

Ausbreitungsdämpfung von Körperschall in plattenförmigen Strukturen

Tobias Kruse¹, Ulrich Schanda¹

Labor für Schallmesstechnik LaSM, Hochschule Rosenheim, 83024 Rosenheim, Email: tobias.kruse@fh-rosenheim.de

Einleitung

In der Bauakustik werden bei der Berechnung der schalltechnischen Eigenschaften von Bauteilen ausreichend diffuse Körperschallfelder angenommen. In der Holzmassivbauweise mit modernen Holzwerkstoffen, wie Brettsperholz, ist die innere Dämpfung der Bauteile im Vergleich zum Mauerwerks- und Betonbau höher, somit die Ausbildung eines Körperschall-Diffusfeldes nicht gesichert. Zum Verständnis der Ausbildung des Körperschallfeldes ist die Messung der Ausbreitungsdämpfung hilfreich. Diese erfolgt über eine Messung des Schnellepegels als Funktion des Abstandes zum Anregungspunkt. Für einen Vergleich mit theoretischen Modellen muss ebenso der Gesamtverlustfaktor bestimmt werden.

In diesem Beitrag werden Messergebnisse der Körperschallfelder in unterschiedlichen plattenförmigen Bauteilen und der Vergleich zu theoretischen Ansätzen präsentiert. Zunächst werden homogene Strukturen am Beispiel von Metall- und Gipskartonplatten *GKB* betrachtet. Diese Messungen erfolgten an frei hängenden Elementen in unterschiedlichen Dimensionen bei punktförmiger Anregung. Im Anschluss wird ein Brettsperholz-Bauteil *BSH* als orthotropes Material bei Punkt- sowie bei Linienanregung betrachtet.

Teil 1: Messobjekte und Messablauf der homogenen Prüfkörper

Um einen möglichen Einfluss der Materialien und deren Formate zu erkennen, wurden die Versuche mit Metallplatten (3 mm) und Gipskartonplatten (12.5 mm) durchgeführt. Die Platten wurden in drei verschiedenen Formaten eingeteilt.

- Format 1: 2.5 m x 1.250 m
- Format 2: 2.5 m x 0.625 m
- Format 3: 2.5 m x 0.075 m

Die Platten wurden je an der unteren rechten Ecke mit einem Impulshammer angeregt. Durch die Messung der Beschleunigung auf der Rückseite des Kräfteinleitungsortes konnte die eingebrachte Leistung W_{in} bestimmt werden (Abbildung 1b).

Der Verlauf der Schnellepegel wurde in zwei Achsen, ausgehend von dem Anregungspunkt (*Apos* in Abbildung 1a), in die diagonale Ecke und senkrecht nach oben in einem regelmäßigen Abstand von 8 cm bestimmt.

Messung des Gesamtverlustfaktors

Für die verschiedenen Plattenformate und Materialien wurde der Gesamtverlustfaktor η_{tot} über die

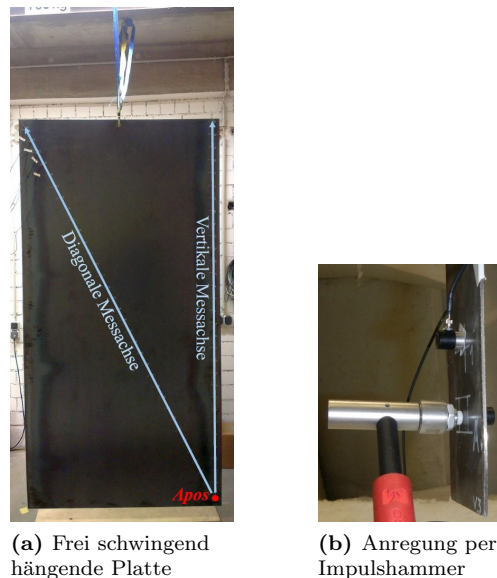


Abbildung 1: Eine der frei aufgehängenen Prüfkörper mit den größten Abmessungen und die darauf verlaufenden Messreihen im *nicht abgesumpften* Messraum mit angebrachten Beschleunigungsaufnehmern.

Körperschall-Nachhallzeit bestimmt. Die impulsförmige Anregung fand an der gleichen Position wie für die Schnellmessungen statt. Die Körperschall-Nachhallzeit (T_{15}) wurde an acht Positionen pro Bauteil bestimmt und deren Median für weitere Berechnungen herangezogen. Je nach Abmessungen der Prüfkörper sind unterschiedliche frequenzabhängige Verlustfaktoren gemessen worden. In den Abbildungen 2 und 3 sind die gemessenen Verlustfaktoren für die drei Formate der Gipskartonplatten sowie der Metallplatten aufgetragen. Es ist auffällig, dass der Verlustfaktor für den schmalen Plattenstreifen in tiefen Frequenzen deutlich höher ist, als für die größeren Formate.

Unter 300 Hz ist eine Bestimmung des Verlustfaktors über andere Methoden geeigneter, da man es mit einem stark modalen Verhalten des Prüfkörpers zu tun hat. Hier wäre die Bestimmung der Verlustfaktoren über die Halbwertsbreite geeigneter [1].

Bei den Messungen zeigte sich, dass sich die Metallplatten eher "klirrend" verhalten und somit die verwendeten Beschleunigungsaufnehmer zum Übersteuern neigen. Da in weiteren Berechnungen auch der innere Verlustfaktor η_{int} benötigt wird, wurde dieser mit dem kleinsten gemessenen Gesamtverlustfaktor angesetzt.

Prognose der Schnelleverteilung

Die Schnelleverteilung auf einer Platte kann aus der Bestimmung des Quadrats des Effektivwertes der Schwing-

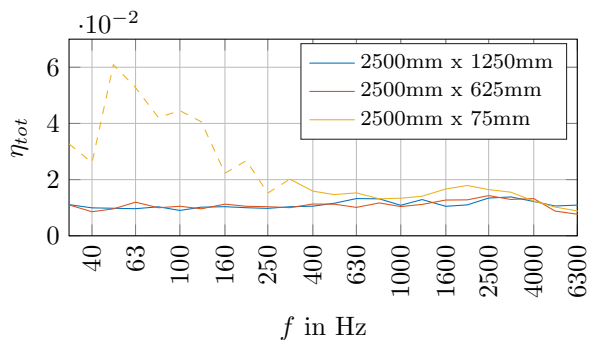


Abbildung 2: Gemessene Gesamtverlustfaktoren über die Körperschall-Nachhallzeit an den drei Formaten der GKB-Platte. Unsichere Messwerte sind gestrichelt.

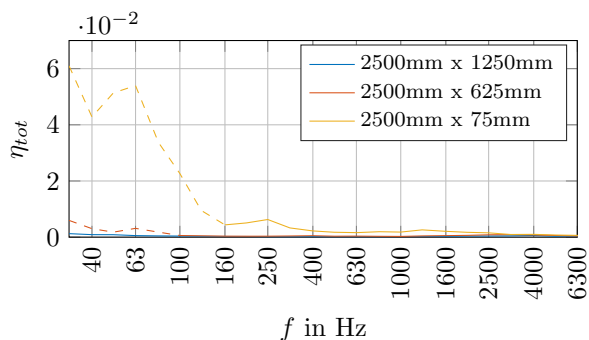


Abbildung 3: Gemessene Gesamtverlustfaktoren über die Körperschall-Nachhallzeit an den drei Formaten der Metall-Platte. Unsichere Messwerte sind gestrichelt.

schnelle des Direktfeldes

$$v_{Dir}^2 = \frac{W_{In}}{2\pi d c_{g(B),p} \rho_S} \exp\left(\frac{-\omega \eta_{int} d}{c_{g(B),p}}\right) \quad (1)$$

und des Diffusfeldes

$$v_{Dif}^2 = \frac{W_{In}(1-\alpha)}{\omega \eta_{tot} S \rho_S} \exp\left(\frac{-\omega \eta_{int} d_{mfp}}{2 c_{g(B),p}}\right) \quad (2)$$

$$d_{mfp} = \frac{S\pi}{U} \quad (3)$$

berechnet werden [2].

Dabei ist: ,

- W_{In} Eingebroughte Leistung
- d Entfernung vom Anregepunkt bis zum Messpunkt
- ω Kreisfrequenz
- η_{int} Innerer Verlustfaktor
- η_{tot} Gesamtverlustfaktor
- $c_{g(B),p}$ Gruppengeschwindigkeit der Biegewellen in Platten
- ρ_S Flächenbezogene Masse
- S Plattenfläche
- d_{mfp} Mittlere freie Weglänge
- α Kantenabsorbtiionsgrad (hier $\alpha = 0$)
- U Umfang des Prüfkörpers

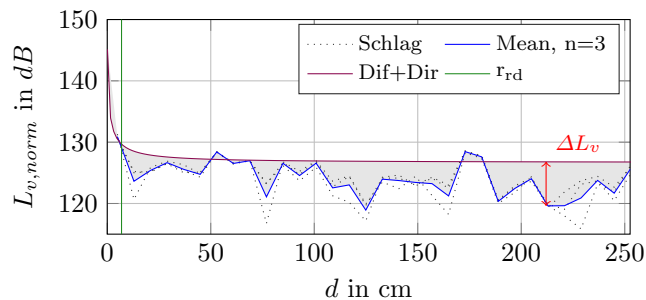


Abbildung 4: Vergleich der berechneten und auf die eingebrachte Leistung normierten gemessenen Schnellepegel auf der GKB-Platte bei 1600 Hz in Abhängigkeit der Entfernung d zum Anregepunkt unter Verwendung des gemessenen Verlustfaktors.

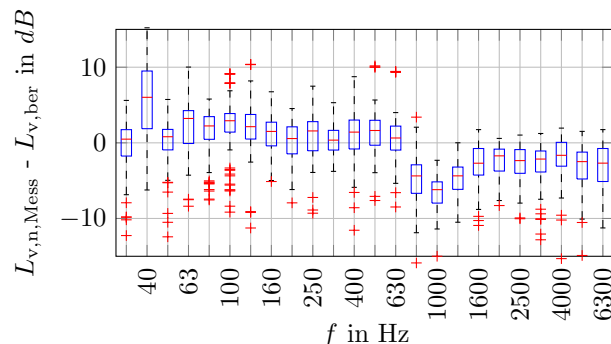


Abbildung 5: Boxplot der Schnellepegeldifferenzen ΔL_v unter Verwendung des gemessenen Verlustfaktors der GKB-Platte im Format 2.5m x 0.625m.

Aus deren Summe kann der quadrierte Schnellepegel auf der Platte in Abhängigkeit der Entfernung d zum Anregepunkt ermittelt werden [3].

In der Abbildung 4 ist der berechnete Schnellepegel dem gemessenen Schnellepegel für die Gipskartonplatte des 1600 Hz Terzbandes gegenübergestellt. Dabei ist der berechnete Schnellepegel $Dif+Dir$ als lila Kurve gezeigt. Die Schnellequadrate sind auf die eingebrachte Leistung normiert. Der Hallradius r_{rd} als der Abstand, an dem die Energiedichten im Diffusfeld und im Direktfeld gleich groß sind, ist in grün dargestellt. Die mittlere gemessene Schnelle ist mit der blauen Kurve $Mean$ abgebildet.

Die Differenzen ΔL_v zwischen den Berechnungen und den Messungen sind in der Abbildung 4 durch die graue Schattierung gekennzeichnet. Diese Schnellepegeldifferenzen werden für die verschiedenen Materialien und Abmessungen gebildet und in den weiteren Boxplots für alle Messpunkte über die Terzbänder aufgetragen (siehe Abbildung 5).

Ergebnisdarstellung der Schnellepegeldifferenzen

Die Schnellepegeldifferenzen werden terzbandweise in der Abbildung 5 für die GKB-Platte unter Verwendung des gemessenen Verlustfaktors im Format 2.5m x 1.25m dargestellt. Im Allgemeinen zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen. Bei 1000 Hz sind die größten Abweichungen, im Mittel bis zu 7 dB, zu erkennen. Aufgrund dessen wurde die einge-

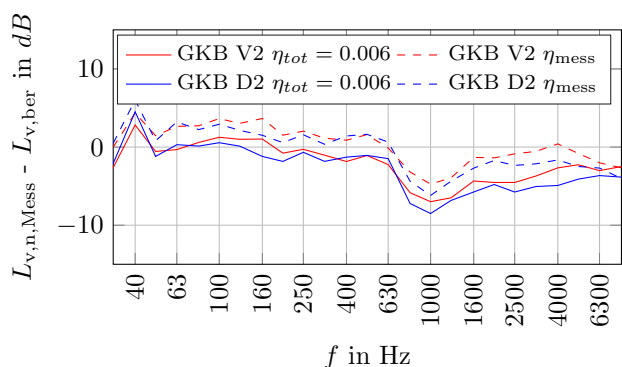


Abbildung 6: ΔL_v der GKB-Platte im Format 2.5 m x 0.625 m mit den gemessenen und dem Verlustfaktoren von $\eta_{tot} = \eta_{int} = 0.006$ [1].

brachte Leistung mit der Körperschalleistung verglichen. Dies zeigt jedoch gute Übereinstimmungen mit Differenzen um 3 dB.

Um zu kontrollieren, ob die Differenzen auf eventuelle Unsicherheiten in der Verlustfaktorbestimmung zurückzuführen sind, wurde die Berechnung mit einem literaturüblichen Wert von $\eta = 0.006$ [1] durchgeführt. In der Abbildung 6 sind die Schnellepegeldifferenzen der Berechnungen mit den gemessenen Verlustfaktoren η_{mess} und den literaturüblichen Verlustfaktoren aufgestellt. Die Senke im Bereich von 1000 Hz zeigt sich auch bei den Berechnungen mit den literaturüblichen Verlustfaktoren. Daher liegen die Abweichungen vermutlich in der Bestimmung der Körperschallschnellen begründet.

Teil 2: Untersuchungen am Brettsperrholz

Weitere Messungen zum Abgleich der berechneten zu den gemessenen Schnellepegeln bei punktförmiger Bauteilanzregung wurden am Brettsperrholz durchgeführt. Die Messungen an dem Brettsperrholz unterscheiden sich im Wesentlichen in zwei Punkten zu den Messungen an den Metall- und Gipskartonplatten. Die Anregung am 3-schichtigen, 81 mm dicken, Brettsperrholz erfolgte durch einen dynamischen Schwingerreger. Die Messung der Kraft und der Beschleunigung an der Anregeposition erfolgte mittels eines Impedanzmesskopfes.

Zudem war das 3 m x 5 m Brettsperrholzbauteil aus drei zusammengesetzten Elementen nicht frei hängend sondern zweiseitig (oben und unten) gelenkig gelagert [4]. Da Brettsperrholz orthotrope Bauteileigenschaften besitzt, müssen die Betrachtungen für die zwei Bauteilachsen getrennt erfolgen. Die verwendeten Materialdatensätze wurden [5, 6] entnommen.

In der Abbildung 7 sind die berechneten und die normierten gemessenen Schnellepegel in Abhängigkeit der Entfernung d zum Anregort auf dem Brettsperrholzbauteil quer zu Faserrichtung aufgetragen. Der Hallradius r_{rd} bis zu dem die Schnellepegel ähnlich wie im Nahfeld abfallen, liegt hier bei ca. 90 cm.

Ebenso wurden wie in den vorherigen Auswertungen nun die Differenzen zwischen den berechneten und den gemessenen Schnellepegeln in weiteren Schritten ausgewertet. In den Abbildung 8 und 9 sind die Boxplots der Schnelle-

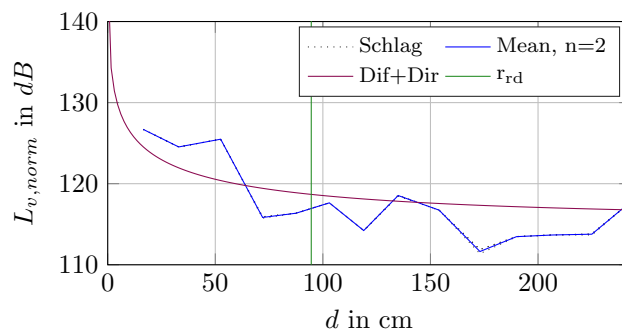


Abbildung 7: Vergleich der berechneten und der gemessenen Schnellepegel auf der BSH-Platte bei 2000 Hz in Abhängigkeit der Entfernung zum Anregepunkt d unter Verwendung des gemessenen Verlustfaktors.

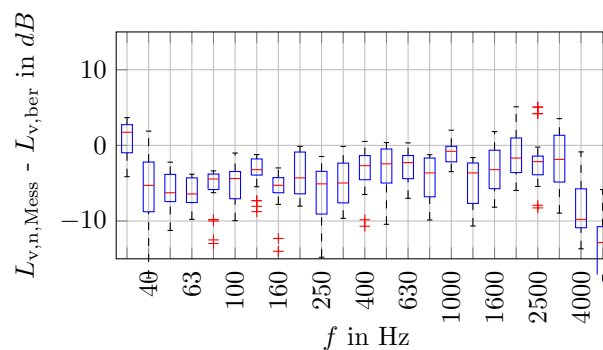


Abbildung 8: Boxplot der Schnellepegeldifferenzen ΔL_v der BSH-Wand quer zur Deckschichtfaser unter Verwendung des gemessenen Verlustfaktors.

pegeldifferenzen aufgeführt.

Für die Messungen und Berechnungen quer zur Faser (Abbildung 8) sind die berechneten Schnellepegel in der Regel höher als die gemessenen, jedoch über den gesamten Frequenzbereich ähnlich verteilt.

Bei Betrachtungen für die Bauteilrichtung parallel zur Deckschichtfaser (Abbildung 9) sind zu hohen Frequenzen deutlich höhere Abweichungen zu erkennen. Der steigende Frequenzverlauf der Differenzen ist momentan nicht zu erklären. Dennoch ist das Ergebnis im Allgemeinen mit Schwankungen um ± 4 dB zufriedenstellend.

Ausbreitungsdämpfung bei indirekter Anregung am Brettsperrholz-Stoß

Bei Messungen des Stoßstellendämm-Maßes führt eine starke Abhängigkeit der Schnellepegel von der Entfernung zwischen Anregort und Aufnehmerpunkt zu einem Überschätzen des Stoßstellendämm-Maßes.[7]

Im folgenden sind die Untersuchungen am L-Stoß aus Brettsperrholz an der Hochschule Rosenheim durchgeführt worden [6]. Die Decke ist aus einem 6-schichtigen Brettsperrholz mit einer Dicke von 162 mm und die Wand aus einem 3-schichtigen Brettsperrholz mit einer Dicke von 81 mm ausgeführt. Die Anregung erfolgte mittels dynamischen Schwingerreger an der unteren Wand des L-Stoßes an zwei verschiedenen Positionen. Die Schnellepegel wurden je an neun senkrechten Linien, an neun Punkten, ausgehend von der Stoßstelle an der Decke ge-

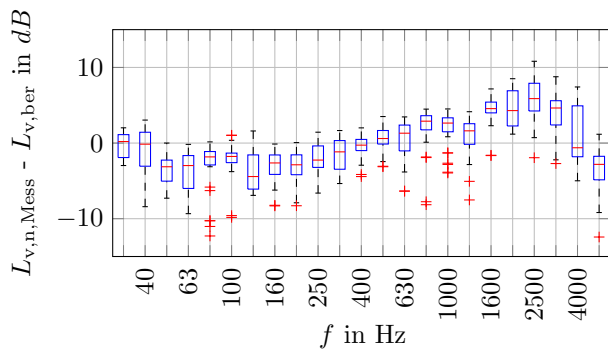


Abbildung 9: Boxplot der Schnellepegeldifferenzen ΔL_v der BSH-Wand *parallel* zur Deckschichtfaser unter Verwendung des gemessenen Verlustfaktors .

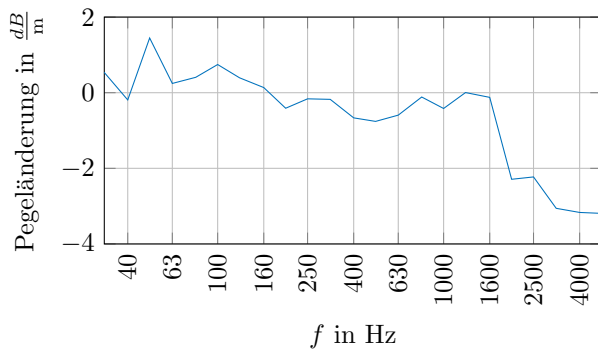


Abbildung 10: Pegeländerung in dB/m auf einer Brettsperrholzdecke in der Haupttragrichtung (3.35 m x 3.0 m x 0.162 m) bei Anregung der angekoppelten Wand.

messen.

Zu höheren Frequenzen zeigte sich auch bei der Brettsperrholzdecke eine Abnahme des Schnellepegels mit zunehmendem Abstand zur Stoßstelle. Wird die Steigung der Ausgleichsgeraden durch die Schnellepegel für die Terzbänder berechnet, so kann die Änderung des Schnellepegels über die Entfernung nach Abbildung 10 dargestellt werden.

Es ist deutlich zu erkennen, dass es ab 160 Hz bereits zu einer Art Ausbreitungsdämpfung kommt. Ab 1600 Hz ist die Änderung des Schnellepegels in Abhängigkeit der Entfernung mit bis zu -3 dB/m wesentlich höher.

Unterhalb von 160 Hz ist das modale Verhalten der Bauteile noch ausgeprägter und eine Abnahme des Schnellepegels in Abhängigkeit der Entfernung nicht zu erwarten. Der Modale Überlappungsfaktor, berechnet mit der kommerziellen Software zur Statistischen Energie Analyse *VA One* der *ESI-Group*, ist ab 500 Hz größer eins.

Zusammenfassung

Es zeigte sich, dass auf den untersuchten frei hängenden Gipskarton- und Metallplatten der Diffusfeldpegel aufgrund des sehr niedrigen Verlustfaktors der verwendeten Materialien überwiegt. Dennoch konnte mit Hilfe der Berechnungsmodelle [2] die Schnellen auf den Platten in Abhängigkeit der Entfernung zum Anregepunkt und der eingebrachten Leistung zufriedenstellend bestimmt wer-

den. Jedoch ist dieses Berechnungsmodell für die schmalen Plattenstreifen scheinbar nicht mehr zutreffend.

Erst bei ausreichender großer Plattendimension zur Biegewellenlänge können die Verlustfaktoren bestimmt werden. Für den tieffrequenten Bereich eignet sich eher die Bestimmung der Verlustfaktoren über die Bestimmung der Halbwertsbreiten.

Messtechnische Einschränkungen zeigten sich vor allem an der Metallplatte. Hier neigen die Beschleunigungsaufnehmer zur Übersteuerung.

Bei Messungen der Schnelleverteilung bei punktförmiger Anregung des Brettsperrholzes konnten die Berechnungsmodelle ebenfalls mit den Berechnungen überprüft werden. Bei den Messungen parallel zur Deckschichtfaserrichtung des Brettsperrholzes trat zu hohen Frequenzen eine zunehmende Abweichung zu den Berechnungen auf. Dies könnte durch die orthotropen Materialeigenschaften begründet sein, ist jedoch nicht abschließend geklärt.

Bei indirekte Anregung des Brettsperrholzes, über eine Anregung des angekoppelten Bauteils im L-Stoß, konnte eine frequenzabhängige Ausbreitungsdämpfung auf dem Bauteil bestimmt werden. Im tiefen Frequenzbereich ist aufgrund des modalen Verhaltens keine Ausbreitungsdämpfung messbar. Im mittleren Frequenzbereich ist diese noch sehr gering und die Schnellepegelverteilung auf dem Bauteil kann als diffus angenommen werden. Zu hohen Frequenzen, oberhalb von 1600 Hz nimmt die Ausbreitungsdämpfung deutlich zu. Sie steigt bis zu 3 dB/m bei 4000 Hz.

Literatur

- [1] Cremer, L.; Heckl, M. A.: *Körperschall: Physikalische Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1967.
- [2] Hopkins, C.: *Sound Insulation*. Butterworth-Heinemann, 2007.
- [3] Lyon, R. H.; DeJong, R. G.: *Theory and application of statistical energy analysis*. 2nd ed. Newton, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 1995.
- [4] Kruse, T.: "Messtechnische Untersuchung zur Stoßstellendämmung und Ausbreitungsdämpfung von Brettsperrholzbauteilen". Bachelorarbeit. Hochschule Rosenheim, 2015.
- [5] Paolini, A. u. a.: "Parameteridentifikation von Brettsperrholz-Elementen mittels Bayesscher Optimierung". In: *DAGA*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. 2016.
- [6] Mecking, S.: "Bauteilstöße im Holzmassivbau - Messtechnische Bestimmung von Eingangsgrößen für eine Schallschutzprognose". Masterarbeit. Hochschule Rosenheim, 2014.
- [7] Schneider, M.; Fischer, H.-M.: "Messung des Stoßstellendämm-Maßes K_{ij} an Wänden aus Mauerwerk im Labor". In: *DAGA*. Hrsg. von Fortschritte der Akustik 26. 2000.