Simulation von Aerogelen als Isolationsmaterial in der Flugzeugkabinenwand

Christiane Gillner[1], Hannes Marckmann[1], Olgierd Zaleski[1] und Otto von Estorff[2]
[1] *Novicos GmbH, 21073 Hamburg, Deutschland, Email: gillner@novicos.de*
[2] *Technische Universität Hamburg (TUHH), 21073 Hamburg, Deutschland*

Einleitung

Um die Luftfahrt energieeffizienter zu gestalten, werden neue Turbinensysteme mit einem erhöhten Nebenstromverhältnis und Gegenlaufpropeller-Antrieben entwickelt. Diese führen allerdings im niedrigen Frequenzbereich zu einer erhöhten Schallemission in der Flugzeugkabine. Um den Passagierkomfort zu erhöhen, ist es daher wünschenswert, neue Isolationsmaterialien bzw. -konzepte zu entwickeln, die im Gegensatz zu den derzeit eingesetzten Konzepten auf Basis von Glaswolle auch in diesem Frequenzbereich zu einer ausreichenden Schalldämmung führen, während die thermische Isolation weiterhin gegeben ist.

Ein vielversprechendes Material für diese Aufgabe sind Aerogele. Dies sind anpassungsfähige hochporöse, nanostrukturierte Festkörper mit einer sehr geringen Dichte. Durch eine verästelte Struktur mit offenen Poren im Nanometer- bis Mikrometer-Bereich weisen sie eine große innere Oberfläche bei geringem Volumen auf [1]. Diese Porenstruktur führt zu einer sehr geringen Wärmeleitung durch das Material. Die Festkörper-Wärmeleitung ist aufgrund des geringen Festkörperanteils vernachlässigbar, während die Gas-Wärmeleitung von der Porengröße abhängig ist. Ist die mittlere freie Weglänge eines Luftmoleküls kleiner als die Porengröße, stößt das Molekül lediglich mit den Wänden der Struktur und kann die Energie nicht auf andere Poren übertragen [2].
Neben den thermischen Eigenschaften bieten Aerogele auch gute akustische Eigenschaften. Eine verminderte Schallgeschwindigkeit führt zu einer guten Schallabsorption.
Weiterhin sind einige Aerogele ohne zusätzliche Behandlung hydrophob, so dass sich im Gegensatz zu Isolationskonzepten mit Glaswolle die Eisbildung innerhalb der Kabinenwand verhindern lässt, was einen großen Gewichtsvorteil bedeutet.

Ziel dieses Projektes ist es, ein Berechnungsmodell zu entwickeln, das die akustischen Eigenschaften der Aerogele beschreibt. Darauf aufbauend soll ein Isolationsmaterial für eine Flugzeugkabinenwand entwickelt werden.

Aerogele

Aerogele werden in einem Sol-Gel-Prozess hergestellt. Typische Ausgangsstoffe sind z.B. Alkoxide, Wasser, Alkohole und Katalysatoren, die im flüssigen Zustand miteinander vermischt werden und das Sol formen. Es bildet sich ein Netzwerk aus kolloidalen Teilchen, das als Gel bezeichnet wird. Die Form und Größe der Verästelungen und damit der Poren kann z.B. durch den ph-Wert oder die Temperatur der Lösung beeinflusst werden. Nach der Ausbildung des Gels muss das Lösungsmittel aus den Poren entfernt werden, ohne dass die Struktur zusammenbricht. Dies wird meistens mit einer überkritischen Trocknung durchgeführt. Hierbei wird das Lösungsmittel z.B. durch CO_2 bei entsprechendem Druck und Temperatur ausgetauscht [1]. Es bleibt eine Struktur erhalten, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist. Die linke Abbildung stellt eine Skizze der Struktur dar, die rechte ist eine Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer Probe mit Porendurchmessern um die 40 µm.

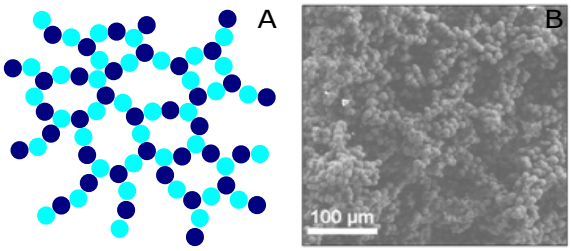

Abbildung 1: Aerogel Struktur. A: Skizze. B: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer Aerogel-Probe (Aufgenommen am DLR Köln).

Je nach Grundmaterial entsteht ein brüchiges oder flexibles Material. Die Dichte eines flexiblen Aerogels ist dabei höher als bei einem brüchigeren, da für die Flexibilität des Materials ein höherer Strukturanteil erforderlich ist. Da ein Material für Flugzeugisolierungen aufgrund der Verbaubarkeit und anderen Anforderungen nicht brüchig sein darf, wird in diesem Projekt flexibles Aerogel verwendet, dessen Ausgangsstoffe Methyltrimethoxysilan und Dimethyldimethoxysilan sind. Die im folgenden diskutierten Aerogel-Proben wurden beim Projektpartner am DLR (Institut für Werkstoff-Forschung, Aerogele und Aerogelverbundwerkstoffe) auf Basis von [3] hergestellt.

Modell-Aufbau

Für die akustische Beschreibung poröser Materialien wird in vielen Fällen das Biot-Modell verwendet [4]. Hierbei wird das eigentlich inhomogene Material, bestehend aus einem Fluid und dem Festkörper, als ein homogenes System mit Kopplung der beiden Phasen beschrieben. Eine Weiterentwicklung des Modells liefert eine Beschreibung der Verschiebung der Struktur und des Druckes im Fluid. Es gelten folgende Gleichungen [5]:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \hat{\sigma}^s(\boldsymbol{u}^s) + \tilde{\rho}\,\omega^2 \boldsymbol{u}^s + \tilde{\gamma}\ \boldsymbol{grad}\ p = 0 \\ \Delta p + \frac{\tilde{\rho}_f}{\tilde{R}}\,\omega^2 p - \frac{\tilde{\rho}_f}{\phi^2}\,\tilde{\gamma}\,\omega^2\ \operatorname{div} \boldsymbol{u}^s = 0. \end{aligned} \qquad (1)$$

Hierbei ist $\hat{\sigma}^s$ der Stress-Tensor und $\boldsymbol{u}^s$ der Verschiebungsvektor der Struktur, $\tilde{\rho}$ die effektive Dichte des Festkörpers, ω die Kreisfrequenz, $\tilde{\gamma}$ ein Kopplungsterm zwischen fester und flüssiger Phase, p der Schalldruck im Fluid, $\tilde{\rho}_f$ die effektive Dichte des Fluids, $\tilde{R}$ das effektive Kompressionsmodul und ϕ die Porosität.

Dieses Materialmodell enthält die sogenannten Biot-Parameter, die die Schallausbreitung beeinflussen. Aus (1) ist eine Abhängigkeit von Porosität und den mechanischen Eigenschaften wie dem Kompressionsmodul und den Dichten direkt ersichtlich. Weitere Biot-Parameter sind die Porenabmessungen, der Luftströmungswiderstand und die Gewundenheit, welche im Dämpfungskoeffizienten der effektiven Dichte und dem effektiven Kompressionsmodul enthalten sind. Auf die Auswirkungen im Schallfeld durch Veränderung der Parameter wird später eingegangen.

Das Biot-Modell soll die Grundlage für die akustischen Berechnungen der Aerogele bilden. Um sicherzustellen, dass das Modell geeignet ist, Aerogele mit verschiedenen Biot-Parametern abzubilden, wurden Absorptions- und Transmissionsmessungen mit Impedanzrohren von 100 mm Durchmesser im Bereich von 100 - 1600 Hz durchgeführt, die zum Abgleich mit Simulationen verwendet wurden. In Abbildung 2 ist das Modell für die Transmissionberechnug, das die Messungen nachbildet, dargestellt.

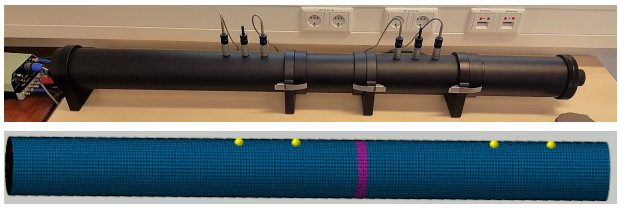

Abbildung 2: Oben: Impedanzrohr (Foto: Y. Abawi, HAW Hamburg). Unten: Zugehöriges Modell für die Berechnung der Transmission. Für die Bestimmung der Absorption wurde die Zwei-Mikrofon-Methode verwendet.

Bei der verwendeten Vier-Mikrofon-Methode befinden sich jeweils zwei Mikrofone vor und hinter der Probe [6]. Für die Bestimmung der Absorption wurde ein Modell bzw. Impedanzrohr mit zwei Mikrofonen verwendet, das direkt hinter der Probe eine schallharte Wand aufweist. Die Finite-Elemente-Modelle haben ungefähr 70000 (Absorption) bzw. 200000 (Transmission) Freiheitsgrade. Als Randbedingungen wurde jeweils eine schallharte Wand am Ende des Rohres vorgegeben und die Probe am Außenrand eingespannt. Die Biot-Parameter aller im folgenden diskutierten Proben sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Absorption

Das Absorptionsmodell wird mit Messungen von zwei Aerogel-Proben abgeglichen. Die erste Probe besteht aus reinem Aerogel, die zweite ist durch Fasern verstärkt, um die Stabilität zu erhöhen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 gezeigt. Beide Proben zeigen eine gute Übereinstimmung von Messung und Simulation.

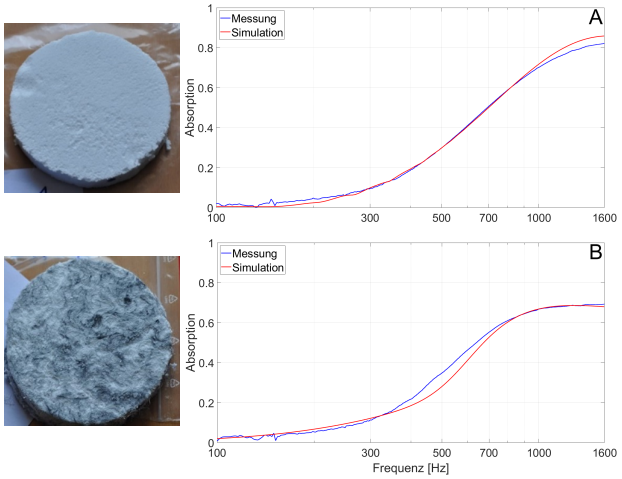

Abbildung 3: Vergleich von Simulation und Messung der Absorption. A: Reines Aerogel. B: Faserverstärktes Aerogel mit erhöhtem E-Modul und Strömungswiderstand.

Durch die Verstärkung ist das E-Modul und der Strömungswiderstand der Probe erhöht im Vergleich zum reinen Aerogel. Dies führt dazu, dass die Absorption der verstärkten Probe hin zu höheren Frequenzen eine schwächere Steigung aufweist und eine geringere maximale Absorption erreicht. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei Proben aus gleichem Material, aber einer unterschiedlichen Dicke. Je dicker eine Probe ist, desto mehr Absorption wird im niedrigen Frequenzbereich erzielt.

Transmission

Für die Validierung des Transmissions-Modells wurde Glaswolle genutzt, da diese als aktuell verwendetes Isolationsmaterial die Referenz für das neu zu entwickelnde Material bildet. Verglichen werden Simulation und Messungen des Schalldämmmaßes. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse von Simulation und Messungen dargestellt. Die Messungen, durchgeführt beim Projektpartner an der HAW Hamburg (Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, Technische Akustik und Strömungsmechanische Kabinenakustik), wurden mit der gleichen Probe durchgeführt, die für jede Messung neu im Messrohr positioniert wurde.

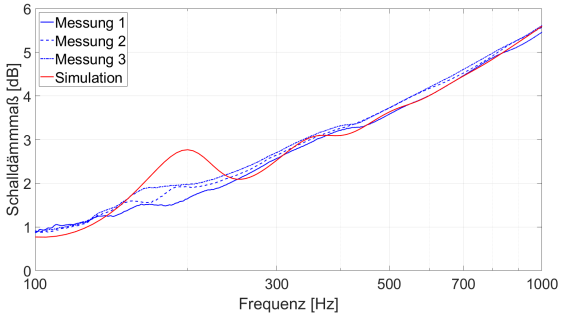

Abbildung 4: Vergleich von Simulation und Messung des Schalldämmmaßes von Glaswolle.

Eine sehr gute Übereinstimmung wird oberhalb von 300 Hz erreicht. Im Bereich unterhalb von 300 Hz treten Abweichungen zur Messung auf. Allerdings zeigen die Messungen in diesem Frequenzbereich ebenfalls Abweichungen voneinander. Da die Probe für die Messung leicht eingespannt ist, um ihre Position sicherzustellen, führt dies zu einer Vorspannung im System. Die Transmission ist im niedrigen Frequenzbereich also stark abhängig von der Position der Probe und der Art der Einspannung. In der Simulation kann, um auf diese Effekte einzugehen, die Dämpfung im Material angepasst werden. Dies führt zu einer besseren Übereinstimmung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich das Modell für die Beschreibung der Aerogele für den betrachteten Anwendungsfall eignet.

Optimierung der Absorption

Das bisher diskutierte Aerogel ist ein flexibles Aerogel mit nicht weiter optimierten Eigenschaften. In einer ersten Optimierung sollte mithilfe des Absorptionsmodells getestet werden, inwieweit die akustischen Eigenschaften im Rahmen der Herstellungsmöglichkeiten verbessert werden können. Als Optimierungsziele wurden eine Maximierung der Absorption von 100 - 1000 Hz bei gleichzeitiger Reduzierung der Dichte gewählt. Die Absorption wurde im gewählten Frequenzbereich ohne eine weitere Gewichtung einzelner Frequenzen integriert. Für eine Anwendung im Flugzeug muss das Material eine möglichst geringe Dichte aufweisen, für die Akustik hingegen ist eine erhöhte Masse von Vorteil. Die Probendicke wurde für die Optimierung konstant auf 20 mm gehalten und das Grundmaterial als unverändert angenommen, sodass die Dichte nur von der Porosität abhängig ist.

Zunächst wurde ein Design of Experiments durchgeführt, wobei die Biot-Parameter variiert wurden. Die Stützstellen wurden über die Latin Hypercube und Full-Factorial Methoden ausgewählt. Die Ergebnisse wurden zu einer Antwortfläche interpoliert und ein Optimum ermittelt.

Ein Vergleich der Ausgangsprobe mit den aus der Optimierung resultierenden Parametern ist in Abbildung 5A dargestellt. Durch die Optimierung wurde erreicht, dass die Absorption ab 300 Hz deutlich steiler ansteigt und bereits unter 600 Hz die maximale Absorption erreicht wird. Dies stellt eine deutliche Verbesserung zum Ausgangsmaterial dar. Die Absorption fällt bei Frequenzen über 600 Hz wieder stark ab. Die entscheidenden Parameter, die zu dieser Veränderung geführt haben, sind die Porenabmessungen. Das bisher verwendete Aerogel besteht aus zylinderförmigen Verbindungen der Poren. Eine deutlichere Abgrenzung der Poren untereinander führt zu der gezeigten Verbesserung. Durch die veränderte Porenform ist auch der Strömungswiderstand etwas erhöht. Eine als Folge des zweiten Optimierungsziels verringerte Dichte kann nur mit einer erhöhten Porosität erreicht werden und folgert ein verringertes E-Modul. Für zukünftige Optimierungen werden Anpassungen an der Zielfunktion wie etwa eine Gewichtung von niedrigen und hohen Frequenzbereichen vorgenommen, um sicherzustellen, dass

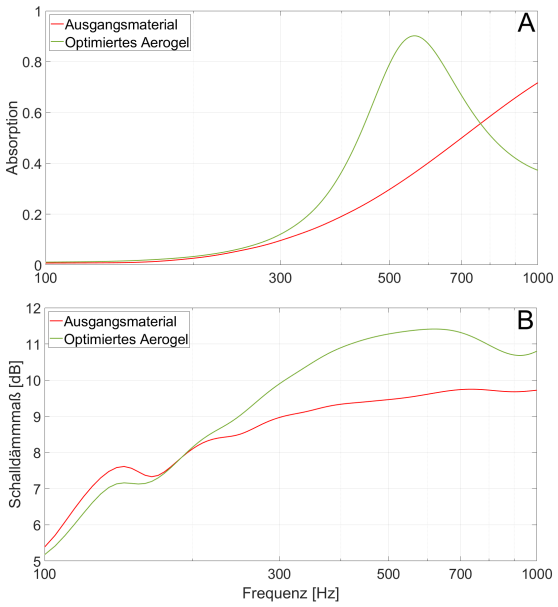

Abbildung 5: Ergebnisse der Optimierung. A: Absorption des Ausgangsmaterial und das Ergebnis der Optimierung. B: Transmission Loss des Ausgangsmaterials und mit den Parametern aus der Optimierung.

das akustische Verhalten in einem breiteren Frequenzbereich verbessert wird.

Da die Optimierung am Absorptionsmodell durchgeführt wurde, wurde überprüft, ob mit den ermittelten Parametern auch eine Verbesserung des Schalldämmmaßes erreicht wird. Das Ergebnis ist in Abbildung 5B dargestellt. Oberhalb von 300 Hz weist das optimierte Material ein bis zu 2 dB höheres Schalldämmmaß auf. Unterhalb von 300 Hz ist das Ausgangsmaterial besser, obwohl sich die Absorption in diesem Bereich kaum unterscheidet. Diese Abweichungen lassen sich mit den Varianzen erklären, die schon bei der Glaswolle zu erkennen waren.

Anschließend wurde eine Optimierung mit den gleichen Parametern für eine 12 mm dicke Probe durchgeführt, um zu überprüfen, ob die resultierenden Parameter dickenabhängig sind. Die Ergebnisse zeigen, dass auch für eine 12 mm dicke Probe die Ergebnisse zu einer maximalen Absorptionskurve führen, die durch ihre geringere Dicke auch eine geringere Fläche aufweist als dickere Proben.

Flugzeugrumpf

Als beispielhafte Anwendung im zu untersuchenden Umfeld des Flugzeugbaus wurde der Schalldurchgang durch einen Ausschnitt aus einem Flugzeugrumpf eines A310 berechnet. Das Modell ist in Abbildung 6 dargestellt. Es enthält die Innen- und Außenwand des Flugzeuges, das Dämmmaterial (dargestellt in rosa) und Luft (dargestellt in blau) im Zwischenraum und hat ca. 300000 Freiheitsgrade.

Als Anregung wurde ein Diffusfeld erzeugt. Die Dämmung wurde mit den zuvor getesteten Biot-Parametern

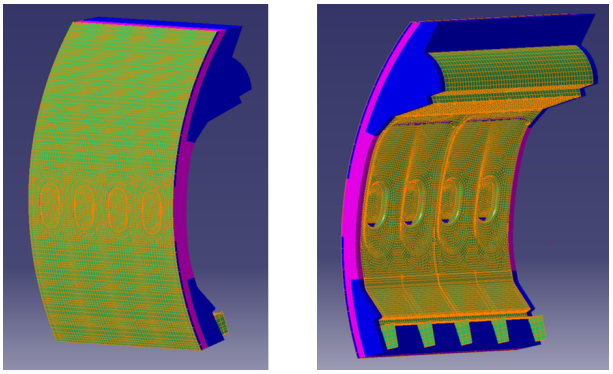

Abbildung 6: Modell eines Flugzeugrumpfes bestehend aus der Außen- und Innenwand, dem Dämmmaterial (rosa) und Luft (blau) im Innenraum.

von reinem Aerogel und Glaswolle beschrieben. Ein Vergleich des Schalldämmmaßes bei Verwendung von Aerogel oder Glaswolle ist in Abbildung 7 gezeigt.

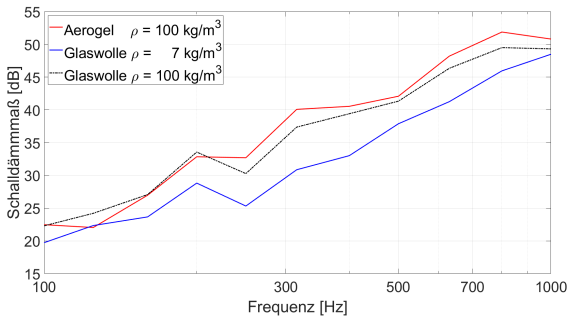

Abbildung 7: Berechnetes Schalldämmmaß eines beispielhaften Flugzeugrumpfes bei Verwendung von Aerogel und Glaswolle als Dämmmaterial.

Auf den ersten Blick scheint das Aerogel ein deutlich höheres Schalldämmmaß von bis zu 7 dB aufzuweisen. Allerdings besitzt die Aerogel-Probe mit 100 kg/m^3 eine deutlich größere Dichte als die Glaswolle (7 kg/m^3). Um auszuschließen, dass das bessere akustische Verhalten ausschließlich auf Masseneffekte zurückzuführen ist, wurde eine Rechnung durchgeführt, bei der die Dichte der Glaswolle auf die des Aerogels erhöht wurde und die restlichen Parameter beibehalten wurden. Hier zeigt sich, dass das Aerogel auch bei korrigierter Masse ein höheres Schalldämmmaß aufweist als die Glaswolle.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass akustische Eigenschaften von Aerogelen mit dem Biot-Modell dargestellt werden können, dass Aerogel ein gut geeignetes Grundmaterial für eine akustische und thermische Isolation in der Flugzeugwand darstellt und es Potential zur Optimierung hat. In weiterführenden Optimierungen sollen auch weitere Eigenschaften wie die thermische Leitfähigkeit berücksichtigt werden. Weiterhin wird beim Projektpartner an der HAW Hamburg ein Transmissions-Fenster aufgebaut, sodass zukünftig Messung und Rechnung in einem größeren Maßstab miteinander verglichen werden können.

Tabelle 1: Biot-Parameter von Glaswolle, dem reinen Aerogel, dem faserverstärkten Aerogel und dem optimierten Aerogel. Abkürzungen: E - E-Modul, ϕ - Porosität, α - Gewundenheit, Λ - Thermische Länge, Λ' - Viskose Länge und r_s - Strömungswiderstand,

	Glaswolle	Reines Aerogel	Verst. Aerogel	Optim. Aerogel
ρ [kg/m^3]	6,7	101,6	112	90
E [kPa]	3	11	128	8,5
ϕ [-]	0,99	0,95	0,95	0,958
α [-]	1,02	2	3	4
Λ [mm]	0,129	0,04	0,04	0,1
Λ' [mm]	0,6	0,04	0,04	0,005
r_s [Ns/m^4]	23000	100000	165000	140000

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projektes GELIKA durchgeführt. Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die finanzielle Unterstützung und den Projektpartnern an der HAW Hamburg und am DLR Köln für die Unterstützung zu diesem Beitrag.

Literatur

[1] Ratke, L.: Organische und anorganische Aerogele-Werkstoffe mit Potential für Triebwerksanwendungen? URL:`https://www.dlr.de/wf/Portaldata/23/Resources/dokumente/wf-kolloquium/Organische_und_anorganische_Aerogele.pdf`

[2] Wiener, M.: Synthese und Charakterisierung Sol-Gel-basierter Kohlenstoff-Materialien für die Hochtemperatur-Wärmedämmung. Dissertation an der Universität Würzburg (2009)

[3] Hayase, G. and Kanamori, K. and Nakanishi, K.: New flexible aerogels and xerogels derived from methyltrimethoxysilane/dimethyldimethoxysilane co-precursors. J. Mater. Chem 21 (2011), 17077-17079

[4] Allard,J.-F. and Atalla, N.: Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials, Second Edition. John Wiley & Sons (2009)

[5] Atalla, Noureddine and Panneton, R and Debergue, Patricia: A mixed displacement-pressure formulation for poroelastic materials. The Journal of the Acoustical Society of America 104 (1998), 1444-1452

[6] Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method, ASTM International, ASTM E2611-17, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org