

# **VibWood: Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken bei tiefen Frequenzen**

Vortrag in großer Anlehnung an den Beitrag zum 7. Europäischen Kongress (EBH)  
in Köln 2014

Ulrich Schanda  
Hochschule Rosenheim  
DE-Rosenheim





# VibWood: Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken bei tiefen Frequenzen

## Hinweis

Das Forschungsvorhaben VibWood [1] wurde an den beiden Forschungsstellen

I. Lehrstuhl für Baumechanik (Prof. Dr. Gerhard Müller) an der TU München  
und

II. Labor für Schallmesstechnik (Prof. Dr. Ulrich Schanda) an der HS Rosenheim  
bearbeitet.

Projektbearbeiter waren an der Forschungsstelle I:

– M. Sc. Mathias Kohrmann und Dr. Martin Buchschmid,

an der Forschungsstelle II:

– M. Eng. Dipl.-Ing. (FH) Raphael Vörtl.

Das Vorhaben ist abgeschlossen (und sollte – wie so oft – doch noch weitergeführt werden), die ausgearbeiteten Planungshilfen wurden erstellt, sollen jedoch noch als interaktives Programm (Freeware) für die Fachwelt aufbereitet werden.

## 1. Motivation

### 1.1. ... aus Sicht des Holzbaus

Um im Bauwesen wettbewerbsfähig zu sein, müssen Wohnungsdecken in Holzbauweise heute den höchsten Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit und den Schallschutz genügen. Im tiefen Frequenzbereich ist dies systembedingt nicht immer einfach – man spricht gerne vom „Rumpeln“ oder „Dröhnen“, wenn Trittschallgeräusche wahrgenommen werden. Dass diese Geräusche nicht sein müssen, wissen viele Fachleute. Tatsächlich haben Holzdecken verglichen zu Massivdecken aus Beton systembedingt Nachteile. Da sind v.a. die geringen flächenbezogenen Massen (Holz ist halt nun mal viel leichter als Beton). Diese Nachteile gilt es, durch intelligente Konstruktionen auszugleichen – Konstruktionen, die schwingungstechnisch und akustisch verstanden sind. Dieses Wissen muss für Planer in einer Art und Weise verfügbar gemacht werden, dass verlässliche Prognosen bei der Schallschutzplanung für den tiefen Frequenzbereich ermöglicht und damit wenig ökonomische Überdimensionierungen vermieden werden. Dabei sollen insbesondere auch unterschiedliche Holzbausysteme verglichen werden können. Dies war Ziel des Forschungsprojektes VibWood.

### 1.2. ... aus vibroakustischer Sicht

Zur Beschreibung des Schwingungs- und akustischen (vibroakustischen) Verhaltens von Holzdecken im Frequenzbereich bis ca. 125 Hz stehen derzeit keine für die Praxis aufbereiteten, etablierten Verfahren zur Verfügung. So wird die Wirkung von Maßnahmen wie z.B. abgehängter Decken, schwimmender Estriche und anderer Schwingungsschutzsysteme in der Regel über stark vereinfachende Ingenieurersatzverfahren beschrieben, die sich im Massivbau bewährt haben, im Holzbau jedoch an ihre Anwendungsgrenzen stoßen. Entsprechende Grenzen erfährt aufgrund der größeren Komplexität der Schwingungsmuster der Holzdeckenkonstruktionen unter dynamischer Anregung wie z.B. durch gehende Personen auch ein einfaches Konzept zur Beschreibung der abgestrahlten Schalleistung. Aufgrund dieser Komplexität stellte sich die Frage nach den grundsätzlichen

Möglichkeiten zur numerischen Berechnung des vibroakustischen Verhaltens von Holzdeckenkonstruktionen und der Möglichkeit der systematisierten Beschreibung des Verhaltens.

## 2. Stand der Technik und der Forschung

Abbildung 1 zeigt den für die im Forschungsvorhaben bearbeiteten Fragestellungen relevanten Frequenzbereich. Bis ca. 20 Hz beschränkt sich die Wahrnehmung auf spürbare Schwingungen und ggf. damit in Verbindung stehender Sekundäreffekte (wie z.B. Gläserklirren), darüber erfolgt die Wahrnehmung, aufgrund der mit der Frequenz zunehmenden Hörempfindung des Menschen, auch akustisch. Unter ca. 100 Hz weisen Holzdecken Eigenfrequenzen auf, deren zugehörige Schwingungsmoden i.d.R. klar separiert werden können und Schall abstrahlen. Stationäre oder transiente Anregungen wie z.B. aus den einzelnen Schritten einer gehenden Person, aus Erschütterungen oder auch aus der Haustechnik regen diese Eigenschwingungen an. Dies kann akustisch über die Trittschallübertragung oder auch den abgestrahlten erschütterungsinduzierten sekundären Luftschall wahrgenommen werden.

Hinsichtlich der Anregung der in Abbildung 1 aufgeführten Schwingungen kann zwischen folgenden Mechanismen unterschieden werden:

### a. Personeninduzierter tieffrequenter Trittschall

ist bei Holzdecken - im Vergleich zu Stahlbetondecken - in der Regel deutlich stärker hörbar, was als „Dröhnen“ oder „Poltern“ bezeichnet wird. Ursachen sind das geringere Gewicht der Holzdecken und die im tiefen Frequenzbereich unter 100 Hz typischerweise vorliegende höhere modale Dichte. Im Bereich mittlerer und hoher Frequenzen weisen Holzdecken, verglichen mit Massivdecken, bei gleichem bewerteten Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  sogar höhere Trittschalldämmungen auf.

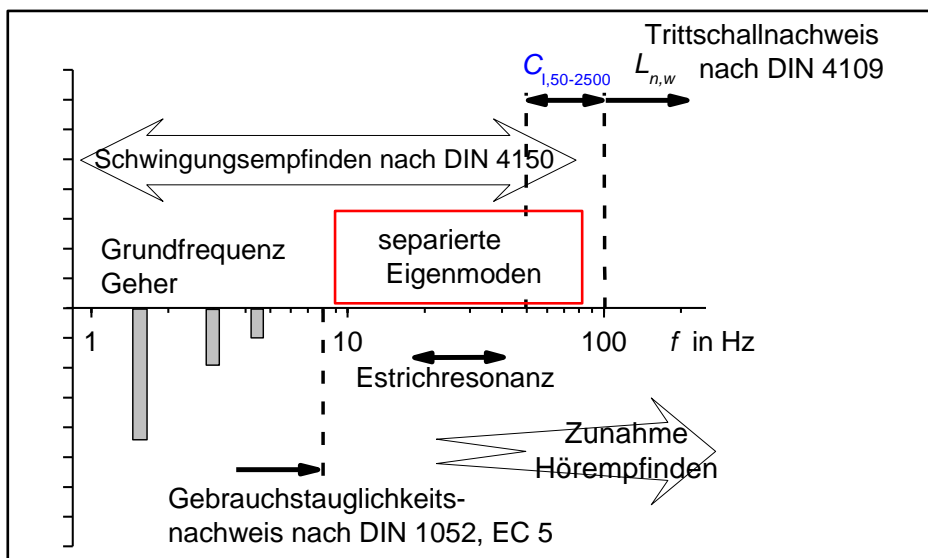


Abbildung 1: Übersicht des Frequenzbereiches und der Aspekte zu den im Vorhaben bearbeiteten Themen

Untersuchungen haben ergeben, dass ein aussagefähiger Vergleich von Gehgeräuschen auf Massivdecken und Holzdecken v.a. dann gegeben ist, wenn man für Holzdecken als Beurteilungsgröße für die Trittschalldämmung die Summe aus dem bewerteten Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  und dem auf den Frequenzbereich bis 50 Hz erweiterten Spektrumsanpassungswert  $C_{I, 50-2500}$  verwendet, bei Massivdecken es jedoch ausreicht, ausschließlich den bewerteten Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  zu benutzen. Beide Werte korrelieren dann direkt mit dem maximalen A-bewerteten Schalldruckpegel  $L_{A,F,max}$ , der sich beim Begehen der jeweiligen Decke ergibt und wurde gerade im vorhergehenden Vortrag von Prof. Rabold erläutert [2].

Holzdecken haben die Tendenz, dass sie bei Verbesserungen hinsichtlich der Trittschallübertragung und damit einem kleineren bewerteten Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  umso höhere Spektrumsanpassungswerte  $C_{I,50-2500}$  aufweisen (s. Abbildung 2). Setzt man nun

als Kriterium für die Trittschallübertragung die Summe aus bewertetem Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  und Spektrumsanpassungswert  $C_{I,50-2500}$  an, so würde dies bei den beiden Decken in Abbildung 2 einen deutlich kleineren Unterschied und insgesamt einen sehr schlechten Wert für die Trittschalldämmung bedeuten.

#### b. Personeninduzierte Schwingungen

werden bei entsprechender Schwingstärke von den Gebäudenutzern subjektiv als störend empfunden.

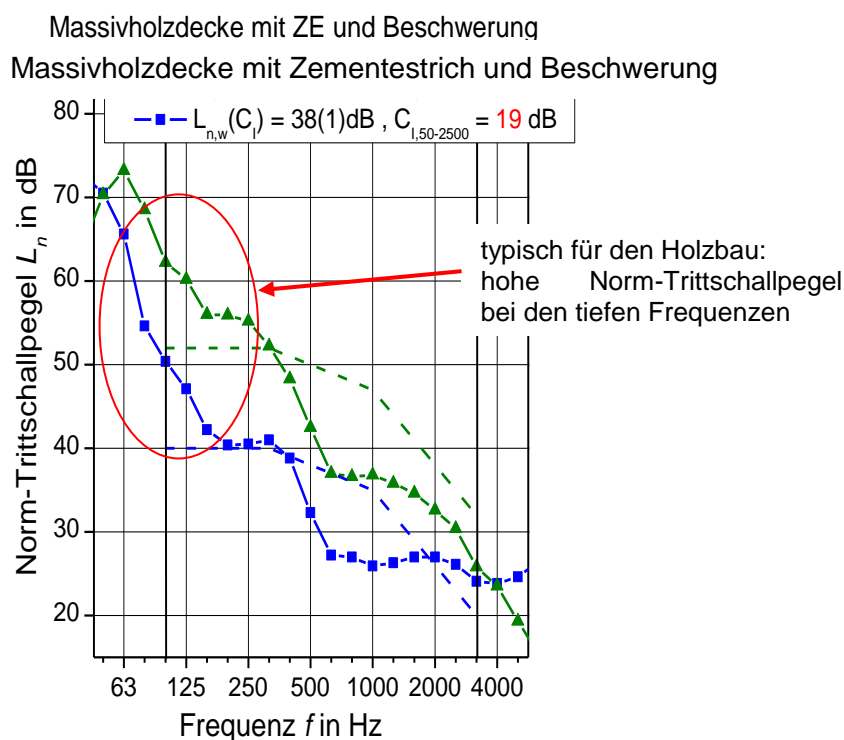


Abbildung 2: Hohe Norm-Trittschallpegel bei tiefen Frequenzen (unter 200 Hz) sind verantwortlich für das bauakustische Defizit von Holzdeckensystemen verglichen mit Massivdecken. Die bessere der beiden Decken weist einen bewerteten Norm-Trittschallpegel  $L_{n,w}$  gemäß DIN EN ISO 717 (Bewertungskurve gestrichelt eingezeichnet) von 38 dB auf, welcher für den Wohnungsbau als ausgezeichnet zu bezeichnen ist. Addiert man jedoch den Spektrumsanpassungswert  $C_{I,50-2500}$  hinzu, so würden beide Decken bei entsprechender Anwendung des Summenkriteriums zur Verwendung im Wohnungsbau ausscheiden. Eine Reduktion der tief-frequenten Schwingungen im Bereich unter 100 Hz könnte diesen Nachteil beheben [3].

Mit der Veröffentlichung eines Nationalen Anhangs zum EUROCODE 5 [6] wird für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis Bezug genommen auf Erläuterungen zur DIN 1052:2004-08 [7] sowie auf Ergebnisse eines Forschungsvorhabens [4], welches auch im Rahmen des Holzbauforum vorgestellt wurden [5]. Dieses Nachweisverfahren ist in der derzeitigen Planungspraxis etabliert. Danach ist u.a. die erste Eigenfrequenz der Decke massgebend für den Ablauf des Nachweises. Für Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten und damit auch mit entsprechenden Schallschutzanforderungen, deren erste Eigenfrequenz gemäß den auf mechanischen Ersatzmodellen beruhenden Berechnungen unter 8 Hz liegt, spielt in einem weiteren Nachweisschritt zur Begrenzung der Schwingbeschleunigung der Dämpfungsgrad  $D$  eine große Rolle.

#### c. Erschütterungseinleitungen in Gebäude und dynamische Wechselkräfte

innerhalb von Gebäuden befindlicher technischer Anlagen (Haustechnik) können bei Holzdeckensystemen zu signifikanten Schwingungsüberhöhungen führen. Die Erschütterungen können für Menschen spürbar sein und störenden, sog. sekundären Luftschall abstrahlen.

### 3. Vorgehensweise

Im Rahmen des Forschungsvorhabens VibWood wurden umfangreiche Messungen an charakteristischen Holzdecken durchgeführt sowie zugehörige hybride Finite-Element- und Abstrahlungsmodelle erstellt, die anhand von Messungen kalibriert werden konnten. Basierend auf diesen Modellen konnten über weiterführende, parametrisierte Berechnungen zum schall- und schwingungstechnischen Verhalten der Deckensysteme bei tiefen Frequenzen die physikalischen Experimente durch „numerische Experimente“ ergänzt werden. Damit wurde der Parameterraum von den zwangsläufig engen Vorgaben aus dem physikalischen Experiment auf breite, baupraktisch übliche Bereiche erweitert.



Abbildung 3: Deckenprüfstand im Labor für Schallmesstechnik LaSM; zu sehen ist eine Brettsper Holzdecke mit Schwingungstilgern zum Test, inwieweit diese das Schwingungsverhalten beeinflussen.

Als Holzdeckensysteme wurden Brettsper Holzdecken, Holzbalkendecken sowie eine Variante einer Hohlkastendecke untersucht. Weiterführende Systemvarianten ergaben sich aus verschiedenen Ausbauständen mit Estrich und abgehängter Unterdecke. Damit waren die klassischen Ausbildungen von Holzdeckenkonstruktionen, die beim mehrgeschossigen Wohnungs- und Objektbau ihren Einsatz finden, abgebildet. Dort ist der Schwingungsnachweis als Teil des Gebrauchstauglichkeitsnachweises sowie die Trittschalldämmung als Teil des Schallschutznachweises zur Erfüllung normativer Anforderungen zu führen. Da die Einhaltung dieser Nachweise für Holzdeckenkonstruktionen, insbesondere eines benutzerfreundlichen Trittschallschutzes bei tiefen Frequenzen unter 100 Hz, mangels verlässlicher bzw. mit nur bauteilspezifischen Planungsdaten zu einer unwirtschaftlichen Überdimensionierung dieser Holzdeckensysteme führt, sollte dieses Forschungsvorhaben Planungshilfen ausarbeiten, um verlässliche Planungsdaten zur Verfügung zu stellen.

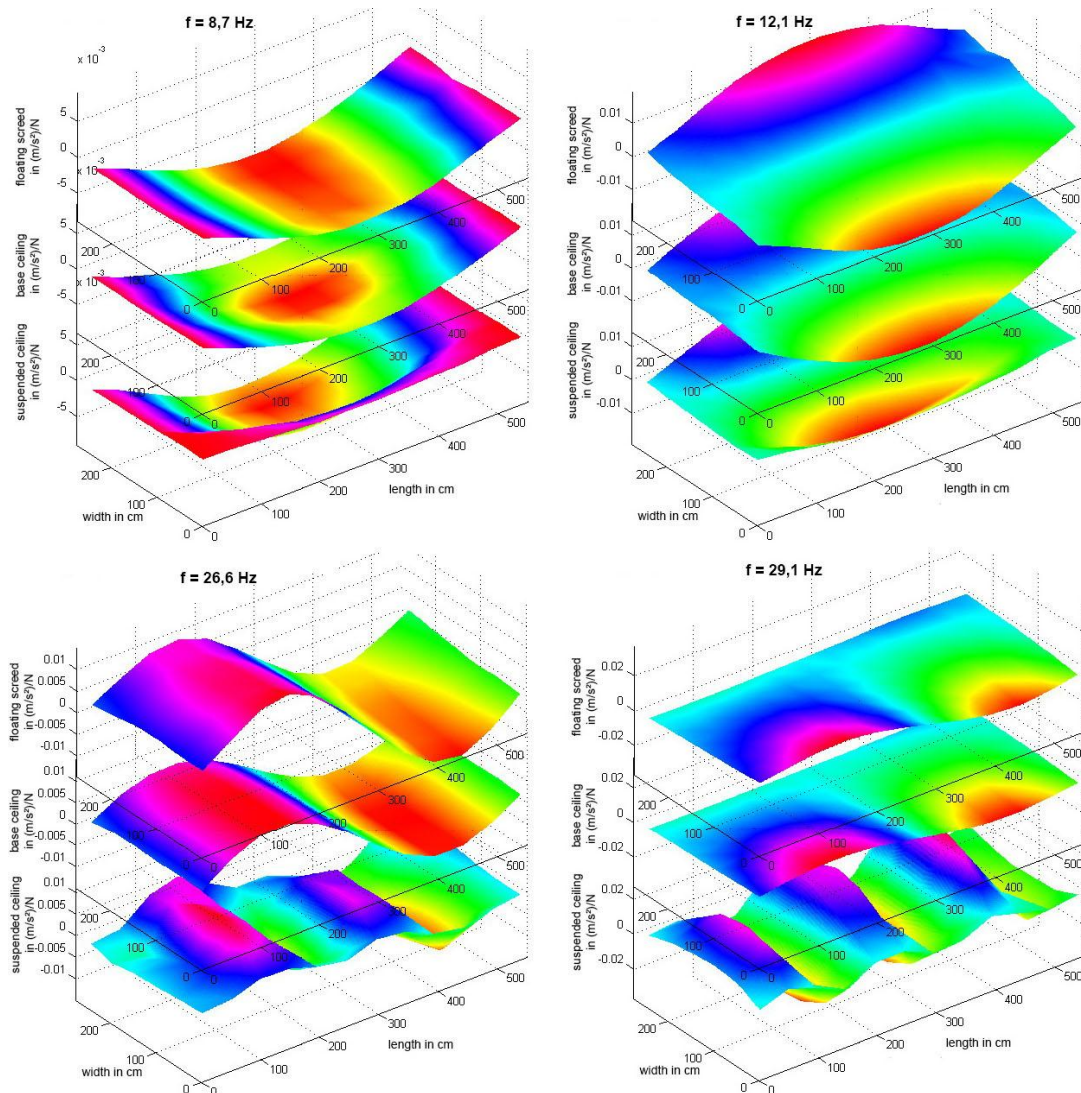


Abbildung 4: Die vier ersten Eigenmoden einer Brettsperrholzdecke mit Ausbauten; zu sehen sind jeweils die Schwingformen des schwimmenden Estrich (oben), der tragenden Brettsperrholzdecke selbst (Mitte) sowie einer abgehängten Unterdecke aus Gipskarton (unten). Während bei den ersten beiden Eigenschwingungen bei 8,7 Hz und bei 12,1 Hz alle drei Deckenkomponenten noch konphas schwingen, hat sich bei den höheren Eigenmoden die Unterdecke „verselbstständigt“. Für den übertragenen Schall in den unteren Raum ist natürlich das aus dem Gesamtsystem resultierende Schwingungsverhalten der Unterdecke maßgeblich [8].

Die Messungen erfolgten im Prüfstand des Labors für Schallmesstechnik LaSM an der Hochschule Rosenheim (s. Abbildung 3). Die Durchführung im Laborprüfstand ermöglichte die Entwicklung und Verwendung spezialisierter Messverfahren (s. Abbildung 4), der Sicherstellung einer hohen Messreproduzierbarkeit sowie einer Optimierung der Lagerungsbedingungen der Deckensysteme hinsichtlich einer Abbildung derselben in den FE-Modellen. Die numerischen Simulationen erfolgten über eine parametrisierte FE-Modellierung in ANSYS sowie einer Nachauswertung der Ergebnisdaten in MATLAB.

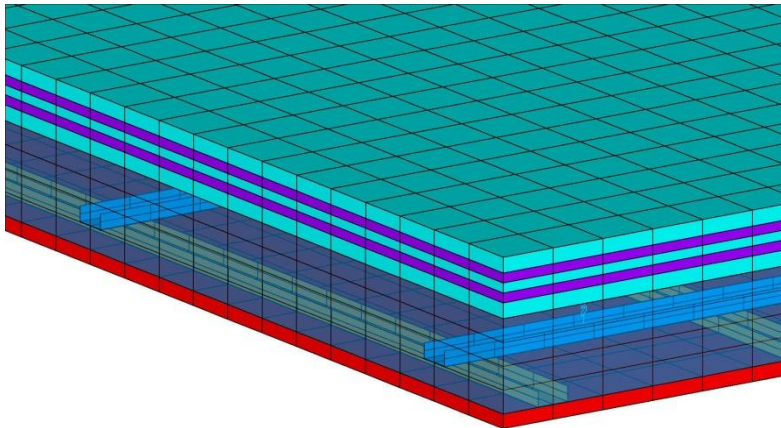


Abbildung 5: FE-Model einer Brettsperrholzdecke mit Unterdecke, die Luft im Hohlraum ist mit Fluidelementen modelliert

Als Analysen wurden Modalanalysen, harmonische Analysen bei Aufbringung von Einzelasten und einer stochastischen Flächenlast (rain-on-the-roof) sowie transiente Analysen zur Ermittlung der schall- und schwingungstechnischen Eigenschaften beim Begehen der Deckensysteme durch Personen durchgeführt. Zur Kalibrierung der FE-Modelle musste für Holz als anisotropes Material ein entsprechendes Materialmodell abgeleitet werden.

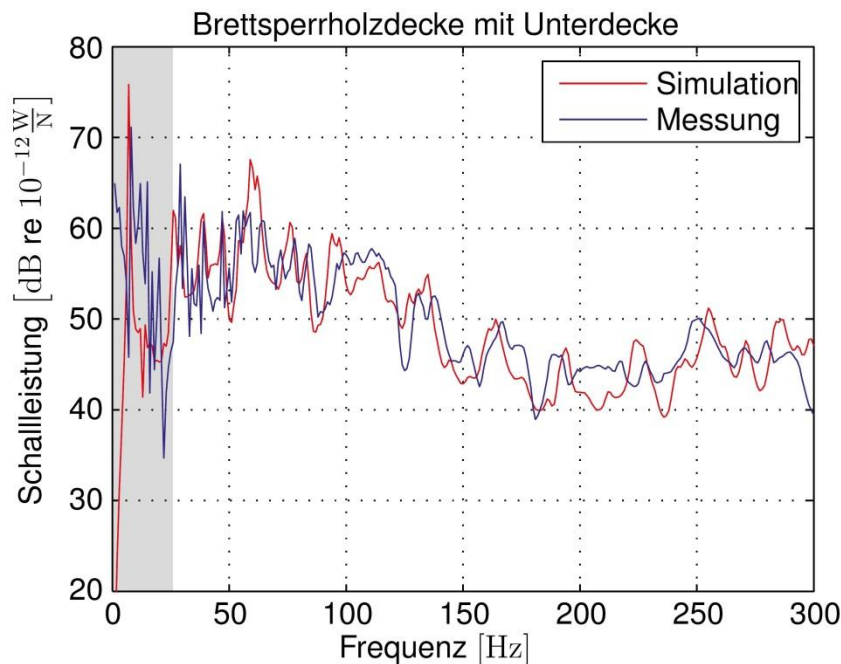


Abbildung 6: Vergleich der abgestrahlten Schalleistung aus Messung und Simulation [9]

Mit Hilfe eines Modell-Updating-Prozesses und Optimierungsalgorithmen konnten die materialbezogenen Eingangsparmeter für alle in den Konstruktionen verwendeten Materialien und Komponenten optimal angepasst werden. Weiterhin musste eine aufwändige Modellierung der Luft in den Gefachen von Holzdeckenkonstruktionen zur Abbildung der Fluid-Struktur-Kopplung entwickelt werden (s. Abbildung 5). Zur Berechnung der abgestrahlten Schalleistung bei harmonischen und transienten Anregungen wurde ein Prognoseverfahren entwickelt, welches aus den berechneten Verformungen der abstrahlenden Fläche die abgestrahlte Schalleistung berechnet (s. Abbildung 6).

## 4. Planungshilfen

Die erarbeiteten Planungshilfen bestehen aus übersichtlichen Nomogrammen, die ein detailliertes Berechnen von Deckensystemen, insbesondere im Hinblick auf die zu erwartenden Eigenschwingungen, aber auch hinsichtlich einer Veränderung durch Schwingungsschutzsysteme, wie z. B. aufgebrauchte schwimmende Estriche, nicht mehr erforder-

lich macht und eine gute Verwendbarkeit in späteren planerischen Anwendungen gewährleistet.

#### 4.1. Parameterauswahl für die Deckenkonstruktionen

Für die Parameterstudien werden überwiegend die geometrischen Parameter variiert, da es sich bei den Material- und Modellparametern bereits um anhand von Messdaten kalibrierte Größen handelt oder diese aus der Literatur entnommen sind. Eine Ausnahme bildet hierbei der Absorptiongrad der Berandung der Luftschicht innerhalb der abgehängten Decke.

Die Anregung wird an drei unterschiedlichen Anregepositionen durchgeführt. Die Positionen sind dabei so gewählt, dass ein möglichst großer räumlicher Abstand zu relevanten Schwingungsknoten vorliegt. Nachfolgend sind die relevanten Parameter aufgeführt, wobei zu beachten ist, dass je nach Haupttragsystem unterschiedliche spezifische Parameter betrachtet werden müssen. Bei den durchgeführten Parameterstudien werden nur die Brettsperrholz- und Holzbalkendecken berücksichtigt. Es wird nur eine Estrich-Variante betrachtet.

Spezifische Parameter für die Brettsperrholzdecke waren:

- Deckentyp (Anzahl Lagen Brettsperrholzzwischen 3 bis 11 und Verhältnis der Biegesteifigkeit in bzw. quer zur Tragrichtung)
- Anzahl Plattenstreifen ( $1.0 \text{ m} < b_{\text{platte}} < 2.5 \text{ m}$ ) zum Aufbau einer Gesamtdecke

Spezifische Parameter für die Holzbalkendecke waren:

- Deckentyp: Einzel- und Doppelbalken
- Balkenabstand

Vom Holzdeckentyp unabhängige Parameter waren:

- Länge (in Spannrichtung)
- Breite: in den Nomogrammen beschrieben über das dimensionslose Längen- zu Breitenverhältnis  $l/b$
- Ausbauzustand (Estrich, Unterdecke)
- Abhängehöhe der Unterdecke
- Abhängerabstand der Unterdecke, einschließlich Abstand der Grund- und Traglattung
- Absorptionsgrad der Berandung im Lufthohlraum (bei Holzbalkendecken)
- Anregeposition (wichtig, um nicht nahe einem Schwingungsknoten anzuregen)

Die Nomogramme sind weitestgehend dimensionslos gehalten.

#### 4.2. Beispiel zur Ermittlung der 1. Eigenfrequenz einer Brettsperrholzdecke ohne Ausbauzustand

Die Parameter in den Darstellungen beziehen sich i. w. auf geometrische bzw. Materialverhältnisse. Tatsächlich muss kann durch Einschränkung auf praxisrelevante Querschnitte in Bezug auf die Länge der Decke in Spannrichtung die Parameterzahl eingeschränkt werden.

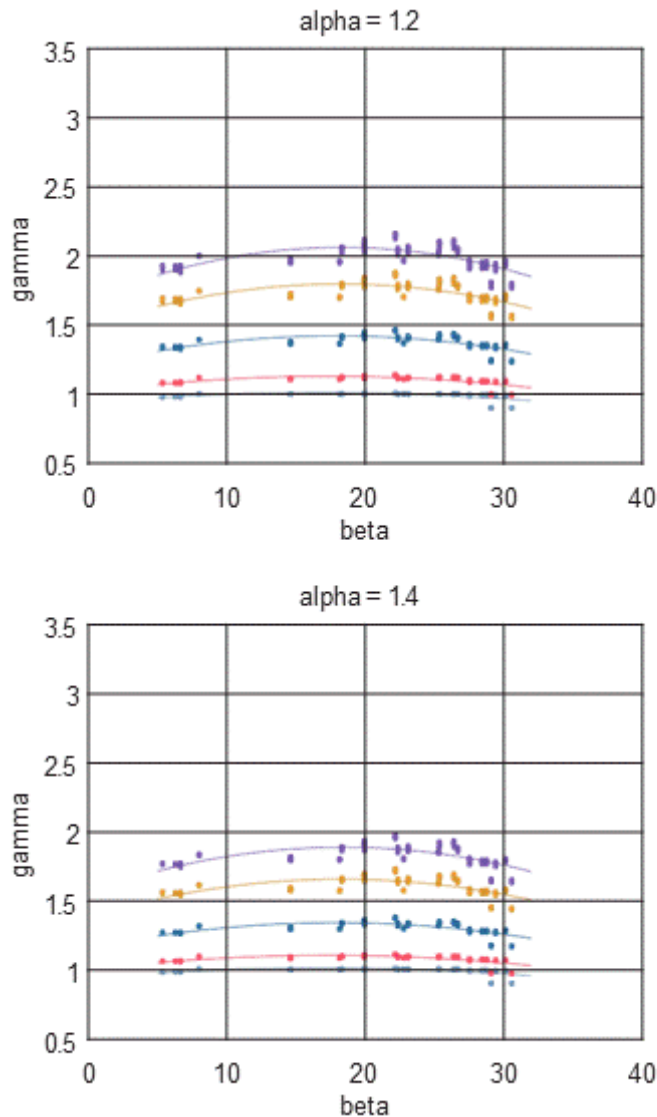
Als Beispiel kann aus Abbildung 7 für die ersten fünf Eigenfrequenzen einer Brettsperrholz-Rohdecke (also ohne Estrichaufbau und/oder Unterdecke) für zwei Längen-zu-Breiten-Verhältnisse (Parameter  $\alpha$ ) als Funktion des Steifigkeitsverhältnisses  $EI_y / EI_x$  (Parameter  $\beta$ ) die normierte Eigenfrequenz (Parameter  $\gamma$ ) entnommen werden. Diese Werte gelten für eine Decke, die aus 4 Plattenstreifen zusammengesetzt ist (bei einer Deckenbreite von 5 m wären es Plattenstreifen mit 1,25 m Breite).

Aus den Nomogrammen lässt sich beispielsweise folgern, dass die 1. Eigenfrequenz sehr gut aus einer Näherung mit dem Euler-Bernoulli-Balken berechnet werden kann, da der Parameter  $\gamma$  nahe den Wert 1 annimmt. Weiterhin ist interessant, dass sich die Anzahl und Anordnung der einzelnen Holzlagen nur sehr wenig auf die Eigenfrequenz auswirkt, sondern über die Biegesteifigkeiten vollständig beschrieben ist. Die Anzahl der berechneten Eigenfrequenzen in den Nomogrammen richtet sich danach, ob die jeweilige Eigenfrequenz noch relevant für die Berechnung der Schalleistung im tiefen Frequenzbereich ist. Für die Berechnung der Absolutwerte der Eigenfrequenzen ist der Parameter

$\gamma$  mit dem Wert der 1. Eigenfrequenz eines Euler-Bernoulli-Balkens mit den Geometrie- und Materialparametern des betrachteten Deckensystems zu multiplizieren.

#### Berechnungsbeispiel

Für einen Brettspertholzdecke mit einer Stärke  $h$  von 162 mm ergibt mit einer Spannlänge  $l$  von 5 m, einer Breite  $b$  von 6 m (aufgebaut aus 4 Einzelementen zu je 1,5 m Breite) bei einer Dichte  $\rho$  von typ. 450 kg/m<sup>3</sup> und einem Elastizitätsmodul  $E$  von 10800 MPa in und ca. 400 MPa quer zur Tragrichtung können die ersten Eigenfrequenzen berechnet werden (s. Abbildung 7).



Euler-Bernoulli-Balken:

$$f_{0,B} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_y}{\mu}} = 14,5 \text{ Hz}$$

mit

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = 4,4 \cdot 10^4 \text{ cm}^4$$

$$\mu = \frac{\rho}{l} = 90 \text{ kg} \cdot \text{m}^4$$

Parameter:

$$\alpha = 6/5 = 1,2$$

$$\beta = 10800/400 = 27$$

Eigenfrequenzen:

$$1: (\gamma \sim 1,0): f = 14,5 \text{ Hz}$$

$$2: (\gamma \sim 1,1): f = 16,0 \text{ Hz}$$

$$3: (\gamma \sim 1,7): f = 25,0 \text{ Hz}$$

Abbildung 7: Nomogramme zur Berechnung der 1. Eigenfrequenz einer Brettspertholz-Rohdecke für zwei verschiedene Längen-zu-Breiten-Verhältnisse (Parameter alpha) aus der normierten Frequenz (Parameter gamma) bei unterschiedlichem Verhältnis der Biegesteifigkeit in und quer zur Tragrichtung (Parameter beta).

### 4.3. Übersichtsmatrix zu Dämpfungsgraden

In Abbildung 8 ist ein Auszug des Forschungsberichtes zu sehen. Darin sind die aus Akzelleranzmessungen durch Ermittlung der Halbwertsbreiten berechneten Dämpfungsgrade (Lehr'sches Dämpfungsmaß) für alle untersuchten Deckensysteme in unterschiedlichen Ausbauständen zusammengestellt. Die Ursachen der Dämpfung in den Systemen liegen in den Bauteilen selbst; als Dämpfungsmechanismen wirken die innere Dämpfung (Materialdämpfung) sowie die Dämpfung, resultierend aus der Reibung der unterschiedlichen Komponenten bei deren Relativbewegung (z.B. Balken und Verlegespanplatte) und die Abstrahlung. Eine Dämpfung durch Bewegung am Randaufleger wurde als unerheblich erkannt, da bei den Eigenschwingungen das Randaufleger als Schwingungsknoten fungiert und somit am Rand keine Bewegung stattfindet.

**Tabelle 4.23:** Dämpfungsmaße der Rohdecken aus Brettsperrholz im Frequenzbereich bis 20 Hz als Rohdecke (RD) und in Kombination mit Unterdecke (UD), Fließestrich (FE) und Trockenestrich (TE)

RD	RD UD	RD FE	RD TE	RD UD FE	RD UD TE
0.7 % ± 0.1 %	1.5 % ± 0.4 %	1.6 % ± 0.1 %	2.1 % ± 0.2 %	1.5 % ± 0.8 %	1.9 % ± 0.6 %

**Tabelle 4.24:** Dämpfungsmaße der Holzbalkendecke im Frequenzbereich bis 20 Hz als Rohdecke (RD) und in Kombination mit Unterdecke (UD), Trockenestrich (TE) und Schüttung (STG)

RD	RD UD	RD UD TE	RD UD TE STG
1.3 % ± 0.1 %	1.6 % ± 0.6 %	1.8 % ± 0.2 %	1.5 % ± 0.7 %

**Tabelle 4.25:** Dämpfungsmaße der Hohlkastenträgerdecke als Rohdecke (RD), Doppелеlement (DE) und Doppелеlement mit Schüttung (STG)

RD	DE	DE STG
1.3 % ± 0.1 %	0.7 % ± 0.2 %	1.5 % ± 1.1 %

Abbildung 8: Dämpfungsgrade mit Unsicherheiten, ermittelt aus Akzelleranzmessungen an den einzelnen Deckensystemen.

Interessant ist, dass die Holzbalkendecke im voll ausgebauten Zustand, also mit schwimmendem Estrich sowie einer Unterdecke, nicht die üblicherweise im Gebrauchstauglichkeitsnachweis verwendeten 3% erreicht, wobei für die Rohdeckensysteme die i.d.R. gewählten 1% durchaus verwendet werden sollte. Bemerkenswert ist weiterhin, dass die oftmals von einer zusätzlichen Schüttung erwartete Erhöhung der Dämpfung im gewählten Frequenzbereich bis 20 Hz nicht festzustellen ist!

#### 4.4. Beispiel zur Ermittlung der Schalleistung im tiefen Frequenzbereich bei einer Holzbalkendecke

Wesentlicher Bestandteil des Forschungsvorhabens ist ja die Optimierung von Holzdeckensystemen bzgl. der Trittschalldämmung im tieffrequenten Bereich. Hierzu wurde detailliert die Schallabstrahlung dieser Systeme untersucht und messtechnisch validierte Berechnungsverfahren entwickelt. Abbildung 9 zeigt die Berechnung der von einer Holzbalkendecke zu erwartenden Schalleistung im Frequenzbereich von ca. 10 Hz bis 200 Hz.

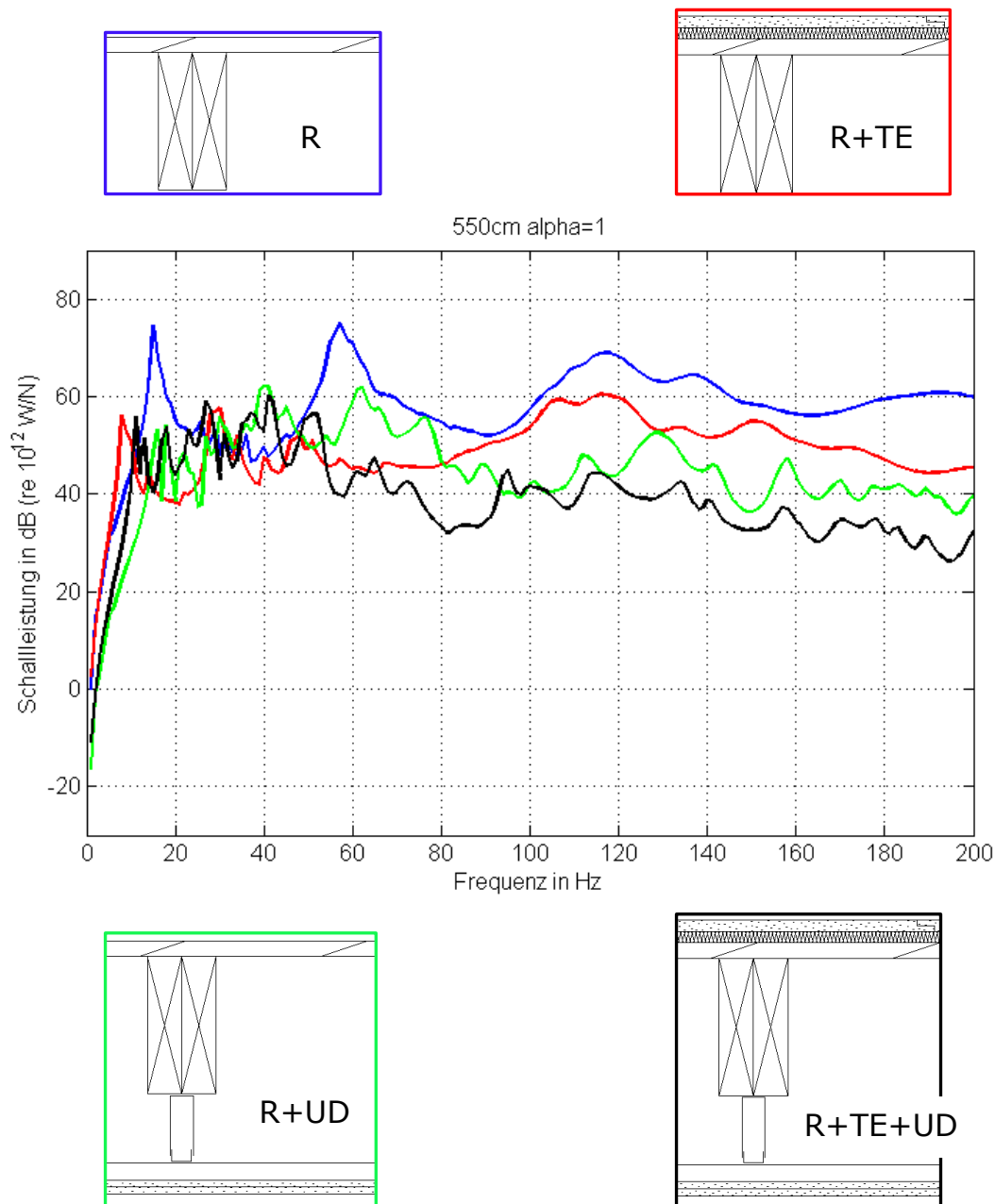


Abbildung 9: Auswirkung unterschiedlicher Ausbauszustände einer Holzbalkendecke mit einem Länge-Breiten-Verhältnis von 1 und einer Spannweite von 5,5 m bei einem Balkenabstand von 50 cm und einer Balkenbreite von 12 cm. (R: Rohdecke, UD: abgehängte Unterdecke, TE: schwimmender Trockenestrich)

Die ersten Spitzen im Spektrum unter 20 Hz stammen i.d.R. aus der ersten Eigenmode des Deckensystems. Schalltechnisch von Bedeutung ist jedoch der Frequenzbereich über 50 Hz. In der Abbildung dargestellt ist der Schalleistungspegel für eine Holzbalkendecke mit einer Spannweite von 5,5 m, einer Breite von ebenfalls 5,5 m ( $\alpha = 1$ ) mit einer Balkenbreite von 12 cm und einem Balkenabstand von 50 cm. Sehr schön zu erkennen sind die Pegelabnahmen bedingt durch den Einbau eines schwimmenden Trockenestrichs (rot) oder einer Unterdecke. Beide Ausbaumassnahmen wirken aber in unterschiedlichen

Frequenzbereichen: während die Unterdecke den Trittschall deutlich im Frequenzbereich über 80 Hz mindert, zeigt der Trockenestrich seine hauptsächliche Reduktion im Bereich unter 80 Hz. Tatsächlich zeigt sich jedoch, dass diese Aussage nicht verallgemeinert werden darf! Ein anderes Längen-Breiten-Verhältnis oder eine andere Spannweite der Decke kann das Ergebnis umkehren. Die Ergebnismomogramme beweisen, dass mit generellen konstruktiven Aussagen zur Verbesserung der Trittschalldämmung bei tiefen Frequenzen Vorsicht geboten ist. Die Ergebnisdaten zur Schallabstrahlung können auch in Terzbandbreite abgelesen werden (s. Abbildung 11). Aus den vielen Berechnungen zur Schallabstrahlung können trotzdem jedoch qualitative Konstruktionsregeln abgeleitet werden, bei welchem Deckensystem die entsprechende Ausbaumaßnahme in einem bestimmten Frequenzbereich Verbesserung bei der tieffrequenten Trittschalldämmung bringt. Eine derartige tabellarische Übersicht gibt Abbildung 10.

Parameter	Aussage	Frequenzbereich in Hz		
		0–50	50–100	100–200
BSDTyp	je größer d. Querschnitt	o	+	+
BSD Plattenstreifen	je mehr	o	o	o
HBD Balkenbreite	je breiter	o	+	+
HBD Balkenabs-	je größer	+(U)	+(U)	o
Abhängehöhe	je größer	o	+	+
Abhängeraster	je größer	+	+	o
Abhänger	mit vgl. zu ohne	o	o	o
Absorptionsgrad	je größer	o	+	+
Längenverhältnis	wenn quadratisch	o	-	-
Estrich	mit vgl. zu ohne	+	++	+
Unterdecke	mit vgl. zu ohne	+	+	++

Abbildung 10: Tabellarische Zusammenstellung einer qualitativen Beurteilung diverser konstruktiver Massnahmen zur Auswirkung auf die tieffrequente Trittschalldämmung. (BSD: Brettsperrholzdecke, HBD: Holzbalkendecke, U: nur mit Unterdecke)

## 5. Zusammenfassung

Für einen Ergebnistransfer in die Wirtschaft ist geplant, die Berechnungsergebnisse in Form eines interaktiv bedienbaren Programms mit einer grafischen Eingabeoberfläche zur Verfügung zu stellen, da die Zahl der erarbeiteten Nomogramme sehr groß ist. Abbildung 11 zeigt einen Entwurf. Auswählbar für den Anwender sind das Holzdeckensystem in den möglichen Ausbauständen eines schwimmenden Estrichs und einer abgehängten Unterdecke sowie die geometrischen Abmessungen der Decke. Weiterhin kann die Anregungsart der Decke variiert werden; es besteht die Möglichkeit zur Wahl zwischen einer Anregung mit dem Normhammerwerk, einem Fußgänger sowie einer benutzereigenen, spektral vorzugebenden Anregungsart. Als Ergebnis wird der abgestrahlte Schallleistungspegel berechnet. Neu aufgenommen wurde die Berechnung des Schwingungsnachweises nach EC5 [6] bzw. der modifizierte Nachweis nach Hamm/Richter [5]. Aus der linearen Frequenzdarstellung des Schallleistungspegels kann die erste Eigenfrequenz für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis abgelesen werden, für schalltechnische Belange erfolgt die Darstellung des Schallleistungspegels als Terzspektrum.

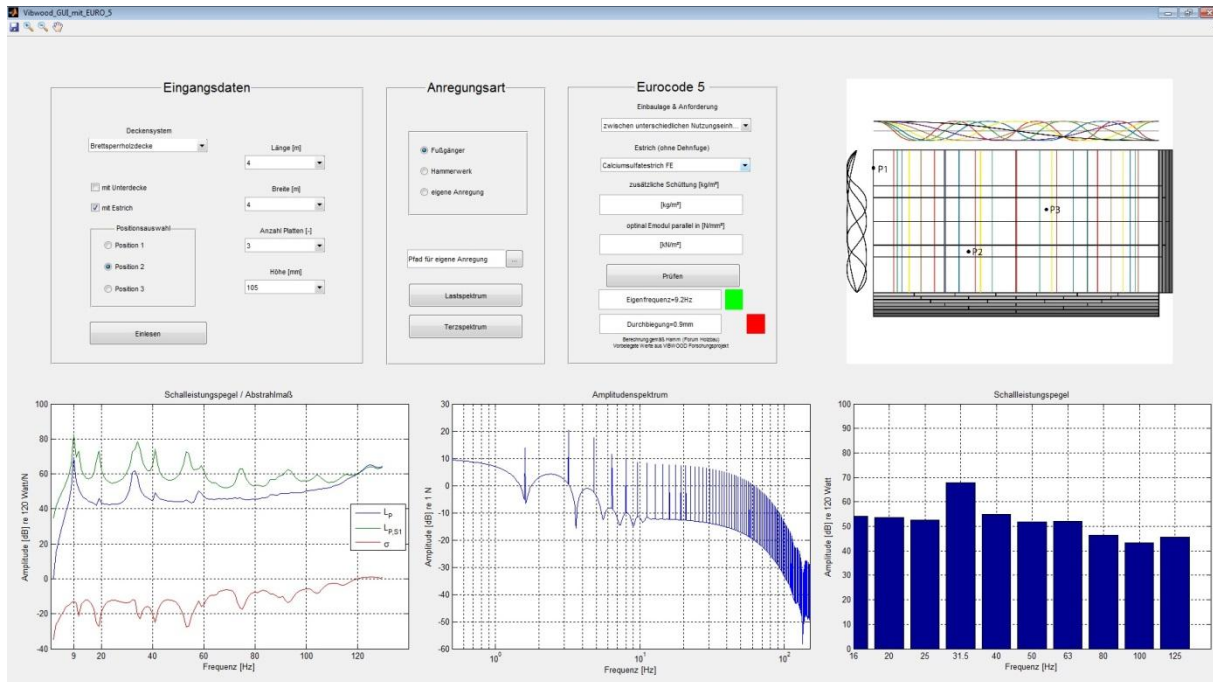


Abbildung 11: Entwurf einer interaktiven Oberfläche für einen bequemen Zugriff auf die Berechnungsdaten.

## 6. Literatur

- [1] R. Vörtl, M. Kohrmann, M. Buchschmid, U. Schanda und G. Müller: „Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken und zur Bewertung und Dimensionierung von angepassten Schwingungsschutzsystemen“ – Abschlussbericht AIF-Vorhaben 16578/N, Technische Universität München und Hochschule Rosenheim, 2014
- [2] Rabold, A. et. Al.: „Schallschutz in der Geschossbauweise - Decken, Trennwände und Stosstellen“, Forum Holzbau, 7. Europäischer Kongress, Köln, 2014
- [3] Meistring, P.: Schalltechnische Entwicklung von Fußbodenaufbauten auf Massivholzdecken, Diplomarbeit an der Fachhochschule Rosenheim, Studiengang Holzbau und Ausbau WS2003/04; Rosenheim März 2004
- [4] Winter, S.; Hamm, P.; Richter, A.: Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken. Schlussbericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 15283. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Technische Universität München. 2010
- [5] Hamm, P.: Schwingungen bei Holzdecken – Konstruktionsregeln für die Praxis; 2. Internationales Forum Holzbau, Beaune 2012
- [6] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, Beuth Verlag
- [7] Blaß, H.J., Ehlbeck, J., Kreuzinger, H., Steck, G.: „Erläuterungen zur DIN 1052: 2004-08“, Bruder Verlag
- [8] R. Vörtl, M. Kohrmann, M. Buchschmid, U. Schanda und G. Müller: Simultaneous operational vibration analysis of different layers of lightweight timber floors, Internoise 2013, Innsbruck
- [9] M. Kohrmann, R. Vörtl, M. Buchschmid, U. Schanda und G. Müller: Numerical models for the prediction of vibro-acoustical characteristics of light-weighted ceilings, Internoise 2013, Innsbruck