Entwicklung, Charakterisierung und Anwendung von Luftschallabsorbern aus Schafwolle zur Verbesserung der Raumakustik eines Institutsgebäudes

Benedikt Bratz[1], Tobias P. Ring[2], Folke Köbberling[3], Sabine C. Langer[4]
[1] *TU Braunschweig, Email: b.bratz@tu-braunschweig.de*
[2] *Institut für Akustik, TU Braunschweig, Email: t.ring@tu-braunschweig.de*
[3] *Institut für Architekturbezogene Kunst, TU Braunschweig, Email: f.koebberling@tu-braunschweig.de*
[4] *Institut für Akustik, TU Braunschweig, Email: s.langer@tu-braunschweig.de*

Einführung

Die Raumakustik ist für eine gute Sprachverständlichkeit oder den musikalischen Höreindruck von großer Bedeutung. Eine wesentliche Maßnahme zur Beeinflussung und Gestaltung der Raumakustik ist der Einsatz poröser Materialien zur gezielten Schallabsorption. Heutzutage werden poröse Schallabsorber überwiegend aus künstlichen Mineralfasern hergestellt [8], welche kostengünstig und effektiv sind. Vor dem Hintergrund von Klimawandel und Ressourcenknappheit besteht die Notwendigkeit, auch die Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit von Produkten verstärkt zu fokussieren. Dies gilt auch für die im Bereich der Raumakustik eingesetzten Materialien und motiviert somit die Untersuchung der Verwendbarkeit und Wirksamkeit natürlicher Rohstoffe als Grundmaterial für poröse Absorber.

In den letzten Jahren hat die Untersuchungen zur Nutzung nachhaltiger Materialien auch im Bereich Akustik zugenommen. Im vorliegenden Beitrag wird das Potenzial von Schafwolle zur Herstellung poröser Absorber untersucht; ihre offenporige und faserige Beschaffenheit ist vielversprechend für eine effiziente Schallabsorption. Mithilfe von Messungen des Strömungswiderstandes und des Absorptionsgrads abhängig von Verarbeitungsgrad und Packungsdichte werden die akustischen Eigenschaften von Schafwolle charakterisiert. Anschließend wird exemplarisch ein Absorberelement entwickelt, realisiert und in einem Seminarraum eingesetzt, um den akustischen Nutzen in der Praxis zu bewerten. Die experimentellen Untersuchungen werden durch eine Modellierung des Materials mithilfe empirischer Materialmodelle zur Abschätzung der akustischen Eigenschaften unterstützt. Neben der grundsätzlichen Eignung von Schafwolle als Absorbermaterial zielt diese Untersuchung auf Aussagen bezüglich der erforderlichen Verarbeitungsgrade und Qualitätsmerkmale, der Eignung gängiger empirischer Materialmodelle für Schafwolle als poröses Material sowie auf die Herausforderungen bei Produktion und Nutzung von Schafwollabsorbern ab.

Das Material Schafwolle

Schafe werden in Deutschland hauptsächlich für den Erhalt der Kulturlandschaft eingesetzt. Für die Rohwolle, die jedes Jahr durch die Schur der Schafe anfällt, gibt es keinen bedeutenden Absatzmarkt; vielmehr sind die Schafschur und oft auch die Wollentsorgung Kostenfaktoren. Die Kleidung aus Wolle, die in Deutschland verkauft wird, besteht größtenteils aus australischer, neuseeländischer und südafrikanischer Schafwolle, welche in Asien aufbereitet und gesponnen wird. Die Infrastruktur zur Verarbeitung der Rohwolle ist fast vollständig aus Europa verschwunden.

Vor diesem Hintergrund und mit dem Ziel für den Wert eines Werkstoffs, der aktuell kaum Wert hat, zu sensibilisieren und ihn im Zusammenhang mit Architektur zu nutzen, fand am Institut für Architekturbezogene Kunst (IAK) der TU Braunschweig das Seminar „Ressource Rohwolle“ statt. Daraus entstand die Initiative, Wolle für raumakustische Zwecke zu nutzen und damit einen neuen Markt zu erschließen. Die Verwendung von Wolle als akustisches Material ist nicht unbekannt, die Anwendung in der Praxis ist aber die Ausnahme. Allerdings hat Schafwolle im Vergleich zu anderen akustisch wirksamen Materialien eine bessere Klimabilanz [2]. Auch muss die für diesen Zweck eingesetzte Wolle nicht denselben Ansprüchen wie für die Textilindustrie genügen.

Aus den Beständen des IAK steht für die hier vorgestellte Untersuchung Schafwolle in drei verschiedenen Verarbeitungsgraden zur Verfügung, siehe Abb. 1. Die Wolle stammt aus regionaler Schafhaltung von verschiedenen, nicht genauer bekannten, Schafrassen.

Abbildung 1: Zur Verfügung stehende Wollproben (v.l.n.r.): Rohwolle, gewaschene Wolle, kardierte Wolle.

Die *Rohwolle* (vgl. Abb. 1, links) enthält das gesamte bei der Schafschur anfallende Material und wird keiner weiteren Behandlung unterzogen. Es sind Bestandteile aus der Schafhaltung enthalten (Fremdkörper wie Stroh, Schmutz, Körperfett, etc.). Es geht ein intensiver Geruch von der Wolle aus. Die *gewaschene* Wolle (vgl. Abb. 1, Mitte) ist frei von groben Fremdkörpern, Körperfett und Geruch sind deutlich reduziert. Durch das Waschen ist die Homogenität herabgesetzt, es sind teilweise verfilzte Strukturen vorhanden. Die *kardierte* Wolle (vgl. Abb. 1, rechts) hat den höchsten Verarbeitungsgrad. Nach dem Waschen wird durch die Kardierung die Verfilzung gelöst,

die Fasern sind eben und gleichmäßig ausgerichtet. Das Material ist sauber und optisch sehr homogen.

Materialcharakterisierung

Ziel der Untersuchungen ist die akustische Charakterisierung der vorliegenden Wollproben. Für die akustischen Eigenschaften poröser Absorber ist der Strömungswiderstand des Materials ein wesentlicher Parameter, der großen Einfluss auf die Absorptionsfähigkeit hat. Der Strömungswiderstand hängt maßgeblich von der Packungsdichte des Materials ab. Um die erforderliche Anzahl Messungen zu minimieren, wird zunächst der zu erwartende Absorptionsgrad mittels empirischer Materialmodelle berechnet und die Packungsdichte auf Basis dieser Berechnungen optimiert. Nachfolgend werden Proben der verschiedenen Wollarten sowohl hinsichtlich des Strömungswiderstandes in Abhängigkeit der Packungsdichte als auch des Absorptionsgrades für einzelne Packungsdichten im Labor vermessen.

Modellierung des porösen Materials Bekannt sind empirische Materialmodelle für poröse Materialien von Delany & Bazley [6] und eine modifizierte Form nach Miki [7]. Diese Modelle wurden durch die Analyse von Messergebnissen faserig-poröser Materialien gewonnen, daher liegt deren Einsatz für Schafwolle nahe. Mit ihnen lässt sich die komplexe charakteristische Impedanz $\underline{Z}_c$ und die komplexe Wellenzahl $\underline{k}$ abhängig nur von dem Strömungswiderstand σ berechnen. Komplexere Materialmodelle, wie beispielsweise das nach Biot, werden hier aufgrund der vielen unbekannten Parameter wie Porosität und Tortuosität nicht weiter betrachtet. Die Gleichungen der empirischen Modelle lauten in allgemeiner Form:

$$\frac{\underline{Z}_c}{\rho_0 c_0} = \left(1 + A\left(10^3 \frac{f}{\sigma}\right)^K\right) - j\left(B\left(10^3 \frac{f}{\sigma}\right)^L\right) \quad (1)$$

$$\frac{\underline{k} \cdot c_0}{2\pi f} = \left(1 + C\left(10^3 \frac{f}{\sigma}\right)^M\right) - j\left(D\left(10^3 \frac{f}{\sigma}\right)^N\right) \quad (2)$$

mit der Frequenz f [Hz], der Luftdichte ρ_0 [kg/m^3], Schallgeschwindigkeit c_0 [m/s] und den Parametern A, B, C, D, K, L, M, N. Die Parameter nach Delany & Bazley haben die Werte: $A = 9{,}08$; $B = 11{,}9$; $C = 10{,}8$; $D = 10{,}3$; $K = -0{,}75$; $L = -0{,}73$; $M = -0{,}7$; $N = -0{,}59$. Nach Miki sind die Parameter: $A = 5{,}5$; $B = 8{,}43$; $C = 7{,}81$; $D = 11{,}41$; $K = L = -0{,}632$; $M = N = -0{,}618$.

Für den Fall des porösen Absorbers vor einer schallharten Wand lässt sich die Oberflächenimpedanz $\underline{Z}$ nach [1] berechnen:

$$\underline{Z} = -j\, \underline{Z}_c \cot \underline{k}\, d \quad . \quad (3)$$

Aus der Oberflächenimpedanz $\underline{Z}$, der Dicke des Absorbers d und der Luftschallkennimpedanz Z_0 kann mittels des Anpassungsgesetzes nach [8] der reelle frequenzabhängige Absorptionsgrad α berechnet werden:

$$\alpha = \frac{4 \cdot \mathrm{Re}(\underline{Z}) \cdot Z_0}{(\mathrm{Re}(\underline{Z}) + Z_0)^2 + \mathrm{Im}(\underline{Z})^2} \quad . \quad (4)$$

Mithilfe der Gleichungen (1) und (2) sowie den zugehörigen Parametern $A-N$ kann der zu erwartende Absorptionsgrad abhängig von dem Strömungswiderstand berechnet und somit auch hinsichtlich des Strömungswiderstandes optimiert werden. Für eine Dicke $d = 10\,\mathrm{cm}$, eine Schallgeschwindigkeit von $c_0 = 340\,\mathrm{m/s}$ und eine Luftdichte von $\rho_0 = 1{,}225\,\mathrm{kg/m^3}$ ergibt sich ein optimaler Strömungswiderstand von ca. $7.200\,\mathrm{N\,s/m^4}$ für beide Modellvarianten. Als Optimalitätskriterium wird dabei das Integral unter der Kurve des frequenzabhängigen Absorptionsgrades verwendet. Allerdings ist das so berechnete Optimum sehr flach, mit einem Strömungswiderstand von ca. $3.500\,\mathrm{N\,s/m^4}$ wird bereits 95 % des Optimums erreicht.

Messung des Strömungswiderstandes Der Strömungswiderstand σ wird für die drei Wollproben mit dem Luftwechselstromverfahren gemäß DIN EN 29053 gemessen. Dabei wird eine konstante Wollmenge sukzessive komprimiert und der Strömungswiderstand in Abhängigkeit der Packungsdichte ρ ermittelt. Die Messergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt.

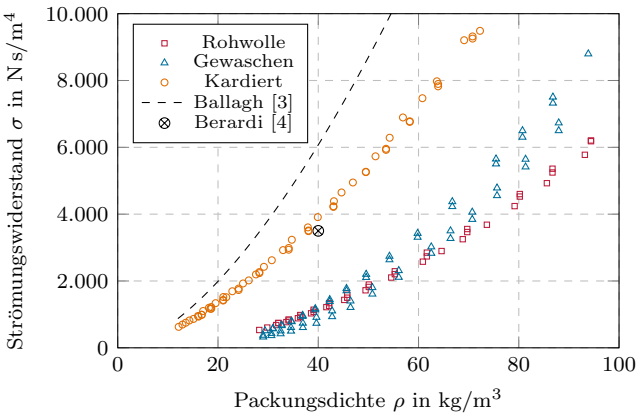

Abbildung 2: Gemessener Strömungswiderstand aufgetragen über der Packungsdichte. Zwei Stichproben je Verarbeitungsgrad inkl. Wiederholungsmessung.

Anhand Abb. 2 ist deutlich zu sehen, dass der Strömungswiderstand wesentlich vom Verarbeitungsgrad der Wolle abhängt. Dabei zeigt die kardierte Wolle für eine feste Packungsdichte den höchsten Strömungswiderstand. Die gewaschene Wolle und die Rohwolle weisen für eine Packungsdichte von 30 – 50 kg/m^3 einen ähnlichen Strömungswiderstand auf, für höhere Packungsdichten ist der Strömungswiderstand der gewaschenen Wolle höher. Die vergleichsweise große Streuung der Messergebnisse für die gewaschene Wolle ist bedingt durch vorhandene Verfilzungen aufgrund des Waschprozesses. Die hier präsentierten Messdaten liegen in einem ähnlichen Bereich wie die Daten anderer Autoren/innen, die Daten von [3] und [4] sind ebenfalls in Abb. 2 eingetragen. Allerdings ist davon auszugehen, dass neben der Verarbeitung auch die Schafrasse einen wesentlichen Einfluss auf den Strömungswiderstand und somit auch auf die akustischen Eigenschaften des Materials Schafwolle besitzt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass der Strömungswiderstand direkt von der Packungsdichte abhängt und darüber gut einstellbar ist. Der oben genannte optimale Strömungswiderstand von ca. 7.200 N s/m^4 lässt sich mit allen Wollarten prinzipiell erreichen.

Messung des Absorptionsgrades Zur Bestimmung der tatsächlichen Absorptionsfähigkeit der Wolle wird der Absorptionsgrad α nach DIN EN ISO 10534-2 im Impedanzrohr ermittelt. Es wird ein Impedanzrohr mit einem Durchmesser von $\varnothing = 100$ mm und einem Frequenzbereich von 250 – 2.000 Hz verwendet. In Abb. 3 sind die Messergebnisse des Absorptionsgrades für ausgewählte Packungsdichten und eine Probendicke von $d = 10$ cm in Terzen über der Frequenz dargestellt. Die Packungsdichte wurde dabei für alle Verarbeitungsgrade so gewählt, dass ein möglichst ähnlicher Strömungswiderstand im Bereich von 2.500 – 4.500 N s/m^4 erreicht wird. Der so erzielte Absorptionsgrad liegt damit bereits recht nahe an dem optimalen Absorptionsgrad. Zusätzlich sind die Berechnungsergebnisse der Modelle nach Delany & Bazley sowie Miki für den jeweiligen Strömungswiderstand eingetragen.

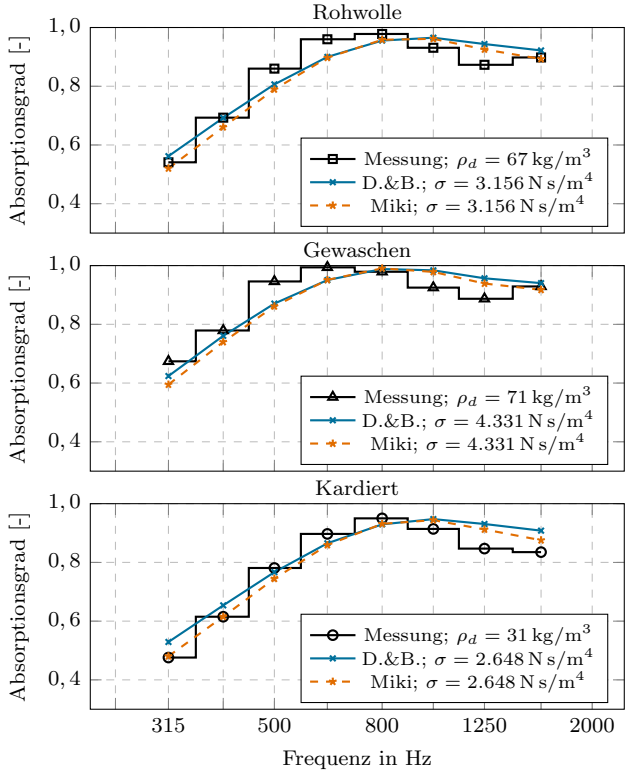

Abbildung 3: Absorptionsgrade aus Messung und Modellen für ausgewählte Packungsdichten, Probendicke jeweils d = 10 cm. Oben: Rohwolle; Mitte: gewaschene Wolle; Unten: kardierte Wolle.

Die Messwerte sind typisch für poröse Absorbermaterialien. Alle Proben weisen oberhalb 630 Hz einen Absorptionsgrad größer 0,9 auf. Grundsätzlich erscheint Schafwolle also als geeignetes Absorbermaterial. Weiterhin ist zu erkennen, dass die mittels der Materialmodelle prognostizierten Absorptionsgrade gut mit der Messung übereinstimmen. Für praktische Anwendungen kann das akustische Verhalten von Schafwolle somit gut mit den Modellen von Delany & Bazley bzw. Miki angenähert werden.

Anwendung in einem Seminarraum

Basierend auf den Erkenntnissen der Materialcharakterisierung wird ein Absorberelement aus Schafwolle exemplarisch gefertigt und die Wirkung auf die Raumakustik eines Seminarraums untersucht. Zur Verfügung steht ein mittelgroßer Raum des IAK, der u.a. für Seminare und Besprechungen genutzt wird. Er hat eine nahezu quadratische Grundfläche, ist an drei Seiten von glatten Betonwänden umfasst, eine Raumseite besteht aus einer Fensterfront. Der Raum verfügt über sehr wenig innere Absorption. Die Abmessungen sind: Grundfläche: 39,7 m^2, Raumhöhe: 4,25 m, Volumen: 168,6 m^3.

Aufbau der Absorber Aufgrund der hohen Verfügbarkeit, des geringen Verarbeitungsaufwands und somit des besten Kosten-Nutzen-Verhältnisses fällt die Wahl für das zu verwendende Absorbermaterial auf Rohwolle. Die gewünschte Masse der losen Wolle wird von einer einfachen Konstruktion in Form gehalten. Die Konstruktion besteht aus einem Rahmen, bestehend aus vier Holzlatten und Winkeln zur gegenseitigen Befestigung, und Drahtgeflecht, welches vorder- und rückseitig auf dem Rahmen aufgebracht wird (s. Abb. 4). Für den Einsatz in der Praxis werden zwei, jeweils 1 m^2 große Elemente mit einer wirksamen Dicke von $d = 10$ cm realisiert. Pro Element werden ca. 6,8 kg unbehandelter Rohwolle verwendet, die Konfiguration entspricht somit näherungsweise der in Abb. 3 oben dargestellten Konfiguration.

Abbildung 4: Absorberelemente aus Rohwolle. Links: Befüllung der Rahmenkonstruktion; Rechts: das fertige Absorberelement.

Wirkung Die Wirkung der Absorberelementen auf die Raumakustik des Seminarraums wird anhand je einer Nachhallzeitmessung (gemäß DIN EN ISO 3382; Verfahren mit integrierter Impulsantwort, Genauigkeitsstufe Standard, Messung in Terzbändern) mit und ohne Absorber quantifiziert. Abbildung 5 zeigt die Nachhallzeit T_{60} über der Frequenz. Eingetragen ist die Nachhallzeit mit und ohne die Schafwollabsorber sowie die mittels der Sabine'schen Formel anhand der Impedanzrohrmessungen prognostizierte Nachhallzeit. Weiterhin ist eine Prognose der Nachhallzeit für eine Absorberfläche von 35 m^2 eingetragen.

Für den Raum ohne Absorber wird eine hohe Nachhallzeit von mehr als 1,5 s unterhalb von 500 Hz gemessen.

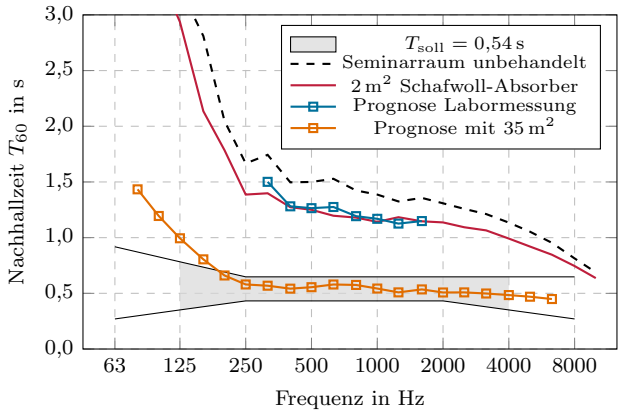

Abbildung 5: Nachhallzeit im Seminarraum: Messung vorher und nachher; Berechnung mit Sabine'scher Formel unter Verwendung von α aus Impedanzrohr; Prognose mit Modell von Miki (kardiert; $\rho = 60\,\mathrm{kg/m^3}$; $d = d_W = 10\,\mathrm{cm}$).

Zum Vergleich ist der nach DIN 18041 empfohlene Bereich für „Sprache / Kommunikation" in Abb. 5 grau hinterlegt. Er wird in sämtlichen Frequenzbändern deutlich überschritten. Nach Platzierung der zwei Absorber aus Schafwolle ist die Nachhallzeit T_{60} in allen Terzbändern reduziert (roter Graph in Abb. 5). Die Prognose unter Verwendung des im Impedanzrohr ermittelten Absorptionsgrades und der Sabine'schen Formel [9] stimmt mit der Messung gut überein.

Mit dem bekannten Zusammenhang des Strömungswiderstandes und der Packungsdichte aller Wollarten lässt sich mit den Gleichungen (1) – (4) und der Sabine'schen Formel auch die zu erwartende Wirkung von anderen möglichen Maßnahmen aus Schafwolle für diesen Raum abschätzen. Beispielhaft sind in Abb. 5 die prognostizierten Werte einer Maßnahme aus $A = 35\,\mathrm{m^2}$ Absorberfläche unter Verwendung von kardierter Wolle ($\rho = 60\,\mathrm{kg/m^3}$; $\sigma \approx 7.200\,\mathrm{N\,s/m^4}$) mit $d = 10\,\mathrm{cm}$ und einem Abstand des Absorbers zur Wand von $d_W = 10\,\mathrm{cm}$ eingezeichnet. Dadurch kann die Nachhallzeit ab einer Frequenz von 200 Hz in den nach DIN 18041 empfohlenen Bereich gesenkt werden. Für eine weitere Optimierung des Seminarraums hinsichtlich der Nachhallzeit wären zur Dämpfung der tiefen Frequenzen zusätzliche Maßnahmen wie Resonanzabsober verwendbar.

Fazit

Der vorliegende Beitrag zeigt die Nutzbarkeit von Schafwolle als nachhaltiges Absorbermaterial auf. Es wird anhand von Impedanzrohr-Messungen gezeigt, dass Schafwolle, abhängig vom vorliegenden Verarbeitungsgrad, durch eine angepasste Einstellung der Packungsdichte hohe Absorption aufweisen kann. Die empirischen Modellgleichungen von Delany & Bazley [6] bzw. Miki [7] sind gut für die Prognose des akustischen Verhaltens von Schafwolle geeignet. In einer exemplarischen Studie wird ein Seminarraum eines Institutsgebäudes mit Schafwoll-Absorbern raumakustisch behandelt. Die Verringerung der Nachhallzeit entspricht auch dabei den auf den Labormessungen basierenden Erwartungen.

Auf dem Weg zur Anwendung von Absorberelementen aus Schafwolle bestehen dennoch weiterhin Herausforderungen. Zunächst ist das Eigengewicht des mit Schafwolle gefüllten Absorbers verglichen mit Absorbern aus künstlichen Fasern oder Schäumen aufgrund der benötigten Wollmenge und der erforderlichen Rahmenkonstruktion zur Komprimierung der Wolle sehr hoch. Weiterhin ist der Einfluss der Schafrasse, Schurstelle sowie des genauen Verarbeitungsprozesses auf die akustischen Eigenschaften der Schafwolle noch weitgehend unbekannt.

Darüber hinaus sind Aspekte des Brandschutzes und der Schädlingsprävention zu berücksichtigen. Schafwolle an sich gilt als schwer entflammbar [5], was für die Nutzung in der Praxis eine gute Voraussetzung ist. Je nach Verarbeitungsgrad sind nötige vorbeugende Maßnahmen auch gegen möglichen Schädlingsbefall zu prüfen.

Die Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit von Produkten steht in Zeiten des Klimawandels zurecht verstärkt im Fokus. Mit Schafwolle steht insgesamt ein leistungsfähiges, flexibel einsetzbares, natürliches und nachwachsendes Material zur Verfügung, das hohen Anforderungen an Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit gerecht werden kann.

Acknowledgement

Die Vorarbeiten von Victoria Hermesmann (IAK) haben zur erfolgreichen Durchführung beigetragen.

Literatur

[1] Allard, J. F.; Atalla, N.: Propagation of Sound in Porous Media. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2009

[2] Asdrubali, F.: Survey on the Acoustical Properties of new Sustainable Materials for Noise Control. In: Proceedings of Euronoise, Tampere, Finland (2006)

[3] Ballagh, K. O.: Acoustical properties of wool. In: Applied Acoustics 48 (1996), Nr. 2, 101–120

[4] Berardi, U.; Iannace, G.; Di Gabriele, M.: Characterization of sheep wool panels for room acoustic applications. In: Proceedings of Meetings on Acoustics, Acoustical Society of America (2016)

[5] Bobeth, W.; Berger, W.: Textile Faserstoffe: Beschaffenheit und Eigenschaften. Springer, Berlin, 1993

[6] Delany, M. E.; Bazley, E. N.: Acoustical properties of fibrous absorbent materials. In: Applied Acoustics 3 (1970), Nr. 2, 105–116

[7] Miki, Y.: Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models. In: Journal of the Acoustical Society of Japan (E) 11 (1990), Nr. 1, 19–24

[8] Müller, G.; Möser, M.: Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer Berlin Heidelberg, 2004

[9] Sabine, W. C.: Reverberation. In: Collected Papers on Acoustics (1923), 3–68