Planungshilfen zur schalltechnischen Bewertung von Deckensystemen aus Holz bei tiefen Frequenzen

Mathias Kohrmann[1], Hans Eham[1], Christian Fünfer[1], Raphael Völtl[1], Martin Buchschmid[2], Ulrich Schanda[1], Gerhard Müller[2]

[1] *Labor für Schallmesstechnik, Hochschule Rosenheim, 83024 Rosenheim, Deutschland,*
Email: mathias.kohrmann@fh-rosenheim.de

[2] *Lehrstuhl für Baumechanik, Technische Universität München, 80333 München, Deutschland,*
Email: baumechanik.bgu@tum.de

Einleitung

Der Einsatz von Holzkonstruktionen im mehrgeschossigen Objekt- und Wohnungsbau gewinnt immer mehr an Bedeutung. Gründe hierfür sind zum Einen die oftmals höhere Profitabilität aufgrund des geringeren logistischen Aufwands. Auf der anderen Seite bietet Holz als erneuerbarer Werkstoff Vorteile bei der Umsetzung von nachhaltigen Konstruktionskonzepten.

Neben den statischen Erfordernissen müssen bei Holzdecken insbesondere Aspekte der Gebrauchstauglichkeit (Schwingungsnachweis) und des Trittschallschutzes berücksichtigt werden. Vor allem im Frequenzbereich unter 125 Hz sind Holzkonstruktionen anfällig für Personeninduzierte Vibrationen, Trittschall und sekundären Luftschall. Dadurch können Komforteinschränkungen entstehen, auch in Fällen, in denen die normativen Anforderungen eingehalten sind.

Für den Schwingungsnachweis existieren eine Vielzahl von Bemessungsansätzen, wie die Beschränkung der Durchbiegung oder Methoden, die auf das subjektive Empfinden abzielen [1]. Auf europäischer Ebene wird eine Methode bevorzugt, die die Schwingantwort berücksichtigt und hauptsächlich auf die Begrenzung der ersten Eigenfrequenz abzielt, was im allgemeinen zu konservativen Bemessungsergebnissen führt [2]. In der Praxis hat sich daher ein modifiziertes Verfahren bewährt, dass im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Technischen Universität München (TUM) entstanden ist [3].

Für den Trittschallnachweis von Holzdecken wird in Ermangelung eines praktisch anwendbaren Bemessungsverfahrens auf vereinfachte Modelle zurückgegriffen [4]. Dies führt immer wieder zu Beschwerden durch Nutzer über vermeintlich gut bewertete Decken [6]. Auch bei Betondecken treten hier oftmals Probleme auf. Als Ursachen kann das sogenannte Estrich-dröhnen genannt werden, dessen mögliche Beurteilung von Burkhart [7] untersucht wurde. Im Falle von Holzdecken besteht zudem eine Diskrepanz zwischen subjektivem Empfinden und messtechnischem Nachweis aufgrund der unterschiedlichen Anregesignale von Geher und Norm-Hammerwerk, für die Rabold [6] alternative Bewertungsverfahren verglichen und Zielwerte für die Bauteilentwicklung abgeleitet hat.

Zusammenfassend besteht jedoch ein Bedarf an Modellen, um das vibroakustische Verhalten von Holzkonstruktionen schon vor der Bauausführung mit hoher Genauigkeit abschätzen zu können. Da experimentelle Untersuchungen zeitaufwendig und kostenintensiv sind, bietet sich hierfür die Entwicklung von numerischen Modellen an. In jüngster Vergangenheit wurden diesbezüglich einige Forschungsvorhaben durchgeführt [8] [9] [10]. Ziel des hier vorgestellten kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhabens *VibWood* war die Entwicklung von parametrisierten Finite-Elemente(FE)-Modellen von Holzdeckensystemen zur Simulation der vibroakustischen Eigenschaften im tieffrequenten Bereich bis 125 Hz und deren Aufbereitung in Form von Planungshilfen [11].

Forschungsprojekt *VibWood*

Das Forschungsvorhaben wurde in Zusammenarbeit der TUM mit der Hochschule Rosenheim (HSRo) durchgeführt. Ziel war es, repräsentative Deckenaufbauten der gängigsten Holzdeckensysteme in unterschiedlichen Ausbauzuständen abzubilden. Dazu wurden Holzbalkendecken und Brettsperrholzdecken untersucht in Varianten mit schwimmendem Estrich und abgehängter Unterdecke. Für jede Deckenkonstruktion wurden am Lehrstuhl für Baumechanik der TUM detaillierte, vollständig parametrisierte, numerische Modelle entwickelt (Abbildung 1) und anhand von experimentell ermittelten modalen Parametern (Eigenfrequenzen, modalen Dämpfungen und Eigenschwingformen) kalibriert [12]. Im Deckenprüfstand des Labors für Schallmesstechnik (LaSM) der HSRo wurden dazu Experimentelle Modal- und Betriebsschwingungsanalysen an den entsprechenden Deckenaufbauten durchgeführt (Abbildung 2) [13].

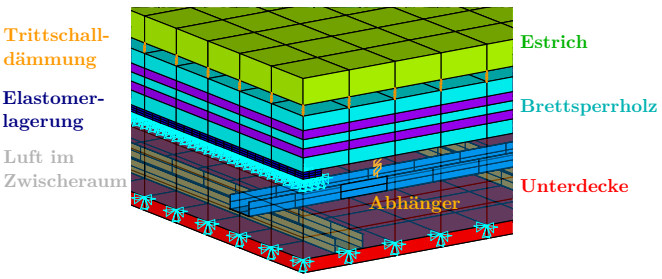

Abbildung 1: FE Modell einer Brettsperrholzdecke mit Estrich und Unterdecke

Anhand dieser kalibrierten numerischen Modelle wurden

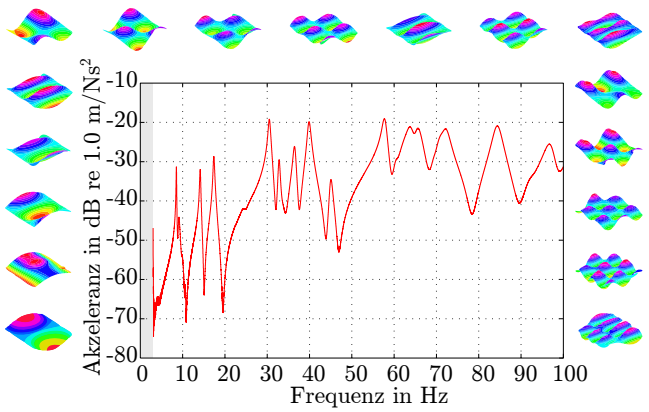

Abbildung 2: Beispiel einer gemessenen Übertragungsfunktion mit zugehörigen Eigenmoden zur Veranschaulichung

umfangreiche Parameterstudien durchgeführt, bei denen ausgehend von den Deckenabmessungen im Prüfstand auf praxisrelevante Dimensionierungen in einem weiten Parameterbereich extrapoliert wurde. Modale und harmonische Frequenzanalysen im Frequenzbereich bis 125 Hz wurden durchgeführt, mit dem Ziel, die jeweiligen Eigenfrequenzen der Deckensysteme sowie deren frequenzabhängige abgestrahlte Schallleistung zu ermitteln. Eine Simulation für den gesamten bauphysikalisch relevanten Frequenzbereich war nicht möglich, aufgrund der Grenzen, die die Diskretisierung der FE-Methode hinsichtlich der möglichen abbildbaren Wellenlängen setzt. Um den Rechenaufwand zu begrenzen wurde auf eine Modellierung des angrenzenden Raumes verzichtet und als Zielgröße die abgestrahlte Schallleistung gewählt.

Die Schallleistung wurde aus den simulierten Körperschallschnellen an der Unterseite der Decken nach der Theorie eines ebenen Strahlers als Summe ebener Wellen approximiert [14]. Dazu wurde ein akustisches Auswertungsmodell erstellt, das unter Zuhilfenahme von Integraltransformationsmethoden (ITM) die jeweilige Schwingantwort der numerischen Modelle im Wellenzahlbereich analysiert [15]. Eine sehr hohe Genauigkeit beim Vergleich mit experimentell ermittelter Schallleistung konnte erzielt werden.

Für jede Parameterkombination wurde somit eine Datenbasis in Abhängigkeit des jeweiligen Ausbauzustandes erstellt, die sowohl die jeweiligen simulierten Eigenfrequenzen, als auch die resultierenden schmalbandigen Schallleistungen in Form von Übertragungsfunktionen, bezogen auf die eingebrachte Anregekraft, beinhalten. Mit Hilfe einer graphische Benutzeroberfläche wurden die gewonnen Daten aufbereitet, um sie dem planenden Ingenieur zugänglich zu machen.

Graphische Benutzeroberfläche

Die im Rahmen weiterführender Forschungen an der HSRo entwickelte graphische Benutzeroberfläche vereint eine Vielzahl von Auswertungsmöglichkeiten. Wie in Abbildung 3 ersichtlich, kann zunächst über eine Eingabemaske der zu betrachtende Deckentyp sowie dessen Ausbauzustand und Dimensionierung eingegeben werden.

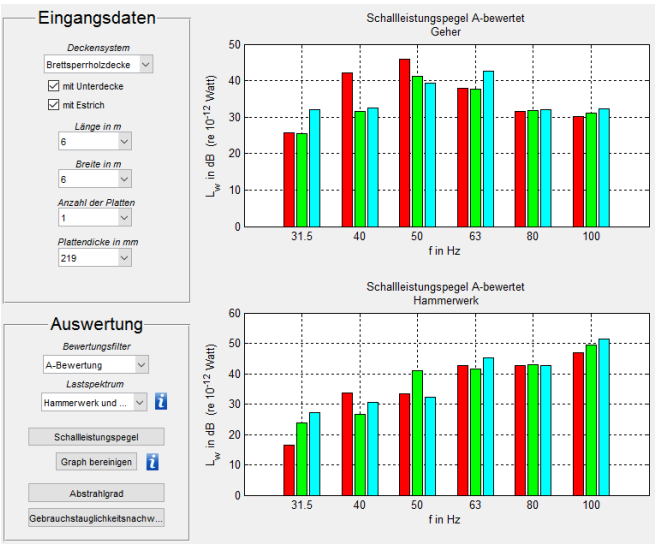

Abbildung 3: Graphische Benutzeroberfläche; Vergleich der Schallleistung dreier Deckenkonstruktionen bei Geher- und Hammerwerksanregung

Für die schalltechnische Auswertung kann zunächst das gewünschte Anregesignal und ein Bewertungsfilter gewählt werden. Dabei werden die gespeicherten Übertragungsfunktionen mit den Lastspektren eines Gehers oder Hammerwerks multipliziert um die jeweils resultierende Schallleistung zu erhalten. Es können zwei Belastungsarten mit jeweils bis zu drei unterschiedlichen Decken-Konfigurationen angezeigt und miteinander verglichen werde (farblich getrennt). Für die schalltechnische Auswertung stehen drei Möglichkeiten mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad zur Verfügung. Standardmäßig werden die Terzspektren der Schallleistung von 31.5 Hz bis 100 Hz ausgegeben. Für detailliertere Betrachtungen können zudem die schmalbandigen Ergebnisse sowie der zugehörige Abstrahlgrad in einem *Pop-Up* Fenster geöffnet werden. Für den schnellen Vergleich und die Einordnung der betrachteten Decke bezüglich des zu erwartenden Norm-Trittschallpegels werden zudem Einzahlwerte gebildet, deren Herleitung im Folgenden detailliert erläutert wird. Zusätzlich besteht die Möglichkeit den gesetzlich vorgeschriebenen Schwingungsnachweis für die ausgewählte Decke zu führen. Dazu kann sowohl eine Berechnung nach Eurocode 5, als auch nach dem modifizierten Verfahren nach Hamm/Richter durchgeführt werden. Der Vorteil gegenüber bestehenden Berechnungsprogrammen besteht hierbei in der Möglichkeit, die berechneten mit den simulierten Eigenfrequenzen abzugleichen (für simulierte Parameterkombinationen). So können Überdimensionierungen infolge des vereinfachten Berechnungsansatzes identifiziert werden.

Einzahlangaben zur Bewertung im tieffrequenten Bereich

Eine direkte Berechnung des bewerteten Norm-Trittschallpegels $L_{n,w}$ nach [5] ist mit den simulierten Daten nicht möglich, da der betrachtete Frequenzbereich nicht ausreicht. Es muss also eine aus den Simulationsdaten ableitbare Kenngröße entwickelt werden, die mit

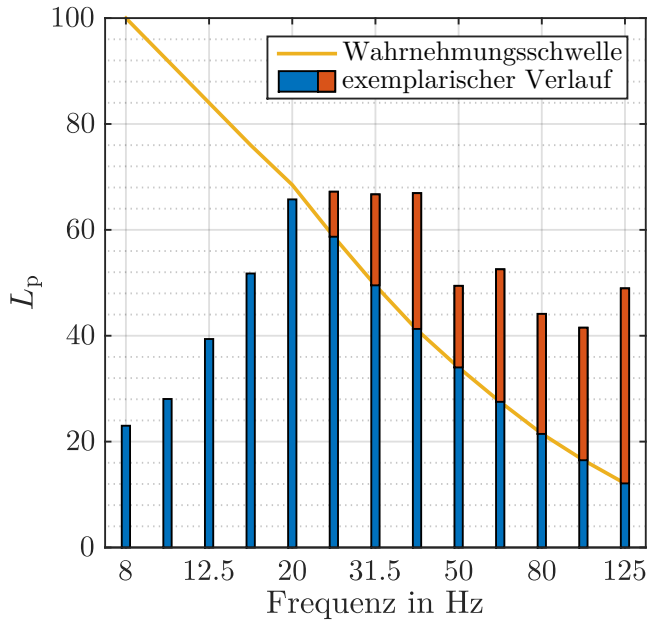

Abbildung 4: Exemplarischer Schalldruckpegel einer Holzbalkendecke mit Estrich und Unterdecke (blau); überlagert: die Wahrnehmungsschwelle (orange) mit entsprechenden Überschreitungen (rot)

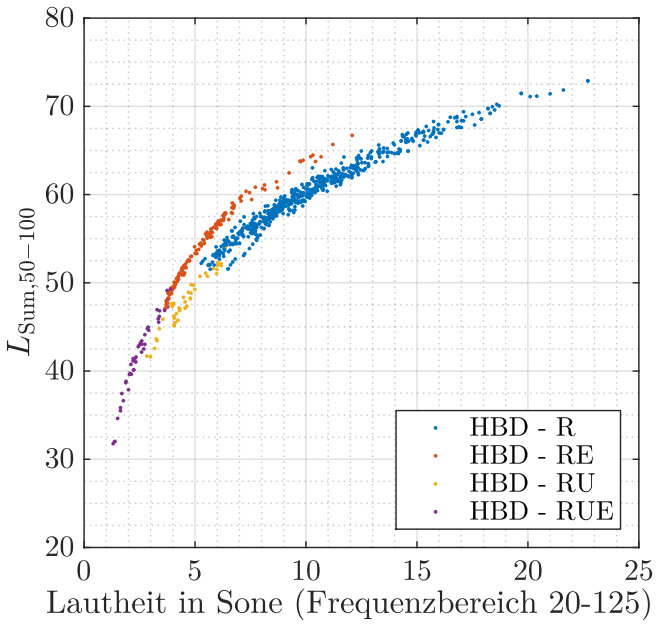

Abbildung 5: Korrelation des Einzahlwertes $L_{\mathrm{Sum},50-100}$ mit der Lautheit nach E. Zwicker für Holzbalkendecken; R: Rohdecken; RE: mit Estrich; RU: mit Unterdecke; RUE mit Unterdecke und Estrich

dem Einzahlwert $L_{n,w}$ korreliert. Dazu wird wie oben erwähnt zunächst die Schallleistung infolge einer Hammerwerksanregung berechnet und die schmalbandigen Spektren in Terzspektren umgewandelt. Die Schallleistungspegel werden anschließend unter vereinfachender Annahme eines diffusen Schallfeldes nach Gleichung (1) in Schalldruckpegel umgewandelt.

$$L_{\mathrm{p,i,diffus}} = L_{\mathrm{w,i}} + 10\log\left(\frac{4\mathrm{m}^2}{A_{\mathrm{eq}}}\right) \qquad (1)$$

Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse zur DIN EN ISO 717-2 wird die äquivalente Schallabsorptionfläche A_{eq} zu 10 $\mathrm{m}^2(A_0)$ gewählt. Um die psycho-akustische Wahrnehmung zu bewerten, wird in Anlehnung an DIN 45680 die dort angegebene Wahrnehmungsschwelle zugrunde gelegt [16]. Abbildung 4 zeigt exemplarisch ein Terzspektrum eines Schalldruckpegels mit überlagerter Wahrnehmungsschwelle.

Der Summenpegel der Schwellenüberschreitungen dient als Kenngröße. Bei der Untersuchung der Simulationsergebnisse konnte nachgewiesen werde, dass hierfür der Summenpegel von 50 bis 100 Hz ($L_{\mathrm{Sum},50-100}$) ausreicht, da die tieferen Terzbänder nur noch sehr geringen Einfluss auf das Endergebnis haben. Zusätzlich wird dieser Frequenzbereich von üblichen bauakustischen Messungen abgedeckt, was einen Vergleich mit existierenden Messdaten möglich macht.

Zur Validierung dieser Kenngröße wird dieser der Lautheit, berechnet aus dem gleichen Datensatz nach dem Verfahren von E. Zwicker, verglichen [17]. Wie in Abbildung 5 ersichtlich, wird eine sehr hohe Korrelation erreicht. Diese zeigt sich besonders für die baurelevanten Ausbauzustände mit schwimmendem Estrich.

Ein direkter Vergleich des bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{\mathrm{n,w}}$ mit Simulationsdaten ist, wie bereits zuvor erwähnt, nicht möglich. Daher werden in Abbildung 6 Summenpegel der Schwellenüberschreitung $L_{\mathrm{Sum},50-100}$ aus bereits bestehenden Messdaten des IFT Rosenheim gebildet und mit dem $L_{\mathrm{n,w}}$ inklusive Spektrumsanpassungswert $C_{\mathrm{I},50-2500}$ verglichen. Die Messdaten entstammen der Datengrundlage für [18]. Eine gute Korrelation der beiden Einzahlwerte ist erkennbar. Der Wertebereich stimmt weitestgehend mit dem der simulierten Daten überein. Folglich kann aus dem $L_{\mathrm{Sum},50-100}$ auf den zu erwartenden $L_{\mathrm{n,w}} + C_{\mathrm{I},50-2500}$ geschlossen werden. Wird ein Wert von maximal 53 dB für eine gut bewertete Decke angesetzt [6], so wird dies von Decken erfüllt deren $L_{\mathrm{Sum},50-100}$ kleiner als 43 dB ist.

Zusammenfassung

Mit dem vorgestellten Computerprogramm wird es für den planenden Ingenieur erstmals möglich, schon in der Planungsphase die Vorteile einer numerischen Simulation zu nutzen. Der Nachteil des begrenzten Frequenzbereiches konnte durch eine geschickt gewählte Kenngröße ausgeglichen werden, die Rückschlüsse auf den zu erwartenden Trittschallpegel gibt. Die Kombination mit dem gesetzlich vorgeschriebenen Schwingungsnachweis bietet einen zusätzlichen Mehrwert, vor allem im Hinblick auf die Vermeidung von Überdimensionierungen. Die Datenbasis ist aktuell noch auf wenige Deckensysteme beschränkt. Das Programm ist jedoch offen angelegt und könnte auf weitere Systeme erweitert werden.

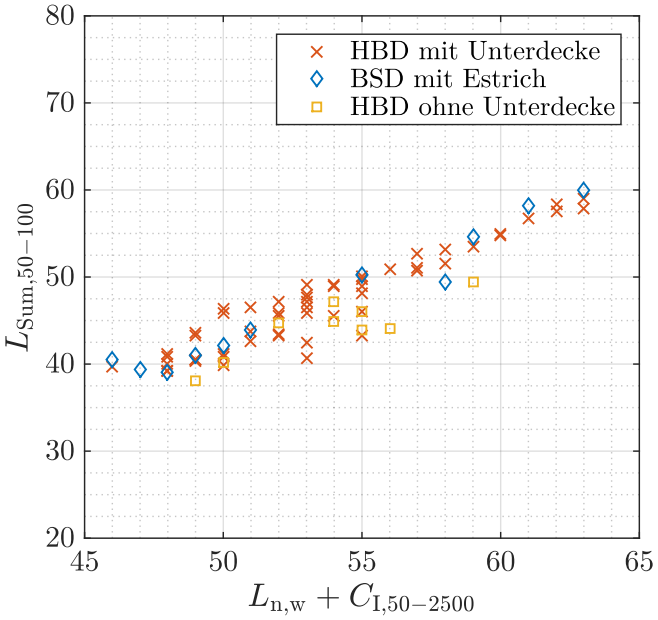

Abbildung 6: Korrelation des Summenpegels der Schwellenüberschreitungen $L_{\mathrm{Sum},50-100}$ mit $L_{\mathrm{n,w}} + C_{\mathrm{I},50-2500}$ für Messdaten von verschiedene Holzdecken

Danksagung

Das IGF Projekt 16758 N des iVtH (Internationaler Verein für technische Holzfragen e.V.) wurde unterstützt durch AIF (Allianz Industrie Forschung). Technischer Support wurde von Müller BBM VAS zur Verfügung gestellt.

Literatur

[1] Weckendorf, J., Toratti, T., Smith, I., Tannert, T. :Vibration serviceability performance of timber floors. Eur. J. Wood Prod., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2015

[2] DIN EN 1995-1-1:2010-12. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten; Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag

[3] Winter, S. and Hamm, P. and Richter, A.: Schwingungstechnische Optimierung von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken: Entwicklung von Bemessungs- und Konstruktionsregeln auf der Grundlage eines kalibrierten FEM-Modells und unter Berücksichtigung des Dissipations-Potentials unterschiedlicher Deckenaufbauten. TU München, Forschungsbericht, 2010

[4] DIN 4109:1989-11. Schallschutz im Hochbau - Anforderungen und Nachweise. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag

[5] DIN EN ISO 717-2:2013-06. Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 2: Trittschalldämmung. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag

[6] Rabold, A.: Trittschalldämmung richtig bewerten. 1. Internationale Schall- und Akustiktage, 2011

[7] Burkhart,C.: Tieffrequenter Trittschall – Messergebnisse, Beurteilung. Tagungsband DAGA, 2003

[8] Rabold, A.: Anwendung der Finite Element Methode auf die Trittschallberechnung. Technische Universität München, Dissertation, 2010

[9] Flode, O.: Vibrations in lightweight structures - efficiency and reduction of numerical models. Lund Universität, Schweden, Dissertation, 2014

[10] Churchill, C., Hopkins, C., Krajci, L.: Modelling airborne sound transmission across a hybrid heavyweight-lightweight floor using Statistical Energy Analysis. Forum Acusticum, 2011

[11] Kohrmann, M., Völtl R., Müller G., Schanda U., Buchschmid M.: Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken und zur Bewertung und Dimensionierung von angepassten Schwingungsschutzsystemen. TU München und HS Rosenheim, Forschungsbericht, 2014

[12] Kohrmann, M., Buchschmid, M., Greim, A., Müller, G., Schanda, U.: Vibroacoustic Characteristics of light-weighted Slabs - Part 1: Aspects of Numerical Modeling, Model Updating and Parametric Studies using the Buckingham π-Theorem. Tagungsband AIA-DAGA, Meran, 2013

[13] Völtl, R., Kohrmann, M., Buchschmid, M., Schanda, U., Müller, G.: Messung und Berechnung der Schwingungen von Holzdecken im Prüfstand. Tagungsband DAGA, Darmstadt, 2012

[14] Cremer, L., Heckl, M., Petersson, B. A. T.: Structure-Borne Sound - Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005

[15] Kohrmann, M., Buchschmid, M., Müller, G., Völtl, R., Schanda, U.: Numerical models for the prediction of vibro-acoustical characteristics of light-weighted ceilings, Tagungsband Internoise, Innsbruck, 2013

[16] DIN 45680:2013-09 Entwurf. Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag

[17] DIN 45631:1991-03. Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum - Verfahren nach E. Zwicker. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag

[18] DIN 4109-33:2013-12 Entwurf. Schallschutz im Hochbau - Teil 33: Eingangsdaten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Holz-, Leicht- und Trockenbau, flankierende Bauteile. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag