

MULTI-PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM TRANSMISSIONSVERHALTEN NEUARTIGER KABINENSEITENWÄNDE

C. Hesse*, P. Allebrodt*, A. Rege[†]

* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Systemarchitekturen der Luftfahrt,
Hein-Saß-Weg 22, 21129 Hamburg, Deutschland

[†] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Werkstoff-Forschung, Linder Höhe, 51147 Köln,
Deutschland

Zusammenfassung

Die Integration neuartiger Konzepte und Materialien im Bereich der Flugzeugkabine erfordert häufig eine disziplinenübergreifende Betrachtungsweise. Sollen beispielsweise neue Materialien der thermischen und akustischen Isolierung betrachtet werden, haben diese einen Einfluss auf die einzelnen Disziplinen, stehen jedoch auch miteinander in Interaktion. Aufgrund von notwendigen Modellvereinfachungen werden häufig die Wechselwirkungen der einzelnen Disziplinen in den jeweiligen Untersuchungen vernachlässigt. So wird beispielsweise das akustische Transmissionsverhalten häufig unter idealisierten Temperatur- und Druckrandbedingungen unter Laborbedingungen vermessen. Unter Flugbedingungen stehen jedoch die aus der Flughöhe befindliche Temperaturverteilung im Bauteil sowie das akustische Verhalten miteinander in Wechselwirkung. Ebenso bewirkt die Druckdifferenz zwischen Flugzeugkabine und der umgebenden Luft eine Vorspannung im Material die das strukturdynamische Verhalten beeinflussen kann. In dieser Studie werden die multi-physikalischen Zusammenhänge von statisch thermischen Lasten und Vorspannungen mit dem akustischen Transmissionsverhalten untersucht. Dazu werden die Flugzeugrumpfstruktur, die primäre und sekundäre Isolierung sowie die Kabinenseitenwand berücksichtigt. Als Isolierungsmaterialien werden Dämmpakete aus Glaswolle sowie poröse Schäume aus Aerogelen betrachtet.

Keywords

Flugzeugkabine, Kabinenlärm, Kabinenseitenwand, Isolierung, Aerogele

1. EINLEITUNG

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt verfolgt das Ziel, die Luftfahrtforschung als virtueller Originalausrüstungshersteller (OEM) über alle Systemebenen hinweg für künftige Flugzeuge zu unterstützen. Dafür wird eine digitale Gesamtsystemfähigkeit angestrebt, wobei die komplexen Wechselwirkungen des Flugzeugs abgebildet werden. Die vorliegende Arbeit verbindet diese Ziele mit den Herausforderungen des Kabinenentwurfs. Als eine wesentliche Problemstellung im Kabinenentwurfsprozess für zukünftige Flugzeuge und Antriebskonzepte wird die Reduktion von Kabinenlärm prognostiziert [1]. Diese Herausforderung ergibt sich insbesondere aus der Verwendung von Ultra High Bypass Ratio (UHBR) Fans, verteilter (Propeller-) Antriebssysteme und dem zunehmenden Grad an Hybridisierung.

Die Reduktion der Schalltransmission in die Kabine geht häufig mit gewichtsintensiven Maßnahmen einher. Insbesondere im Flugzeugbau ist dabei die zweischalige Bauweise aus primärer Rumpfstruktur und der innenliegenden Kabinenverkleidung weit verbreitet. Diese bietet ein hohes Steifigkeit-Gewichts-Verhältnis sowie positive thermische und akustische

Isolationseigenschaften. Speziell die akustische Dämmung ist dabei im hochfrequenten Bereich deutlich höher im Vergleich mit einschaligen Bauteilen vergleichbarer Dicke. Im tieffrequenten Bereich kann die Schalldämmung jedoch aufgrund der gekoppelten Masse-Feder-Masse-Resonanz stark einbrechen. Eine Möglichkeit zur Reduktion der tieffrequenten Schalltransmission ist der Einsatz von Dämmmaterialien aus hochporösen Aerogelen. Diese beschreiben eine Gruppe von Materialien, deren Einsatz flexibel auf den jeweiligen Anwendungsbereich angepasst werden kann [2, 3]. So sind bspw. Eigenschaften wie Hydrophobie sowie die thermale Isolation positiv für den Einsatz in der Flugzeugkabine [4]. Auch die akustischen Absorptionseigenschaften sind vielversprechend und durch die Abstimmung auf den Frequenzbereich vielseitig einsetzbar [5].

Die Evaluation neuartiger Dämmmaterialien erfordert die Berücksichtigung multi-physikalischer Einflüsse, welche sich aus dem Betrieb der Flugzeugkabine ergeben. Die Druckdifferenz zwischen der Passagierkabine und der das Flugzeug umgebenden Luft kann bspw. einen signifikanten Einfluss auf das Transmissionsverhalten der Seitenwand haben. Bei Transmissionsmessungen in einem Propeller-

flugzeug konnten BEYER ET AL. [6] allein durch Variation des Kabinendrucks eine Differenz des Einfügedämmmaßes von ca. 5 dB für ein identisches Dämmmaterial nachweisen. Die Bedruckung einer Platte bewirkt dabei nach GRAHAM [7] eine versteifende Membranspannung in der Struktur, welche die Eigenfrequenzen verschiebt, die Eigenformen bleiben in der Regel unverändert. Auch die Temperaturverteilung in der Kabinenseitenwand hat entscheidende Einwirkung auf das Transmissionsverhalten [8, 9]. Die Temperaturverteilung hängt wiederum stark vom verwendeten Dämmmaterial ab und lässt sich im Fall von Aerogelen für den genauen Betriebsfall abstimmen.

Das Ziel dieser Studie ist die Untersuchung von multi-physikalischen Zusammenhängen, die sich aus dem Betrieb einer Kabinenseitenwand ergeben. In Kapitel 2 wird dazu zunächst das Simulationsmodell einer Doppelplatte vorgestellt. Daran wird insbesondere der Einfluss von thermischen sowie Druckrandbedingungen auf die strukturellen Eigenfrequenzen untersucht. Anschließend werden in Kapitel 3 erste Untersuchungen zum Schalltransmissionsverhaltens durchgeführt und für verschiedene Dämmmaterialien verglichen.

2. UNTERSUCHUNGEN AN FLUGZEUGSEITENWÄNDEN

Dieser Abschnitt stellt das in dieser Studie verwendete Simulationsmodell einer Doppelplatte mit internem Fluid sowie Isolierung vor. Dieses wird im nachfolgenden Kapitel 3 für eine Untersuchung des Transmissionsverhaltens verwendet. Des Weiteren wird anhand einer einfachen Platte eine Parametervariation durchgeführt, um den Einfluss von thermalen Randbedingungen und der Bedruckung zu quantifizieren.

2.1. Simulationsmodell

Das verwendete Finite-Elemente-Modell ist in BILD 1 dargestellt; es handelt sich dabei um ein symmetrisches Doppelplattenmodell. Die Struktur ist in grün dargestellt, das Isolierungsmaß in rot. In blau sind Elemente des akustischen Fluids abgebildet, welche eine Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) aufweisen. Elemente in lila beschreiben das akustische Fluid ohne Kontakt zur Struktur. Die numerischen Simulationen werden in Ansys® v19.1 durchgeführt. Für multi-physikalische Untersuchungen ist die Verwendung der entsprechenden Elemente und die aus den Analysen resultierenden Lasten entscheidend. Die Struktur wird im Rahmen von thermischen Untersuchungen mit SHELL131 vernetzt und für strukturelle bzw. strukturdynamische Simulationen mit SHELL181. Die Kavität besteht aus Elementen vom Typ FLUID30. Diese erlauben auch die Modellierung von Isolierungsmaßen nach dem Materialgesetz von Johnson-Champoux-Allard [10–13]. Zusätzlich werden auf der Strukturoberfläche für die akustische Anregung mit komplex-wertigen Druckfeldern Elemente vom Typ SURF154 verwendet. Die Knoten

TAB 1. Eigenschaften von Platte und Fluid

Platte

E-Modul:	71.7 GPa
Querkontraktionszahl ν :	0.331
Dichte ρ :	2750 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Wärmeausdehnungskoeffizient α :	$22.9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$
Dimension ($a \times b$):	(0.33 × 0.25) m^2
Dicke h :	0.002 m
Dämpfungsverhältnis:	1%

Fluid

Dichte ρ_0 :	1.204 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Schallgeschwindigkeit c_0 :	343 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Kavitätstiefe:	0.08 m

dieser Elemente sind koinzident zu den Plattenknoten der Primärstruktur.

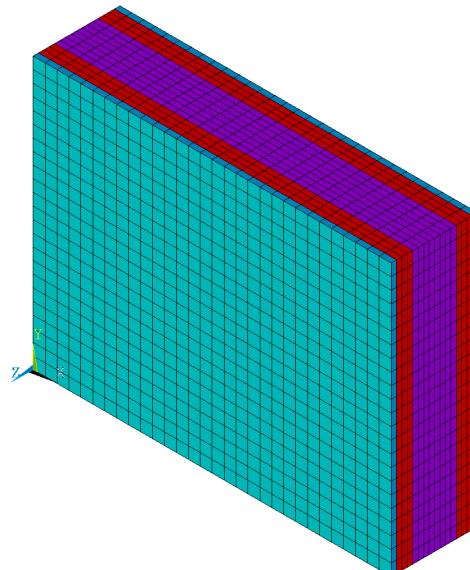


BILD 1. FE-Modell der Doppelplatte (Grün) mit Isolierung (Rot), akustischem Fluid ohne FSI (Lila) und akustischen Fluid mit FSI (Blau)

Die strukturellen und akustischen Parameter des Simulationsmodells sind in TAB 1 gegeben. Es handelt sich um Platten aus Aluminium und Luft als Fluid. Für die Abbildung der Isolierungen wird eine äquivalente Fluidformulierung gewählt, deren Parameter im nachvollgenden Kapitel 3 vorgestellt werden.

Im nachfolgenden Abschnitt soll der Einfluss thermaler und statischer Lasten auf das akustische Transmissionsverhalten untersucht werden. Die Übertragung der Lasten aus einer derartigen Basisanalyse auf eine struktur-akustische Analyse lässt sich in Ansys® durch eine sogenannte lineare Perturbationsanalyse durchführen. Letztere geht von einer statischen bzw. transienten Basisanalyse aus. Die anschließende Lösung (bspw. harmonische bzw. Modalanalyse) ist in zwei Phasen unterteilt; Umformen

der Elementmatrizen und anschließendes Lösen der modifizierten Gleichungssysteme. Die modifizierten Gleichungssysteme enthalten dabei die Lasten aus der Basisanalyse. Die nachfolgenden Abschnitte vergleichen die lineare Perturbation in Ansys® mit analytischen Lösungen für die strukturellen Eigenfrequenzen einer einzelnen ebenen Platte unter Temperatur und Druck-Randbedingungen.

2.2. Strukturresonanzen in thermaler Umgebung

In diesem Abschnitt wird der Temperatureinfluss auf die Strukturresonanzen einer einzelnen ebenen Platte, wie sie im vorangegangenen Abschnitt vorgestellt wurde, untersucht. Durch einen Vergleich der numerischen Eigenfrequenzen mit einer analytischen Beschreibung wird dabei das Simulationsmodell verifiziert.

Nach [9] lassen sich die Eigenkreisfrequenzen $\omega_{mn} = 2\pi f_{m,n}$ einer ebenen Platte in thermaler Umgebung zu

$$(1) \quad \omega_{mn} = \sqrt{\left(f_x^2 + g_y^2\right)^2 \frac{B}{\rho h} - \frac{\alpha E \Delta T}{\rho(1-\nu)} (f_x^2 + g_y^2)}$$

mit $f_x = m\pi/a$ und $g_y = n\pi/b$ bestimmen. Dabei beschreibt $B = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ die Biegesteifigkeit der Platte, α den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Platte und ΔT die Temperaturdifferenz verglichen mit der Referenztemperatur. Die modalen Indices m und n stehen für die Anzahl an Halbwellen in x - bzw. y -Richtung. Als Randbedingung für Gl. (1) wurden einfache Auflager angenommen, die Translationen an den Plattenrändern sind demnach eingeschränkt.

Im Reiseflug wird die Temperatur der Rumpfstruktur im Wesentlichen bestimmt durch die von der Flughöhe abhängigen Außentemperaturen. Weiterhin haben Fluggeschwindigkeit und Flugzeuggeometrie entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung der turbulenten Grenzschicht und der durch Reibungseffekte bedingten Aufheizung in unmittelbarer Umgebung der Flugzeugstruktur [14]. Die Bauteiltemperatur sinkt damit unter ihre jeweilige Referenztemperatur wodurch sich nach Gl. (1) ein Anstieg der Eigenfrequenzen erkennen lässt.

BILD 2 stellt die strukturellen Eigenfrequenzen einer einzelnen Platte über der Differenztemperatur dar. Dabei werden die analytischen Eigenfrequenzen den numerisch berechneten aus den Simulationsmodellen mit linearer Perturbation gegenüber gestellt. Eine gute Übereinstimmung ist dabei über einen weiten Temperaturbereich erkennbar. Die gewählte Art der Modellierung erscheint demnach für die Abbildung von temperaturbedingten Steifigkeitseffekten zuverlässig verwendbar zu sein.

2.3. Strukturresonanzen in bedruckter Umgebung

Dieser Abschnitt untersucht den Einfluss des Kabinendrucks bzw. der Flughöhe auf strukturelle

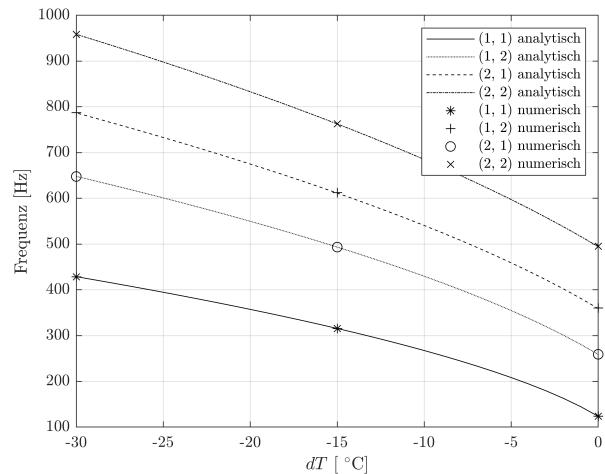


BILD 2. Vergleich der numerischen und analytischen Eigenfrequenzen (m, n) einer einzelnen Platte unter thermalen Randbedingungen

Resonanzen. Die Beaufschlagung einer ebenen Platte mit einem lateralen Druck ruft Membranspannungen in der Bauteilebene hervor. Äquivalent zu thermalen Einflüssen bewirken diese Spannungen eine Versteifung der Platte und damit ansteigende Eigenfrequenzen [15].

Die Eigenfrequenzen einer durch Bedruckung vorgespannten ebenen Platte bestimmen sich gemäß [16] zu

$$(2) \quad \omega_{mn} = \sqrt{\frac{1}{\rho h} \left[B (f_x^2 + g_y^2)^2 + T_x f_x^2 + T_y g_y^2 \right]}.$$

Zusätzlich zu den Formelzeichenkonventionen aus Gl. (1) werden hier die von der Bedruckung abhängigen Spannungen T_x und T_y in x - und y -Richtung eingeführt.

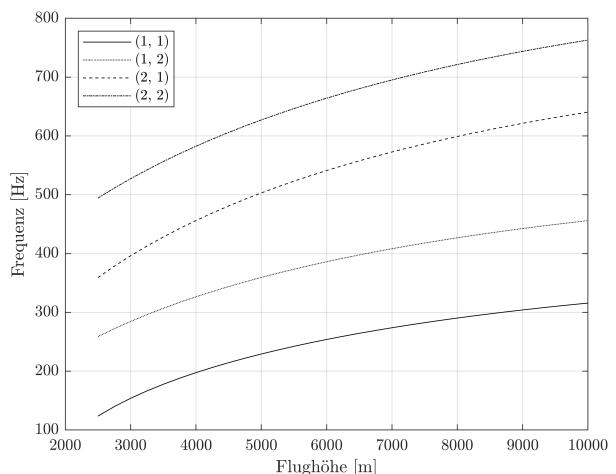


BILD 3. Strukturelle Eigenfrequenzen einer ebenen Platte in Abhängigkeit der Flughöhe

Die strukturellen Eigenfrequenzen einer ebenen Platte sind in BILD 3 nach Gl. (2) berechnet abgebildet. Dabei wurde eine Kabinenhöhe von 2500 m angenommen, was einem Druck von $\approx 74 \text{ kPa}$ entspricht. Bei einer Flughöhe von 2500 m stimmen die Eigenfrequenzen demnach mit denen einer span-

nungsfreien Platte überein. Darüber hinaus sinkt der Aussendruck, sodass die resultierende Druckdifferenz einen Anstieg der Eigenfrequenzen bewirkt. Dieser Zusammenhang zeigt die Bedeutsamkeit einer Berücksichtigung der Bedruckung für die Simulation der Schalltransmission in die Passagierkabine. Erste numerische Simulationen mit dem zuvor vorgestellten Simulationsmodell zeigen, dass die Verschiebung der Eigenfrequenzen sogar noch höher liegen kann. Dies liegt darin begründet, dass zusätzlich zu den hier vorliegenden Membranlasten noch statische Biegelasten berücksichtigt werden müssen. Dieser Zusammenhang wird in zukünftigen Studien genauer untersucht.

3. SIMULATION DER AKUSTISCHEN TRANSMISSION

In diesem Kapitel wird der Einfluss von akustischen und thermischen Dämmmaterialien auf das Transmissionssverhalten von doppelwandigen Bauteilen untersucht. Zu diesem Zweck werden zunächst die Grundlagen zur Berechnung des Schalldämmmaßes vorgestellt. Insbesondere erfolgt ein Vergleich von in der Luftfahrt üblicherweise verwendeten Dämmpakten aus Glaswolle und porösen Schäumen aus Aerogelen.

3.1. Simulation des Schalldämmmaßes

Das Schalldämmmaß ist eine Größe für die Güte der Schalldämmung struktureller Bauteile. Für die numerische Simulation des Schalldämmmaßes wird in der Regel eine akustische Druckanregung p_e in Form eines diffusen Schallfeldes zu

$$(3) \quad p_e(r_s) = \sum_n j\omega \rho_0 \frac{Q_n}{4\pi R_n} \exp\left(-j\omega \frac{R_n}{c_0} + \frac{\alpha_n}{2\pi}\right)$$

berechnet [17]. Dabei beschreibt Q_n die Volumenschnelle von n auf einer Halbsphäre verteilten Monopolschallquellen. Der Abstand der Monopolquellen zu einem Punkt r_s auf der Struktur wird dabei durch R_n definiert. Für jede Quelle wird zusätzlich eine stochastische Phaseninformation α_n angegeben.

Der zuvor berechnete Schalldruck wird in Ansys® im definierten Frequenzbereich von 100 - 1000 Hz auf die SURF154-Elemente als Anregung für die Primärstruktur definiert. Damit wird das harmonisch gekoppelte System aus Fluid, Struktur und Schalldämmung gelöst. Mit der normalen Oberflächenschnelle $v_n(r_s)$ der Sekundärstruktur lässt sich der Schalldruck p_a im Fernfeld an Position r nach dem RAYLEIGH-Integral zu

$$(4) \quad p_a(r) = \frac{j\omega \rho_0}{2\pi} \int_S \frac{v_n(r_s) \exp\left(\frac{-j\omega R}{c_0}\right)}{R} dS$$

berechnen.

Das frequenzabhängige Schalldämmmaß $R(\omega)$ berechnet sich damit als Verhältnis der einfallenden

TAB 2. Parameter des Materialmodells nach Johnson-Champoux-Allard für Glaswolle G und Aerogele A₁, A₂ und A₃

Parameter	G	A ₁	A ₂	A ₃
Porosität [-]	0.99	0.65	0.75	0.84
Viskose Länge [μm]	192	77	44	50
Thermale Länge [μm]	384	280	227	295
Tortuosität [-]	1	2.2	3.9	3.8
Strömungswiderstand [$\frac{\text{kNs}}{\text{m}^4}$]	9	17	89	200
Dichte [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	16	80	68	61

Schallleistung P_e und abgestrahlten Schallleistung P_a zu

$$(5) \quad R(\omega) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_e}{P_a} \right) [\text{dB}] .$$

Das berechnete Schalldämmmaß wird im nachfolgenden Abschnitt mit identischer Anregung und Strukturmodellierung für verschiedene Dämmmaterialien vergleichend gegenüber gestellt.

3.2. Vergleich von Dämmmaterialien

Eine Übersicht über für die Simulation verwendete Materialparameter ist in TAB 2 gegeben. Die Parameter für Glasswolle sind dabei aus LEI ET AL. [18] entnommen und die Aerogel-Parameter aus ABAWI ET AL. [5]. Aus der Studie von ABAWI ET AL. [5] wurden die Materialien "a"-“c” mit Granulatgrößen von 0.25 bis 3 mm ausgewählt, da hier die inverse Bestimmung der Materialparameter erfolgreich durchgeführt werden konnte. Die Materialien zeigen insbesondere im niedrigen Frequenzbereich unterhalb von 1000 Hz vielversprechende Absorptionseigenschaften.

BILD 4 stellt das berechnete Schalldämmmaß gemäß Gl. (5) für fünf Fälle vergleichend gegenüber. Im ersten Fall ist in der Kavität anstatt von Dämmmaterial nur Luft vorhanden. In den weiteren Fällen wird das Johnson-Champoux-Allard-Materialmodell mit den Parametern gemäß TAB 2 verwendet. Dabei ist erkennbar, dass für alle Fälle mit Dämmmaterial das Schalldämmmaß nahezu über den gesamten betrachteten Frequenzbereich ansteigt, besonders aber in den durch strukturelle Resonanzen bedingten Einbrüchen des Schalldämmmaßes.

Darüber hinaus zeigt sich insbesondere für die Dämmmaterialien aus Aerogel ein erhöhter Anstieg des Schalldämmmaßes in den fundamentalen und tieffrequenten Strukturresonanzen. Da sich die verschiedenen Dämmmaterialien in den einzelnen akustischen und strukturellen Resonanzen unterschiedlich verhalten, können diese nicht in schmalbandigen Frequenzen (wie in BILD 4 dargestellt) direkt verglichen werden. Vielmehr wird die abgestrahlte Schallleistung über den gesamten betrachteten Frequenzbereich betrachtet. Diese frequenzintegrierten Schallleistungspegel sind in TAB 3 dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass die

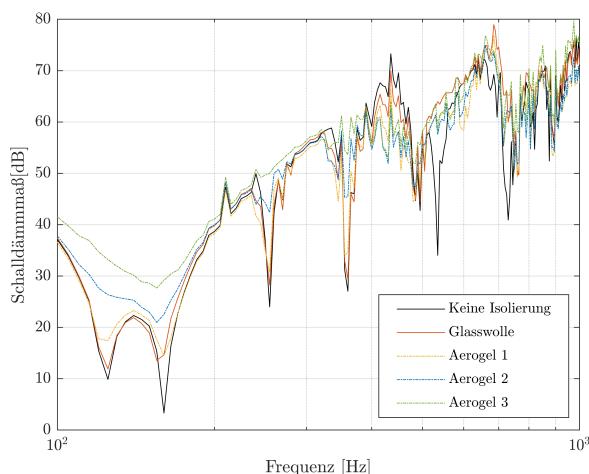


BILD 4. Vergleich des Schalldämmmaßes mit verschiedenen Isolierungsmaterialien

TAB 3. Frequenzintegrierter Schallleistungspegel der Abstrahlung für diverse Dämmmaterialien

Material	Schallleistung [dB]	Diff. [dB]
Keine Isolierung	89.73	—
Glaswolle G	88.22	1.51
Aerogel A ₁	84.98	4.75
Aerogel A ₂	80.01	9.72
Aerogel A ₃	74.95	14.78

abgestrahlte Schallleistung sich je nach verwendetem Aerogel-Material deutlich gegenüber der traditionellen Glaswolle reduzieren lässt. Während Glaswolle erst bei hohen Frequenzen oberhalb von 1000 Hz seine volle Wirksamkeit entfaltet [19], zeigen die Aerogel-Materialien bereits im sehr tieffrequenten Bereich eine nennenswerte Reduktion der Schalltransmission.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Studie werden multi-physikalische Randbedingungen aus Temperatur und Kabinenbedruckung auf die akustische Schalltransmission untersucht. Dabei wird zunächst anhand analytischer Zusammenhänge gezeigt, dass im Wesentlichen die strukturellen Eigenfrequenzen mit abnehmender Temperatur und zunehmender Druckdifferenz stark zunehmen können. Im Reiseflug fallen die Randbedingungen unterschiedlich aus als bei der hier verwendeten ebenen Platte, weswegen keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden können. Aufgrund von fehlenden Auflagern ist davon auszugehen, dass der Einfluss durch die Kabinenbedruckung bei einer komplexen Rumpfstruktur den Temperatureinfluss überwiegt.

Anhand von Transmissionssimulationen wurde zudem die Schalldämmung von Aerogelmaterialien mit Glaswolle verglichen. Diese Werte zeigen das Potential für den Einsatz von Aerogelen als Dämmmaterialien in der Luftfahrt auf, sind jedoch auch

mit einiger Vorsicht zu behandeln. Insbesondere das Johnson-Champoux-Allard-Materialmodell geht von einem starren Rahmen des Dämmmaterials aus und kann daraus bedingte Ungenauigkeiten in der Modellierung aufweisen [20]. Die Validität der Annahmen wird in zukünftigen Untersuchungen näher betrachtet und evaluiert. Darüber hinaus muss die Abhängigkeit der modalen Dämpfung von der Temperatur berücksichtigt werden [21]. Das in dieser Arbeit verifizierte thermische Modell der Einzelplatte soll zudem auf das Doppelplattenmodell erweitert werden und damit der Temperatureinfluss auch auf die akustische Transmission quantifiziert werden. Zudem werden die diversen Dämmmaterialien an zunehmend komplexen Strukturmodellen untersucht. Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen insbesondere die starken Wechselwirkungen zwischen diversen Entwurfsdisziplinen auf und motivieren damit die ganzheitliche Betrachtung von zukünftigen Kabinenkonzepten. In dieser ganzheitlichen Betrachtungsweise trägt jede Entwurfsdisziplin einen Baustein zum durchgängigen digitalen Faden bei.

Kontaktadresse:

christian.hesse@dlr.de

Literatur

- [1] Christian Thomas and Henning Scheel. Kabinenakustik in der Luftfahrtforschung. In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 4.-6. September 2018, Friedrichshafen*, 2018.
- [2] Lawrence W. Hrubesh. Aerogel applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 225:335–342, 1998.
- [3] Jason P. Randall, Mary Ann B. Meador, and Sadhan C. Jana. Tailoring mechanical properties of aerogels for aerospace applications. *ACS applied materials & interfaces*, 3(3):613–626, 2011.
- [4] Ameya Rege, Pascal Voepel, Emrah Okumus, Markus Hillgärtner, Mikhail Itskov, and Barbara Milow. Temperature-dependent stiffening and inelastic behavior of newly synthesized fiber-reinforced super flexible silica aerogels. *Materials*, 12(18):2878, 2019.
- [5] Y. Abawi, F. Langfeldt, H. Hoppen, W. Gleine, and B. Milow. Application of the johnson-champoux-allard model for the calculation of the sound absorption coefficient of aerogel granules based on inverse characterization for the determination of the granules parameters. In *Proceedings of DAGA 2020*, page 1039–1042, Hannover, 2020.
- [6] T. B. Beyer, C. A. Powell, E. F. Daniels, and L. D. Pope. Effects of acoustic treatment on the interior noise of a twin-enginepropeller airplane. *Journal of Aircraft*, 22(9):784–788, 1985.

- [7] W. R. Graham. Boundary layer induced noise in aircraft, part i: The flat plate model. *Journal of Sound and Vibration*, 192(1):101–120, 1996.
- [8] Yuan Liu and Yueming Li. Vibration and acoustic response of rectangular sandwich plate under thermal environment. *Shock and Vibration*, 20(5):1011–1030, 2013.
- [9] Qian Geng and Yueming Li. Analysis of dynamic and acoustic radiation characters for a flat plate under thermal environments. *International Journal of Applied Mechanics*, 4(03):1250028, 2012.
- [10] David Linton Johnson, Joel Koplik, and Roger Dashen. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of fluid mechanics*, 176:379–402, 1987.
- [11] Yvan Champoux and Jean-F. Allard. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of applied physics*, 70(4):1975–1979, 1991.
- [12] Jean-F. Allard and Yvan Champoux. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91(6):3346–3353, 1992.
- [13] Jean Allard and Noureddine Atalla. *Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials 2e*. John Wiley & Sons, 2009.
- [14] Society of Automotive Engineers. Committee AC, Aircraft Environmental Systems, and Society of Automotive Engineers. Committee A-9: Aerospace Environmental Control Systems. *SAE aerospace applied thermodynamics manual: developed by SAE Committee AC-9, Aircraft Environmental Systems*. Society of Automotive Engineers, 1969.
- [15] Joana Da Rocha, Afzal Suleman, and Fernando Lau. Turbulent boundary layer induced noise and vibration of a multi-panel walled acoustic enclosure. *Canadian Acoustics*, 38(4):9–22, 2010.
- [16] Robert D. Blevins. *Formulas for dynamics, acoustics and vibration*. John Wiley & Sons, 2015.
- [17] Stephan Tewes. *Active trim panel attachments for control of sound transmission through aircraft structures*. PhD thesis, Technische Universität München, 2006.
- [18] L. Lei, N. Dauchez, and J. D. Chazot. Prediction of the six parameters of an equivalent fluid model for thermocompressed glass wools and melamine foam. *Applied Acoustics*, 139:44–56, 2018.
- [19] Chao-Nan Wang and Jiunn-Hwan Tornig. Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials. *Applied Acoustics*, 62(4):447–459, 2001.
- [20] Andreas Gündel, Sigurd Häusler, and Steffen Marburg. Vergleich verschiedener absorbermodelle zur berechnung von flugzeuginnenlärm unter beachtung poröser materialien. 2007.
- [21] Qian Geng, Huan Li, and Yueming Li. Dynamic and acoustic response of a clamped rectangular plate in thermal environments: experiment and numerical simulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(5):2674–2682, 2014.