sekundären Luftschalls bei Körperschallanregung, vor allem im Frequenzbereich unter 100 Hz eine anspruchsvolle Aufgabe für die Prognose und für konstruktive Lösungen dar. Für die baupraktische Anwendung ist es im Regelfall nicht vertretbar, komplexe Simulationsrechnungen hinsichtlich des vibroakustischen Verhaltens durchzuführen. Neben den in der Regel nicht scharf eingrenzenden Randbedingungen und Materialparametern sind auch die erforderlichen Hilfsmittel für eine vibroakustische Berechnung, insbesondere zur Wechselwirkung von Schwingungen und damit verursachter Schallabstrahlung und Innengeräuschpegel nur in Ausnahmefällen vorhanden.

Für den Geschoßwohnungsbau in Holzbauweise sind daher Planungshilfen erforderlich, die es ermöglichen, bereits in einer frühen Phase, die zu erwartenden vibroakustischen Eigenschaften einzugrenzen. Diese Planungshilfen sollen als Grundlage für die Auslegung ggf. erforderlicher konstruktiver Maßnahmen dienen. Maßnahmen reichen von elastisch aufgelagerten Fußbodenaufbauten, abgehängten Decken bis zu Schwingungstilgern [1].

Für die Erarbeitung von Planungshilfen sind geeignete Ingenieurmodelle erforderlich, wobei besonders die Sensitivitäten der Ergebnisse im Hinblick auf Schwingungen und Abstrahlverhalten bezüglich der Beschreibung von Material, Geometrie und Auflagerbedingungen zu berücksichtigen sind.

Im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens VibWood werden an der Hochschule Rosenheim (Prof. Schanda) und an der TU München (Prof. Müller) geeignete Ingenieurmodelle entwickelt. Dabei werden experimentelle Untersuchungen an verschiedenen Deckensystemen durchgeführt, anhand derer Simulationsrechnungen kalibriert werden. Darauf aufbauend werden „numerische Experimente“ durchgeführt, bei denen grundlegende Abhängigkeiten der vibroakustischen Eigenschaften, wie z.B. der Eigenfrequenzen oder des Abstrahlgrades, von Geometriedaten, konstruktiven Details oder wesentlicher Parameter abgehängter Decken oder schwimmender Estrichen aufbereitet werden.

Im folgenden Beitrag werden exemplarisch derartige Betrachtungen vorgestellt.

2. Vorgehensweise

Verschiedene Deckenaufbauten werden im Deckenprüfstand der Hochschule Rosenheim hinsichtlich ihrer dynamischen Charakteristik und Schallabstrahlung messtechnisch untersucht. Die Untersuchungen erfassen die Eigenfrequenzen, die Betriebsschwingungsformen und die Schallabstrahlung unter harmonischen Lasten. Es werden unterschiedliche Zustände (Bodenaufbauten, abgehängte Decken) betrachtet.

Die Experimente werden über Finite-Elemente Berechnungen und Nachauswertungen zur Abstrahlung numerisch nachvollzogen. Dazu wird ein Verfahren für die Prognose der Schallabstrahlung von schwingenden Strukturen mit Hilfe von Integraltransformationmethoden angewandt, das in Laborversuchen validiert wurde.

In den zugrundeliegenden Modellen werden, so weit als möglich, die wesentlichen Kenngrößen parametrisiert betrachtet, d.h. es ist ohne zusätzlichen Modellierungsaufwand möglich, Steifigkeiten, Geometrie aber auch Parameter konstruktiver Elemente wie einer Unterdecke (Abhängeabstände, Ankopplungsparameter der Unterdecke an die Abhängung, Steifigkeiten der Hänger usf.) zu ändern.

Die Parameter der numerischen Modelle der einzelnen experimentell untersuchten Systeme werden abgeglichen und kalibriert. Aufbauend auf die kalibrierten Modelle ist es möglich, den Einfluss unterschiedlicher Deckenparameter auf das vibroakustische Verhalten einzugrenzen. Diese Modellierung ermöglicht grundsätzliche Studien ohne den

Aufwand weiterer physikalischer Modelle. Die Parameter der Modelle werden dabei, soweit als möglich, über dimensionslose Größen beschrieben, mit dem Ziel, Nomogramme für die Praxis zu entwickeln.

Die Parameterstudien dienen dazu, die grundlegenden Einflüsse charakteristischer Parameter in Bauteilen, wie abgehängte Decken und schwimmende Estriche, einzugrenzen und Hinweise für die Optimierung dieser Bauelemente zu entwickeln. Auch der Einfluss von Schwingungstilgern oder anderen schalltechnischen Maßnahmen kann mit diesem Verfahren gut erfasst werden.

3. Prüfstandsversuche – Numerische Simulationen

3.1. Brettsperrholzdecke

Im Folgenden wird auf die im Prüfstand der Hochschule Rosenheim (vgl. Abbildungen 1 und 2) vermessene zweiseitig gelagerte Decke aus Brettsperrholz-Elementen Bezug genommen [2]. Nach Untersuchungen der Decke ohne Ausbauten mit unterschiedlichen Auflagerkonfigurationen wurden eine abgehängte doppelt beplankte Unterdecke (Abbildung 3) und Schwingungstilger hinzugefügt.



Abbildung 1: Messlabor mit BSH-Decke



Abbildung 2: Vorbereitung der Unterdeckenkonstruktion

Über die Koordinaten der Decke und für unterschiedliche Frequenzen wurden die Betriebsschwingungsformen bei harmonischer Anregung mit Hilfe eines Shakers aufgezeichnet. Die örtliche Abtastung, d.h. die Wahl der Aufnehmerpunkte wurde mit Hilfe eines örtlichen Shannon-Kriteriums so festgelegt, dass bis zu Frequenzen von 200 Hz eine ausreichende örtliche Auflösung gewährleistet werden konnte. Hierzu wurde ein Raster von ca. 12 x 12 cm festgelegt (Abbildung 4).

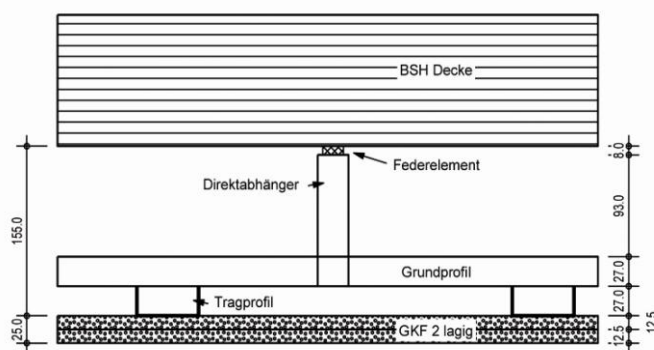


Abbildung 3: Schnitt durch das Gesamtsystem

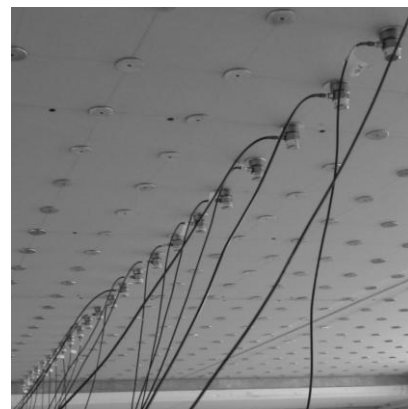


Abbildung 4: Messpositionen

Ferner wurde im darunter liegenden Raum die Schallabstrahlung mittels einer fahrbaren Intensitätssonde erfasst.

Die numerischen Simulationen der Brettsper Holzdecke (Abbildung 4) erfolgten mit dem Finite-Elemente Programm ANSYS (Abbildung 5). Die Güte des numerischen Modells konnte mit Hilfe von Konvergenzstudien nachgewiesen werden. Im Frequenzbereich bis zu 100 Hz genügt ein Elementenetz mit Einzelelementen mit einer Kantenlänge von 10 cm. Hinsichtlich der Eigenfrequenzen tritt hier eine Abweichung zur Lösung mit dem feinsten Netz von lediglich ca. 3 % auf, welche vor dem Hintergrund der Unwägbarkeiten in den weiteren Systemparametern vernachlässigbar ist.

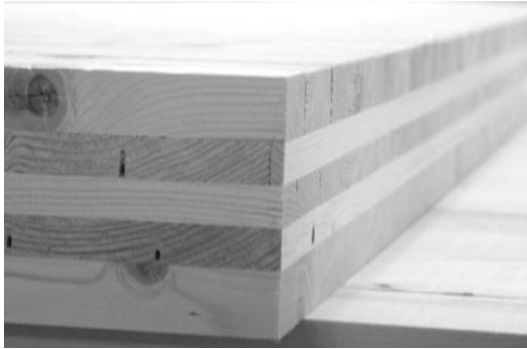


Abbildung 4: Brettsper Holz (BSH)

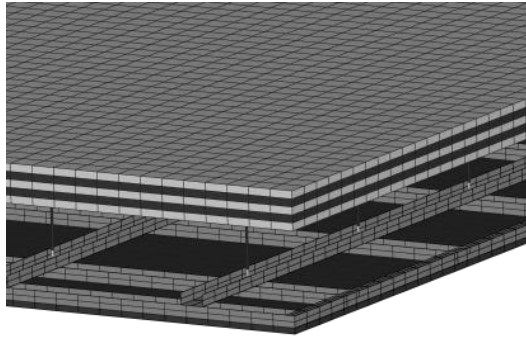


Abbildung 5: FE-Modell einer Brettsper Holzdecke mit abgehängter Decke

Des Weiteren konnte im Rahmen von umfangreichen Messungen ein robustes Schwingverhalten unterschiedlicher Deckenelemente und Auflagerkonfigurationen hinsichtlich der Lage der Eigenfrequenzen und der zugehörigen modalen Dämpfungsparameter nachgewiesen werden. Lediglich die Dämpfung der ersten Eigenfrequenz wies dabei – in Abhängigkeit der Auflager – größere Streuungen auf.

3.2. Vorgehensweise

Bei allen Versuchen werden zunächst die Eigenfrequenzen und Eigenformen ermittelt. Die Ergebnisse dienen zur Kalibrierung des Finite-Elemente Modells. Die Vorgehensweise wird in Abbildung 6 skizziert.

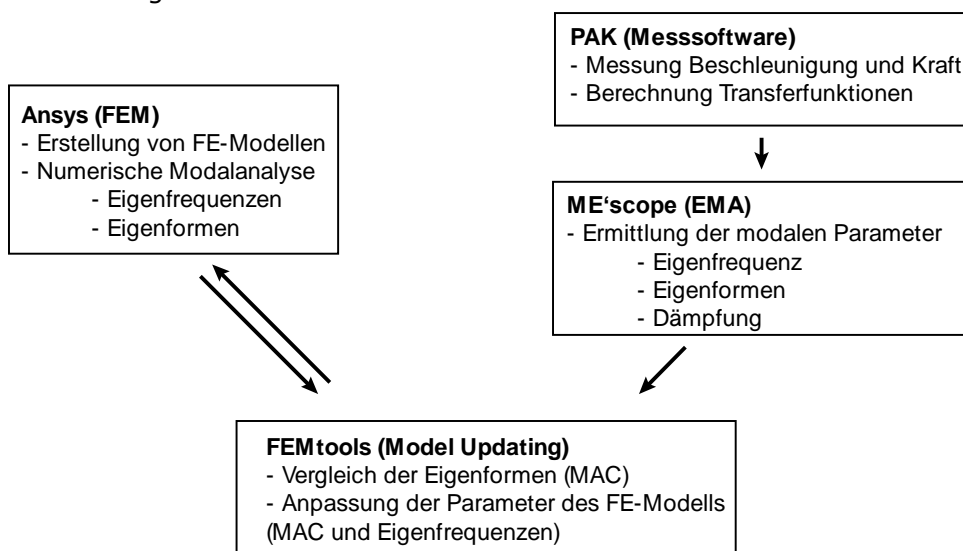


Abbildung 6: Ablaufdiagramm Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den Messergebnissen – Model Updating

Ferner werden unter verschiedenen Lastfällen Betriebsschwingungsformen bestimmt. Zur Anregung der Strukturen werden neben der punktförmigen Anregung am Ort des Shakers sogenannte „rain-on-the-roof“-Anregungen angesetzt (Abbildung 7). Diese über die gesamte Fläche zufällig verteilten Anregungen haben den Vorteil, dass sie gleichmäßig auf die relevanten Schwingungsmoden wirken und Artefakte vermieden werden, die z.B. durch eine zufällige Nähe der anregenden Kraft an Schwingungsbäuchen oder Schwingungsknoten auftreten können. Wenngleich in den Experimenten keine derartige Anregung realisiert werden kann, ist die „rain-on-the-roof“-Anregung insbesondere zur vergleichenden Betrachtung unterschiedlicher Deckenkonstruktionen hilfreich.

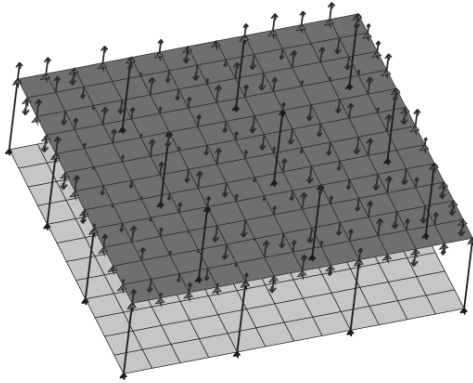


Abbildung 7: Rain-on-the-roof-Anregung

Auf Grundlage dieser Anregungen werden zunächst die Strukturschwingungen bestimmt. In einem Nachlaufprogramm wird aus den so ermittelten Schwingungen an der Oberfläche über ein auf Integraltransformationmethoden basierendes Verfahren die abgestrahlte Schallleistung ermittelt. Dazu wird die Schwingantwort für jede betrachtete Frequenz – analog zur Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich – auch vom Orts- in den Wellenzahlbereich transformiert (siehe Abbildung 8). Dabei wird die Schwingform (Abbildung 8 links) über eine Fourier-Transformation in bezüglich der Deckenebene Sinus- bzw. Cosinus-förmige Schwingmuster entwickelt.

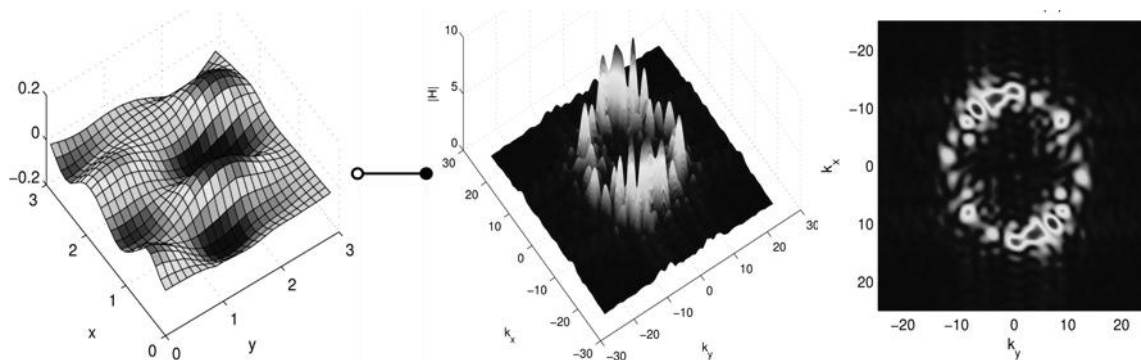


Abbildung 8: Prinzipskizze Fourier-Transformation (Ortsbereich-Wellenzahlbereich)

In Abhängigkeit der Wellenlänge auf der Oberfläche erlaubt diese Darstellung im Wellenzahlbereich eine Identifikation der nur im Nahbereich der Decke vorliegenden Nahfelder und der schallabstrahlenden Fernfelder und ermöglicht so eine Abschätzung der abgestrahlten Schallleistung $P(f)$ auf Basis der Oberflächenschnelle $\tilde{v}(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y, f)$ im transformierten Raum über [3]

$$P(f) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho c_L}{4\pi^4} \cdot \Re \sum_r \sum_s \frac{k_L}{\sqrt{k_L^2 - \mathbf{k}_x^2 - \mathbf{k}_y^2}} \cdot \tilde{v}(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y, f) \tilde{v}^*(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y, f) \quad (1)$$

mit der Luftdichte ρ , der Schallgeschwindigkeit c_L , der Wellenzahl der Luft $k_L = 2\pi f / c_L$, der Frequenz f und den Wellenzahlen in x - bzw. y -Richtung k_x bzw. k_y . Diese Wellenzahlen k_x bzw. k_y ergeben sich aus der Wellenlänge λ_x bzw. λ_y über die Beziehung $k_x = 2\pi / \lambda_x$ bzw. $k_y = 2\pi / \lambda_y$. Die resultierende Wellenzahl k_R an der Oberfläche folgt zu:

$$k_R = \sqrt{\mathbf{k}_x^2 + \mathbf{k}_y^2}$$

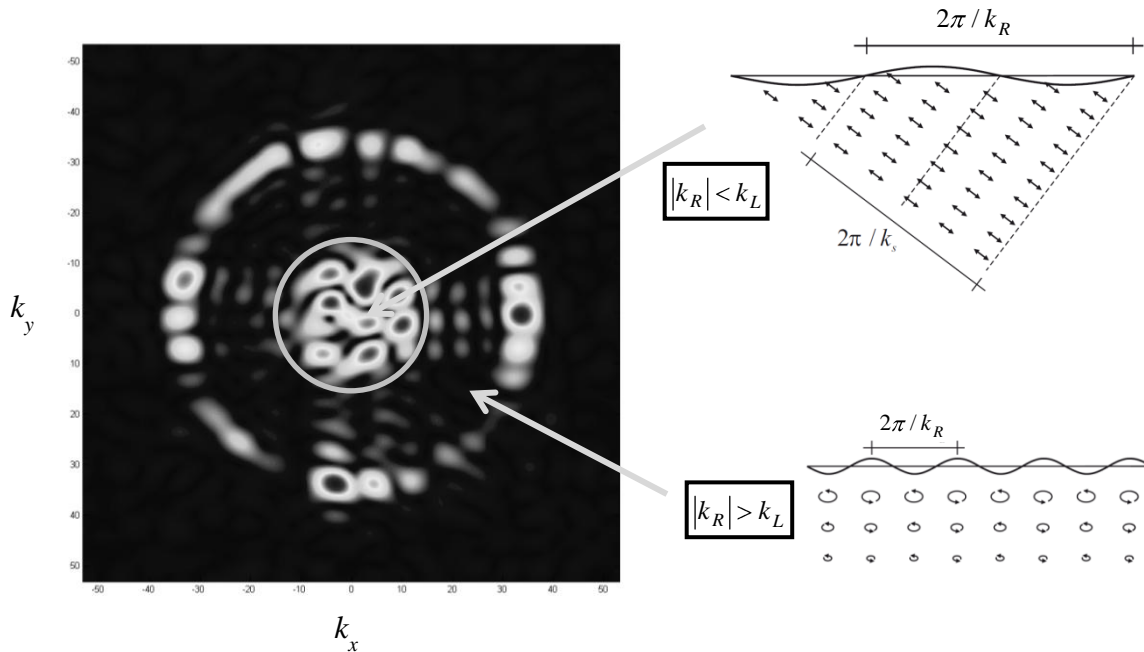


Abbildung 9: Prinzipskizze Fern- und Nahfelder

Die Schwinganteile mit Wellenlängen oberhalb der Luftwellenlänge, d.h. Wellenzahlen k_R kleiner als die Wellenzahl der Luft k_L , entsprechen Fernfeldern, größere Wellenzahlen Nahfeldern (Abbildung 9). Bei homogenen Platten liegt der Übergang von Nah- zu Fernfeld bei der sog. Koinzidenzfrequenz [4].

Dieses Verfahren zur Abschätzung der Abstrahlung wurde im Vorfeld an anderen Strukturen experimentell validiert [3].

4. Beispiele

4.1. Abstrahlung von Unterdecken

Abbildung 10 zeigt die an einer Brettsperrholzdecke mit Unterdecke an der abstrahlenden Unterdecke numerisch ermittelte mittlere Schwingung. Die mit „sigma=1“ gekennzeichneten gepunkteten Kurven würden sich bei einer reinen Abstrahlung über Fernfelder ergeben. Sie zeigen ein Maß für die Schwingstärke. Aufgrund der Anregung von Nah- und Fernfeldern liegt die abgestrahlte Schalleistung deutlich darunter (durchgezogene Linien).

Bei Auslegung von Schwingungstilgern zur Reduktion der Abstrahlung liegt das Augenmerk auf den gut abstrahlenden Moden. Es können Schwingformen identifiziert werden, die zwar signifikante Körperschallschnelle-Amplituden aufweisen, aber aufgrund der zugehörigen Wellenlängen nur wenig zur Schallabstrahlung beitragen. Diese Schwingformen müssen zur Reduktion der Abstrahlung nicht getilgt werden. Z.B. muss der in Abbildung 10 in den gepunkteten Linien erkennbare Peak bei ca. 40 Hz nicht durch einen Tilger abgemindert werden, da dieser offensichtlich nicht zur Abstrahlung beiträgt.

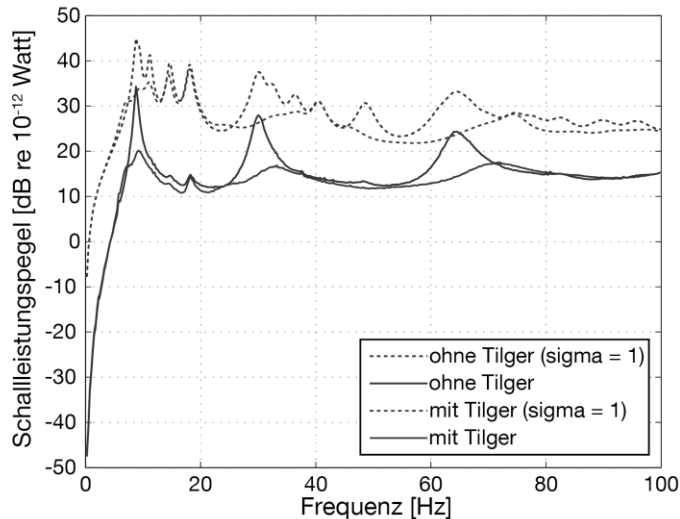


Abbildung 10: Prognose der Wirksamkeit von Schwingungsschutzsystemen – Tilger [5]

In Abb. 11 sind die Ergebnisse einer Parameterstudie bei variierender Abhängigeranzahl und -position dargestellt. Die damit verbundene Studie zeigt, dass es ein Optimum hinsichtlich der Abhängigerabstände gibt, welches durch folgende gegenläufige Parameter bestimmt wird:

- Falls größere Abstände untereinander eine höhere Biegesteifigkeit des abgehängten Systems erfordern, so ist dies ggf. mit einer Absenkung der Koinzidenzgrenzfrequenz und einer etwas höheren Abstrahlung verbunden.
- Sind die Abstände der punktförmigen Ankopplungen größer als die Biegewellenlänge der Unterdecke, kann bei ausreichend großen Abhängehöhen das günstige Abstrahlverhalten der Unterdecke – bedingt durch die hohe Koinzidenzgrenzfrequenz – besser „aktiviert“ werden.
- Bei einem dichten Abhängigeraster – wie auch bei einem flachen Luftpolster, bedingt durch eine niedrige Abhängehöhe - folgt die Unterdecke weitgehend der Schwingform der darüber liegenden schwingenden Holzdecke, womit eine für die Abstrahlung ungünstigere, langwelligere Schwingform auch auf die untere Decke eingepreßt wird.

Mit Hilfe des dargestellten Verfahrens kann nun an den kalibrierten Finite-Elemente-Modellen die Schallabstrahlung im tieffrequenten Bereich unter Berücksichtigung von abgehängten Decken und schwimmenden Estrichen eingegrenzt werden. Es ist vorgesehen, hierfür geeignete dimensionslose Parameter für Ingenieurverfahren zu entwickeln.

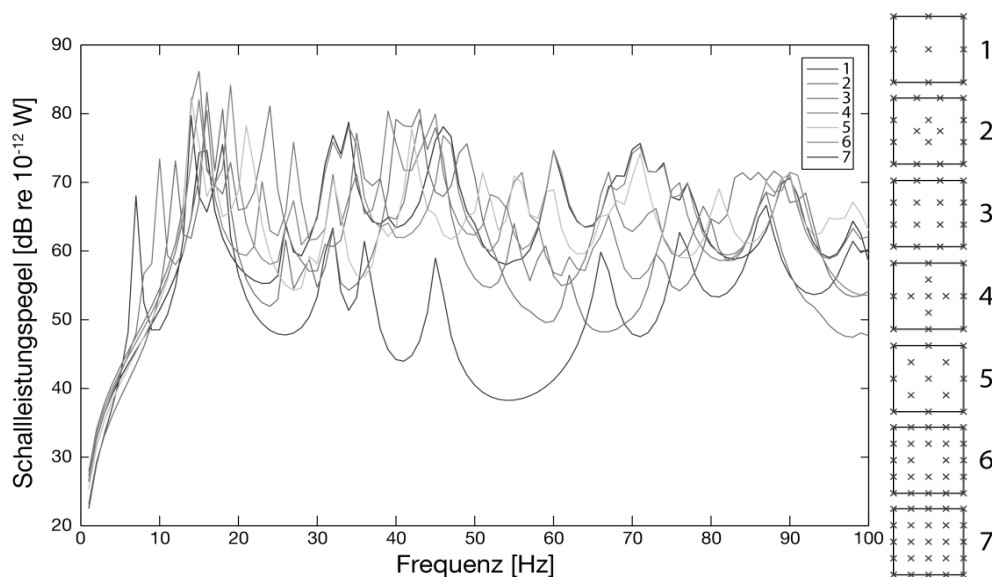


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung des Schalleistungspegels bei variierender Anzahl und Position der Abhänger und großer Abhängehöhe. Rechts: Anordnung der Abhänger

4.2. Eigenfrequenzen für unterschiedliche Deckenkonstruktionen

Über geeignete dimensionslose Parameter können für die Auslegungen Eigenfrequenzen eingegrenzt werden. Es stellt sich die Frage nach einfachen Handreichungen. Hierzu wurden für das im Versuchsstand kalibrierte Modell einer Brettsperrholzdecke, bestehend aus mehreren parallel angeordneten Elementen, ein Parametersatz entwickelt, für den Auswertungen vorgenommen wurden. Die Decke wird über folgende Parameter beschrieben:

- Rohdichte: ρ [kg/m³]
- Dicke: d [m]
- Gesamtlänge: l [m]
- Gesamtbreite: b [m]
- 2 Biegesteifigkeiten: EI_x', EI_y' [Nm²/m]
- Anzahl Elemente: n [-]
- Eigenfrequenzen: f_i [1/s]

Die 8 Parameter können nun, bei konstantem ρ , für jeden Zähler der Eigenfrequenz i nach dem π -Theorem von Buckingham über 4 dimensionslose Größen wie folgt charakterisiert werden

- Anzahl der Elemente: n
- Geometrieverhältnis: $\alpha = l/b$
- Steifigkeitsverhältnis: $\beta = EI_x' / EI_y'$
- Frequenzverhältnis: $\gamma_i = f_i / f_{\text{Balken}}$

mit f_{Balken} der ersten Eigenfrequenz eines Balkens mit der Biegesteifigkeit EI_x' , der Gesamtlänge l und der Massebelegung $m'' = \rho \cdot d$:

$$f_{\text{Balken}} = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI_x'}{m''}}$$

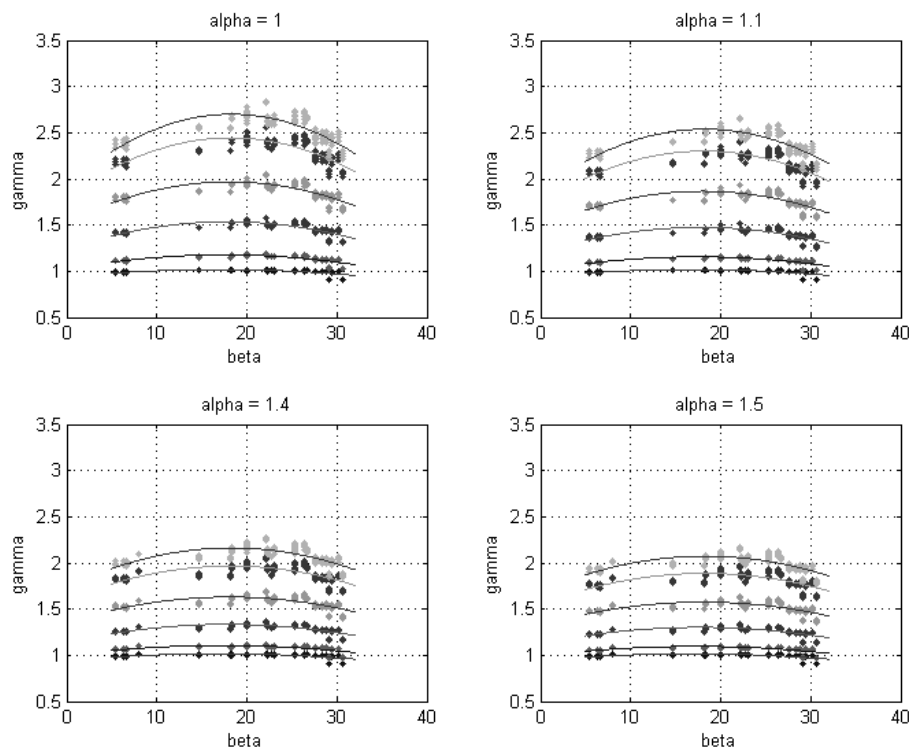


Abbildung 12: Nomogramme zur Bestimmung der Eigenfrequenzen in dimensionsloser Darstellung

Abbildung 12 zeigt die Abhängigkeit des Frequenzverhältnisses von Steifigkeitsverhältnissen für 5 Elemente und unterschiedliche Länge/Breite-Verhältnisse. Man erkennt eine weitgehende Unabhängigkeit bis zur dritten Eigenfrequenz, so dass hier das Frequenzverhältnis γ dieser Eigenfrequenz in sehr guter Näherung über $\gamma_1 \approx 1,0$ $\gamma_2 \approx 1,1$, $1,2 < \gamma_3 < 1,5$ eingegrenzt werden kann.

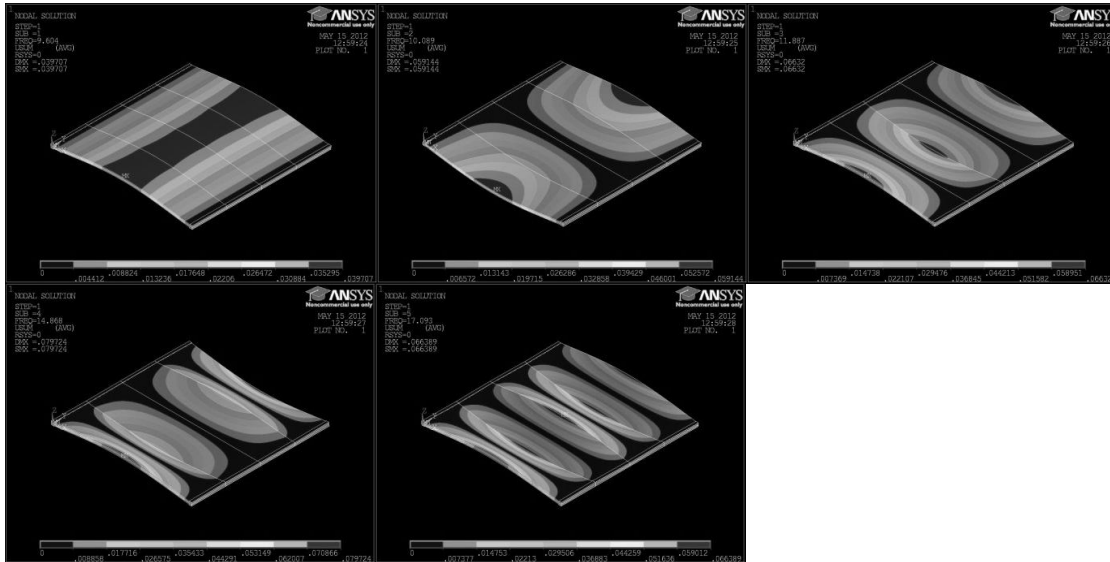


Abbildung 13: Eigenmoden der ersten 5 Eigenfrequenzen einer Brettsperrholzdecke mit 4 Elementen

Eine separate Finite-Elemente-Berechnung zur Bestimmung der Eigenfrequenzen ist für diese Konstruktion somit nicht erforderlich. Durch die Kopplung mehrerer Elemente ergeben sich in Abhängigkeit von der Elementanzahl n Eigenmoden mit ähnlichem Schwingmuster (vgl. Abbildung 13) und nahe beieinander liegenden Eigenfrequenzen. Auch diese werden mit den dimensionslosen Parametern abgebildet. Abbildung 14 zeigt deutlich einen Trend an, wonach die Eigenfrequenzen mit wachsenden α abnehmen bzw. deren Abstand untereinander abnimmt.

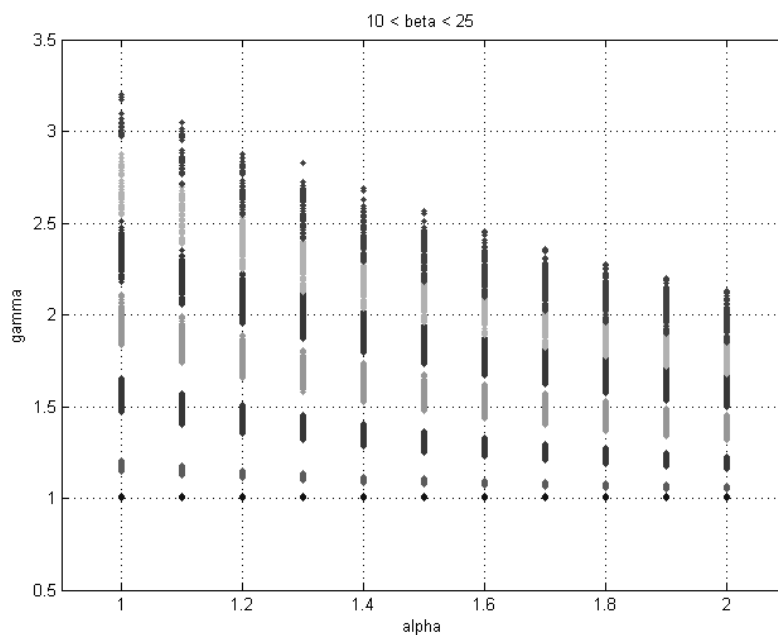


Abbildung 14: Zusammenfassende Darstellung für den begrenzten Bereich von $10 < \alpha < 25$

5. Zusammenfassung

Durch einen Abgleich von umfangreichen Versuchen an Brettsper Holzdecken und den zugehörigen numerischen Simulationen konnte gezeigt werden, dass numerische Simulationen gut geeignet sind, das dynamische Verhalten hinsichtlich der Schwingungsanregung sowie der Schallabstrahlung einzugrenzen. Darauf aufbauend können mit parametrisierten Modellen numerische Experimente durchgeführt werden. Mit Hilfe von dimensionslosen Parametern, können daraus einfache Nomogramme für den planenden Ingenieur entwickelt werden.

Exemplarisch wurden Nomogramme für die Eigenfrequenzen einer aus mehreren Segmenten zusammengesetzten Decke gezeigt. Ein Ausblick auf die Betrachtung des Einflusses von abgehängten Decken sowie elastischen Fussbodenaufbauten wurde gegeben.

6. Literatur

- [1] Reichelt, H.; Schanda, U.; Rabold, A.: Reduction of Low-frequency Vibrations of Wooden Floors by Tuned Mass Dampers; DAGA2009
- [2] Vörtl, R.; Kohrmann, M.; Buchschmid, M.; Schanda, U.; Müller, G.: Messung und Berechnung der Schwingungen von Holzdecken im Prüfstand; DAGA2012
- [3] Kohrmann, M., Buchschmid, M.; Müller, G.: Combining numerical and semi-analytical methods for predicting reradiated sound of wooden slabs; GACM2011
- [4] Müller, G.; Möser, M.: Handbook of Engineering Acoustics; Springer 2012
- [5] Kohrmann, M.; Buchschmid, M.; Vörtl, R.; Müller, G.; Schanda, U.: Prognose von sekundärem Luftschall bei leichten Geschossdeckensystemen mit Integraltransformationmethoden; DAGA2012