Schallabsorption pilzbasierter Materialien mit 3D-gedruckter Doppelporosität

Roman Wack[1], Ipek Sögüt[2]

[1] *Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 70569 Stuttgart, E-Mail: roman.wack@ibp.fraunhofer.de*
[2] *Werner und Balci GmbH, 73728 Esslingen*

Einleitung

Mit pilzbasierten Materialen lassen sich poröse Schallabsorber mit einem hohen Anteil rezyklierter organischer Abfälle aufbauen. Dabei dienen Reststoffe aus Holz, Stroh oder aus der Lebensmittelproduktion als Substrat. Die pilzbasierten Materialien entstehen dadurch, dass ein Pilzmyzel das Substrat durchwächst, ein feines Geflecht fadenförmiger Hyphen ausbildet und die Struktur so mechanisch gebrauchstauglich macht.

Nach einer abschließenden Trocknung, die den Pilz abtötet, ist ein Material mit hoher offenzelliger Porosität entstanden, das keine Verhautungen an den Oberflächen aufweist und damit gute Voraussetzungen für einen Einsatz als Schallabsorber mitbringt. Allerdings sind die Porengrößen vergleichsweise klein und damit der Strömungswiderstand für viele Anwendungen noch zu hoch.

Mit der Möglichkeit, das Substrat als Pasten in einem 3D-Druck-Verfahren zu verarbeiten, ergeben sich weitere Möglichkeiten zur Gestaltung der Porenstruktur (Abbildung 1).

Abbildung 1: 3D-Pastendruck eines Werkstücks aus organischem Substrat.

Dazu wurde eine Struktur grober Poren aus dem 3D-Pastendruck angestrebt, die mit dem feinporigen Anteil des Pilzmaterials eine doppelporöse Morphologie ausbildet. Beide Porennetzwerke sind an ihren Grenzflächen offenzellig miteinander verbunden. Mit dieser Doppelporosität lässt sich einerseits der Gesamt-Strömungswiderstand gut auf Absorberdicken von wenigen Zentimetern abstimmen, andererseits kann das erste Absorptionsmaximum im Vergleich zu gut abgestimmten Faserabsorbern gleicher Schichtdicke um eine Oktave zu tieferen Frequenzen verschoben werden. Das Ziel beim Herstellungsprozess war eine weitgehend unsterile Pilzzucht, wodurch sich die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessert.

Berechnungsgrundlagen

Das Prinzip der Doppelporosität nutzt zwei miteinander verbundene Porennetzwerke mit deutlich unterschiedlichen Porendimensionen. Dabei durchzieht ein Netzwerk grober Mesoporen eine Materialphase mit feinen Mikroporen, die meist mit einem offenzellig porösen Material aufgebaut wird. Eine analytische Lösung ist in [1], [2] gegeben. Bei bekannter Schallausbreitung in den einzelnen Porennetzwerken kann die Ausbreitung im doppelporösen Material durch eine Parallelschaltung der effektiven Dichten und Kompressionsmoduli beschrieben werden: Die effektive Dichte des doppelporösen Materials ρ_{dp}, welche die viskosen und Trägheitsverluste beschreibt, ist gegeben mit der Dichte ρ_p der grobporigen, mesoporösen Phase und ρ_m der mikroporösen Phase als

$$\rho_{dp} = \left(\frac{1}{\rho_p} + \left(1-\phi_p\right)\frac{1}{\rho_m}\right)^{-1}. \tag{1}$$

Darin ist ϕ_p die Porosität des mesoporösen Anteils. Analog ergibt sich der Kompressionsmodul K_{dp}, der die Verluste durch nicht isotherme Kompression beschreibt, mit den Kompressionsmoduli der beiden Einzelphasen und der Porosität der mikroporösen Phase ϕ_m zu

$$K_{dp} = \left(\frac{1}{K_p} + \left(1-\phi_p\right)\frac{F\phi_m}{K_m}\right)^{-1}. \tag{2}$$

Zusätzlich ist hier eine Kopplungsfunktion F berücksichtigt, welche die Effekte einer Druckdiffusion von der meso- in die mikroporöse Phase bei deutlich unterschiedlichen Porengrößen beschreiben soll. Entsprechende Schalldruckpegel-Verteilungen sind in den folgenden Abschnitten gezeigt. Für einfache Geometrien (Kreiszylinder, parallele Schlitze) lassen sich analytische Lösungen für die Kopplungsfunktion angeben.

Mit der Wellenzahl in Luft ω lassen sich dann für die Schallausbreitung im Gesamtmaterial die bekannten Ausdrücke für die Wellenzahl k_{dp} und die charakteristische Impedanz Z_{dp} angeben:

$$k_{dp} = \omega\sqrt{\frac{\rho_{dp}}{K_{dp}}}, \quad Z_{dp} = \sqrt{\rho_{dp}K_{dp}}\,. \tag{3}$$

Abschätzungen für geschichtete Aufbauten wurden mittels Transfermatrix-Methode durchgeführt, indem die Ausdrücke in Gleichung (3) in die Transfermatrix für äquivalente Fluide eingesetzt wurden. Problematisch ist dabei, dass die Grenzflächen zwischen den Schichten als homogen angenommen sind. Zur Abschätzung von Schichtungen und

damit grob modellierter Gradienten hat sich das Vorgehen dennoch als brauchbar erwiesen, wie die Vergleiche mit Messungen belegen.

Parallel zur analytischen Behandlung sind einige Aufbauten mit der Finite-Elemente-Methode mit dem Programm COMSOL berechnet worden. Hierzu wurde ein periodischer Ausschnitt des Aufbaus modelliert, bei dem das Material vor schallhartem Abschluss angeordnet ist und auf der Schalleinfallsseite an eine Luftschicht grenzt (Abbildung 2). Diese ist mit einer perfekt angepassten Schicht (PML) abgeschlossen.

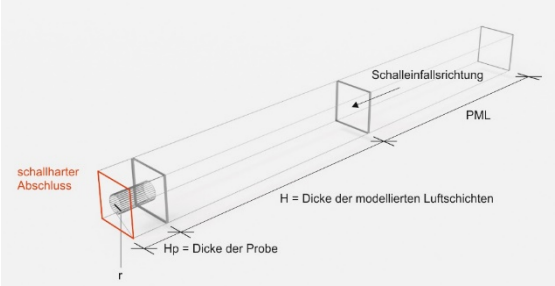

Abbildung 2: Modell für die Finite-Elemente-Berechnungen einer Probe mit kreiszylindrischer Mesopore.

Auswahl eines Ersatzmaterials

Da zunächst nicht genügend pilzbasierte Materialien mit reproduzierbaren Eigenschaften zur Verfügung standen, wurde auf ein Ersatzmaterial zurückgegriffen. Zur Auswahl wurden die Eingangsdaten des Johnson-Champoux-Allard-Modells [3], [4] des Pilzmaterials und faserbasierter Produkte mit hohem Strömungswiderstand ermittelt. Dazu wurde die offenzellige Porosität ϕ mit einem Luftpyknometer direkt gemessen und der längenbezogene Strömungswiderstand σ aus einer Transmissionsmessung im Impedanzrohr bestimmt. Für eine homogene Probe, die als äquivalentes Fluid betrachtet werden kann, liefert diese Messung eine frequenzabhängige effektive Dichte ρ, aus der mit einer Grenzwert-Betrachtung für die Wellenzahl ω gegen Null der Strömungswiderstand gewonnen werden kann [5]:

$$\sigma = -\frac{1}{\phi} \lim_{\omega \to 0} [Im(\omega\rho)] \,. \tag{4}$$

Die Tortuosität α_∞, die charakteristische viskose und thermische Länge Λ und Λ' wurden aus einer Anpassung an gemessene Wandimpedanzen abgeleitet. Auf dieser Grundlage wurde ein Ersatzmaterial aus einer Unterdeckenplatte aus epoxidgebundener Mineralfaser ausgewählt, wobei lediglich der 15 mm dicke, homogene Kern ohne Beschichtungen verwendet wurde. Die Eingangsdaten dieses Materials können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Eingangsdaten des Ersatzmaterials für das Johnson-Champoux-Allard-Modell

ϕ [-]	σ [kPa s/m²]	α_∞ [-]	Λ [µm]	Λ' [µm]
0,87	190	1,8	13	50

Die Übereinstimmung der damit berechneten und an homogenen Proben gemessenen Absorptionsspektren ist bei allen untersuchten Schichtdicken gut. Die Proben für die folgenden Untersuchungen zur Struktur der Mesoporen im Impedanzrohr wurden aufgebaut, indem 15 mm dicke Schichten gestapelt wurden, sodass sich Gesamtschichtdicken von 15, 30 und 45 mm ergaben.

Optimierung der Mesoporenstruktur

Der Einfluss der Geometrie der groben Mesoporen wurde mit Messungen am Ersatzmaterial im Impedanzrohr und Berechnungen mit dem analytischen Modell und der Finite-Elemente-Methode untersucht. Dazu wurden die Mesoporen mechanisch in 15 mm dicke Schichten gebohrt. Mit entsprechenden Schichtungen wurden Gradienten erzeugt, die bei den Pilzmaterialien durch einen 3D-Pastendruck erzeugt werden sollen. Gezeigt sind durchgehend Ergebnisse für den senkrechten Schalleinfall. Die Messergebnisse wurden im Impedanzrohr mit 30 mm Durchmesser ermittelt.

Zunächst konnten die Ergebnisse für Gradienten in der Literatur [6] bestätigt werden. Dazu wurden aus drei Schichten Proben mit einer Mesoporosität ϕ_p von 0,06 aufgebaut. Die Lochradien betrugen 4,9, 3,4 und 1,9 mm, der Lochabstand auf quadratischem Raster 26,6 mm. Mit den Schichtungen wurden Gradienten mit zu- und abnehmenden Mesoporenradien mit 45 mm Schichtdicke realisiert (Abbildung 3).

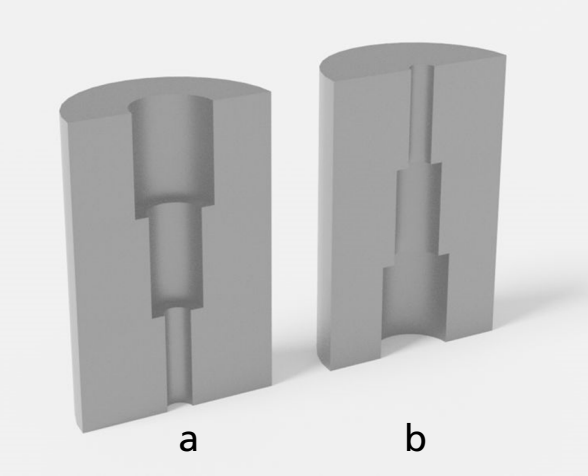

Abbildung 3: Schematische Darstellung der Proben mit sich in Schallausbreitungsrichtung verengenden (a) und aufweitenden Mesoporen (b) mit 45 mm Schichtdicke.

Abbildung 4 zeigt die gemessenen und berechneten Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall. Die Übereinstimmung der gemessenen und mit FEM berechneten Absorptionsspektren war bei allen untersuchten Varianten gut.

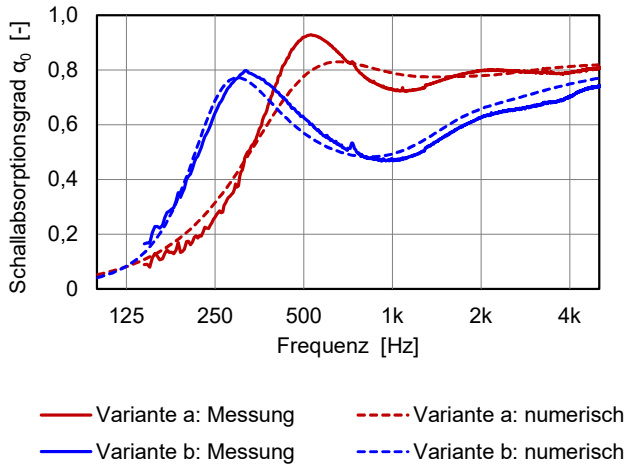

Abbildung 4: Gemessene und mit FEM berechnete Absorptionsspektren der Varianten mit Gradienten gemäß Abbildung 3.

In Abbildung 5 sind Verteilungen des Schalldruckpegels in den Materialen bei 500 Hz gezeigt. Deutlich erkennbar ist der Effekt der Druckdiffusion in der Variante mit sich verengenden Mesoporen. Auch am schallharten Abschluss werden hier hohe Schalldrücke in der mesoporösen Phase erreicht, die sich in der mikroporösen Phase fortsetzen. Die damit einhergehenden Schnellen in der mikroporösen Phase führen zu der hohen Dämpfung in dem eigentlich überdämpften mikroporösen Material, welche die Variante mit der sich aufweitenden Mesoporen-Geometrie nicht zeigt. Darüber hinaus konnte bestätigt werden, dass sich verengende Mesoporen Vorteile gegenüber Varianten ohne Gradienten aufweisen.

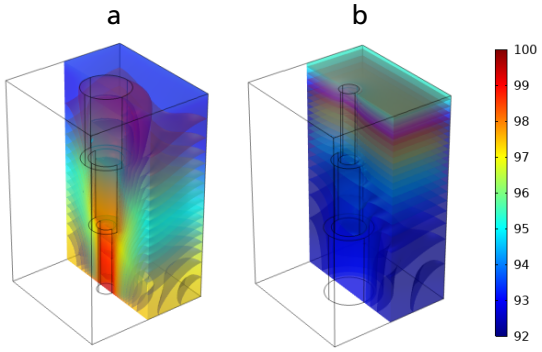

Abbildung 5: Verteilungen des berechneten Schalldruckpegels in dB bei 500 Hz für die Varianten mit Gradienten gemäß Abbildung 3.

Im Hinblick auf die Realisierbarkeit mit einem 3D-Verfahren ergab sich ein günstiges Ergebnis bei der Aufteilung der Mesoporen in mehrere feinere Poren mit gleicher Gesamtporosität. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel, bei dem die Mesoporen im oben gezeigten Aufbau jeweils in 5 feinere Poren gleicher Porosität unterteilt wurden. Die Porenradien betragen dann 2,2, 1,5 und 0,8 mm. Abbildung 7 zeigt den Vergleich mit der Berechnung nach dem Finite-Elemente-Verfahren. Entscheidend ist, dass die Absorptionsspektren beider Varianten vergleichbar sind und damit großes Potential für die Gestaltung der Porengrößen der Mesoporen besteht.

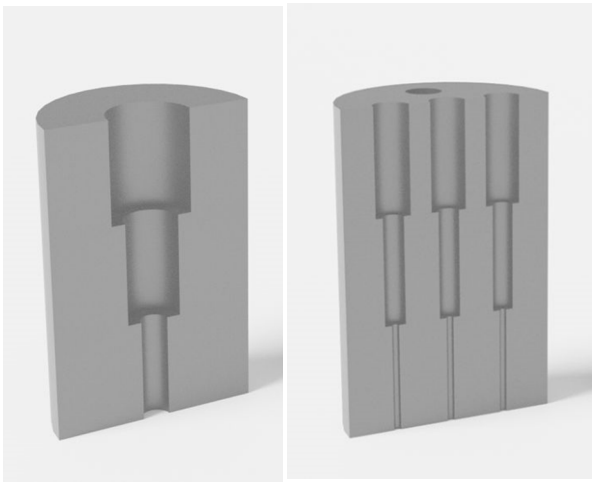

Abbildung 6: Schematische Darstellung der Proben gleicher Porosität mit sich in Schallausbreitungsrichtung verengenden groben und feinen Mesoporen bei 45 mm Schichtdicke.

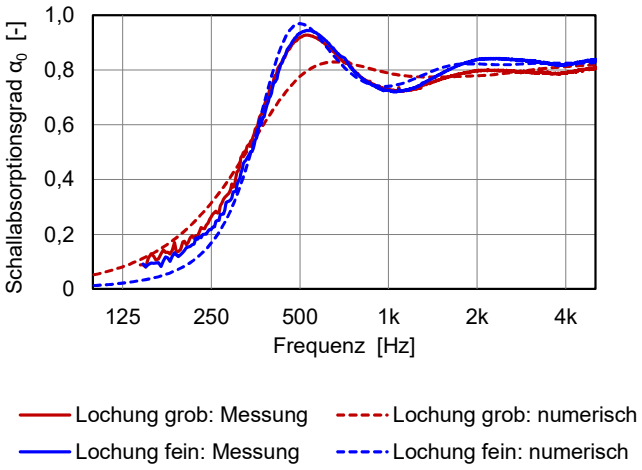

Abbildung 7: Gemessene und mit FEM berechnete Absorptionsspektren der Varianten mit Gradienten gemäß Abbildung 6.

Die Schalldruckpegelverteilungen der FEM-Berechnungen beider Varianten in Abbildung 8 zeigen wenig Ähnlichkeit. Dennoch sind die erzielten Dämpfungen vergleichbar.

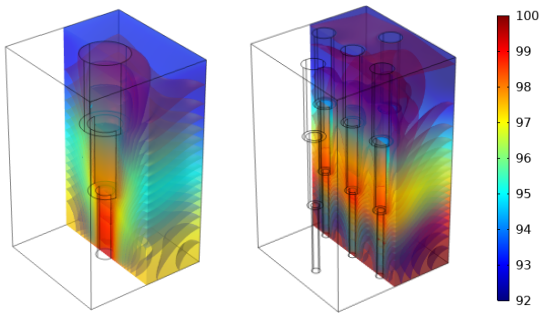

Abbildung 8: Verteilungen des berechneten Schalldruckpegels in dB bei 500 Hz für die Varianten mit groben und feinen Mesoporen bei gleicher Gesamtporosität gemäß Abbildung 6.

Abschließend wurde für die Variante mit den feinen Mesoporen in Abbildung 6 eine Variante mit einer 1,5 mm dicken raumseitigen Abdeckung aus demselben Material untersucht. Wie Abbildung 9 entnommen werden kann, reduziert sich das Absorptionsvermögen dadurch um ca. 10 Prozent. Der Vergleich mit der Berechnung mittels Transfermatrix-Methode zeigt, dass die analytische Methode auch bei komplexeren Schichtungen die Verhältnisse für Entwicklungszwecke ausreichend genau wiedergibt.

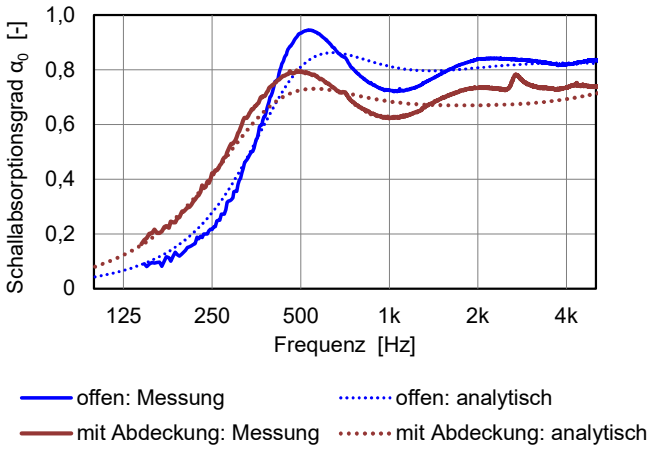

Abbildung 9: Gemessene und analytisch berechnete Absorptionsspektren der Varianten mit und ohne Abdeckung.

In Abbildung 10 sind die Varianten mit am Markt verfügbaren Schäumen verglichen. Auch die pilzbasierten, doppelporösen Varianten zeigen eine vergleichbare Verschiebung des ersten Absorptionsmaximums zu tiefen Frequenzen wie der Glasschaum aus gesintertem Blähglasgranulat und erreichen ein gleichwertiges Absorptionsvermögen. Zusätzlich ist das gemessene Spektrum des Melaminharzschaums Basotect® eingetragen, der bei gleicher Schichtdicke sein erstes Absorptionsmaximum erst bei ca. 1,6 kHz erreicht.

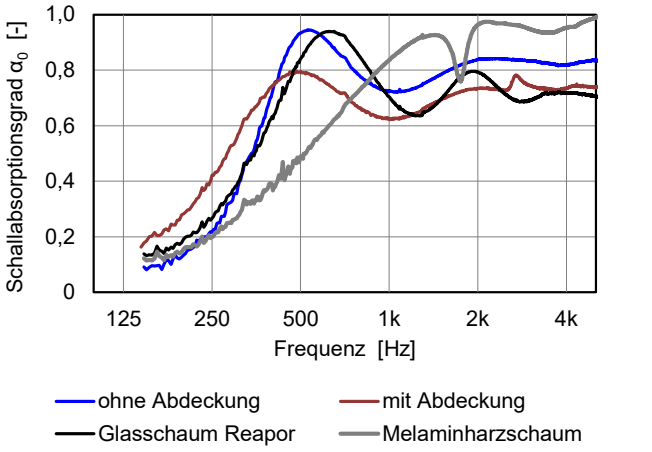

Abbildung 10 Gemessene Absorptionsspektren der Variante mit und ohne Abdeckung im Vergleich zu dem gesinterten Glasschaum Reapor® und Melaminharzschaum bei jeweils 45 mm Schichtdicke.

Zusammenfassung

Mit pilzbasierten Materialien lassen sich Produkte mit hohem Anteil rezyklierter Komponenten produzieren. Das Materialsystem auf rein organischer Basis ist zudem kreislaufgerecht. Anhand eines Ersatzmaterials wurde das Potential für doppelporöse Porenmorphologien ausgelotet. Einige der Varianten erreichen das Absorptionsvermögen marktüblicher Produkte und erzielen die angestrebte Verschiebung des ersten Absorptionsmaximums zu tiefen Frequenzen im Vergleich zu einem gleich dicken, gut angepassten Faserabsorber. Dabei haben sich sowohl analytische Berechnungsmodelle auf Basis der Transfermatrix-Methode als auch Finite-Elemente-Berechnungen als geeignet erwiesen.

Wesentlich für die Umsetzung im 3D-Pastendruck sind die akustisch gleichwertigen Ergebnisse mit variierten Größen der groben Mesoporen, da sich kleine Poren mit den Substratpasten kaum realisieren lassen. Außerdem erlauben raumseitig vollständig geschlossene Abdeckungen aus porösem Material auch gestalterisch ansprechende Lösungen

Danksagung

Die Ergebnisse wurden in einem Vorhaben erarbeitet, das durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Bundestages gefördert wird. Die COMSOL-Berechnungen wurden von Yohko Aoki, Ph.D. am Fraunhofer IBP durchgeführt.

Literatur

[1] Olny, X., Boutin, C.: Acoustic wave propagation in double porosity media. J. Acoust. Soc. Am. 114 (2003), 73-89

[2] Sgard, F. et al.: On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials. Applied Acoustics 66 (2005), 625-651

[3] Johnson, D. L.; Koplik, J.; Dashen, R.: Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. J. Fluid Mechanics 176 (1987), 379-402

[4] Champoux, Y.; Allard, J. F.: Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. Journal of Applied Physics 70 (1991), 1975-1979

[5] Doutres, O. et al.: Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. Applied Acoustics 71 (2010), 506-509

[6] Olny, X; Sgard, Franck; Boutin, C.: Practical aspects of building absorbing materials including double porosity media. ICA. (2004), 1457-1460