

# CELLULOSE-AEROGELE ALS MULTIFUNKTIONALE UND NACHHALTIGE ALTERNATIVEN FÜR FLUGZEUGKABINENELEMENTE

S. Aney\*, M. Schestakow\*, L. Prikazchikova<sup>†</sup>, B. Milow\*<sup>‡</sup>, D. Prikazchikov<sup>†</sup>, J. Kaplunov<sup>†</sup>, H. Voggenreiter\*, A. Rege\*<sup>†</sup>

\* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Werkstoff-Forschung, Linder Höhe, 51147 Köln, Deutschland

<sup>†</sup> Keele University, School of Computing and Mathematics, Staffordshire ST5 5BG, Großbritannien

<sup>‡</sup> Universität zu Köln, Department Chemie, Nanostrukturierte Cellulare Materialien, Greinstraße 6, 50939 Köln, Deutschland

## Zusammenfassung

Aufgrund steigender Anforderungen steht das Design von Flugzeugkabinen vor revolutionären Herausforderungen. Die Integration innovativer Konzepte und nachhaltiger Materialien bietet einen wichtigen Lösungsansatz. Entsprechend müssen die Entwicklung und Demonstration neuer nachhaltiger multifunktionaler Materialien, die als thermische und akustische Isolation in Flugzeugkabinen wirken, beschleunigt werden. Hier können Aergelle eine wesentliche Rolle spielen. Cellulose-Aergelle sind hochporöse, nachhaltige Materialien mit einer sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit (bis zu 0,018 W/mK) und einer sehr guten mechanischen Eigenschaften. Zudem können Cellulose-Aergelle mit Silica-Aergellen kombiniert werden, und so wird die Wärmeleitfähigkeit weiter verringert. Diese Materialien können weiter funktionalisiert werden, um Hydrophobie und hinreichende Feuerbeständigkeit zu erzielen und so die Anforderungen der Luftfahrt vollständig zu erfüllen. In diesem Beitrag wird eine analytische und rechnerische Studie vorgestellt von vereinfachten Flugzeugkabinenseitenwänden, welche auf einem dreischichtigen System, aus der Aluminiumdeckschicht und der Dämmschicht im Inneren (Kern), basieren. Die Leistungsfähigkeit von Cellulose-Silica-Aergel wird mit der von Glaswolle im Rahmen einer Eigenfrequenzanalyse und Wärmetransportanalyse verglichen.

## Keywords

Flugzeugkabinenseitenwände, Eigenfrequenzanalyse, Wärmedämmung, Cellulose-Silica-Hybrid-Aergelle

## 1. EINLEITUNG

Wachsende Anforderungen an die Optimierung des Passagierkomforts stellen die Konstruktion von Flugzeugkabinen vor revolutionären Herausforderungen, insbesondere für die Integration innovativer Konzepte. Die derzeitige Isolierung der Flugzeugkabine erfolgt durch Packungen aus Siliziumdioxidfasern unterschiedlicher Grammaturn zur Wärme- und Schalldämmung. Angesichts eines Temperaturgefälles von bis zu 80°C zwischen dem Inneren der Kabine und der Außenhaut des Flugzeugs müssen diese Dämmstoffe enorm effizient sein, ohne das Gesamtgewicht des Systems zu erhöhen. Obwohl derzeitige Materialien gute Leistungen in Bezug auf die Wärmedämmung aufweisen, sind mehrere Nachteile zu beobachten. Eines der Hauptprobleme ist die Kondensation von Feuchtigkeit innerhalb des Isoliermaterials und die daraus resultierende Eisbildung. Durch die Eisbildung sinkt die Wärmedämmleistung erheblich, was zu einem höheren Energieverbrauch (Kraftstoff) für die Kabinenheizung führt. Geringere Umkehrverweilzeiten werden zu einem kostengünstigeren Flugplan führen. Die Maßnahmen, die derzeit zur Verringerung

der Abfertigungszeiten ergriffen werden, wurden von M. Schmidt [1] zusammengefasst. Kürzere Umkehrverweilzeiten lassen jedoch das Eis im Isoliermaterial nicht schmelzen, was zu einem Phänomen namens 'Rain in the plane' führen kann [2]. In diesem Fall schmilzt das im Isoliermaterial gebildete Eis während des Fluges und regnet auf die Passagiere herab. Neben diesen Komfortproblemen wirkt sich die Eisbildung im Isoliermaterial auch auf die wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Aspekte aus, da das zusätzliche Gewicht den Treibstoffverbrauch und das Korrosionsrisiko erhöht [3].

Kontinuierliche Verbesserungen wie eine bessere Isolierung, mehr Platz in der Kabine und eine Verringerung des Lärms sind notwendig, um die Zufriedenheit der Passagiere zu erhöhen. Dies könnte durch den Einsatz neuer multifunktionaler Hochleistungsmaterialien wie Aergelle erreicht werden, die faszinierende Eigenschaften aufweisen [4]. Aergelle gehören zu einer Klasse von extrem leichten, superisolierenden Materialien, deren Eigenschaften auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten werden können [5]. Arbeiten von Rege et al [6] zeigen die thermische und mechanische Eignung faserverstärkter, superflexibler

Silica Aerogele in Luftfahrtanwendungen. Geeignete Aerogel-Verbundwerkstoffe behalten auch bei  $-50^{\circ}\text{C}$  ihre mechanische Flexibilität bei. Angesichts des gegenwärtigen Trends hin zu nachhaltigeren Ansätzen und Technologien in der Luftfahrt kommt auch der Verwendung nachhaltiger, erneuerbarer Werkstoffe eine wichtige Rolle zu. Zu diesem Zweck können Aerogele aus Biopolymeren hervorragende Kandidaten sein. Cellulose ist eines der am häufigsten vorkommenden Biopolymere auf der Erde. Die Verfügbarkeit und die herausragenden Eigenschaften der, aus  $\beta$ -1,4-glycosidisch verknüpften Glucosemolekülen bzw. Cellobioseeinheiten bestehenden, Cellulose macht das Material zunehmend interessant für technische Anwendungen. Aerogele auf Basis von Cellulose sind hochporös, haben eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit, eine niedrige Dichte und eine sehr gute mechanische Stabilität [7, 8]. Im Allgemeinen können (Biopolymer)Aerogele in jede beliebige Form hergestellt werden. Die Eigenschaften von Cellulose-Aerogelen können durch die Entwicklung von Aerogel-Verbundwerkstoffen oder Hybrid-Aerogelen weiter verbessert werden. In dieser Arbeit werden Cellulose-Silica (CA-Si) Hybrid-Aerogele für Anwendungen in der Luftfahrt untersucht.

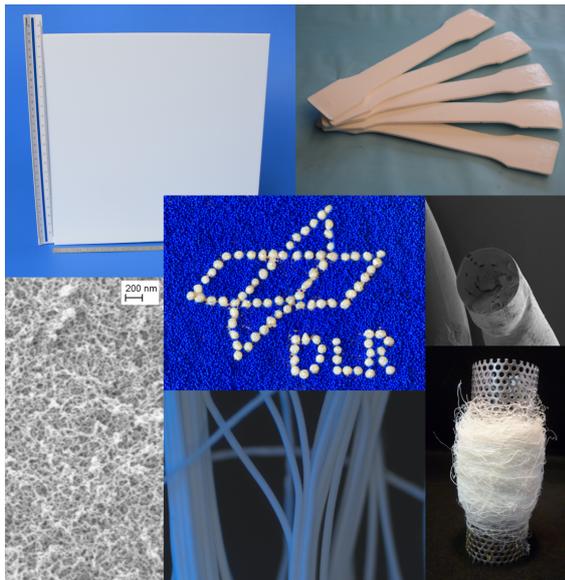


BILD 1. Zusammenstellung darstellbarer Formen von Biopolymer Aerogelen: Platten, Flachzugproben, Fasern und Aerogelkugeln, sowie eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der nanofilartigen Netzwerkstruktur eines Cellulose-Aerogels mit einem Feststoffgehalt von 5 Gew.-% und die Draufsicht einer Faser mit  $200\ \mu\text{m}$  Durchmesser.

Um die Verwendung von Aerogel-Verbundwerkstoffen in Flugzeugkabinen unter Flugbedingungen zu untersuchen, ist ein interdisziplinärer Ansatz erforderlich. Das große Ziel besteht darin, die Multifunktionalität dieser Aerogele und Verbundwerkstoffe für die Isolierung von Flugzeugkabinen zu nutzen, und zwar als Ersatz für die primäre und sekundäre Isolierung (das derzeitige Standardmaterial ist Glaswolle), indem sowohl die thermische als auch die akustische Isolierung be-

rücksichtigt wird, sowie die Anwendung der Aerogele in Kabinenkomponenten, wie z. B. in den Seitenwänden. Obwohl es sich bei den Seitenwänden der Flugzeugkabine um eine recht komplexe Schichtstruktur handelt, betrachten wir in dieser Arbeit als Vorstudie eine vereinfachte dreischichtige Sandwichstruktur, an denen wir die analytischen und Simulationsstudien durchführen. Ähnliche Studien [9,10] über Aerogele für Kabinenanwendungen haben vielversprechende Ergebnisse gezeigt. Die hier vorliegende Studie ist jedoch die erste, in der solche hybriden Aerogele im Zusammenhang mit Luftfahrtanwendungen untersucht werden. Hierzu werden zunächst die Materialeigenschaften von CA-Si-Aerogele experimentell charakterisiert und anschließend mit denen von Glaswolle verglichen. Weiter werden analytische Untersuchungen zum Dispersionsverhalten von Sandwichstrukturen mit Glaswolle und CA-Si-Aerogele vorgestellt. Schließlich werden Simulationsstudien zur Analyse der Eigenfrequenz der Sandwichstrukturen mit Glaswolle und Aerogelen durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Faktoren, wie Flughöhe und Temperatur, auf den Frequenzgang verglichen. Von besonderem Interesse ist die Untersuchung des Wärmedurchgangs durch die Sandwichstruktur, um die Dämmeigenschaften der Sandwichpaneele mit Aerogelen mit denen der gängigen Glaswolle zu vergleichen.

## 2. CELLULOSE-SILICA AEROGELE

Ausgewählte Eigenschaften von Cellulose-Aerogelen wurden im vorherigen Abschnitt beschrieben. Einige Beispiele zur Herstellung von Cellulose-Aerogelen in verschiedenen Formen sind in Abbildung 1 dargestellt.

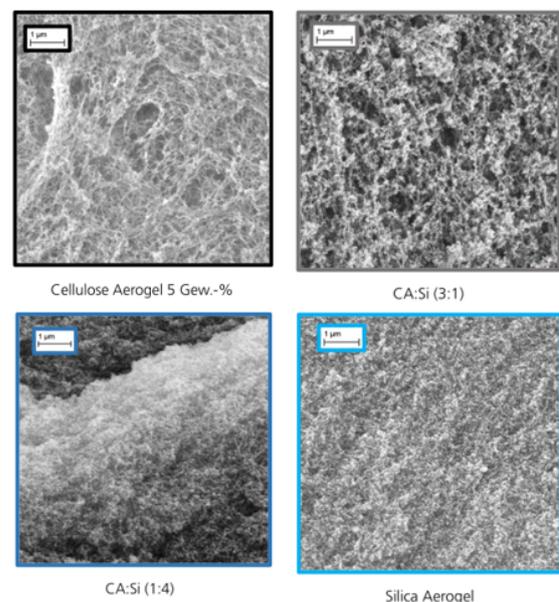


BILD 2. REM-Aufnahmen der Mikrostrukturen von CA und Silica Aerogelen, sowie zweier exemplarischer CA:Si-Verhältnisse, welche die Einstellbarkeit der Eigenschaften anhand der Netzwerkbeschaffenheit verdeutlichen sollen.

Silica-Aerogele weisen extrem niedrige Dichten und Wärmeleitfähigkeiten auf. Allerdings sind die reinen Silica-Aerogele oft mechanisch instabil [11]. Sie bleiben weitgehend spröde. Die Kombination von wärmeisolierenden und flammhemmenden Silica-Aerogelen mit den hervorragenden mechanischen Eigenschaften von Cellulose-Aerogelen ergibt jedoch ein geeignetes Material als potentielles Isoliermaterial in der Luftfahrt [12, 13]. Die diversen Werkstoffeigenschaften sind einstellbar und können prinzipiell mit mehr "Cellulose- oder mehr Silica-artigen" Eigenschaften hergestellt werden. Dies kann anhand der in Abbildung 2 gezeigten Mikrostrukturen exemplarisch verdeutlicht werden. Die Herstellung über eine einstufige Synthese wird derzeit weiterentwickelt, um den Herstellungsprozess zu optimieren. Basierend auf den Eigenschaften dieser Hybrid-Aerogele werden im Rahmen dieser Arbeit Simulationen für ihren Einsatz als Isolationsmaterial in Flugzeugen durchgeführt.

### 3. ANALYTISCHE UNTERSUCHUNGEN DREI-SCHICHTIGE SEITENWÄNDE

In diesem Abschnitt wird das Dispersionsverhalten von Sandwichstrukturen mit Glaswolle und CA-Si Aerogel untersucht. Betrachtet wird eine vereinfachte dreischichtige Sandwichstruktur. Die Außen- und Innen-

deckschicht der Seitenwand wird mit Aluminium modelliert und der innere Kern wird als Dämmmaterial (entweder Glaswolle oder CA-Si Aerogel) modelliert. Für die analytischen Untersuchungen kann die dreischichtige symmetrische Platte isotroper Schichten, die zugfreien Flächen ausgesetzt sind (Sandwichstruktur), als ein Problem im ebenem Dehnungszustand betrachtet werden. Die Kernschicht besitzt eine Dicke von  $2h_c$  und die Deckschichten haben eine Dicke von  $h_s$ , siehe Abbildung 3. Angenommen wird eine ideale Verbindung zwischen den Schichten.

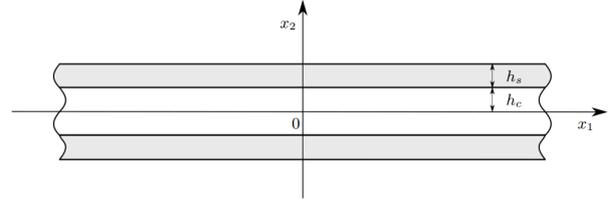


BILD 3. Eine dreischichtige Sandwichstruktur.

Die Dispersionsrelation für die antisymmetrischen Moden der Sandwichstruktur kann wie folgt ermittelt werden, siehe z.B. [14, 15]

$$(1) \quad 4K^2 h^3 \alpha_s \beta_s F_4 [F_1 F_2 C_{\beta_c} S_{\alpha_c} - 2\alpha_c \beta_c (\varepsilon - 1) F_3 C_{\alpha_c} S_{\beta_c}] + h \alpha_s \beta_s C_{\alpha_c} C_{\beta_s} [4\alpha_c \beta_c K^2 (h^4 F_3^2 + F_4^2 (\varepsilon - 1)^2) C_{\alpha_c} S_{\beta_c} - (4K^4 h^4 F_2^2 + F_4^2 F_1^2) S_{\alpha_c} C_{\beta_c}] + C_{\beta_s} S_{\alpha_s} \varepsilon \beta_s (\beta_s^2 - K^2 h^2) (\beta_c^2 - K^2) [4\alpha_s^2 \beta_c K^2 h^2 S_{\alpha_c} S_{\beta_c} - F_4^2 \alpha_c C_{\alpha_c} C_{\beta_c}] + C_{\alpha_s} S_{\beta_s} \varepsilon \alpha_s (\beta_s^2 - K^2 h^2) (\beta_c^2 - K^2) [4\alpha_c \beta_s^2 K^2 h^2 C_{\alpha_c} C_{\beta_c} - F_4^2 \beta_c S_{\alpha_c} S_{\beta_c}] + h^3 S_{\alpha_s} S_{\beta_s} [(4\alpha_s^2 \beta_s^2 K^2 F_1^2 + K^2 F_4^2 F_2^2) C_{\beta_c} S_{\alpha_c} - \alpha_c \beta_c (16\alpha_s^2 \beta_s^2 (\varepsilon - 1)^2 K^4 + F_4^2 F_3^2) C_{\alpha_c} S_{\beta_c}] = 0,$$

wobei

$$(2) \quad \begin{aligned} F_1 &= 2(\varepsilon - 1)K^2 - \varepsilon\Omega^2, \\ F_2 &= 2(\varepsilon - 1)K^2 + \frac{\varepsilon(1-r)}{r}\Omega^2, \\ F_3 &= 2(\varepsilon - 1)K^2 + \frac{\varepsilon}{r}\Omega^2, \\ F_4 &= \beta_s^2 + K^2 h^2, \end{aligned}$$

und

$$(3) \quad \begin{aligned} \alpha_c^2 &= K^2 - \varkappa_c^2 \Omega^2, & \alpha_s^2 &= h^2 \left( K^2 - \frac{\varepsilon \varkappa_s^2}{r} \Omega^2 \right), \\ \beta_c^2 &= K^2 - \Omega^2, & \beta_s^2 &= h^2 \left( K^2 - \frac{\varepsilon}{r} \Omega^2 \right). \end{aligned}$$

In den obigen Gleichungen  $C_{\alpha_q} = \cosh(\alpha_q)$ ,  $C_{\beta_q} = \cosh(\beta_q)$ ,  $S_{\alpha_q} = \sinh(\alpha_q)$ ,  $S_{\beta_q} = \sinh(\beta_q)$ , und  $\varkappa_q = c_{2q}/c_{1q}$  mit

$$(4) \quad c_{1q}^2 = \frac{\lambda_q + 2\mu_q}{\rho_q}, \quad c_{2q}^2 = \frac{\mu_q}{\rho_q}, \quad q = c, s,$$

wobei  $\lambda_q$  und  $\mu_q$  sind die Lamé-Konstanten,  $\rho_q$  sind Volumenmassedichten. Hier und im Folgenden werden die dimensionslose Frequenz  $\Omega$  und die Wellenzahl  $K$  eingeführt als

$$(5) \quad \Omega = \frac{\omega h_c}{c_{2c}}, \quad K = k h_c,$$

zusammen mit dimensionslosen Parametern

$$(6) \quad h = \frac{h_s}{h_c}, \quad \varepsilon = \frac{\mu_c}{\mu_s}, \quad r = \frac{\rho_c}{\rho_s}.$$

Die in Tabelle 1 aufgeführten Parameterwerte für Aerogele wurden experimentell ermittelt. Die folgende Gleichung für Grenzfrequenzen lässt sich aus der Dispersionsrelation ableiten (1)

$$(7) \quad \tan(\Omega) \tan\left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{r}} h \Omega\right) = \sqrt{\varepsilon r},$$

siehe auch eine ähnliche Frequenzgleichung für einen elastischen Dreikomponentenstab in Kaplunov et al.

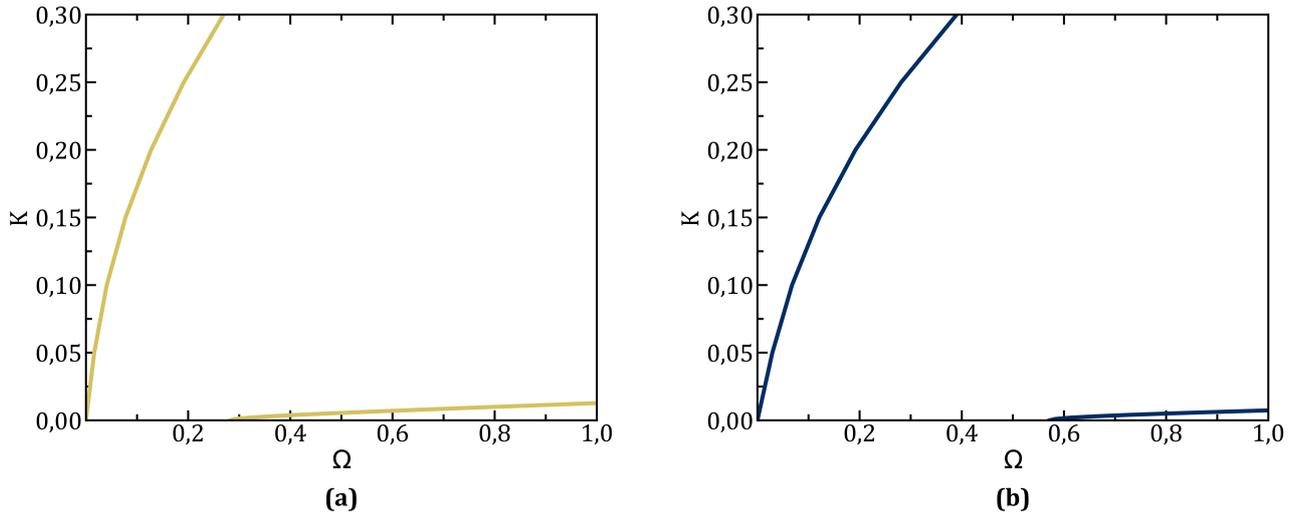


BILD 4. (a) Numerische Lösung der Dispersionsrelation (1) für Anwendungsfall 1 (Aluminium - Glaswolle - Aluminium), wobei  $\varepsilon \approx 5,6 \times 10^{-6}$ ,  $r \approx 1,1 \times 10^{-2}$  und  $h \approx 1,3 \times 10^{-1}$ , (b) Numerische Lösung der Dispersionsrelation (1) für Anwendungsfall 2 (Aluminium - Aerogel - Aluminium), wobei  $\varepsilon \approx 1,0 \times 10^{-5}$ ,  $r \approx 4,9 \times 10^{-2}$  und  $h \approx 1,3 \times 10^{-1}$ .

Material	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$E$ Pa	$\nu$ -
Aluminium	2750	$7,17 \times 10^{10}$	0,331
Glaswolle	30	$3,90 \times 10^5$	0,300
Aerogel	135	$6,67 \times 10^5$	0,200

TAB 1. Materialparameter der Schichten [10, 16] ( $\rho$ : Dichte,  $E$ : Elastizitätsmodul,  $\nu$ : Querkontraktionszahl).

[17]. Aus (7) folgt,

$$(8) \quad r \ll h \ll \varepsilon^{-1},$$

die niedrigste Scherfrequenz klein wird, gegeben in führender Ordnung durch

$$(9) \quad \Omega_{sh} \approx \sqrt{\frac{r}{h}} \ll 1.$$

Für die Szenarien mit innerer Glaswollschicht sind die dimensionslosen Parameter  $r$ ,  $h$  und  $\varepsilon$  durch

$$(10) \quad \varepsilon \sim h^6, \quad r \sim h^2,$$

verbunden, während für die Aerogel-Kernschicht gilt

$$(11) \quad \varepsilon \sim h^5, \quad r \sim h^2.$$

Daher sind die Gleichungen (8) für beide Fälle erfüllt, was dazu führt, dass die niedrigsten Scher-Grenzfrequenzen klein sind, nämlich  $\Omega_{sh} \sim \sqrt{h}$ .

Die obigen analytischen Berechnungen können weiterentwickelt werden, um polynomiale asymptotische Näherungen für die ersten beiden Dispersionskurven abzuleiten, gemäß dem von Kaplunov et al. [15] beschriebenen Verfahren. Darüber hinaus kann die gleichmä-

ßige oder ungleichmäßige Art solcher asymptotischen Expansionen untersucht werden. Außerdem kann eine Verallgemeinerung des Saint-Venant-Prinzips unter Berücksichtigung eines hohen Kontrasts der Materialparameter der Schichten durchgeführt werden, was zu asymptotischen Randbedingungen für eine Sandwichstruktur finiter Größe führt, siehe Kaplunov et al. [18].

#### 4. FINITE-ELEMENTE-UNTERSUCHUNG DER SEITENWÄNDE

Die Simulationen zur Analyse des Frequenzverhaltens der Sandwichstruktur werden in Abaqus 6.19 durchgeführt. Die vernetzte Geometrie, die aus den drei Schichten besteht, ist in Abbildung 5 dargestellt. Für diese Simulationen werden Solid-Elemente (lineare 8-Knoten-Brick-Elemente mit reduzierter Integration) mit einem grundlegenden linear-elastischen Materialmodell verwendet. Für die in Abschnitt 4.1 beschriebene Frequenzanalyse wird ein linearer Störungsschritt definiert.

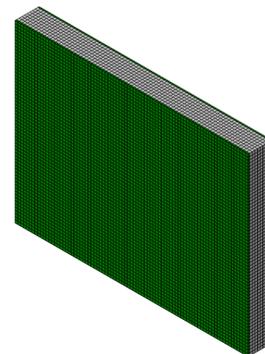


BILD 5. Vernetzte Geometrie der Sandwichstruktur, wobei die Deckschichten in grüner Farbe und die Isolierung in grauer Farbe dargestellt sind.

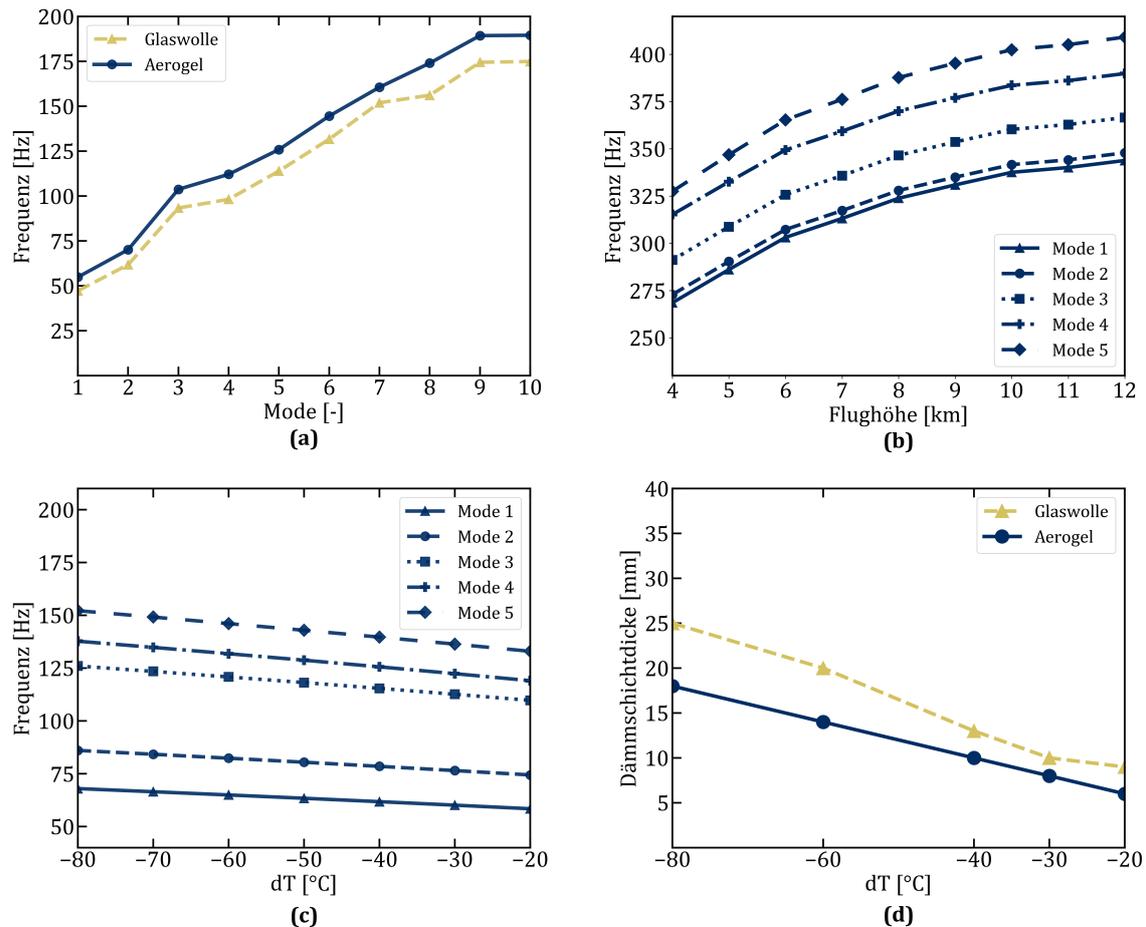


BILD 6. (a) Variation der Eigenfrequenzen mit den ersten zehn Moden, (b) Variation der Eigenfrequenzen mit der Flughöhe, (c) Variation der Eigenfrequenzen mit der Temperaturdifferenz, (d) Erforderliche Dämmschichtdicke bei verschiedenen Außentemperaturen.

Die dreischichtige Sandwichstruktur (Abbildung 5) wird zunächst einer Eigenfrequenzanalyse unterzogen, es folgt die Berücksichtigung des Einflusses der Flughöhe auf die Eigenfrequenzen. Der Einfluss der Temperatur zusammen mit dem des Drucks auf die Eigenfrequenzen wird ebenfalls untersucht. In dem Abschnitt 4.2 wird auch der Wärmetransport durch die Struktur untersucht, der sich aus dem Temperaturgefälle zwischen der Kabine und der Außenluft ergibt.

#### 4.1. Lineare Störungsanalyse

Die für die ersten zehn Moden ermittelten Eigenfrequenzen sind in der Abbildung 6 (a) dargestellt. Die für das CA-Si-Aerogel erhaltenen Frequenzen sind etwas höher als die von Glaswolle, was qualitativ mit den analytischen Berechnungen übereinstimmt. Ein quantitativer Vergleich wird aufgrund eines Konflikts zwischen den simulierten Dimensionen (2D im analytischen Fall und 3D im rechnerischen Fall) vermieden. Eine quantitative Übereinstimmung kann jedoch durch Untersuchungen innerhalb eines ähnlichen Frequenz-

spektrums und einer ähnlichen Dimensionalität des Problems erreicht werden.

Noch interessanter ist es, die Leistung von Materialien unter tatsächlichen Flugbedingungen zu analysieren. Passagierflugzeuge fliegen in der Regel in Höhen zwischen 9000 und 12000 m. Um die Eigenfrequenzen unter realen Flugbedingungen zu simulieren, wird der Einfluss der Flughöhe auf die Eigenfrequenzen für die ersten fünf Moden untersucht. Diese korreliert im Wesentlichen mit der erzeugten Druckdifferenz. Die Einwirkung von seitlichem Druck auf eine solche Sandwichstruktur würde zu Membranspannungen in der Bauteilebene führen. Äquivalent zu thermischen Einflüssen bewirken diese Spannungen eine Versteifung der Sandwichstruktur und damit eine Erhöhung der Eigenfrequenzen. Abbildung 6 (b) zeigt die für unseren Fall erhaltenen Ergebnisse. Für jeden Modus führte eine Erhöhung der Flughöhe zu höheren Eigenfrequenzen für CA-Si-Aerogel. Dieses Ergebnis stimmt gut mit früheren Studien zur Simulation von Kabinenkomponenten mit Silica-Aerogelen [10, 19] überein.

## 4.2. Thermische Untersuchungen

Üblicherweise wird während des Fluges eine Kabinentemperatur von 22 bis 24°C gehalten. Die Außentemperatur in Reiseflughöhe kann bis zu -57°C erreichen. Das bedeutet eine Temperaturdifferenz von 80°C. Dieser Temperaturdifferenz führt zu Spannungen, die sich auf die Eigenfrequenzen auswirken. Um den Wärmetransport durch die Sandwichstruktur zu analysieren, wurde diese Auswirkung der Temperaturdifferenz auf die Eigenfrequenzen der ersten fünf Moden untersucht. Abbildung 6 (c) zeigt, dass mit steigender Temperaturdifferenz auch die Frequenzen steigen. Dies stimmt mit den vorherigen Ergebnissen überein, die nur den Druckunterschied berücksichtigten. Dies stimmt auch qualitativ mit früheren Ergebnissen über die thermische Analyse von Kabinenseitenwänden überein [10, 19]. In unserem Fall ist die Art der beobachteten Frequenzvariation jedoch linear. Weitere Untersuchungen, die die Temperatur- und Druckeffekte kombinieren, werden in zukünftigen Studien durchgeführt.

Es ist von Interesse, die Leistung von CA-Si Aerogelen mit der von Glaswolle hinsichtlich ihrer Isolierfähigkeit zu vergleichen. Der Wärmetransport durch die Sandwichstruktur wird für verschiedene Temperaturbelastungen sowohl für Glaswolle als auch für das CA-Si Aerogel simuliert. Der Temperaturabfall durch die Struktur wird variiert und die erforderliche Mindestdicke der Dämmschicht wird berechnet. Die Temperatur auf einer Seite der Struktur wird konstant auf 23°C gehalten, was der Temperatur im Inneren der Kabine entspricht. Die Temperatur auf der anderen Seite der Struktur wird von 3°C bis -57°C variiert, und somit die Temperaturdifferenz. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass im Fall einer Aerogel-Kernschicht, über alle untersuchten Temperaturbereiche hinweg geringere Dämmschichtdicken notwendig sind als für Glaswolle (siehe Abbildung 6 (d)). Insbesondere bei einem Temperaturunterschied von 80°C, der den in Reiseflughöhe erreichten Temperaturen sehr nahekommt, beträgt die für Aerogele erforderliche Isolierdicke nur etwas mehr als zwei Drittel der Dämmschichtdicke von Glaswolle. Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse qualitativ bewertet werden müssen. Der reale Sandwichtaufbau einer Kabinenseitenwand ist wesentlich komplexer und umfasst zwei durch den Lüftungsspalt getrennte Dämmschichten. Dies würde in der Realität zu einer weiteren Verringerung der Dicke der Dämmschicht führen.

## 5. SCHLUSSFOLGERUNG

Das Flugzeugkabinen-Design ist ein multidisziplinäres Problem. Obwohl anspruchsvolle Ansätze zur Behandlung des multidisziplinären Charakters dieses Problems vorgeschlagen wurden [20], sollte diese Studie erste Einblicke in die potenziellen Anwendungen von CA-Si-Aerogelen in Flugzeugkabinenseitenwänden liefern. Um die Verwendung von CA-Si-Aerogelen als Kabinenisolierung vorzuschlagen, wurden dreischichtige Sandwichstrukturen, bestehend

aus Aluminiumdeckschichten und einer isolierenden Kernschicht, untersucht. Es wurden analytische Berechnungen durchgeführt. Um das Dispersionsverhalten in solchen Strukturen zu untersuchen, wurden zwei Anwendungsfälle betrachtet, einer mit Glaswolle und einer mit CA-Si-Aerogel betrachtet. Für solche Strukturen wurde eine Eigenfrequenzanalyse durchgeführt, die den Einfluss der Flughöhe simulierte, wobei Temperatur und Druck separat berücksichtigt wurden. Außerdem wurde die Dämmleistung von Aerogelen im Vergleich zu Glaswolle untersucht. Abschließend konnte aufgezeigt werden, dass die Verwendung von CA-Si-Aerogelen den Volumenbedarf für die Flugzeugisolierung um fast 30% reduzieren könnte.

## DANKSAGUNG

J.K. möchte sich bei der Humboldt-Stiftung für die Unterstützung seines dreimonatigen Aufenthalts an der RWTH Aachen University bedanken. S.A. bedankt sich für das DLR-DAAD-Forschungsstipendienprogramm.

Kontaktadresse:

[shivangi.aney@dlr.de](mailto:shivangi.aney@dlr.de)

## Literatur

- [1] M Schmidt. A review of aircraft turnaround operations and simulations. *Progress in Aerospace Sciences*, 92:25–38, 2017.
- [2] T Pleasant. Rain in the plane. *Aircraft Cabin Management*, 2:56–60, 2013.
- [3] L Chen, S Wang, G Li, C-H Lin, and TT Zhang. Cfd modeling of moisture accumulation in the insulation layers of an aircraft. *Applied Thermal Engineering*, 102:1141–1156, 2016.
- [4] MA Aegerter, N Leventis, and MM Koebel. *Aerogels handbook*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [5] LW Hrubesh. Aerogel applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225:335–342, 1998.
- [6] A Rege, P Voepel, E Okumus, M Hillgärtner, M Itskov, and B Milow. Temperature-dependent stiffening and inelastic behavior of newly synthesized fiber-reinforced super flexible silica aerogels. *Materials*, 12(18):2878, 2019.
- [7] A Rege, M Schestakow, I Karadagli, L Ratke, and M Itskov. Micro-mechanical modelling of cellulose aerogels from molten salt hydrates. *Soft Matter*, 12(34):7079–7088, 2016.
- [8] S Zhao, WJ. Malfait, N Guerrero-Alburquerque, MM. Koebel, and G Nyström. Biopolymer aerogels and foams: Chemistry, properties, and applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 57:7850–7608, 2018.

- [9] V Latsuzbaya, P Middendorf, D Völkle, and C Weber. Improving the thermal properties of aircraft cabin interiors with the integration of vacuum insulation panels. *CEAS Aeronautical Journal*, 13(3):705–718, 2022.
- [10] C Hesse, P Allebrodt, and A Rege. *Multi-Physikalische Untersuchungen zum Transmissionsverhalten neuartiger Kabinenseitenwände*. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV, 2020.
- [11] JCH Wong, H Kaymak, P Tingaut, S Brunner, and MM Koebel. Mechanical and thermal properties of nanofibrillated cellulose reinforced silica aerogel composites. *Microporous and Mesoporous Materials*, 217:150–158, 2015.
- [12] A Demilecamps, C Beauger, C Hildenbrand, A Rigacci, and T Budtova. Cellulose–silica aerogels. *Carbohydrate polymers*, 122:293–300, 2015.
- [13] S Zhao, Z Zhang, G Sèbe, R Wu, Raymond V Rivera V, P Tingaut, and MM Koebel. Multiscale assembly of superinsulating silica aerogels within silylated nanocellulosic scaffolds: improved mechanical properties promoted by nanoscale chemical compatibilization. *Advanced Functional Materials*, 25(15):2326–2334, 2015.
- [14] PCY Lee and N Chang. Harmonic waves in elastic sandwich plates. *Journal of Elasticity*, 9(1):51–69, 1979.
- [15] J Kaplunov, DA Prikazchikov, and LA Prikazchikova. Dispersion of elastic waves in a strongly inhomogeneous three-layered plate. *International Journal of Solids and Structures*, 113:169–179, 2017.
- [16] V Tarnow. Measurements of anisotropic sound propagation in glass wool. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(5):2243–2247, 2000.
- [17] J Kaplunov, D Prikazchikov, and O Sergushova. Multi-parametric analysis of the lowest natural frequencies of strongly inhomogeneous elastic rods. *Journal of Sound and Vibration*, 366:264–276, 2016.
- [18] J Kaplunov, L Prikazchikova, and M Alkinidri. Antiplane shear of an asymmetric sandwich plate. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 33(4):1247–1262, 2021.
- [19] P Allebrodt and C Hesse. Entwicklung einer methode zur numerischen simulation multiphysikalischer, thermisch-strukturakustisch gekoppelter analysen an flugzeug-kabinenkomponenten. Master’s thesis, Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt, 2020.
- [20] C Hesse, P Allebrodt, and J-N Walther. Integration of multi-physics analysis into the cabin design process using virtual reality. In *AIAA AVIATION 2021 FORUM*, page 2776, 2021.