

Roman Wack

Entwicklung mehrphasig-poröser Schallabsorbermaterialien durch Mikrostruktursynthese

F 3027

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-7388-0040-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Entwicklung mehrphasig-poröser Schallabsorbermaterialien durch Mikrostruktursynthese

Abschlussbericht

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert.
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-14.13)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Der Bericht umfasst

37 Seiten Text

6 Tabellen

31 Abbildungen

Roman Wack

Stuttgart, 27. Februar 2017

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Theoretische Modellierung	4
2.1	Absorbermodell für homogene Phase	4
2.2	Kopplung der einzelnen porösen Phasen	5
3	Aufbau und Messung von Modellsubstanzen	8
3.1	Poröse Schichten mit regelmäßigen Lochungen	8
3.2	Lose Schüttungen von Granulaten	15
4	Rechnerische Parametervariation Modellsubstanzen	21
4.1	Einfluss der mikroporösen Phase	22
4.2	Einfluss der mesoporösen Phase	26
5	Bindemittel-Systeme	27
6	Herstellungstoleranzen	33
6.1	Unregelmäßige Verteilung der Granulatdurchmesser	33
6.2	Kapselung der Granulate	33
7	Praxistauglichkeit	34
7.1	Absorptionsvermögen bei diffusem Schalleinfall	34
7.2	Übertragbarkeit auf andere Materialsysteme und Branchen	34
8	Zusammenfassung	35
9	Literatur	37

1 Einleitung

Das Absorptionsspektrum von Schichten aus offenzellig porösen Materialien wird entscheidend von deren Schichtdicke bestimmt. Der entscheidende Dämpfungsmechanismus bei Materialien mit einfacher Porenstruktur und starrem Skelett ist die viskose Reibung der Luft im Porenvolumen. Prinzipbedingt sind dicke Aufbauten für die Bedämpfung tieferer Frequenzen erforderlich. Aus Faustformeln für die Auslegung etwa von Faserabsorbern [1] ergibt sich, dass für eine Verschiebung des ersten Absorptionsmaximums um eine Oktave zu tieferen Frequenzen bei optimalem Strömungswiderstand eine Verdopplung der Schichtdicke notwendig ist.

Die Nachfrage nach schlanken Schallabsorbern hat sich in jüngerer Zeit deutlich erhöht. Im Büro- und Verwaltungsbau lässt sich durch den inzwischen weit verbreiteten Einsatz von bauteilaktivierten Geschossdecken eine adäquate raumakustische Behandlung mit abgehängten Akustik-Unterdecken nur noch schwer umsetzen. Praktisch alle alternativen Absorberprodukte, wie Akustiksegel, absorbierende Schirmwände und Wandabsorber sind aufgrund ihrer begrenzten Schichtdicke als alleinige Maßnahme nicht in der Lage eine Bedämpfung nach den Regeln der Technik zu liefern. Ähnliche Schwierigkeiten hat die Alternative der Absorberstreifen-Decke [2]. Bei der baupraktischen Umsetzung werden inzwischen Absorberstreifen-Dicken von ca. 30 mm bevorzugt. Das Absorptionsspektrum verschiebt sich dadurch aus dem für Sprache relevanten Frequenzbereich (Bild 1). Der einzig mögliche Ausweg ist eine Ertüchtigung der porösen Absorbermaterialien.

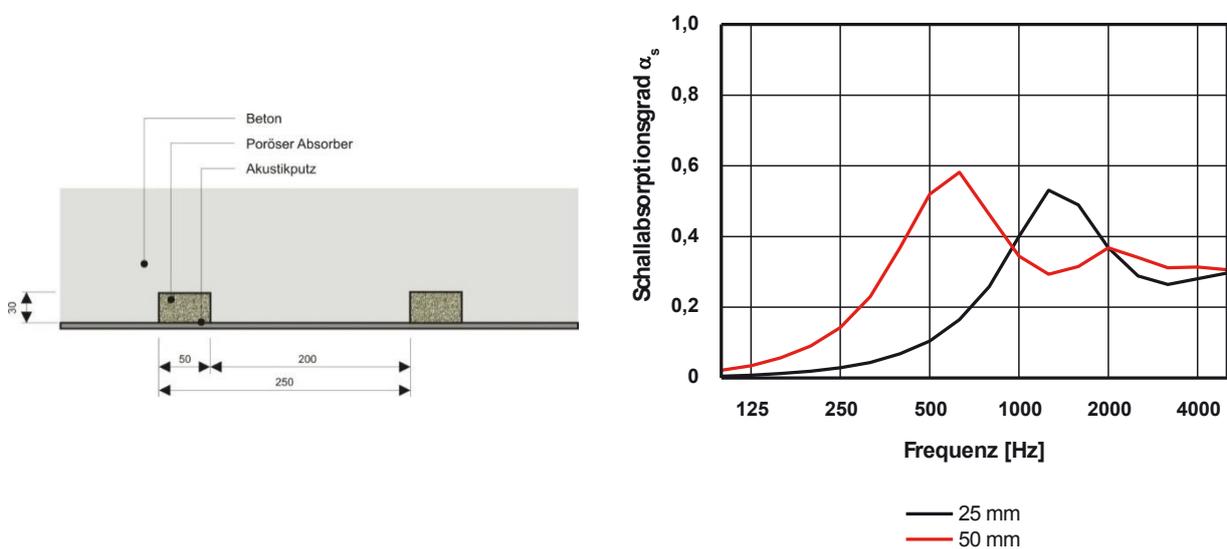


Bild 1: Aufbau einer Absorberstreifenanordnung in einer bauteilaktivierten Decke (links) und beispielhafte Absorptionsspektren bei diffusem Schalleinfall bei unterschiedlichen Schichtdicken der Absorberstreifen (rechts).

Ziel des Vorhabens war es daher, ein poröses Absorbermaterial zu entwickeln, das bei geringen Schichtdicken auch bei tieferen Frequenzen adäquat wirkt. Das Material soll dabei eine Verschiebung des ersten Absorptionsmaximums um eine Oktave zu tieferen Frequenzen im Vergleich zu einer gleich dicken, gut angepassten Mineralfaserschicht aufweisen, d.h. eine Halbierung der Schichtdicke bei gleichbleibendem Absorptionsgrad erlauben.

Erreicht werden sollte diese Verbesserung durch ein Porengefüge mit mehr als einer porösen Phase. Zweiphasige Systeme (double porosity materials) haben sich in jüngeren Untersuchungen bereits als vielversprechend herausgestellt [3]. Der Ansatz ist durch seine Materialunabhängigkeit besonders praktikabel im Bauwesen. Es kann auf eingeführten Materialsystemen aufgebaut werden, welche die brandschutztechnischen und wirtschaftlichen Anforderungen erfüllen.

Der Bericht orientiert sich grob an den Arbeitspaketen des Zuwendungsantrags [4].

2 Theoretische Modellierung

2.1 Absorbermodell für homogene Phase

Das Konzept zur theoretischen Beschreibung sieht zunächst eine separate Betrachtung der einzelnen Materialphasen vor. Zur Beschreibung der Schallausbreitung in einer solchen Phase wird das Absorbermodell nach Johnson-Champoux-Allard benutzt [5, 6]. Das Modell hat fünf Eingangsparameter, deren messtechnische Bestimmung zum Teil schwierig ist:

- σ : längenbezogener Strömungswiderstand
- ϕ : offene Volumenporosität
- α_∞ : Tortuosität
- Λ : charakteristische viskose Länge
- Λ' : charakteristische thermische Länge

Das Modell beschreibt die viskosen Verluste über

$$\alpha = \alpha_\infty \left(1 - \frac{\eta j \phi}{\rho \alpha_\infty k_0 \omega} \sqrt{1 + \frac{4 k_0^2 \alpha_\infty^2 j \omega \rho}{\Lambda^2 \phi^2 \eta}} \right)^{-1} \quad (1)$$

Darin sind ω die Kreisfrequenz, ρ die Dichte der Luft und c die Schallgeschwindigkeit in Luft. η ist die dynamische Viskosität der Luft, woraus sich die viskose Permeabilität $k_0 = \eta/\sigma$ ergibt. Die kalorischen Verluste werden über

$$\beta = \kappa - (\kappa - 1) \left(1 - \frac{\eta j \phi}{\rho k_0' \text{Pr} \omega} \sqrt{1 + \frac{4 k_0'^2 \rho j \omega \text{Pr}}{\Lambda'^2 \phi^2 \eta}} \right)^{-1} \quad (2)$$

ausgedrückt, mit $k_0' = \phi \Lambda'^2/8$, dem Adiabatenexponenten κ und der Prandtl-Zahl Pr. Die Wellenzahl und die charakteristische Impedanz ergeben sich dann zu

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\alpha\beta} \qquad Z = \frac{\rho c}{\phi} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (3)$$

Der entscheidende Vorteil liegt nun darin, dass nicht die Schallausbreitung in einem repräsentativen mehrfach porösen Elementvolumen REV_{db} direkt berechnet bzw. simuliert werden muss, sondern dass zunächst nur die Eingangsparameter des Absorbermodells für die einzelnen Phasen berechnet werden müssen. Dies soll aus Computertomographien bzw. aus synthetisierten Geometrien mit dem Programm GeoDict [7] erfolgen. In Bild 2 sind solche Elementvolumen beispielhaft für zweifach poröse gelochte Platten, wie in Abschnitt 4 näher untersucht, gezeigt. Im Folgenden werden die in der Literatur üblichen Indizes für die einzelnen Phasen benutzt: db für die doppelt-poröse Phase, p für die Phase mit den größeren Porendurchmessern (in der Literatur mesoporös) und m für die Phase mit den kleineren Durchmessern (mikroporös).

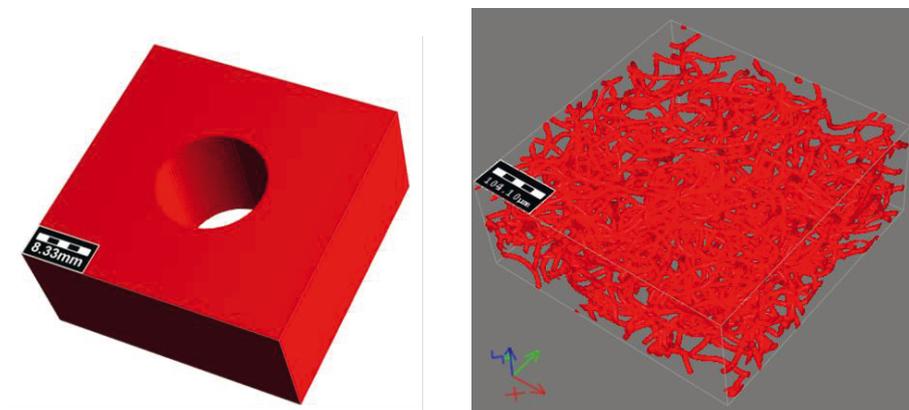


Bild 2:
Beispielhafte Geometrien der Elementvolumen für zweifach poröse Lochplatten zur Simulation der Eingangsdaten des Absorbermodells in GeoDict.

Das Elementvolumen der mesoporösen Phase REV_p (im Bild 2 links) wird dabei mit massivem Material modelliert, in dem keine Schallausbreitung stattfindet. Die mikroporöse Phase REV_m (Bild 2 rechts) wird als quaderförmiger Ausschnitt der Mikrogeometrie beschrieben. Die Größe und Auflösung der jeweiligen Elementvolumen bleiben dabei in einem rechentechnisch praktikablen Rahmen.

2.2 Kopplung der einzelnen porösen Phasen

Die dynamische Permeabilität des doppelt-porösen Mediums wird nach [8] beschrieben mit (Indizes: db: doppelt-porös, p: mesoporös, m: mikroporös):

$$k_{db} = k_p + (1 - \phi)k_m \quad (4)$$

Daraus ergibt sich die effektive Dichte zu

$$\rho_{db} = \frac{\eta}{j\omega k_{db}} \quad (5)$$

Das Kompressionsmodul ist (wieder mit den jeweiligen Indizes) beschrieben durch

$$K_{db} = \left(\frac{1}{K_p} + \frac{1-\phi_p}{K_m} F_d \left(\frac{P_0}{\phi_m} \frac{\omega}{K_m} \right) \right)^{-1} . \quad (6)$$

Darin ist die Kopplungsfunktion F_d das Verhältnis aus mittlerem Druck in der mikroporösen Phase zum mittleren Druck in der mesoporösen Phase. Analog zu Abschnitt 2.1 ergibt sich die Wellenzahl und charakteristische Impedanz zu

$$k = \omega \sqrt{\frac{\rho_{db}}{K_{db}}} \quad Z = \sqrt{\rho_{db} K_{db}} . \quad (7)$$

Für ein zweifach-poröses Medium können entsprechend der Permeabilität der einzelnen Phasen zwei Bereiche unterschieden werden: Medien mit einem geringen und einem hohen Permeabilitätskontrast. Entscheidend sind die charakteristischen Dimensionen der beiden Phasen l_p und l_m . l_p ist die charakteristische Länge der mesoporösen Phase, bei granularen Medien entspricht dies der Korngröße. Entsprechend ist l_m die charakteristische Länge der mikroporösen Phase und entspricht dem Porendurchmesser. Bei einem hohen Permeabilitätskontrast, d.h. $l_m / l_p \geq 10^{-3}$ vereinfacht sich Gleichung (4) zu

$$k_{db} \approx k_p \quad (8)$$

Die viskose Permeabilität, und damit auch der makroskopische Strömungswiderstand, wird also praktisch nur noch durch die mesoporöse Phase bestimmt. Bei geringen Permeabilitätskontrast, d. h. bei $l_m / l_p \geq 10^{-1}$, wird F_d in Gleichung (6) rein reel gleich 1.

Für die Schallausbreitung in dem gesamten mehrfach porösen System werden abschließend Kopplungsfunktionen zwischen den einzelnen Phasen benötigt.

Die Kopplungsfunktion ergibt sich zu

$$F_d = 1 - j \frac{\omega}{\omega_d} \frac{D(\omega)}{D(0)} . \quad (9)$$

Darin ist

$$\omega_d = \frac{(1-\phi_p)P_0}{\phi_m \sigma_m D(0)} \quad (10)$$

eine charakteristische Kreisfrequenz, bei der die Wellenlänge in der mikroporösen Phase gleich ist mit der charakteristischen Abmessung der Mesostruktur (bei Granulaten die Korngröße). P_0 ist der statische Druck der Luft. $D(\omega)$ ergibt sich mit dem Formfaktor M_d [9] zu

$$D(\omega) = \frac{D(0)}{j\frac{\omega}{\omega_d} + \left(1 + j\frac{M_d}{2}\frac{\omega}{\omega_d}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

Der Ausdruck $D(0)$ kann numerisch aus einer Strömungssimulation gewonnen werden. Für das Beispiel kreiszylindrischer Bohrungen auf regelmäßigem quadratischem Raster wurde dies mit entsprechenden GeoDict-Simulationen bestätigt. Hierfür kann $D(0)$ elementar angegeben werden [8, 9]:

$$D(0) = \frac{L_c^2}{4\pi} \left(\ln\left(\frac{1}{\phi_p}\right) - \frac{3}{2} + 2\phi_p - \frac{\phi_p^2}{2} \right) \quad (12)$$

Die entsprechende Simulation benutzt ein invertiertes Elementvolumen der mesoporösen Phase, wie in Bild 3 gezeigt. Die mesoporöse Phase (grau) ist hier als massiv modelliert. Die Simulation des Strömungsfelds in mikroporöser Phase liefert nach Integration über das Strömungsprofil die viskose Permeabilität k^* . $D(0)$ aus Gleichung (12) ergibt sich dann zu $D(0) = \eta / k^*$.

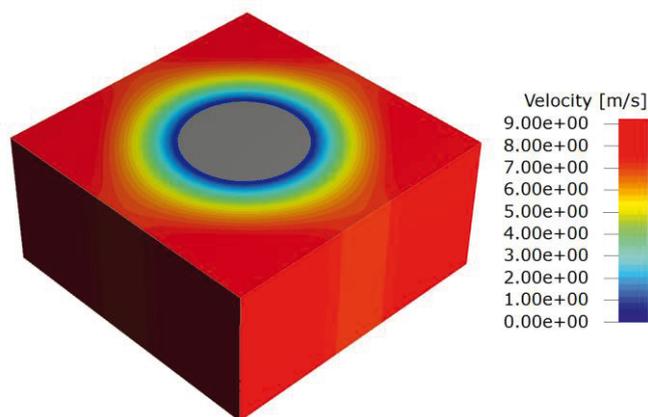


Bild 3:
Invertiertes Elementvolumen der mesoporösen Phase einer zweifach porösen Lochplatte mit simuliertem Strömungsfeld zur Bestimmung der Kopplungsfunktion F_d .

Auch für granulare Medien kann die Kopplungsfunktion näherungsweise analytisch angegeben werden. Nach [10] ergibt sich für monodisperse Kugelschüttungen mit Kugelradius r_p :

$$F_d = \frac{3}{z^2} (1 - z \cot z) \quad (13)$$

mit

$$z = \sqrt{-j} r_p \left(\sqrt{\frac{P_0 \eta}{\phi_m \sigma_m \omega}} \right)^{-1} \quad (14)$$

Dabei wird davon ausgegangen, dass die Druckdiffusion in die mikroporöse Phase nur lateral zur Schallausbreitungsrichtung erfolgt.

Wie die Vergleiche von Messung und Rechnung an Modellsubstanzen in Abschnitt 3 zeigen ist die rechnerische Modellierung auch mit den vereinfachten analytischen Lösungen für die weitere Entwicklung ausreichend. Adäquate Werkzeuge zur Simulation sind somit vorhanden.

3 Aufbau und Messung von Modellsubstanzen

Ziel dieses Arbeitspakets war der Aufbau gut kontrollierbarer zweifach-poröser Proben für Messungen des Absorptionsgrads im Impedanzrohr [11] und des Strömungswiderstandes [12]. Zur Erzeugung der Mesoporosität kamen zwei Varianten zum Einsatz: zylindrische Lochungen auf regelmäßigem Raster (Abschnitt 3.1) in homogener poröser Platte und lose Schüttungen poröser Granulate (Abschnitt 3.2).

Die Schichtdicken sind hier noch nicht im Hinblick auf die Anwendungen gewählt, sondern so, dass die Messbereiche der Messgeräte optimal genutzt werden. Bei den Granulaten wurden 40 und 80 mm dicke Schüttungen untersucht, um die Ergebnisse vorhergehender Untersuchungen [13] an massiven Granulaten direkt vergleichen zu können.

3.1 Poröse Schichten mit regelmäßigen Lochungen

Die Messserie an gelochten porösen Platten dient vorwiegend der Überprüfung des Rechenmodells. In Platten aus porösen Absorbermaterialien sind dazu zylindrische Löcher auf einem periodischen Raster gebohrt worden. Die Bohrungen erfolgten jeweils senkrecht zur Plattenoberfläche. Bild 4 zeigt beispielhaft den Einbau einer gelochten Trittschalldämmplatte aus Mineralfasern im Kundt'schen Rohr.

Die zylindrische Lochung erlaubt eine analytische Darstellung der Schallausbreitung in der mesoporösen Phase und der Druckdiffusionsfunktion in die mikroporöse Phase. Wo möglich, wurde zuvor das ungelochte Material vermessen und die Eingangsdaten für das Johnson-Champoux-Allard-Modell indirekt bestimmt, sodass auch die Schallausbreitung in der mikroporösen Phase beschrieben werden kann.

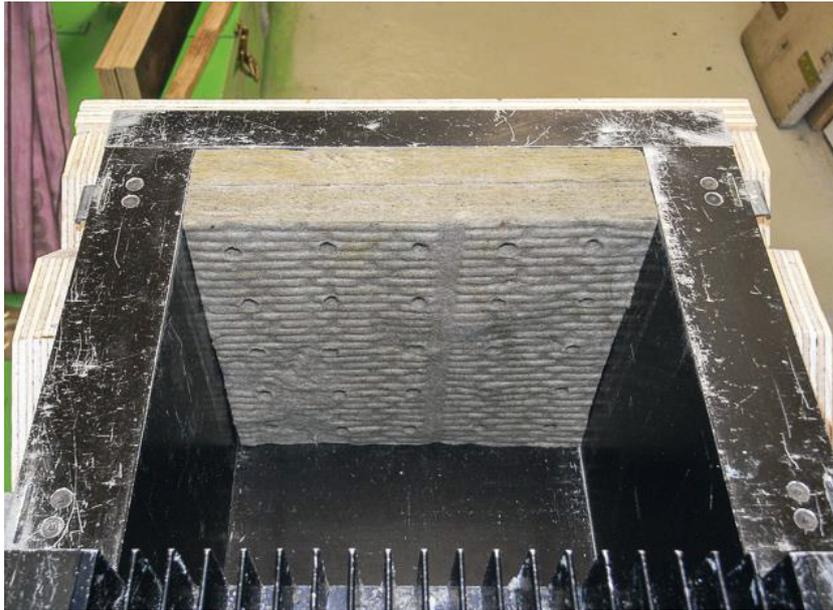


Bild 4:
Einbau einer 45 mm dicken Mineralfaserschicht im Kundt'schen Rohr mit kreiszylindrischen Löchern auf quadratischem Lochraster.

Im Folgenden sind die Ergebnisse an Aufbauten mit sehr unterschiedlicher Mikrogeometrie aufgeführt: Zwei Mineralfaserplatten sowie eine Anordnung aus Hohlfasern, die für die Filtration eingesetzt werden. In Tabelle 1 sind die Eingangsdaten für das Absorbermodell der Mineralfaser-Materialien aufgeführt. Die Strömungswiderstände sind direkt gemessen. Die restlichen Parameter wurden indirekt so bestimmt, dass sich die geringsten Abweichungen zwischen den berechneten Spektren und den Impedanzrohrmessungen ergeben.

Tabelle 1:
Eingangsdaten für das Johnson-Champoux-Allard-Modell der Mineralfaser-Materialien.

Material	Strömungswiderstand σ [kPa s/m ²]	Porosität ϕ [-]	Tortuosität α_{∞} [-]	viskose char. Länge Λ [m]	thermische char. Länge Λ' [m]
Trittschall-Dämmplatte	100,5	0,85	1,7	15·10 ⁻⁶	20·10 ⁻⁶
Unterdeckenplatte	600	0,8	1,7	100·10 ⁻⁶	150·10 ⁻⁶

Die Lochraster und Durchmesser der Lochungen wurden variiert. Bild 5 zeigt die Absorptionsspektren der 40 mm dicken Trittschall-Dämmplatte mit unterschiedlich weiten Löchern auf einem 40 mm breiten quadratischen Raster.

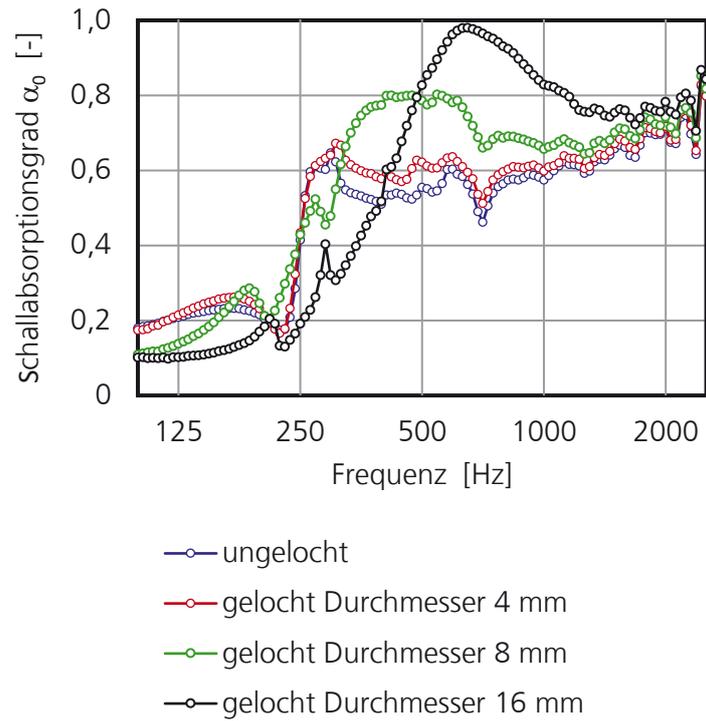


Bild 5:
Gemessene Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall einer 45 mm dicken Mineralfaserschicht ungelocht und mit Kreislochungen unterschiedlicher Durchmesser.

Die Übereinstimmung mit der analytischen Rechnung ist gut, wie Bild 6 entnommen werden kann.

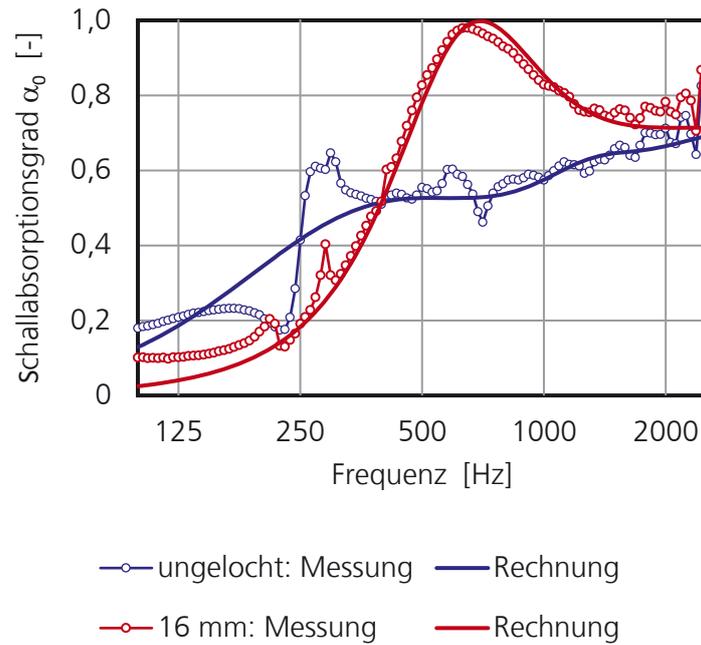


Bild 6:
Gemessene und berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall einer 45 mm dicken Mineralfaserschicht ungelocht und mit Kreislochung mit 16 mm Durchmesser.

Für die Unterdeckenplatte sind in Bild 7 entsprechende Messungen mit variiertem Lochraster gezeigt. Auch für dieses Material ergibt sich eine gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung. In Bild 8 sind die entsprechenden Spektren beispielhaft für 4 mm weite Löcher in 10 mm Abstand eingetragen. Insgesamt wird die Modellierung der Lochplatten als ausreichend genau für eine Entwicklung eingestuft.

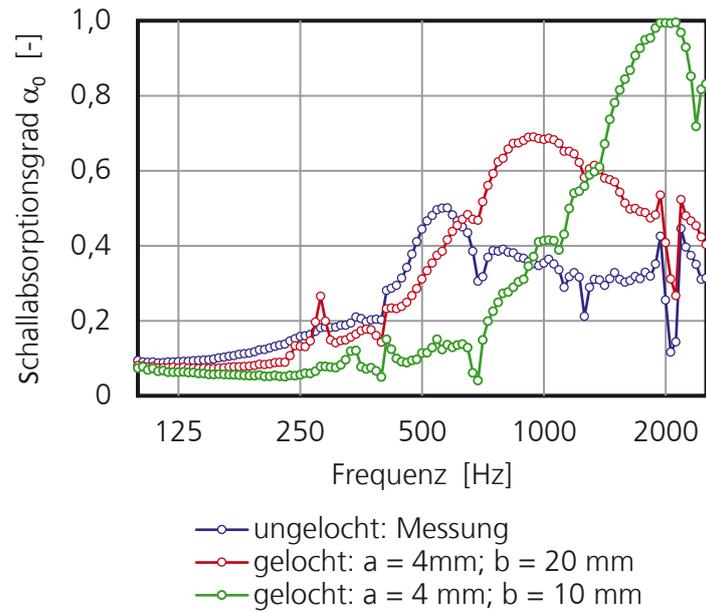


Bild 7:
Gemessene Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall einer 17 mm dicken Unterdeckenplatte ungelocht und mit Kreislochungen von 4 mm Durchmesser und unterschiedlichem quadratischen Lochraster mit Lochabstand b.

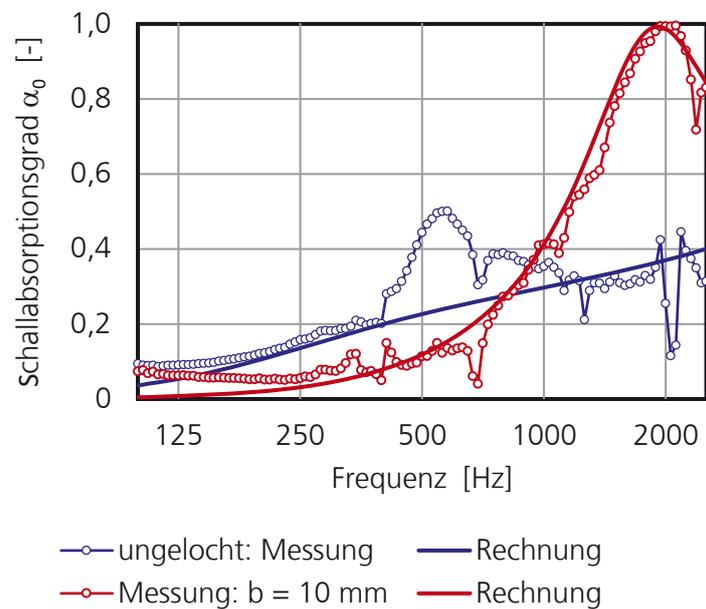


Bild 8:
Gemessene und berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall einer 17 mm dicken Unterdeckenplatte ungelocht und mit Kreislochung mit 4 mm Durchmesser.

In Bild 9 ist die Wirkung der Mehrfach-Porosität anhand berechneter Spektren in einem weiteren Frequenzbereich dargestellt. Die ungelochte 17 mm dicke Unterdeckenplatte (blaue Line) ist überdämpft und zeigt kein ausgeprägtes Absorptionsmaximum mehr. Ein gleich dicker Faserabsorber mit einem gut angepassten Strömungswiderstand hat ein erstes Maximum bei etwa 5 kHz. Eine massive Lochplatte (Lochdurchmesser 4 mm, Abstand 10 mm) hat eine $\lambda/4$ -Resonanz ebenfalls bei etwa 5 kHz. Der Strömungswiderstand der ungelochten Platte ist mit 315 Pa s/m^2 jedoch viel zu gering, um eine nennenswerte Absorption zu erzeugen. Bei der gelochten porösen Platte stellt sich das erste Maximum bereits bei ca. 2 kHz ein. Es ist bei gleicher Schichtdicke damit um mehr als eine Oktave zu tiefen Frequenzen verschoben.

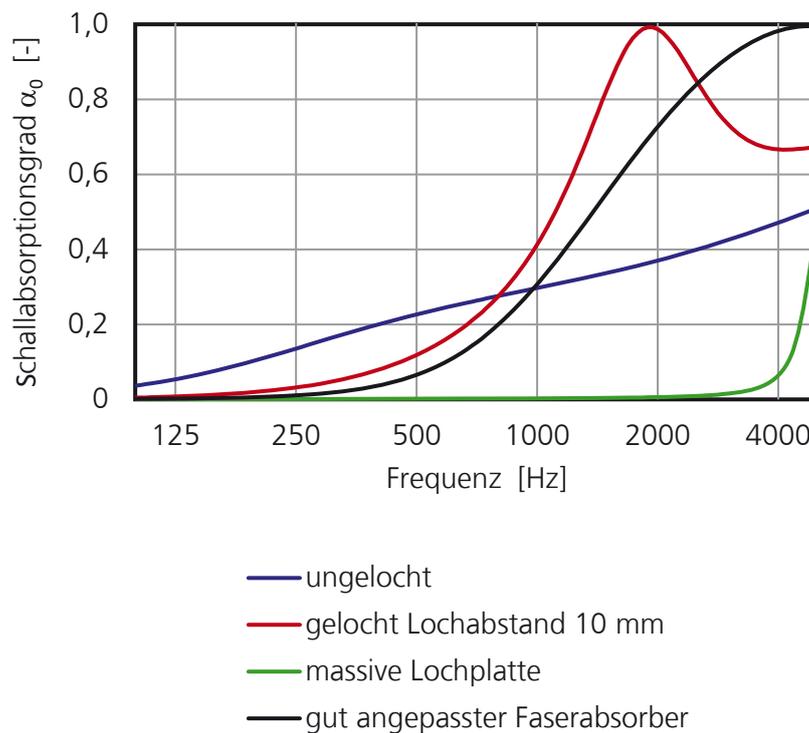


Bild 9: Berechneten Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von jeweils 17 mm dicken Schichten. Vergleich der ungelochten und gelochten Unterdeckenplatte mit einem gut angepassten Faserabsorber und einer massiven Lochplatte.

Die nachfolgende Untersuchung an Hohlfasern diente der Eingrenzung der kleinsten sinnvollen Porendurchmesser der mikroporösen Phase. Die betrachteten Hohlfasern werden als Filtrationsmedium eingesetzt. Die kleinsten Porendurchmesser sind durch eine REM-Aufnahme bestimmt worden und liegen bei 10 nm. Bild 10 zeigt die parallele Anordnung der Fasern bei der Messung. Auch hier ergeben sich zylindrische Mesoporen in Schallausbreitungsrichtung.

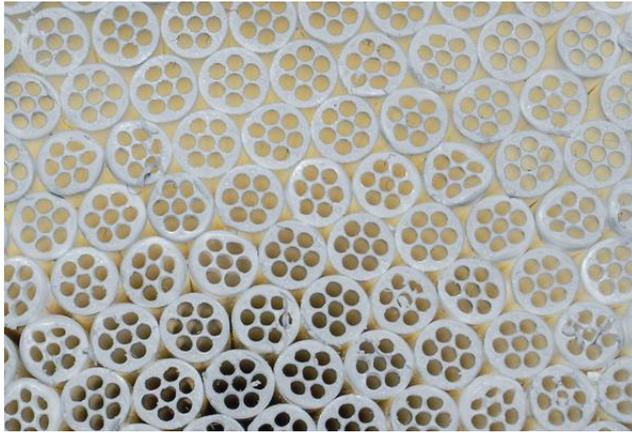


Bild 10:
Anordnung der Hohlfasern Multibore® bei der Messung im Kundt'schen Rohr.

Die Schallausbreitung in den Mesoporen wurde über eine GeoDict-Simulation bestimmt. Bild 11 zeigt das entsprechende Strömungsfeld in einem Geometrieausschnitt.

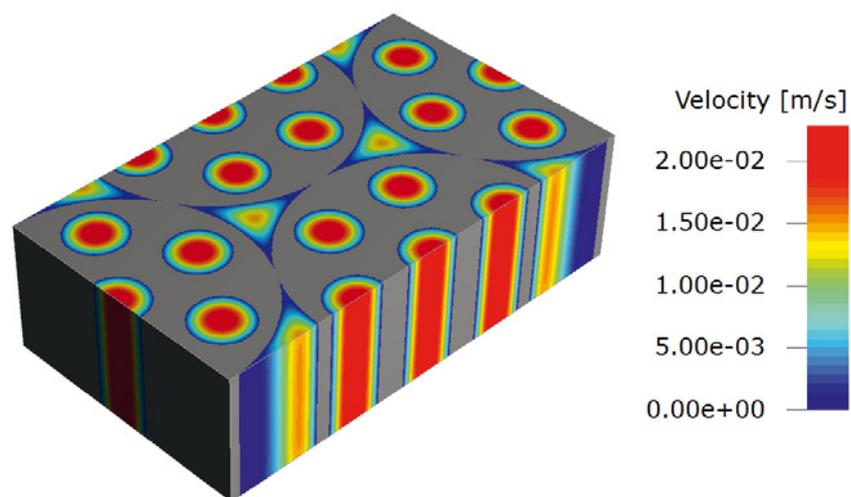


Bild 11:
Betrag der Strömungsgeschwindigkeit des berechneten Strömungsfeldes im Mesoporenvolumen der Hohlfaseranordnung.

Das berechnete Spektrum der massiven Hohlfaser ist in Bild 12 eingetragen. Der Vergleich mit der Messung der porierten Hohlfaser zeigt keine Verschiebung des Absorptionsmaximums, sodass davon ausgegangen werden muss, dass in den Mikroporen keine Schallausbreitung stattfindet. Porendurchmesser im Bereich von 10 nm scheinen für diese Anwendung demnach zu klein zu sein.

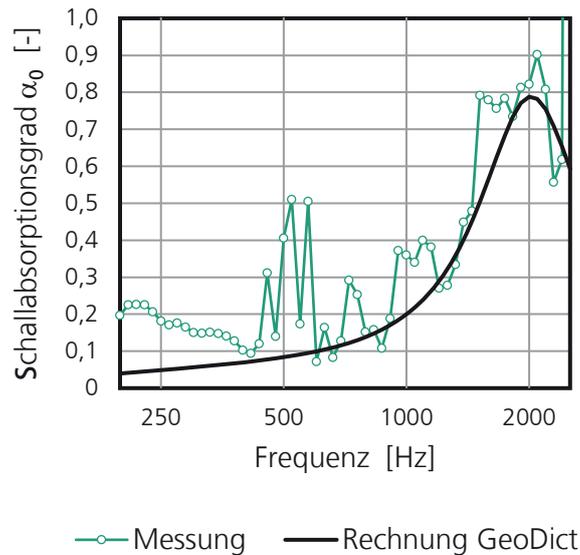


Bild 12:
Gemessene und berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall einer 40 mm dicken Anordnung aus Hohlfasern.

Abschließend werden die Untersuchungen an regelmäßig gelochten Platten als erfolgreich bewertet. Die rechnerische Modellierung erweist sich als ausreichend genau. Allerdings sind die Geometrien wenig praxistauglich.

3.2 Lose Schüttungen von Granulaten

Der zweite Teil der Untersuchungen an Modellsubstanzen beschäftigte sich mit dem Aufbau von Schallabsorbern aus losen Schüttungen massiver und porosierter Granulate. Im Vordergrund standen Schüttungen aus Blähglasgranulaten. Vom Industriepartner Liaver GmbH wurden Granulate in unterschiedlichen Kornfraktionen zur Verfügung gestellt. Diese wurden in loser Schüttung ohne Verdichtung vermessen. Im Folgenden werden die Untersuchungen an gesiebten Granulaten (Maschenweite 1,4-1,6 mm) näher dargestellt. Bei einer Korngröße von ca. 1,5 mm stellt sich in der mesoporösen Phase ein gut angepasster Strömungswiderstand ein [13].

Darüber hinaus sind die Unterschiede in der nicht verdichteten, annähernd monodispersen Schüttung mit hoher Sphärizität akustisch vernachlässigbar. In der folgenden Tabelle 2 sind die Mittelwerte für drei Schüttungen aus unterschiedlichen massiven und porosierten Granulaten mit vergleichbaren Korngrößen aufgeführt. Die gemessenen Strömungswiderstände variieren nicht sehr: 9,3 kPa s/m² bei massiven Kugeln, 10,9 kPa s/m² bei unregelmäßig gebrochenem massivem Glasgranulat und 10,9 kPa s/m² beim Liaver Blähglas-Granulat.

Tabelle 2:

Mittelwerte der gemessenen Strömungswiderstände und Geometrie Größen an losen Schüttungen unterschiedlicher Granulate vergleichbarer Korngröße.

Material	Strömungswiderstand [kPa s/m ²]	Korngröße [m]	Sphärizität [—]
Glaskugeln	9,3	1,53	0,96
gebrochenes massives Granulat	10,9	1,55	0,88
Blähglasgranulat	10,9	1,65	0,93

Die Granulate wurden in losen Schüttungen im Impedanzrohr gemessen. In Bild 13 sind die Spektren bei 40 mm Schichtdicke gezeigt. Die Verläufe sind konsistent. Allerdings weist der geringe Unterschied beim porosierten Granulat auf eine vergleichsweise geringe offenzellig angeschlossene Porosität in den Granulaten hin.

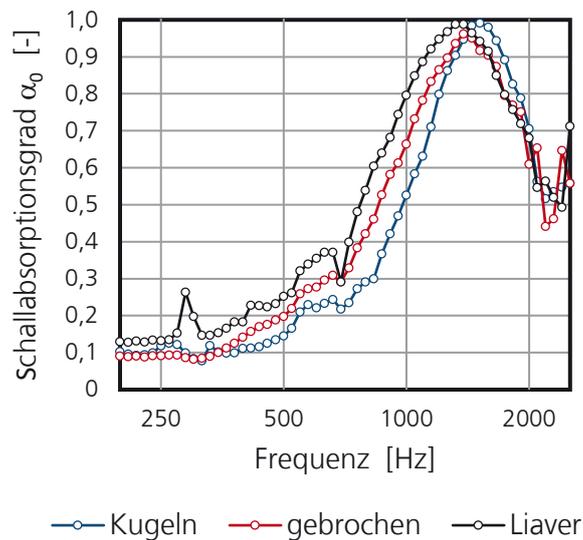


Bild 13:

Gemessene Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 40 mm dicken losen Schüttungen aus Glasgranulaten mit ca. 1,6 mm Korngröße. Vergleich massiver Kugeln, massivem gebrochenem Granulat und porosiertem Blähglasgranulat (Liaver).

Das Blähglas-Granulat wurde mit zwei Methoden vermessen: Mit einer Partikelanalyse an der Universität Stuttgart, und durch die Bildanalyse einer Computer-Tomografie. Bild 14 zeigt die entscheidenden Bearbeitungsschritte der Tomografie. Nach der Binarisierung wurde das innere Porenvolumen der Granulate geschlossen. Das ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Partikelseparation.

Die separierten Partikel wurden abschließend vermessen. Die analysierten Größen aus der Partikelanalyse und der Bildanalyse der μ CT stimmen gut überein.

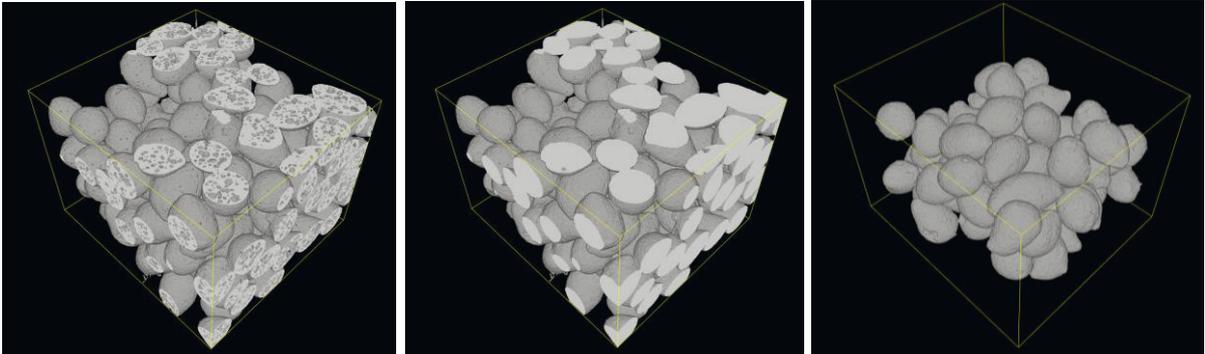


Bild 14:
Bildbearbeitungsschritte der Tomografie des Blähglasgranulats: Binarisierte Tomografie (links), Schließen des inneren Porenvolums (Mitte) und Partikelseparation sowie entfernte geschnittene Randpartikel (rechts).

Es wurde versucht, die offene Volumenporosität nach [14] zu bestimmen. Die Umsetzung des Verfahrens hat sich für lose Schüttungen jedoch als wenig praktikabel erwiesen. Selbst bei gut definierten, polierten Glaskugeln führte das Einbringen von Wasser bei Unterdruck zur Ausbildung größerer Zwischenräume ohne Partikel und zu entsprechenden Abweichungen der Messwerte von den erwarteten Werten für monodisperse Kugelpackungen.

Schüttungen der vermessenen Granulate wurden als massive Partikel modelliert und die Eingangsdaten für das Absorbermodell der mesoporösen Phase simuliert. Die Werte für die mikroporöse Phase wurden über eine Anpassung an die gemessenen Wandimpedanzen indirekt bestimmt (Tabelle 3).

Tabelle 3:
Eingangsdaten für das Johnson-Champoux-Allard-Modell der meso- und mikroporösen Phase der Schüttung aus Blähglasgranulat.

Phase	Strömungswiderstand σ [Pa s/m ²]	Porosität ϕ [-]	Tortuosität α_{∞} [-]	viskose char. Länge Λ [m]	thermische char. Länge Λ' [m]
mesoporös	9559	0,39	1,43	$267 \cdot 10^{-6}$	$318 \cdot 10^{-6}$
mikroporös	150000	0,18	1,5	$100 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6}$

In Bild 15 sind die entsprechenden berechneten Spektren mit den gemessenen verglichen. Für beide betrachteten Schichtdicken ergibt sich eine ausreichend gute Übereinstimmung.

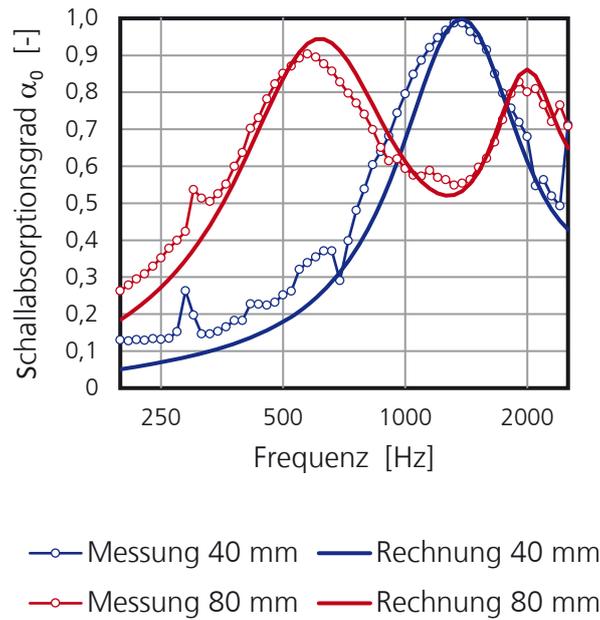


Bild 15:

Gemessene und berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 40 und 80 mm dicken losen Schüttungen aus Blähglasgranulat mit ca. 1,6 mm Korngröße.

Weitere Modellsubstanzen wurden aus losen Schüttungen grob kubischer Granulate aufgebaut. Dazu wurden vorher vermessene poröse Materialien in entsprechende Partikel geschnitten. Benutzt wurde neben dem Mineralwolle-Material (Unterdecken-Platte) aus Abschnitt 3.1 auch ein PU-Schaum. Die Ergebnisse der Messungen im Kundt'schen Rohr sind in Bild 16 für das Granulat aus Unterdeckenplatte und Bild 17 für die PU-Schaum-Variante eingetragen. Die Messungen wurden wieder jeweils für 40 und 80 mm Schichtdicke durchgeführt.

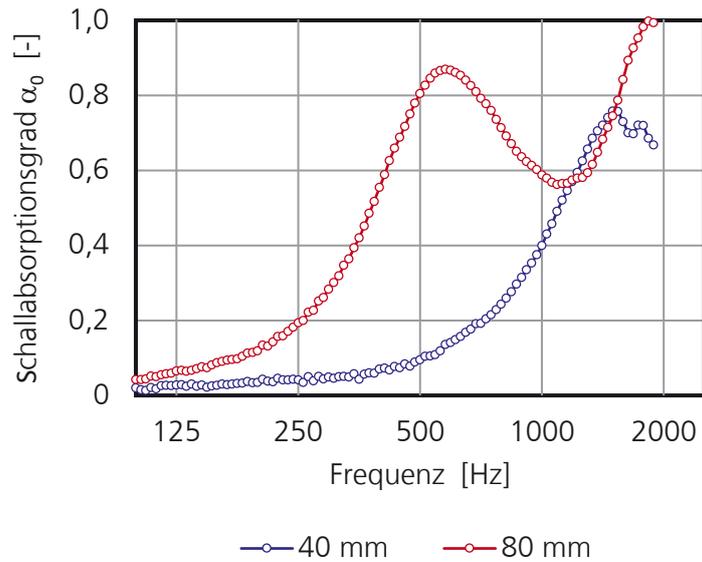


Bild 16:
Gemessene Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 40 und 80 mm dicken losen Schüttungen aus grob kubischem Granulat mit Kantenlängen von ca. 6 mm aus Unterdeckenplatte.

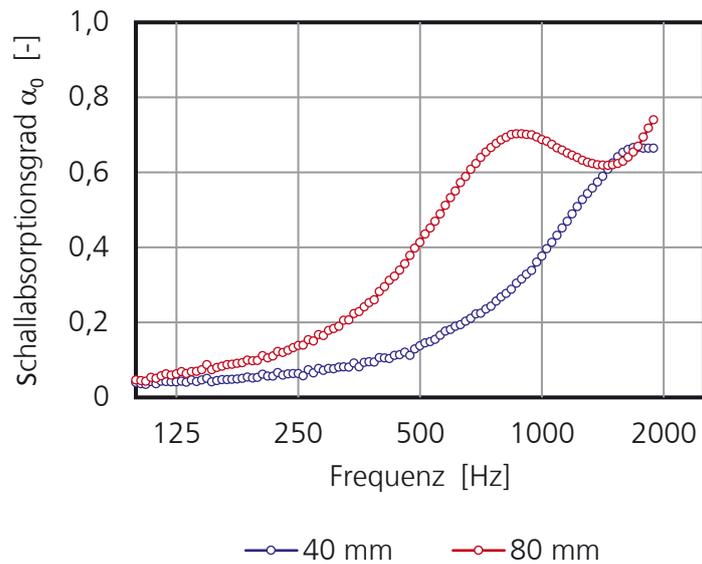


Bild 17:
Gemessene Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 40 und 80 mm dicken losen Schüttungen aus grob kubischem Granulat mit Kantenlängen von ca. 4,5 mm aus PU-Schaum.

Auch für die annähernd kubischen Granulate wurden Eingangsdaten für das Johnson-Champoux-Allard-Modell durch Simulation ermittelt. Hierzu wurden

jeweils drei Packungen massiver Granulate erzeugt und in drei Raumrichtung in GeoDict simuliert. Bild 18 zeigt ein Geometrie-Beispiel mit simuliertem Strömungsfeld. Die Mittelwerte sind in Tabelle 4 eingetragen. Die Eingangsdaten für die mikroporöse Phase wurden jeweils an Messungen der Wandimpedanz von homogenem, plattenförmigem Material indirekt bestimmt. Die Strömungswiderstände wurden auch gemessen.

Die Übereinstimmung ist hier deutlich schlechter als bei den grob kugelförmigen Granulaten. Es war nicht möglich, zufriedenstellende Spektren für beide Schichtdicken zu berechnen. Mögliche Ursachen könnten einerseits die starke Varianz der Schüttungen sein. Bei den Simulationen unterscheiden sich die Werte für den Strömungswiderstand in den drei Raumrichtungen bereits um mehr als 30 Prozent. Andererseits sind beide Granulat-Materialien anisotrop. Die Strömungswiderstände sind nur in eine Richtung gemessen worden, beim Fasermaterial senkrecht zu den Faserlagen.

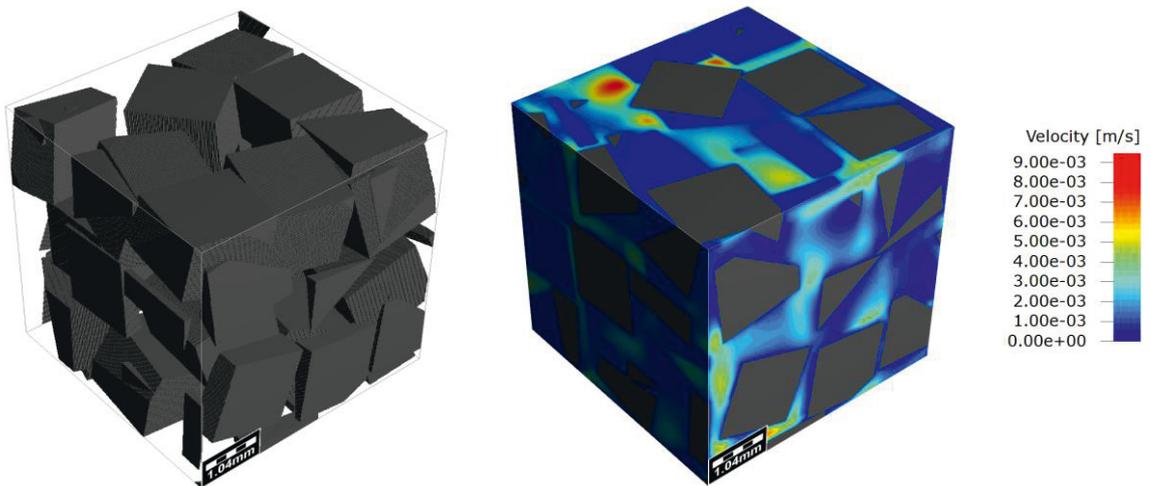


Bild 18: Packung aus kubischem Granulat mit 1,5 mm Kantenlänge (links) und Betrag der Strömungsgeschwindigkeit (rechts).

Tabelle 4: Eingangsdaten für das Johnson-Champoux-Allard-Modell von Packungen aus massivem kubischem Granulat unterschiedlicher Kantenlänge.

Kantenlänge [mm]	Strömungswiderstand σ [Pa s/m ²]	Porosität ϕ [-]	Tortuosität α_∞ [-]	viskose char. Länge Λ [m]	thermische char. Länge Λ' [m]
1,5	5799	0,45	1,60	$0,263 \cdot 10^{-3}$	$0,377 \cdot 10^{-3}$
3,0	1450			$0,526 \cdot 10^{-3}$	$0,754 \cdot 10^{-3}$
4,5	644			$0,788 \cdot 10^{-3}$	$1,132 \cdot 10^{-3}$
6,0	362			$1,051 \cdot 10^{-3}$	$1,509 \cdot 10^{-3}$

4 Rechnerische Parametervariation Modellsubstanzen

Ausgehend von der Modellierung der Blähglasgranulat-Schüttung in Abschnitt 3.2 wurde eine Parametervariation durchgeführt. Die Granulate wurden mit einer vergleichbaren Kornform, wie die der analysierten Modellsubstanz, modelliert und in Korngrößen von 0,7 bis 2 mm variiert. Zunächst wurden jeweils drei Schüttungen aus massiven Partikeln mit GeoDict in drei Raumrichtungen berechnet. In Tabelle 5 sind die Mittelwerte der Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 5:
Eingangsdaten für das Johnson-Champoux-Allard-Modell von Packungen aus massivem Granulat unterschiedlicher Korngrößen.

Korngröße [mm]	Strömungs- widerstand σ [kPa s/m ²]	Porosität ϕ [-]	Tortuosität α_∞ [-]	viskose char. Länge Λ [m]	thermische char. Länge Λ' [m]
0,7	44,447	0,39	1,47	$123 \cdot 10^{-6}$	$145 \cdot 10^{-6}$
0,9	26,229			$153 \cdot 10^{-6}$	$189 \cdot 10^{-6}$
1,1	17,495			$188 \cdot 10^{-6}$	$231 \cdot 10^{-6}$
1,5	9,559			$267 \cdot 10^{-6}$	$318 \cdot 10^{-6}$
2,0	5,421			$384 \cdot 10^{-6}$	$421 \cdot 10^{-6}$

Anschließend wurden die Schallabsorptionsgrade für Schüttungen aus porosierten Granulaten analytisch berechnet. Bei der Porenstruktur der Granulate wurden folgende Größen variiert: Strömungswiderstand 50-200 kPa s/m², Porosität 0,3-0,9 und Tortuosität 1,1-4,4. Ausgewählte Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

Aus der theoretischen Beschreibung können erste Tendenzen für die mikroporöse Phase abgeleitet werden [15]. Mit der charakteristischen Wellenlänge für die mikroporöse Phase

$$\omega_{vm} = \frac{\sigma_m \phi_m}{\rho_0 \alpha_{\infty m}} \quad (15)$$

und der charakteristischen Wellenlänge ω_d nach Gleichung (10) lassen sich folgende Trends ableiten. Für einen hohen Permeabilitätskontrast muss ω_{vm} sehr viel größer sein als ω_d :

$$\frac{\omega_d}{\omega_{vm}} = P_0 \rho_0 \frac{1-\phi_p}{D(0)} \frac{\alpha_m}{\phi_m^2 \sigma_m^2} \ll 1 \quad (16)$$

Die Tortuosität α_m der mikroporösen Phase sollte demnach möglichst nahe bei 1 liegen. Weiterhin ist günstig, wenn sowohl der Strömungswiderstand als auch die Porosität möglichst groß ist. D.h. der hohe Strömungswiderstand muss über entsprechend kleine Porenquerschnitte und nicht über eine Verringerung der Porosität erreicht werden.

4.1 Einfluss der mikroporösen Phase

Die Parametervariation wurde für eine Schichtdicke von 30 mm berechnet, mit der auch der abschließende Demonstrator aufgebaut werden soll. Zum Vergleich ist in den Diagrammen jeweils das Spektrum eines gut angepassten Faserabsorbers gleicher Dicke angegeben. Bei mittleren bis hohen Porositäten verschiebt sich das erste Absorptionsmaximum mit höher werdendem Strömungswiderstand σ_m deutlich zu tieferen Frequenzen. Allerdings fällt auch der Einbruch nach dem Maximum mit wachsendem Strömungswiderstand zunehmend größer aus. In Bild 19 sind entsprechende Spektren für eine Porosität ϕ_m von 0,9 und Tortuosität α_m von 1,1 gezeigt.

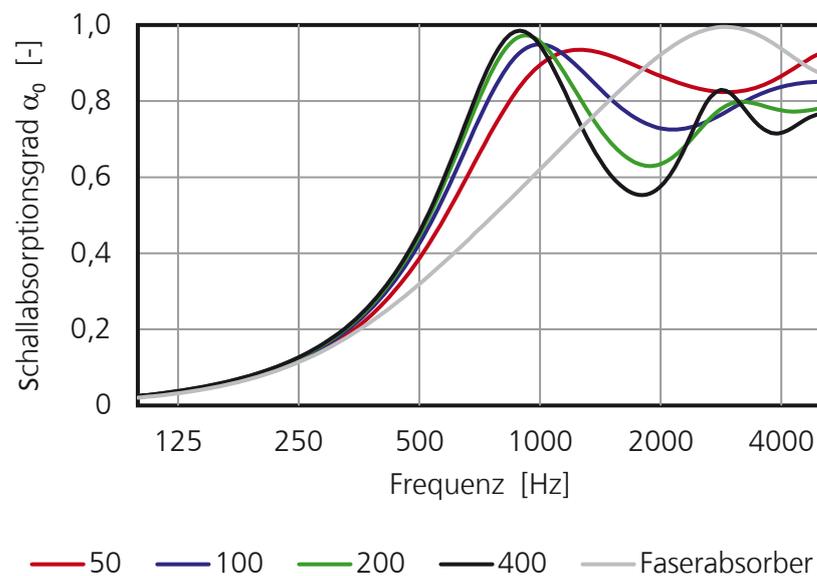


Bild 19:

Berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 30 mm dicken losen Schüttungen aus Granulat mit Korngröße 1,5 mm. Variiert wurde der Strömungswiderstand σ_m der mikroporösen Phase, angegeben in kPa s/m^2 ($\phi_m = 0,9$; $\alpha_m = 1,1$).

Bei niedrigen Porositäten ϕ_m ist der Einfluss des Strömungswiderstands jedoch deutlich geringer. Bild 20 zeigt eine Variation für eine Porosität ϕ_m von 0,3 und einer Tortuosität α_m von 4,4. Die Verschiebung des Maximums mit wachsendem Strömungswiderstand ist hier in deutlich geringerem Maße vorhanden. Außerdem liegen die Absorptionsspektren im Bereich von 250-500 Hz bei allen betrachteten Korngrößen unter dem des Faserabsorbers.

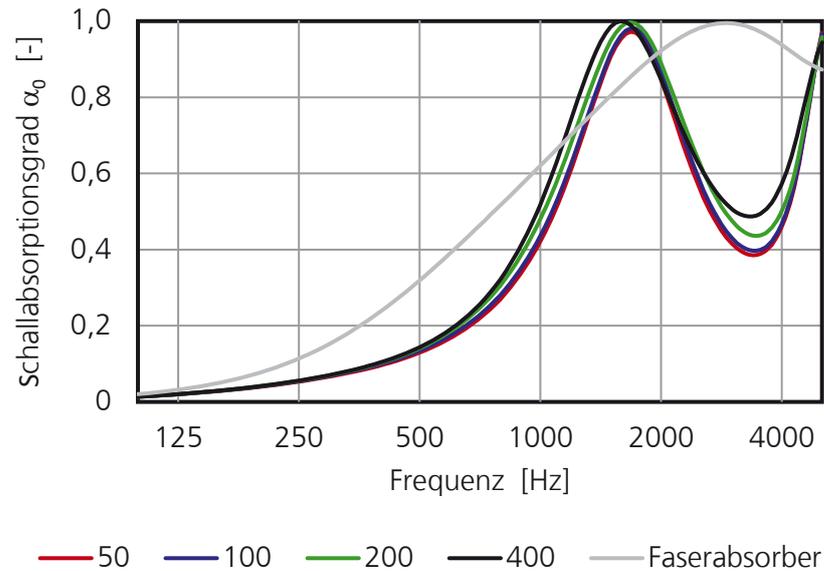


Bild 20:
 Berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 30 mm dicken losen Schüttungen aus Granulat mit Korngröße 1,5 mm. Variiert wurde der Strömungswiderstand σ_m der mikroporösen Phase, angegeben in kPa s/m^2 ($\phi_m = 0,3$; $\alpha_m = 4,4$).

Eine Erhöhung der Porosität ϕ_m wirkt sich, wie nach Gleichung (16) erwartet, günstig aus. Im Falle hoher Strömungswiderstände σ_m und geringer Tortuosität α_m verschiebt sich das Maximum beträchtlich zu tieferen Frequenzen. Auch die Einbrüche bei höheren Frequenzen fallen mit zunehmender Porosität geringer aus (Bild 21).

Bei geringen Strömungswiderständen und hohen Tortuositäten findet kaum noch eine Verschiebung des Maximums statt. Höhere Porositäten wirken sich dennoch sehr vorteilhaft aus, da sie das Maximum breitbandiger machen und die Einbrüche reduzieren, wie Bild 22 entnommen werden kann.

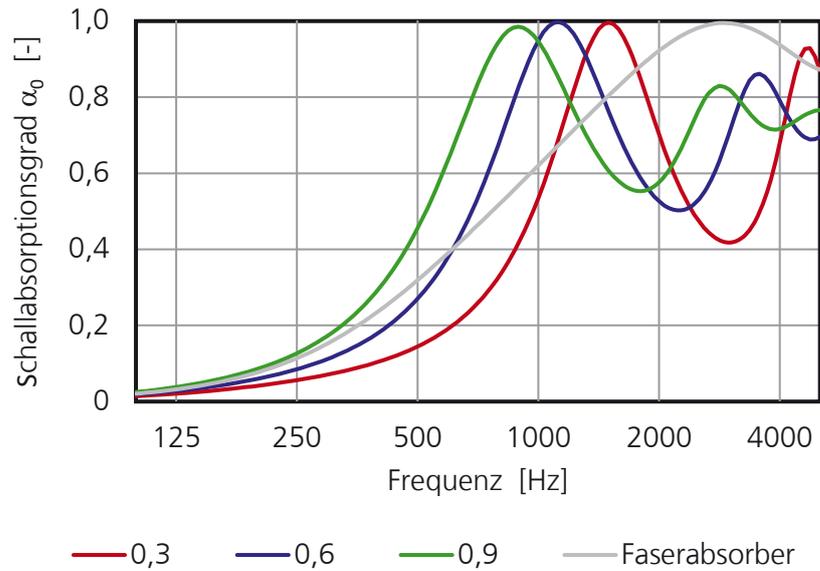


Bild 21:
 Berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 30 mm dicken losen Schüttungen aus Granulat mit Korngröße 1,5 mm. Variiert wurde Porosität ϕ_m der mikroporösen Phase ($\sigma_m = 400 \text{ kPa s/m}^2$; $\alpha_m = 1,1$).

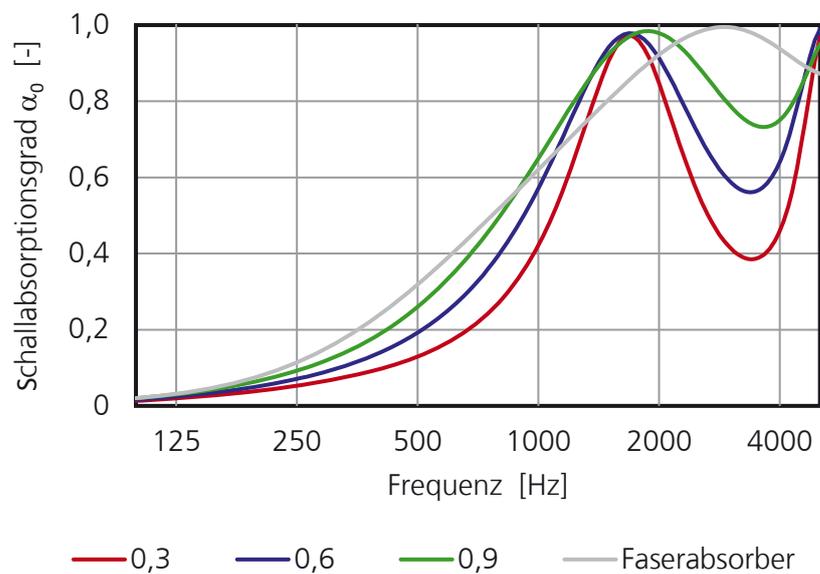


Bild 22:
 Berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 30 mm dicken losen Schüttungen aus Granulat mit Korngröße 1,5 mm. Variiert wurde Porosität ϕ_m der mikroporösen Phase ($\sigma_m = 50 \text{ kPa s/m}^2$; $\alpha_m = 4,4$).

Eine Erhöhung der Tortuosität α_m wirkt sich insbesondere bei hoher Porosität ϕ_m verschlechternd aus (Bild 23). Bei geringen Porositäten und hohen Strömungswiderständen ist der Einfluss der Tortuosität deutlich geringer (Bild 24).

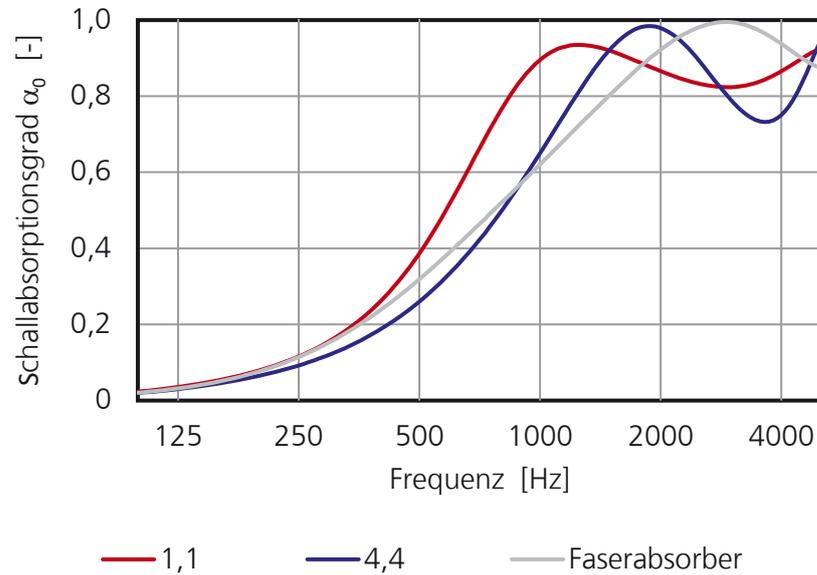


Bild 23: Berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 30 mm dicken losen Schüttungen aus Granulat mit Korngröße 1,5 mm. Variiert wurde die Tortuosität α_m der mikroporösen Phase ($\sigma_m = 50 \text{ kPa s/m}^2$; $\phi_m = 0,9$).

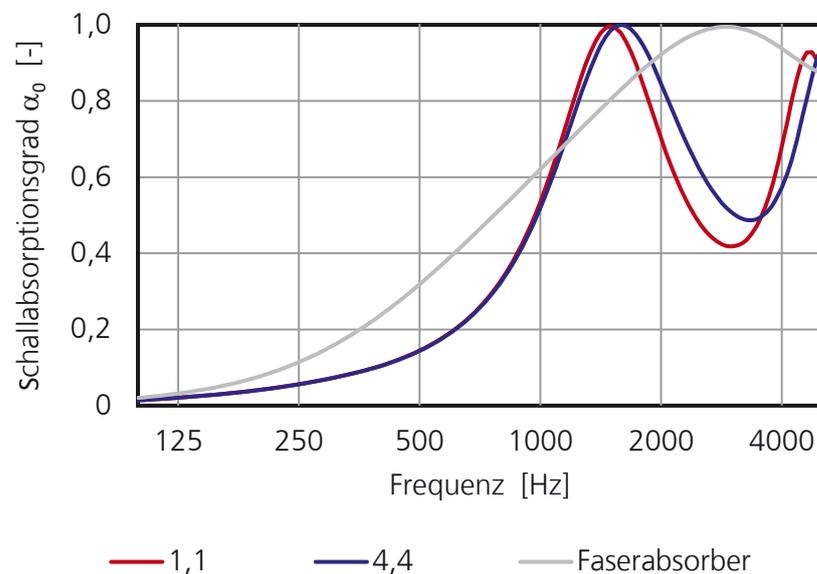


Bild 24: Berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 30 mm dicken losen Schüttungen aus Granulat mit Korngröße 1,5 mm. Variiert wurde die Tortuosität α_m der mikroporösen Phase ($\sigma_m = 400 \text{ kPa s/m}^2$; $\phi_m = 0,3$).

4.2 Einfluss der mesoporösen Phase

Für die Variation der mesoporösen Phase wurden Granulatpackungen mit Korngrößen zwischen 0,7 und 1,5 mm betrachtet. Aus der Simulation ergeben sich die in Tabelle 5 aufgeführten Eingangsdaten. Die Porosität und die Tortuosität der Packungen ist unabhängig von der Korngröße. Variiert wurden also nur der Strömungswiderstand sowie die viskose und thermische charakteristische Länge.

Die Verkleinerung der Korngröße und damit Erhöhung des Strömungswiderstands σ_p hat keinen großen Einfluss auf die Lage des ersten Frequenzmaximums. Mit geringerer Korngröße wird das Absorptionsmaximum breitbandiger, d.h. die ansteigende und abfallende Flanke werden flacher. Im Maximum verringert sich der Absorptionsgrad jedoch. Die Effekte sind bei geringen Strömungswiderständen σ_m und hohen Porositäten ϕ_m der mikroporösen Phase weniger ausgeprägt (Bild 25).

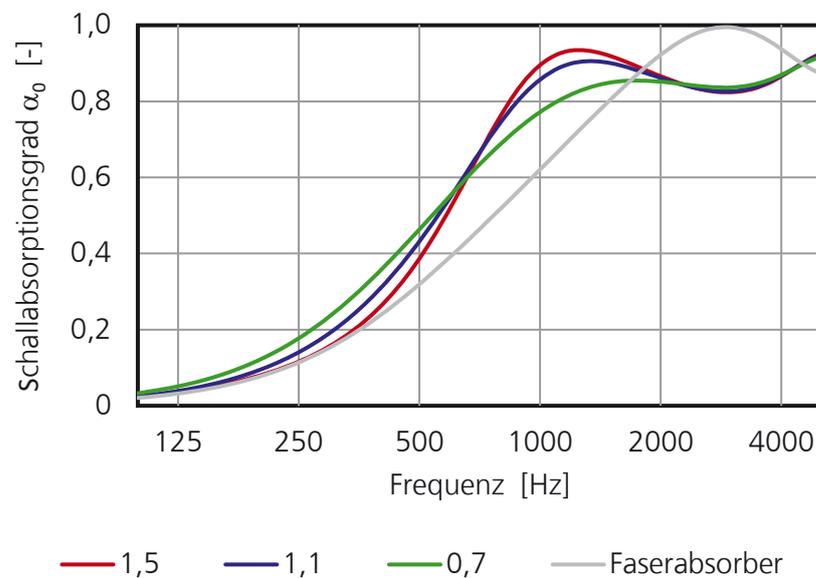


Bild 25:

Berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 30 mm dicken losen Schüttungen aus Granulat mit unterschiedlicher Korngröße in mm. ($\phi_m = 0,9$; $\sigma_m = 50 \text{ kPa s/m}^2$; $\alpha_m = 1,1$).

Bei hohen Strömungswiderständen σ_m und geringen Porositäten ϕ_m der mikroporösen Phase wird das Spektrum jedoch deutlich verändert. Bild 26 zeigt, dass das Spektrum bei sehr kleinen Korngrößen deutlich glatter wird. Der ausgeprägte Einbruch nach dem ersten Maximum wird deutlich vermindert. Auch die ansteigende Flanke ist deutlich flacher und erhöht den Absorptionsgrad bei tiefen Frequenzen damit erheblich. Allerdings ist die Absorption im Maximum um 20 Prozent reduziert.

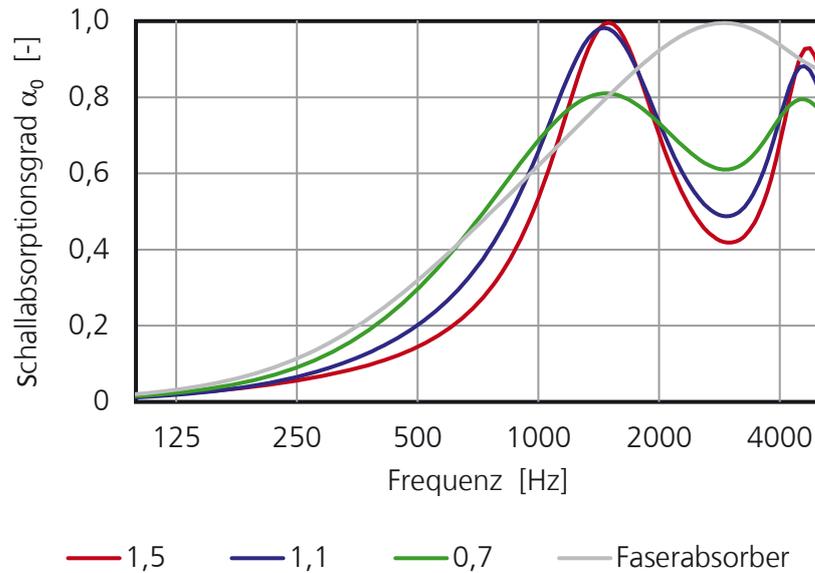


Bild 26:
Berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von 30 mm dicken losen Schüttungen aus Granulat mit unterschiedlicher Korngröße in mm. ($\phi_m = 0,3$; $\sigma_m = 400 \text{ kPa s/m}^2$; $\alpha_m = 1,1$).

Die verwendete Granulatpackung hat eine vergleichsweise geringe Tortuosität α_p von 1,47. Eine moderate Erhöhung wirkt sich rechnerisch bei einigen Kombinationen günstig aus. Inwieweit die Tortuosität durch die Bindung der Granulate erhöht werden kann, soll in einem späteren Arbeitspaket untersucht werden.

Die Einflüsse der akustischen Kennwerte der meso- und mikroporösen Phase auf den Absorptionsgrad sind somit bekannt. Für die jeweiligen Anwendungsfälle können günstige Granulat-Geometrien ausgewählt werden. Optimal darauf abgestimmte Geometrien der Poren im Granulat sind ebenfalls bekannt. Die praktische materialtechnische Umsetzung der optimalen Eigenschaften, also hoher Strömungswiderstand bei hoher Porosität und geringer Tortuosität, muss allerdings als herausfordernd eingestuft werden.

5 Bindemittel-Systeme

Die Bindung der Blähglas-Granulate zu Plattenware hat einen entscheidenden Einfluss auf die akustischen Eigenschaften. Sie kann zu folgenden akustisch relevanten Modifikationen im Vergleich zur losen Schüttung führen:

- Erhöhung des Strömungswiderstands der mesoporösen Phase durch Verkleinerung der Porendurchmesser zwischen den Granulaten
- Reduktion des mikroporösen Porenvolumens durch dichte Ummantelung der Granulat-Oberflächen

- Veränderung der Granulat-Geometrie durch chemische oder thermische Prozesse

Das Ziel der Untersuchung war eine zumindest qualitative Beschreibung dieser Faktoren bei gebräuchlichen Bindungssysteme. Dazu wurden drei unterschiedliche Varianten untersucht:

- Epoxidbindung:
kunstharzhaltiges Bindemittel mit hohem mineralischen Anteil (Sto Silent 220)
- Zementbindung:
mineralisches Bindemittel (Entwicklung Fraunhofer-IBP, Patentanmeldung zurückgezogen)
- Sinterung:
Bindung rein durch thermischen Prozess ohne zusätzliches Bindemittel (Produkt Reapor)

Bei allen Systemen sind die Absorptionsgrade der entsprechenden losen Granulatschüttungen bekannt. Die Korngrößenverteilungen und die Absorptionsspektren der Schüttungen sind ähnlich. Dennoch weisen die Platten ein deutlich unterschiedliches Absorptionsvermögen auf. Von den drei Materialien wurden Mikro-Tomografien erstellt. Die Proben waren kreiszylindrisch mit einem Durchmesser von ca. 10 mm und einer Höhe von 14 mm. Bei einer mittleren Korngröße von etwa 2 mm ergeben sich damit repräsentative Ausschnitte. Die Auflösungen der μ CTs sind mit einer Voxelkantenlänge von 3,4 μ m gewählt. Die Unterschiede in der Bindung sind größtenteils gut erkennbar, lediglich die Modifikation der Granulate ist bei dieser Auflösung nicht sicher nachweisbar. Zunächst werden die beiden Varianten mit Bindemitteln dargestellt, abschließend das gesinterte Material. In der Darstellung entsprechen blaue Bereiche dem Porenvolumen, grüne und rote der Materialphase, entsprechend des Absorptionsvermögens für Röntgenstrahlung.

Das Epoxid-gebundene Material ist in Bild 27 gezeigt. Das Porengefüge zwischen den Granulaten wird durch das Bindemittel akustisch nicht nennenswert beeinflusst, d. h. es entstehen keine großen Materialansammlungen an den Verbindungsstellen. Die Oberflächen der Körner werden jedoch größtenteils vom Bindemittel überzogen. Die Zellwände an den Granulatoberflächen sind deutlich dicker, als die der Poren im Granulat.

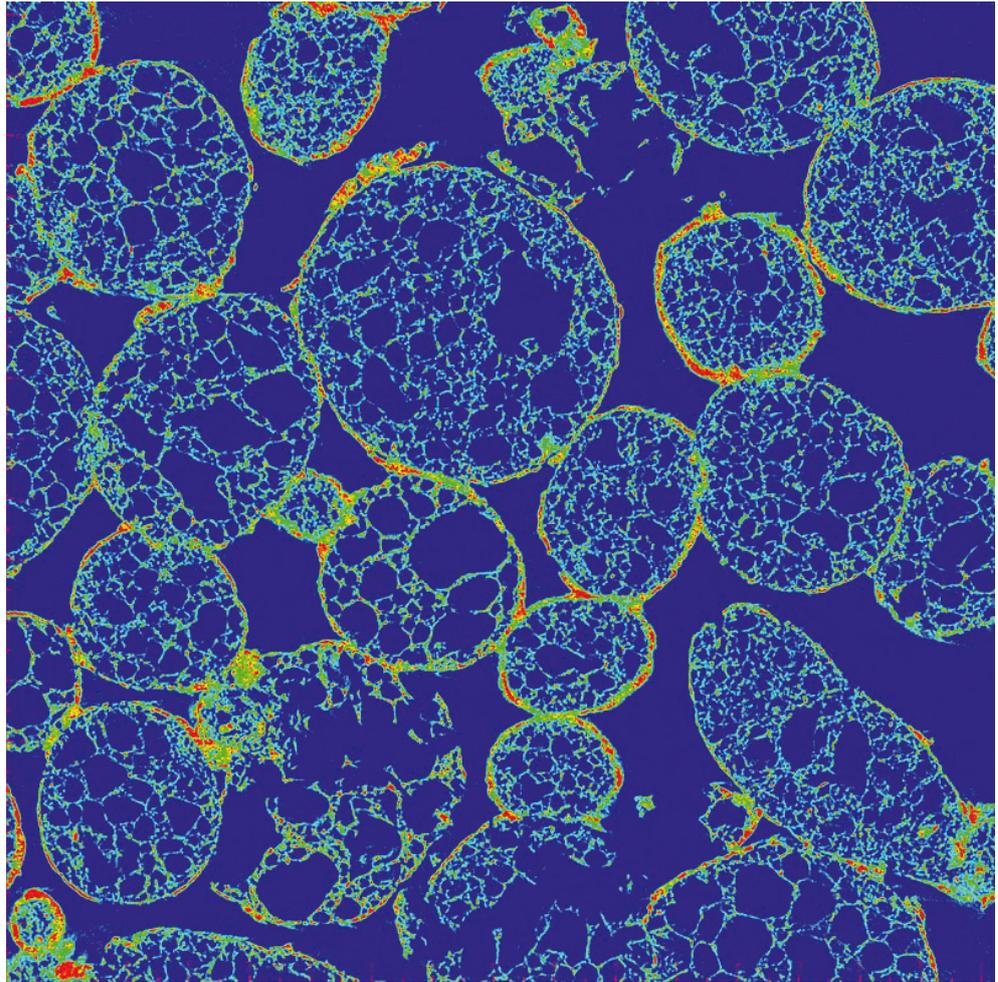


Bild 27:
Schnitt durch eine computertomografische Aufnahme von Blähglasgranulat mit Epoxid-Bindung. (Poraver-Granulat). Kantenlänge des Ausschnitts ca. 7,2 mm.

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Bindemittelschicht weitestgehend geschlossenzellig ist und offenzelliges Porenvolumen in den Granulaten kapselt. Entsprechend lassen sich die gemessenen Absorptionsgrade des Materials durch Schüttungen massiver Kugeln gut nachsimulieren.

Das Zement-gebundene Material zeigt Bild 28. Im Gegensatz zur Epoxidbindung überzieht das Bindemittel einen deutlich geringeren Anteil der Granulatoberfläche. Allerdings sind deutliche Bindemittelansammlungen an den Verbindungspunkten erkennbar, die massiv und damit akustisch nicht wirksam sind. Entsprechend ist der Strömungswiderstand des gebundenen Materials höher als der einer vergleichbaren Kugelschüttung.

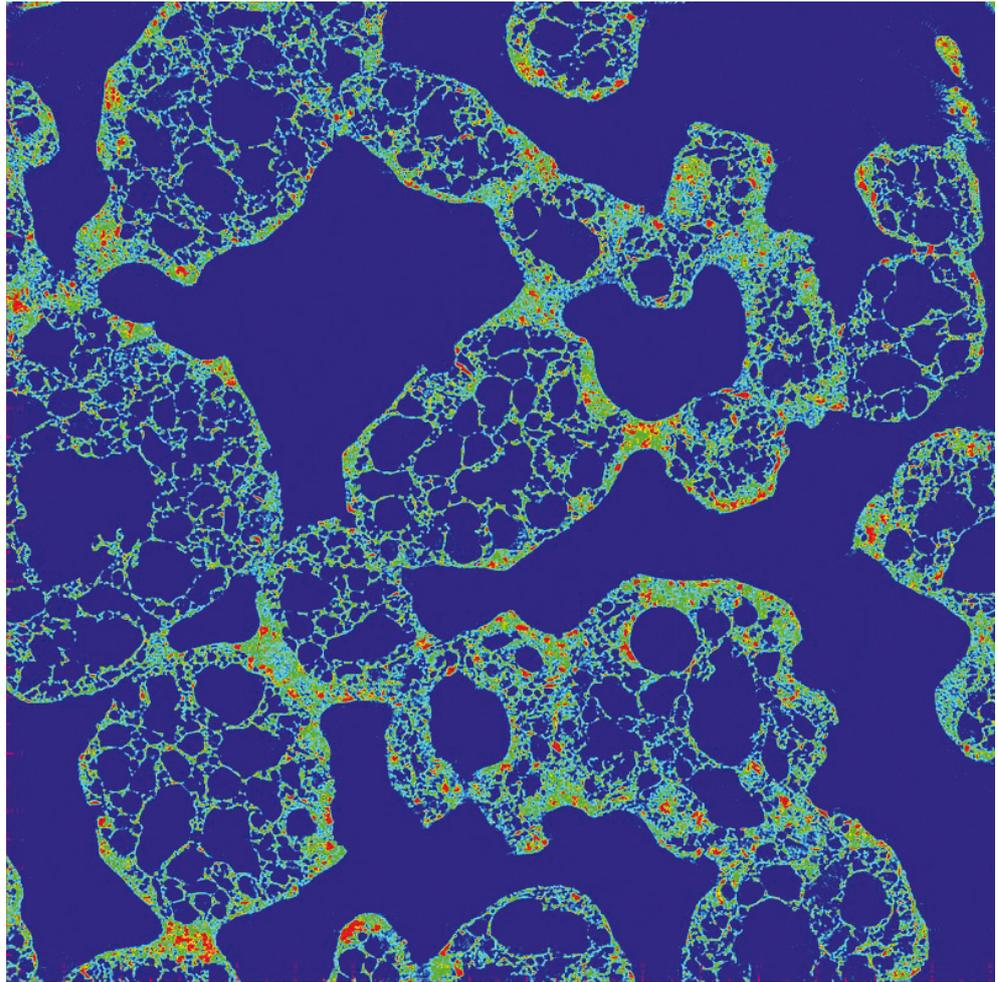


Bild 28:
Schnitt durch eine computertomografische Aufnahme von Blähglasgranulat (Omega-Bubbles) mit Zement-Bindung. Kantenlänge des Ausschnitts ca. 7,2 mm.

Bild 29 zeigt das gesinterte Material (Reapor). Durch den thermischen Prozess entstehen „Sinterhälse“, die ebenfalls porosiert sind. Es sind keine Materialanhäufungen erkennbar, d.h. die Strukturen der Verbindungsstellen haben etwa die gleichen Dicken wie die Zellwände der Granulate. Eine Kapselung der Granulate findet bei dieser Bindung also nicht statt.

Das gesinterte Material hat deutlich andere Absorptionseigenschaften, als eine lose Schüttung vergleichbaren Granulats. In Tabelle 6 sind die Eingangsdaten für das Johnson-Champoux-Allard-Modell für die lose Schüttung und das gesinterte Material angegeben. Die Strömungswiderstände wurden direkt gemessen, die restlichen Parameter sind indirekt aus den Messungen der Wandimpedanzen bestimmt.

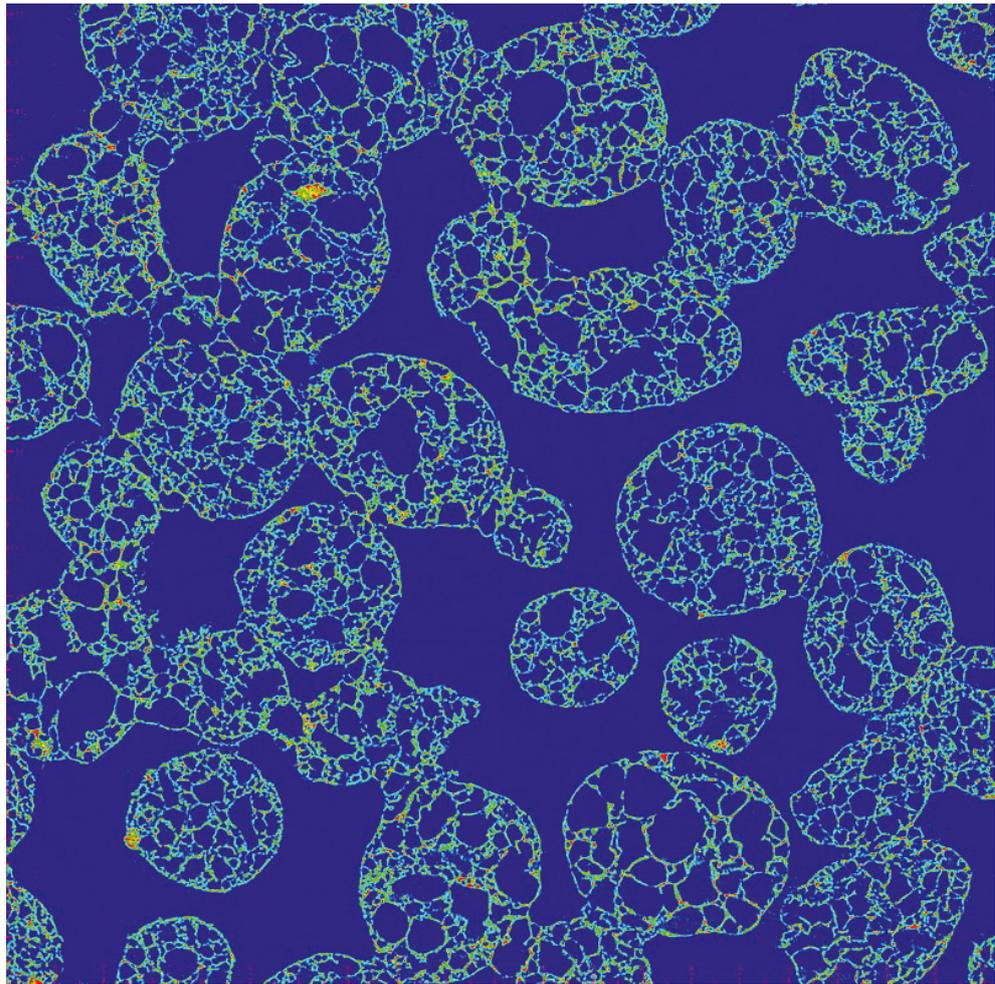


Bild 29:
Schnitt durch eine computertomografische Aufnahme von gesintertem Blähglasgranulat (Liaver-Granulat). Kantenlänge des Ausschnitts ca. 7,2 mm.

Tabelle 6:
Eingangsdaten für das Johnson-Champoux-Allard-Modell für Reapor und eine lose Schüttung aus Liaver-Granulat mit vergleichbarer Korngrößenverteilung.

Material	Strömungswiderstand σ [kPa s/m ²]	Porosität ϕ [-]	Tortuosität α_{∞} [-]	viskose char. Länge Λ [μ m]	thermische char. Länge Λ' [μ m]
Reapor	14,0	0,76	2,8	72	90
Schüttung Liaver-Granulat	5,4	0,39	1,47	384	421

Die Modellierung mit dem einphasigen Modell ist für dünne Schichten noch ausreichend. Auffällig ist der um 195 Prozent höhere Wert der offenen Volu-

menporosität. Offensichtlich hat der Bindungsprozess zu einem weiteren Aufschließen des Porenvolumens in den Granulaten selbst geführt. Vermutet wird ein Zusammenwirken von Wasserglas, das beim ersten Binden zu einem „Grünkörper“ zugesetzt wird, und den hohen Temperaturen (740 °C) beim Sinterungsprozess [16]. Die leichte Erhöhung des Strömungswiderstands ist im Wesentlichen auf die Parallelschaltung des höheren Widerstands in den nun offenzelligen Granalien zurück zu führen.

Insgesamt ergibt sich ein deutlich verbessertes Spektrum (Bild 30): Der starke Einbruch nach dem ersten Absorptionsmaximum ist beim gesinterten Material deutlich geringer und das Maximum ist im Vergleich zur gleich dicken Granulatschüttung um ca. 2 Terzen zu tieferen Frequenzen verschoben.

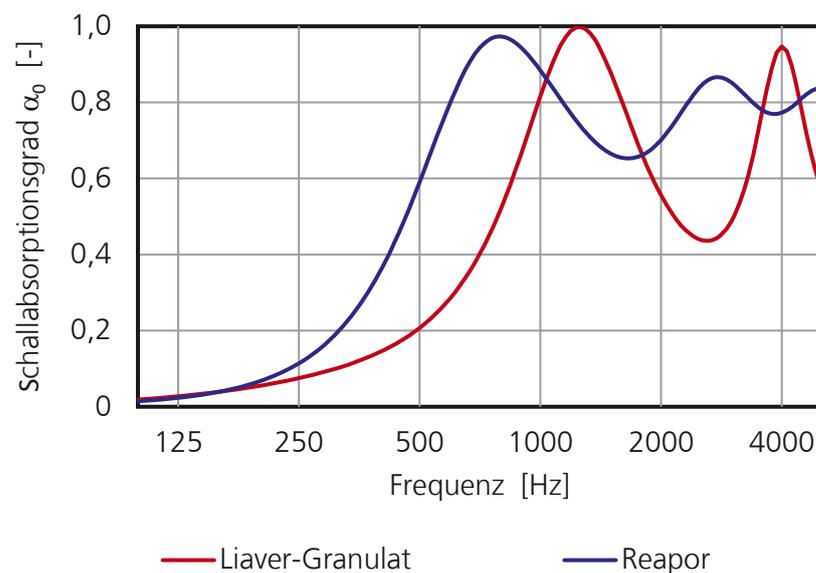


Bild 30:

Berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall einer losen Schüttung und einer gesinterten Platte aus Blähglasgranulat (Reapor) mit vergleichbarer Korngrößenverteilung bei einer Schichtdicke von 30 mm.

Für Blähglas-Granulate ist der Sinterungsprozess die akustisch beste Lösung der hier untersuchten Bindungen. Nur durch die Sinterung wird die nach dem Blähen weitgehend geschlossenzellige Oberfläche aufgeschlossen und das Porenvolumen im Inneren der Granalien zugänglich gemacht.

Bei Granulaten, die bereits über eine überwiegend offenzellige Oberfläche verfügen, kann auch die zementbasierte Bindung zu guten Ergebnissen führen. Allerdings ist bekannt, dass porosierte Granulate zu einer erheblichen Zunahme des Bindemittelgehalts führen, d.h. stark saugen. In Abschnitt 6.2 ist eine Abschätzung zu tolerierbaren geschlossenen Bindemittelflächen auf den Granalien angegeben.

6 Herstellungstoleranzen

Um die akustischen Eigenschaften von Materialsystemen aus gebundenen, offenzellig porosierten Granulaten sicher reproduzieren zu können, müssen für mehrere geometrische Größen bestimmte Toleranzen eingehalten werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden folgende Aspekte eingehender betrachtet:

- Über der Plattenfläche unregelmäßig verteilte Korngrößen der Granulate
- Anteil der durch die Bindung verkapselten Oberfläche der Granulate

Der Bindemittelanteil hat sich als vergleichsweise unproblematisch erwiesen. Er ist auch bei händischem Aufbau kleiner Materialmengen sehr gut dosierbar.

6.1 Unregelmäßige Verteilung der Granulatdurchmesser

Der Strömungswiderstand wächst in erster Näherung umgekehrt quadratisch mit dem Porendurchmesser. Darüber hinaus verringert sich bei grob kugelförmigem Granulat die Mesoposität mit zunehmender Abweichung von einer monodispersen Verteilung. Es können sich zunehmend kleinere Granalien in den Bereichen zwischen den großen anlagern. Die verringerte Porosität führt dabei mit einer linearen Abhängigkeit zu einer weiteren Reduktion des Strömungswiderstands. Ungleichmäßige Verteilungen der Granulate wirken sich daher insbesondere bei hohen Anteilen kleiner Korngrößen aus.

Der weiteste eingehender untersuchte Korngrößenbereich betrug 0,5 bis 4 mm. Bei losen Schüttungen ergab sich bei Messungen an 10 leicht verdichteten Proben eine Standardabweichung von 32 Prozent. Die kreiszylindrischen Proben hatten einen Durchmesser von 100 mm und ca. 40 mm Dicke. Bei epoxidgebundener Plattenware mit vergleichbarer Korngrößenverteilung ergaben sich leicht höhere Standardabweichungen. Allerdings wurden hier nur 6 Proben aus drei Chargen untersucht. Zudem waren die Probenvolumen mit 25 mm Schichtdicke kleiner. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Absorptionseigenschaften großflächiger Proben mit diesem Korngrößenbereich nicht mehr streut, als die handelsüblicher Mineralfaser-Produkte.

6.2 Kapselung der Granulate

Zusätzliche Bindemittel verringern zwangsläufig das wirksame offenzellige Porenvolumen in den Granulaten. Rechnerisch ergeben sich bei optimalem Granulat auch bei einer Schließung von bis zu 40 Prozent der Granulat-Oberfläche durch das Bindemittel noch Absorptionsspektren, die dem Ziel einer Verschiebung des Absorptionsmaximums um eine Oktave gerecht werden. Dabei bricht das Spektrum nach dem ersten Maximum infolge der geringeren Gesamtporosität auch nur soweit ein, dass es beim diffusen Schalleinfall praxisgerecht bleibt.

7 Praxistauglichkeit

7.1 Absorptionsvermögen bei diffusem Schalleinfall

Das geplante Funktionsmuster mit ca. 12 m² konnte während der Projektlaufzeit nicht mehr realisiert werden, sodass keine Messungen bei diffusem Schalleinfall im Hallraum vorliegen. Eine Berechnung für den diffusen Einfall mit dem Modell in Abschnitt 2.2 ist grundsätzlich möglich. Dazu wird der Absorptionsgrad für schrägen Einfall über den Halbraum integriert. Allerdings ist die Kopplungsfunktion für jeden Einfallswinkel separat zu bestimmen, was bereits bei den kreiszylindrisch gelochten Platten (Abschnitt 3.1) sehr aufwendig wird.

7.2 Übertragbarkeit auf andere Materialsysteme und Branchen

Der Ansatz, mehrfach-poröse Materialien mit porosierten Granulaten aufzubauen hat sich in der praktischen Umsetzung als herausfordernd erwiesen. Einerseits erfordern optimale Geometrien Korngrößen größer 2 mm. Dadurch ergeben die punktwisen Verbindungen bei Plattenware nur geringe Festigkeiten. Außerdem entstehen im Anschnitt recht grobe Strukturen, sodass eine ansprechende Ausgestaltung der raumseitigen Oberflächen bei Innenraum-Anwendungen nur mit hohem zusätzlichem Aufwand erzielt werden kann.

Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich direkt auf eine Reihe anderer Materialsysteme übertragen. Bild 31 zeigt schematisch Varianten für Textilien und Schäume.

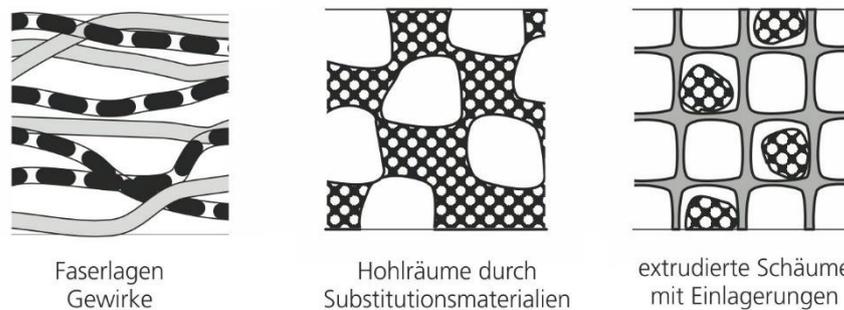


Bild 31:
Doppelt-poröse Geometrien in alternativen Materialsystemen.

Der entscheidende Vorteil mehrfach-poröser Materialien besteht in den geringeren erforderlichen Schichtdicken im Vergleich zu einfachporösen Systemen. Dadurch sind sie insbesondere auch für die Innenraumhandlung im Fahrzeugbau attraktiv. Darüber hinaus sind Umsetzungen in Schalldämpfern, etwa für raumluftechnische Anlagen, angedacht.

8 Zusammenfassung

Es wurden poröse Schallabsorber mit mehreren miteinander verbundenen Porennetzwerken untersucht, welche deutlich unterschiedliche Porendurchmesser aufweisen. Das Ziel war, das erste Absorptionsmaximum im Vergleich zu gleich dicken Faserabsorbieren oder Weichschäumen um mindestens eine Oktave zu tieferen Frequenzen zu verschieben. Die Porengeometrien sollten vorzugsweise mit gebundenem Blähglasgranulat umgesetzt werden. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Eine **theoretische Modellierung** der Schallausbreitung im Material liegt vor:

- Lochplatten und Schüttungen aus grob kugelförmigen Granulat lassen sich mit einem analytischen Modell beschreiben. Ein entsprechendes Rechen-tool wurde implementiert. Die Übereinstimmung mit den Messungen ist ausreichend für eine Optimierung.
- Die Eingangsdaten für die einzelnen porösen Phasen müssen separat vorliegen. Die Modellmaterialien wurden so aufgebaut, dass diese indirekt aus akustischen Messungen bestimmt werden konnten. Für die Granulate wurden sie aus Simulationsrechnungen (GeoDict) an Geometriemodellen der jeweiligen Phasen gewonnen.
- Bei komplexerer Mesoporengeometrie kann die erforderliche Kopplungsfunktion durch Finite-Elemente-Berechnungen ermittelt und im analytischen Modell eingesetzt werden.

Es wurden Proben von **Modellsubstanzen** aufgebaut. Das Ziel war, die einzelnen Porennetzwerke möglichst separat variieren und akustisch vermessen zu können:

- Aus zuvor vermessenen Weichschäumen und Fasermaterialien wurden Platten mit geometrisch einfachen, groben Lochungen erstellt. Außerdem wurden annähernd kubische Granalien hergestellt und als lose Schüttungen untersucht.
- Die Grenzen für die kleinsten Porendurchmesser wurden experimentell an Filtrationsmedien untersucht. Durchmesser von 10 nm sind nicht mehr geeignet, sodass auch einige Adsorber-Materialien ausscheiden.

Die **Systeme aus Blähglasgranulat** wurden zunächst in Form loser Schüttungen untersucht:

- Die Granulate wurden mittels Partikelanalyse und Computertomografie vermessen. Auf dieser Grundlage wurden Geometriemodelle erstellt und die Eingangsdaten für das Rechenmodell simuliert.

- Die gemessenen Absorptionsgrade von losen Schüttungen zweier Fabrikate zeigten, dass Blähglas-Granulate weitgehend geschlossenzellig sind und sich akustisch zunächst wie Schüttungen massiver Granulate verhalten.
- In einer rechnerischen Parametervariation wurden die Eigenschaften der Partikel und ihrer Porosierung in einem für die Praxis relevanten Bereich variiert. Optimale Kombinationen liegen vor und die entsprechenden Geometrien sind bekannt.

Drei Varianten zur **Bindung der Granulate** zu Plattenware wurden auf der Grundlage von Mikrotomografien untersucht:

- Bindemittel auf Zement- und Epoxid-Basis führten zu einer deutlichen Ummantelung der Granalien und damit zu einer Abkopplung des Mikroporenvolumens im Inneren. Vertretbare Flächenanteile der Ummantelung wurden rechnerisch abgeschätzt.
- Bei der Sinterung des Granulats, wie sie vom Industriepartner LIAVER umgesetzt wird, entsteht keine Kapselung der Granalien. Selbst die Verbindungsstellen sind porosiert. Zudem erzeugt der thermische Prozess offensichtlich einen erhöhten Anteil an offenzelligen Poren durch Aufbrechen der Porenwände.

Das Ziel, das Absorptionsspektrum um eine Oktave zu tieferen Frequenzen zu erweitern, wurde mit den Modellsubstanzen problemlos erreicht. Bei den Blähglas-Granulaten hängen die akustischen Eigenschaften davon ab, inwieweit sich das Porenvolumen im Inneren offenzellig anschließen lässt. Bislang wurde ein Aufbrechen der Porenwände und die Bindung ohne Kapselung nur über den Prozess der Sinterung erreicht. Die Erkenntnisse zu geeigneten Geometrien bilden jedoch auch eine gute Grundlage, das Prinzip mit Textilien oder Schaumsystemen umzusetzen.

9 Literatur

- [1] Fasold, W.; Sonntag, E.; Winkler, H: Bau- und Raumakustik. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen, 1987
- [2] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: Abschlussbericht: Marktgerechte Akustikputzsysteme mit hoher thermischer Effizienz. Durchgeführt im Auftrag des Bundesinstituts für Bau- Stadt- und Raumforschung im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ SF – 10.08.18.7-11.15 / II 3-F20-10-1-007. Juli 2013
- [3] Allard, J. F.; Atalla, N.: Propagation of Sound in Porous Media. Modeling Sound Absorbing Materials. Wiley, 2009
- [4] Zuwendungsantrag für Forschungsprojekte im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“: Entwicklung mehrphasig-poröser Schallabsorbiermaterialien durch Mikrostruktursynthese. Eingereicht von der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Oktober 2013
- [5] 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
- [6] Champoux, Y.; Allard, J. F.: Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of Applied Physics* 70, 1975 (1991), 1995-1979
- [7] <http://www.geodict.com>
- [8] Olny, X.; Boutin, C.: Acoustic wave propagation in double porosity media. *J. Acoust. Soc. Am.* 114 (1), July 2003. 73-89
- [9] Sgard, F. C. et al.: On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials. *Applied Acoustics* 66 (205) 625-651
- [10] Venegas, R.; Umnova, O.: Acoustical properties of double porosity granular materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 130 (5), November 2011. 2765-2776
- [11] DIN EN ISO 10534-2: Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren. Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion. Oktober 2001
- [12] DIN EN 29 053: Akustik - Materialien für akustische Anwendungen. Bestimmung des Strömungswiderstandes. Mai 1993

- [13] Petelj, A.: Einfluss der Granulatgröße und Schichtdicke auf die akustischen Eigenschaften loser Schüttungen. Zwischenbericht zum MOE Austauschstipendienprogramm der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU. Juni 2013
- [14] DIN EN 1936: Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität. Februar 2007
- [15] Olny, X.; Sgard, F.; Boutin, C.: Practical aspects of building absorbing materials including double porosity media. Proceedings of ICA, Kyoto, Japan, 2004
- [16] Gödeke, H.; Fuchs, H. V.: Reapor – Sintered open-pore glass as a high-strength sound absorber. *Glastechn. Ber. Sci. Technol.* 71 (1998), 282–284