

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen in der Bauteilprognose

Simon Mecking, Andreas Rabold, Anton Huber

Labor für Schallmesstechnik, Technische Hochschule Rosenheim, E-Mail: simon.mecking@th-rosenheim.de

Einleitung

Um die Anwendungsmöglichkeiten im Bauwesen für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zu fördern, wurde von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. ein Projekt initiiert. Darin werden für diese Dämmstoffe die Anforderungen aufgezeigt sowie Planungs- und Nachweismöglichkeiten zur Verfügung gestellt. Im Bereich des Schallschutzes werden Bauteilkataloge für diese Dämmstoffe erweitert, Prüfverfahren für die Materialeigenschaften der Dämmstoffe festgelegt und Prognosemodelle weiterentwickelt.

Bauteilmessungen weisen darauf hin, dass eine Charakterisierung der Hohlraumdämmung allein durch den Strömungswiderstand unzureichend ist. Durch einen semi-analytischen Berechnungsansatz mit einem äquivalenten Fluid können weitere Dämmstoff Eigenschaften bei der Prognose von zweischaligen Bauteilkonstruktionen berücksichtigt werden. Die Luftschallprognose der Bauteile erfolgt, um den Einfluss der unterschiedlichen Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen im Vergleich zu Konventionellen zu untersuchen.

Bauteilprüfungen

Am ift Rosenheim wurde die Luftschalldämmung von Doppelständer Wänden mit verschiedenen Hohlraumdämmungen aus nachwachsenden Rohstoffen gemessen. Zusätzlich wurde von den Dämmstoffen der längenbezogene Strömungswiderstand (r) und die Rohdichte (ρ) messtechnisch ermittelt. Bei der Holzfaser und Hanffaser handelt es sich um plattenförmige Dämmstoffe. Die Zellulose wurde eingeblasen und das Seegras wurde als loser Dämmstoff manuell eingebracht.

Die Messergebnisse in Abb.1 bei Verwendung von Holzfaser und Zellulose weisen trotz sehr unterschiedlichem Strömungswiderstand die gleiche bewertete Schalldämmung auf. Dagegen hat die Hanffaser und das Seegras zwar den gleichen Strömungswiderstand, jedoch hat Seegras eine um 6 dB kleinere Luftschalldämmung. Tieffrequent ist die Luftschalldämmung der Doppelständer Wand mit dem Seegras der Variante ohne Dämmstoff im Hohlraum sehr ähnlich. Es wird vermutet, dass bei dem Seegras durch die Verdichtung zum Teil die Gerüststeifigkeit bei tiefen Frequenzen für den Einbruch der Schalldämmung geführt hat.

Die Ergebnisse in Abb.1 zeigen keine Korrelation zwischen dem längenbezogenen Strömungswiderstand und dem bewerteten Schalldämm-Maß. Das weist darauf hin, dass die schalltechnische Güte eines Faserdämmstoffes allein über diese Kenngröße unzureichend beschrieben ist.

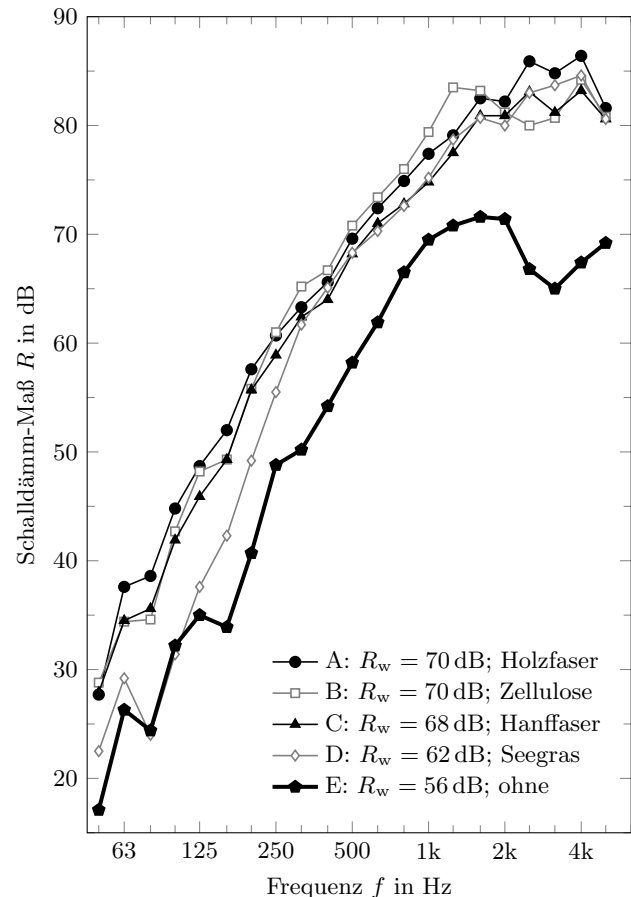


Abbildung 1: Schalldämm-Maße von Doppelständer Wänden unter Variation der Hohlraumdämmung mit messtechnisch ermittelten Dämmstoff Eigenschaften (A: $r = 9 \text{ kPa s/m}^2$, $\rho = 46 \text{ kg/m}^3$; B: $r = 36 \text{ kPa s/m}^2$, $\rho = 58 \text{ kg/m}^3$; C: $r = 3 \text{ kPa s/m}^2$, $\rho = 63 \text{ kg/m}^3$; D: $r = 3 \text{ kPa s/m}^2$, $\rho = 75 \text{ kg/m}^3$). Messdurchführung am ift Rosenheim [1].

Prognose für zweischalige, gedämmte Konstruktionen ohne Verbindung

Eine charakteristische Größe bei der Berechnung der Schalldämmung von zweischaligen Konstruktionen ist die Doppelwand Resonanz (f_0), die nach (1) berechnet werden kann. Dabei ist m' die flächenbezogene Masse der beiden Schalen und s' die dynamische Steifigkeit des mit Dämmstoff gefüllten Hohlraumes in N/m^3 .

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad (1)$$

Bei einer vollständigen Beschreibung eines porösen Absorbers setzt sich die dynamische Steifigkeit aus den Anteilen aus dem Gerüst und aus dem Fluid in (2) zusammen [2].

$$s' = s'_s + s'_a \quad (2)$$

Dabei ist die Steifigkeit der in den Poren eingeschlossenen Luft abhängig vom dynamischen Kompressionsmodul (\underline{K}), der Porosität (Φ) und dem Schalenabstand (d).

$$s'_a = \frac{\text{Re}\{\underline{K}\}}{\Phi d} \quad \text{mit } p_s \leq \text{Re}\{\underline{K}\} \leq \gamma p_s \quad (3)$$

Bei isothermer Verdichtung ist $\text{Re}\{\underline{K}\}$ gleich dem statischen Druck p_s . Das kann bei Faserdämmstoffen bei tiefen Frequenzen angenommen werden. Bei hohen Frequenzen erfolgt die Verdichtung adiabatisch, dabei erhöht sich $\text{Re}\{\underline{K}\}$ um den Adiabatenkoeffizienten (Luft: $\gamma \approx 1,402$).

Semi-analytisches Modell

Die Berechnung der Schalldämmung für eine zweischalige Wand mit genügend gedämpftem Hohlraum kann mit (4) und (5) aus den Schalldämm-Maßen von den einzelnen Schalen näherungsweise berechnet werden [vgl. 3, 4]. Dabei können sowohl Messwerte als auch Prognosewerte der Schalldämm-Maße für die einzelnen Platten als Eingangsdaten verwendet werden. Der erste Term in (4) entspricht dem Massegesetz nach Berger für senkrechten Schalleinfall. Mit den 5 dB im zweiten Term wird ein praxisnahes, diffuseres Schallfeld berücksichtigt, indem einfallender Schall aus nahezu dem gesamten Halbraum berücksichtigt wird.

$$R = 20 \lg \left(\frac{\omega (m'_1 + m'_2)}{2 \rho_a c_a} \right) - 5 \text{ dB} \quad (f < f_0) \quad (4)$$

Oberhalb der Doppelwand Resonanz kann die Schalldämmung für den Fall, dass der Zwischenraum mit einem porösen Absorptionsmaterial ausgefüllt ist, näherungsweise nach (5) berechnet werden [3, 4].

$$\begin{aligned} R &\approx R_1 + R_2 + 20 \lg \left(\frac{2 \omega \rho_a c_a}{s'} \right) \quad (f > f_0) \\ &\approx R_1 + R_2 + \Delta R_{\text{DW}} \end{aligned} \quad (5)$$

Dabei ist s' die dynamische Steifigkeit der Zwischenschicht und kann mit der frequenzabhängigen Fallunterscheidung nach (6) berechnet werden [4], wenn der Dämmstoff einen längenbezogenen Strömungswiderstand von $r \geq 5 \text{ kPa s/m}^2$ hat.

$$s' \approx \begin{cases} \frac{\rho_a c_a^2}{d} & (f \leq f_d) \\ \omega \rho_a c_a & (f > f_d) \end{cases} \quad (6)$$

Der Wechsel zwischen den Berechnungen der dynamischen Steifigkeit der Hohlraumschicht ist abhängig von dem Wellenlängenverhältnis zum Schalenabstand. In [vgl. 3–5] wird als Frequenzgrenze (7) verwendet.¹ Danach erhöht sich das Schalldämm-Maß oberhalb von f_d um 6 dB gegenüber der Summe der Schalldämm-Maße der beiden einzelnen Schalen.

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{c_a}{d} \approx \frac{55}{d} \quad (7)$$

¹In [4] wird zwar für die Grenze der Verwendung der Gleichungen mit 4 statt 2π angegeben, jedoch wird auch im Beispiel im Diagramm der Quelle 2π verwendet. Die 2π ergeben sich auch aus Schnittfrequenz der beiden Gleichungen in (6).

Modifiziertes Modell

Um bei der Luftschallprognose die Abhängigkeit der charakteristischen Dämmstoff Eigenschaften berücksichtigen zu können, wird im Fall von nicht druckbelasteten Dämmstoffen ein starres Gerüst und als Ersatzmodell ein äquivalentes Fluid angenommen. Abhängig vom Schalenabstand können bei mittleren oder höheren Frequenzen Hohlraumresonanzen (f_{HR}) nach (8) auftreten, welche die Schalldämmung reduzieren. Dabei ist \underline{c} die komplexe Phasengeschwindigkeit im äquivalenten Fluid.

$$f_{\text{HR},n} = n \frac{\text{Re}\{\underline{c}\}}{2d} \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Durch das Einfügen eines porösen Absorbers/Dämmstoffes kann die Verminderung der Schalldämmung reduziert werden. Der Dämmstoff vermindert die Steifigkeit der Luftschicht und dämpft die Hohlraumresonanzen. Bei dem modifizierten Modell wird die dynamische Steifigkeit in (5) aus der Überlagerung der einzelnen Anteile der Hohlraumresonanzen berechnet. Dabei wird für jede Hohlraumresonanz ein fußpunkterreger, gedämpfter Einmassenschwinger angenommen.

Auch der Kompressionsmodul bei der Doppelwand Resonanz in (3) und (1) kann mithilfe der spezifischen Dämmstoff Eigenschaften beim äquivalenten Fluid iterativ ermittelt werden. Die entsprechenden Werte aus den Normen sind in Abb. 2 zusätzlich eingezeichnet. Der Verlustfaktor (η) für die Vergrößerungsfunktionen der einzelnen Resonanzen kann ebenfalls aus dem Kompressionsmodul nach (9) berechnet werden.

$$\eta = \frac{\text{Im}\{\underline{K}\}}{\text{Re}\{\underline{K}\}} \quad (9)$$

Äquivalente Fluide

Für diesen Ansatz wird vorausgesetzt, dass das Gerüst steif ist, keine Verschiebung erfährt und die Kopplung zwischen Gerüst und Fluid vernachlässigbar ist. Wenn dabei Unsicherheiten bestehen, sollte ein vollständiges poroelastisches Modell verwendet werden. Der dynamische Kompressionsmodul des Absorbers wird nach (10) aus dem charakteristischen Wellenwiderstand (\underline{Z}_c) und dem Ausbreitungskoeffizienten ($\underline{\gamma}$) oder der komplexen Phasengeschwindigkeit (\underline{c}) berechnet [vgl. 6, 7].

$$\underline{K} = j\omega \frac{\underline{Z}_c}{\underline{\gamma}} = \underline{c} \underline{Z}_c \quad (10)$$

Semi-empirische Modelle zu Faser-Absorbern

Der charakteristische Wellenwiderstand und der Ausbreitungskoeffizient lassen sich auf Basis des längenbezogenen Strömungswiderstands anhand von semi-empirischen Modellen für Faserdämmstoffe berechnen [u. a. 8–10]. Die Grundlagen der unterschiedlichen Fitparameter in den Modellen sind Regressionsanalysen an Messergebnissen aus Glas- und Steinwolle Proben, welche häufig eine Porosität nahe Eins aufweisen.

Tabelle 1: Dämmstoff Eigenschaften.

	r	Φ	τ	Λ	Λ'
	kPa s/m ²			µm	
Par. 1 [14]	5,20	0,95	1,00	131	187
Par. 2	5,20				
Par. 3 [14]	11	0,94	1,40	58	122

In Abb. 2 sind Kompressionsmodule, Verlustfaktoren und Phasengeschwindigkeiten, die sich aus dem makroskopischen und den semi-empirischen Modellen ergeben, für die Parameterdatensätze 1 und 2 aus Tab. 1 aufgetragen.

Makroskopisches Modell für Faser-Absorber

Eine differenziertere Prognose unter Berücksichtigung weiterer makroskopischer Kenngrößen ist die Berechnung des charakteristischen Wellenwiderstands und des Ausbreitungskoeffizienten nach Johnsen-Champoux-Allard (JCA) [7, 11]. Dabei werden neben dem längenbezogenen Strömungswiderstand auch die Porosität (Φ), die Tortuosität (τ), die viskose und die thermische Länge (Λ , Λ') der Dämmstoffe berücksichtigt.

Anwendung

In Abbildung 3 ist der Hohlraumeinfluss aus der modifizierten Berechnung dem des semi-empirischen Ansatzes [3, 4] und den aus Messungen erhobenen Werten [13] gegenüber gestellt. Dabei zeigt die modifizierte Prognose im Bereich der Hohlraumresonanzen eine bessere Übereinstimmung zu den Messergebnissen. Die zweischalige Wand bestand bei der Messung aus zwei 16 mm Spanplatten und einer Mineralfaserdämmung im Zwischenraum. Zur Berechnung des zu Grunde liegenden äquivalenten Fluids wurde das empirische Modell nach [10] mit einem längenbezogenen Strömungswiderstand von $r = 5,2 \text{ kPa s/m}^2$ (Par. 2) verwendet.

Abbildung 4 zeigt die resultierenden Schalldämm-Maße aus den Messungen gegenüber zwei verschiedenen Parameterdatensätzen für den Dämmstoff nach der modifizierten Berechnung. Die Dämmstoffart kann zu signifikanten Unterschieden in der Schalldämmung führen.

Zusammenfassung

Bei der modifizierten Prognose kann mithilfe von Vergrößerungsfunktionen des Einmassenschwingers die Schallübertragung durch die Hohlraumresonanzen und die Doppelwand Resonanz berechnet werden. Die dafür verwendeten äquivalenten Fluide ermöglichen es, diese von Dämmstoff Eigenschaften abhängig zu berechnen. Damit ist es möglich die schalltechnische Güte von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen zu bewerten.

Als nächste Schritte werden Dämmstoff Eigenschaften, die an der PTB Braunschweig messtechnisch ermittelt werden, für die Prognose als Eingangsdaten verwendet und mit Bauteilmessungen verglichen. Außerdem wird

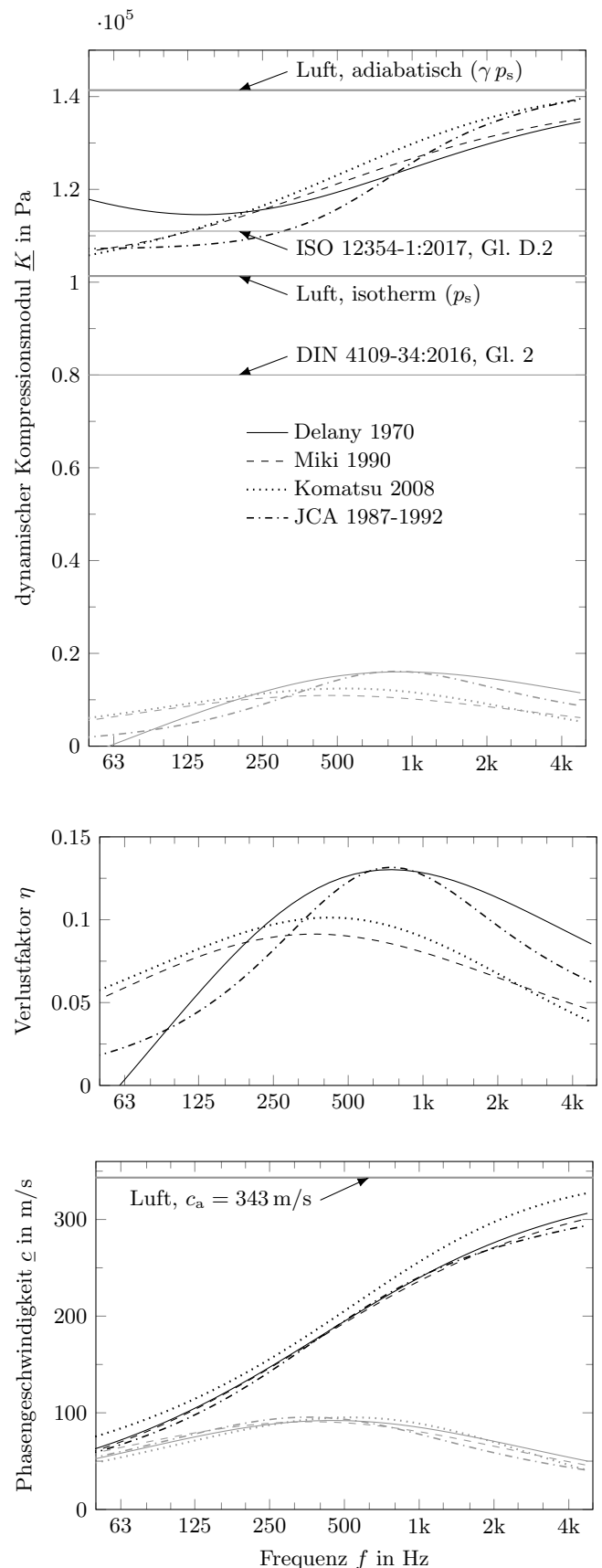


Abbildung 2: Eigenschaften des äquivalenten Fluids berechnet nach empirischen Modellen [8–10] für Par.2 und nach einem makroskopisches Modell nach Johnson-Champoux-Allard (JCA) [11, 12] für Par. 1 aus Tab. 1. Die Imaginärteile sind grau dargestellt.

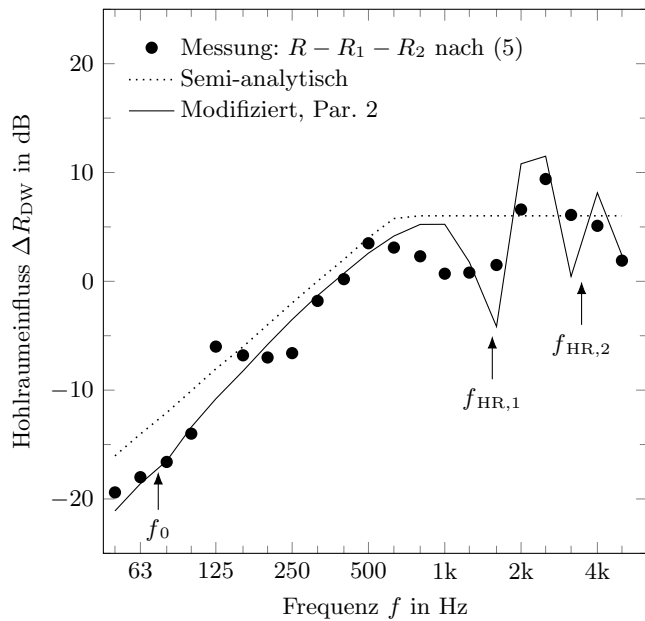


Abbildung 3: Hohlraumeinfluss ΔR_{DW} nach modifiziertem Modell mit Eigenschaften des äquivalentem Fluid (Par. 2 aus Tab. 1) berechnet nach [10] gegenüber dem semi-analytischen Ansatz [3, 4] und den aus Messungen erhobenen Werten [13].

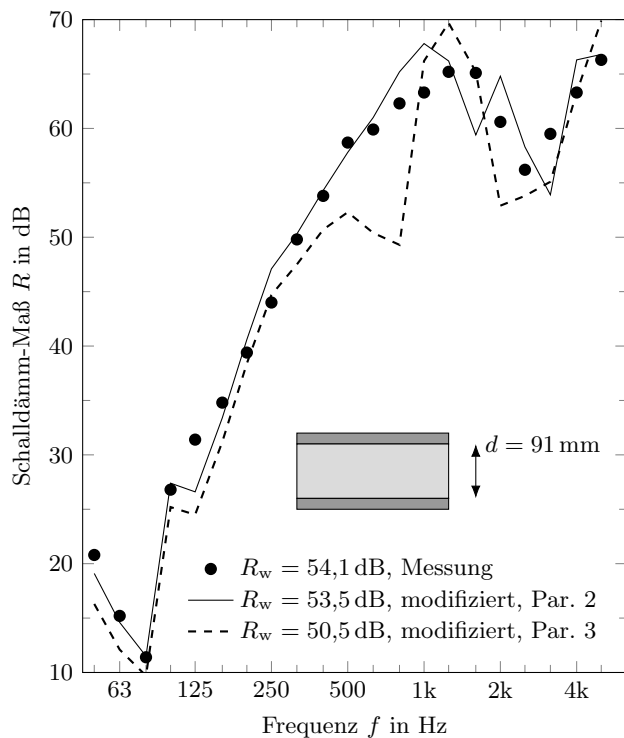


Abbildung 4: Prognostizierte Schalldämmung für zwei Dämmstoff Parameterdatensätze (Par. 2 und 3 aus Tab. 1) gegenüber Messungen [13].

die Transmission über Ständer in die Prognoserechnung integriert.

Danksagung

Die Ergebnisse sind aus Teilprojekt 3 des Forschungsverbundprojektes *Mehr als nur Dämmung - Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen* gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) mit dem Förderkennzeichen 22005516.

Literatur

- [1] Huber, A.: Ermittlung von Planungsdaten für den Schallschutz von Außenwänden in Holzbauweise mit unterschiedlichen Dämmstofftypen: Datensammlung - Bauteilmessung - Simulation. Bachelorarbeit. Hochschule Rosenheim, 2018
- [2] Cremer, L.; Heckl, M. A.: Körperschall: Physikalische Grundlagen und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1967
- [3] Sharp, B. H.: Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering Journal* 11.2 (1978), S. 53–63
- [4] Gösele, K.: Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelständigen Bauteilen (ohne Verbindung der Schalen). *Acta Acustica* 45.4 (1980), S. 218–227
- [5] Vér, I. L.: „Interaction of sound waves with solid structures: Chapter 11“. In: *Noise and vibration control engineering*. Hrsg. von Vér, I. L.; Beranek, L. L. Hoboken, N.J.: Wiley, 2006
- [6] Beranek, L. L.: Acoustical Properties of Homogeneous, Isotropic Rigid Tiles and Flexible Blankets. *J Acoust Soc Japan (E)* 19.4 (1947), S. 556–568
- [7] Allard, J. F.; Champoux, Y.: New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J Acoust Soc Am* 91.6 (1992), S. 3346–3353
- [8] Delany, M. E.; Bazley, E. N.: Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Appl Acoust* 3.2 (1970)
- [9] Miki, Y.: Acoustical properties of porous materials - Modifications of Delany-Bazley models. *J Acoust Soc Jpn (E)* 11.1 (1990)
- [10] Komatsu, T.: Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials. *Acoust Sci Techn* 29.2 (2008)
- [11] Johnson, D. L. u. a.: Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J Fluid Mechanics* 176.-1 (1987), S. 379
- [12] Champoux, Y.; Allard, J.-.-F.: Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *J Appl Phys* 70.4 (1991), S. 1975–1979
- [13] Nusser, B.: Entwicklung bauakustisch optimierter Trennwände aus Leichtbauplatten auf Basis gewonnener Materialkennwerte. Masterarbeit. Hochschule Rosenheim, 2007
- [14] Glé, P. u. a.: Acoustic performance prediction for building elements including biobased fibrous materials. In: *Proc Euronoise 2018*. Crete, Greece, 2018