Liner mit flexiblen Strukturen zur verbesserten Schalldämpfung

Karsten Knobloch[1], Friedrich Bake[1] und Lars Enghardt[1]

[1] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Triebwerksakustik, 10623 Berlin, E-Mail: karsten.knobloch@dlr.de*

Einleitung

Passive Schalldämpfung in Form von akustisch wirksamen Wandstrukturen („Liner“) ist zur Reduzierung der Lärmemission von Flugzeugtriebwerken von immenser Bedeutung. Sowohl im Einlauf als auch im Nebenstromkanal und zum Teil auch im Heißgasbereich kommen Liner zum Einsatz, um dominierende tonale Komponenten zu reduzieren und Breitbandlärm effizient zu verringern. Für zukünftige Flugtriebwerke ist eine weitere Erhöhung der Dämpfungswirkung sowohl für tiefe Frequenzen als auch im Breitband-Bereich erforderlich.

Die im Einsatz befindlichen Schallabsorber, im Folgenden als „klassische“ Helmholtz-Resonator-Liner (HR-Liner) bezeichnet, beinhalten die Elemente eines Helmholtz-Resonators und wirken gleichzeitig auch als λ/4-Resonatoren. Ein großer Teil der akustischen Dämpfungswirkung beruht auf Reibungsverlusten und Wirbelerzeugung bei der Durchströmung der Deckschicht. Diese Dämpfer weisen in der Regel ein eindeutiges akustisches Dämpfungsmaximum bei der Helmholtz-Resonanzfrequenz auf, das - abhängig von der Deckschicht - zu einer signifikanten akustischen Dämpfung über einen einige hundert Hertz umfassenden Frequenzbereich führt. Die Modellierung und Beschreibung der Dämpfungs-mechanismen an den überströmten Oberflächen und der durch die akustische Anregung periodisch durchströmten Lineroberfläche ist Gegenstand der aktuellen Forschung.

Das neue „FlexiS“-Linerkonzept nutzt die Zellstruktur bisheriger Liner und ersetzt Teile der steifen Grundstruktur durch flexible Elemente. Diese flexiblen Strukturen weisen dabei gleichzeitig eine materialinhärente Dämpfung auf, so dass ein zusätzlicher Mechanismus zur Umwandlung der akustischen Energie genutzt wird: durch Anregung der flexiblen Elemente zur gedämpften Schwingung wird Energie des Schallfeldes in Wärme umgewandelt.

Aus der Literatur sind bereits Untersuchungen und Anwendungen von Linern mit zwei oder mehr Freiheitsgraden (DDOF, MDOF) bekannt (z.B. [1,2]). Hier wird in der Regel durch eine Segmentierung der Zellen versucht, mehrere Frequenzen mit einer Linerstruktur effektiv zu dämpfen. Die Segmentierung kann z.B. durch ein poröses Gewebe erfolgen, das Teile der Schallwelle passieren lässt (vgl. z.B. Patente der Firma Hexcel, „Acousticaps“ [3], [4]).

Das hier zu untersuchende Konzept unterscheidet sich sowohl durch die Undurchlässigkeit der Zwischenwand für die Strömung und außerdem durch die gezielte Ausnutzung der materialinhärenten Dämpfung von den vorgenannten Linern.

Grundprinzip, Liner Design und Testobjekte

Das Prinzip des Flexis-Liners ist in Abbildung 1 dargestellt. Zusätzlich zu dem bekannten Aufbau eines Helmholtz-Resonators aus (primärer) Kavität und perforierter Deckschicht ist ein Rückvolumen (sekundäre Kavität) durch eine flexible Wand (mit intrinsischer Materialdämpfung) abgetrennt. Diese zusätzliche Kavität ist nicht direkt mit dem Strömungskanal verbunden.

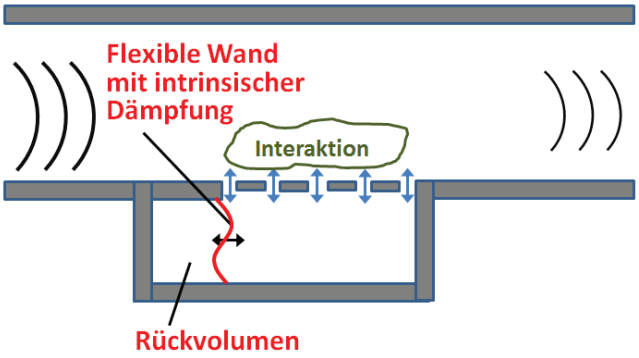

Abbildung 1: Flexis-Liner-Konzept bestehend aus Helmholtz-Resonator und separatem Rückvolumen, getrennt durch eine flexible Wand mit intrinsischer Dämpfung

Für die Dissipation von akustischer Energie durch die Bewegung der flexiblen Wand sind hauptsächlich zwei Voraussetzungen zu erfüllen: die Wand muss durch die Schalldruckschwankungen in der primären Kavität ausgelenkt werden. Des Weiteren muss das flexible Material eine signifikante Materialdämpfung aufweisen.
Entsprechend der ersten Bedingung wurde die Auslegung der flexiblen Wand so vorgenommen, dass eine Eigen-frequenz der Wand in der Nähe der Helmholtz-Resonanzfrequenz liegt. Entsprechende Unsicherheiten entstehen hier allerdings durch schwer definierbare Randbedingungen der Einspannung (Verklebung) und der Streuung der Materialparameter des flexiblen Materials. Auf Grund der noch nicht vorhandenen Modellierung des Gesamtsystems und der zu Grunde liegenden Mechanismen wurden mehrere Materialien ausgewählt, die eine unterschiedliche Materialdämpfung aufweisen. Thermoplastische Polyurethane (TPU) sind in Folienform in verschiedenen Schichtdicken kommerziell verfügbar, z.B. [5].
Für die Untersuchung wurden zwei Materialien 1195A (Dicken 0,1mm und 0,5mm) und 1170D (Dicke 0,3mm) ausgewählt. Der sogenannte Verlustfaktor $\tan(\delta)$, wobei δ die Phasenverschiebung zwischen Spannungen und Dehnungen bezeichnet, liegt für diese Materialien in der Größenordnung von 0,1. Der Verlustfaktor ist i.d.R. temperaturabhängig und variiert ggf. auch mit der Frequenz der Auslenkung.
Ein weiteres Material EP-0.5 (Foliendicke 0,5mm) wurde durch einen Projektpartner aus einem Epoxidharz-Härter-Gemisch herstellt. Hier wurde ein Maximum des Verlustfaktors bei Raumtemperatur nahe 1 erzielt.

Die flexiblen Materialien wurden in einem ebenen Linersample auf die Zwischenwände quer zur Hauptströmungsrichtung aufgebracht und verklebt (Abbildung 2).

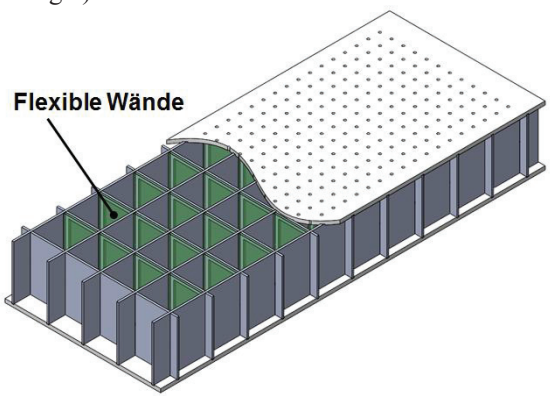

Abbildung 2: Aufbau der Linersamples mit flexiblen Zwischenwänden quer zur Hauptströmungsrichtung

Die Abmaße der Einzelzellen betragen 19 x 19 x 30mm³, die Deckschichtdicke beträgt 2mm mit jeweils 9 Löchern (Durchmesser d=1,3mm) pro Zelle (Porosität des Liners: 3,3%). Die Helmholtzfrequenz f_{HR} liegt damit bei ca. 1040Hz, die $\lambda/4$-Resonanzfrequenz bei 2860Hz.
Die Liner-Samples bestehen jeweils aus 10 x 4 Zellen und haben die Gesamtabmessungen B=89mm, H=34mm, L=221mm.

Zur flexiblen Untersuchung verschiedener Konfigurationen wurden die sekundären Kavitäten (Rückvolumina) durch Abklebung jeder zweiten Zellreihe mit Aluminium-Klebeband generiert (Abbildung 3). Zum Ausgleich von statischen Druckunterschieden beim Betrieb des Windkanals wurde in jede abgeklebte Zelle ein kleines Ventilationsloch (d<1mm) eingebracht.

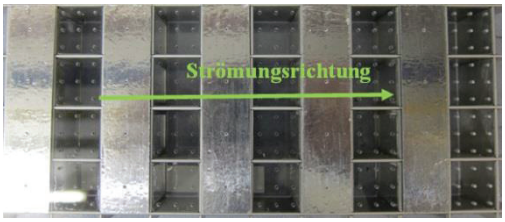

Abbildung 3: Alternierende Abfolge von primären Kavitäten (mit Verbindung zum Strömungskanal durch die Perforation) und abgeklebten sekundären Kavitäten.

Ein Referenz-Liner wurde analog zu den Linern mit flexiblen Wänden aufgebaut. Dieser weist auch quer zur Hauptströmungsrichtung steife (unbewegliche) Wände auf. Die Abklebung der Deckschicht wurde in gleicher Weise wie bei den flexiblen Linern vorgenommen, um die akustisch aktive Oberfläche vergleichbar zu halten.

Messaufbau und Datenauswertung

Die Messungen wurden hauptsächlich im Akustikwindkanal DUCT-R des DLR, Abt. Triebwerksakustik durchgeführt. Der Kanal besitzt eine rechteckige Mess-Strecke mit den Querschnittsmaßen 60 x 80mm². Die maximal erreichbare Strömungsgeschwindigkeit (bezogen auf die Schallgeschwindigkeit) liegt bei Ma=0,3.

Der schematische Aufbau des Versuchsstandes ist in Abbildung 4 gezeigt. Dabei ist aus Platzgründen nur der stromauf des Messobjekts (Liner) gelegene Teil gezeigt. Der Aufbau ist symmetrisch auf der stromab gelegenen Seite. Der Liner wird zwischen die zwei Mikrofonsektionen („Section 1“ und „Section 2“) eingebaut. Die akustische Anregung erfolgt durch zwei Lautsprecher, wobei jede Frequenz nacheinander sowohl von dem stromauf gelegenen Lautsprecher A und dem stromab gelegenen Lautsprecher B angeregt wird. Durch dieses Vorgehen ist die Berechnung der Reflexion (R), Transmission (T) und Dissipation (Δ) unabhängig von akustischen Reflexionen an den Kanalenden möglich.

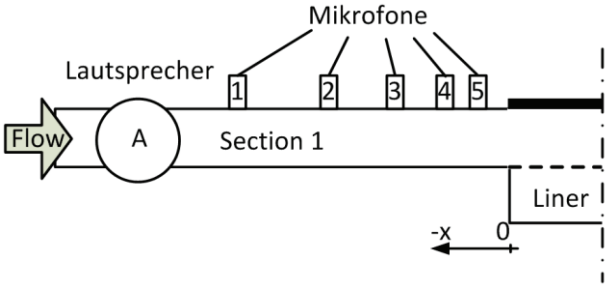

Abbildung 4: Stromauf gelegene Hälfte des DUCT-R-Prüfstands, symmetrischer Aufbau auch stromab

In Abbildung 5 ist die Schallausbreitung (Druckamplituden *p*, Reflexion *r*, Transmission *t*) im Strömungskanal dargestellt. Die amplitudenbasierten Werte sind hier durch kleine Buchstaben gekennzeichnet. Die Ausbreitung in Hauptströmungsrichtung ist durch ein „+“, die Ausbreitung in entgegengesetzter Richtung durch ein „-“ gekennzeichnet.

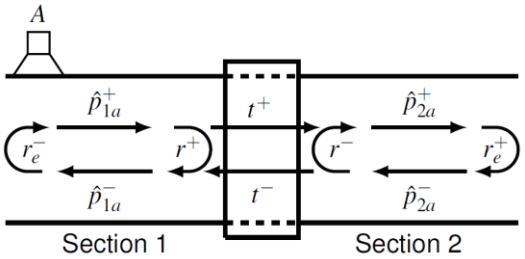

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Schallausbreitung im Strömungskanal bei „A“-Anregung.

Energetisch betrachtet wird die akustische Energie, die weder reflektiert, noch transmittiert wird, komplett dissipiert:

$$\Delta^{\pm} + \boldsymbol{R}^{\pm} + \boldsymbol{T}^{\pm} = \mathbf{1}. \qquad (1)$$

Die richtungsabhängige Dissipation wird aus den den druckamplitudenbasierten Werten für Reflexion und Transmission unter Berücksichtigung der Machzahl *Ma* ermittelt:

$$\Delta^{\pm} = \mathbf{1} - \left(\frac{(\mathbf{1}\mp \boldsymbol{Ma})^2}{(\mathbf{1}\pm \boldsymbol{Ma})^2}\left|\boldsymbol{r}^{\pm}\right|^2 + \left|\boldsymbol{t}^{\pm}\right|^2\right). \qquad (2)$$

Eine vereinfachte Darstellung erhält man, wenn man das arithmetische Mittel der Dissipationswerte in und entgegen der Hauptströmungsrichtung betrachtet:

$$\Delta_{avg} = \Delta^{+}/2 + \Delta^{-}/2. \qquad (3)$$

Ergebnisse

Der Vergleich der 4 Liner mit flexiblen Zwischenwänden und des Referenzliners mit allseits steifen Zellwänden ist in Abbildung 6 und Abbildung 7 gezeigt. Die Anregung des Schallfeldes erfolgte dabei mit mehreren Multitönen, die einen Summenschallpegel (OASPL) von 120dB ergeben. Die Einzeltöne haben einen Pegel von ca. 112dB.

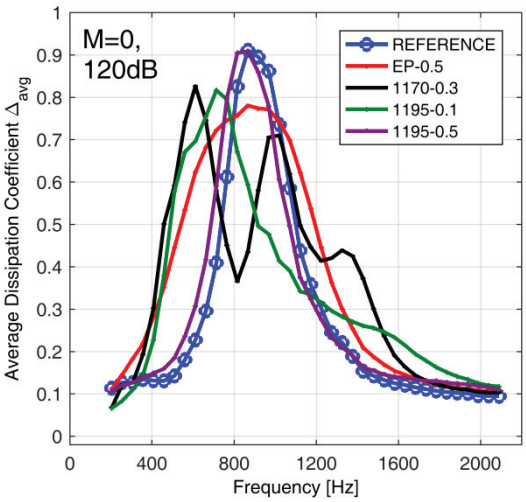

Abbildung 6: Dissipation der Liner mit flexiblen Zwischenwänden im Vergleich zur Referenz (steife Zellwände). Ohne Überströmung.

Für den Fall ohne Überströmung (Abbildung 6) ist eine deutliche Verschiebung/Vergrößerung des wirksamen Frequenzbereiches zu beobachten. Die Maximaldämpfung bei der Auslegungsfrequenz nimmt ab. Eine Ausnahme bildet hier der Liner 1195-0.5, wo die Folie auch durch die hohe Materialdicke eher „steif" wirkt. Dadurch gibt es nur minimale Veränderungen zur Referenz. Die Materialien bewirken sehr unterschiedliche Veränderungen des Dämpfungsverlaufs. Der Liner mit dem Material 1195-0.1 zeigt eine Verschiebung des Dämpfungsmaximums zu tieferen Frequenzen, EP-0.5 eine generelle Verbreiterung bei unveränderter Frequenz der höchsten Dissipation. Bei dem Liner 1170-0.3 werden vermutlich zwei Schwingungsformen in der flexiblen Wand angeregt, so dass sich eine Dissipationskurve mit drei lokalen Maxima ergibt. Eine experimentelle Bestätigung für die Schwingformen gibt es bisher nicht. Für diese drei Liner erhöht sich auch die als Gesamtdämpfung zu interpretierende Fläche unter der Dissipationskurve.

Mit Überströmung (beispielhaft für Ma=0,2 in Abbildung 7 gezeigt) reduziert sich die mittlere Dissipation Δ_{avg} bei allen untersuchten Linern (Erhöhung der Resistanz der Deckfläche, verringerte effektive Passierdauer bzw. kleinere Wellenzahl in Hauptströmungsrichtung). Der Zusatzeffekt der flexiblen Zwischenwände bleibt qualitativ und quantitativ erhalten.
Messungen mit einem Summenschallpegel (OASPL) von 130dB zeigen nahezu identische Ergebnisse und sind hier nicht dargestellt.

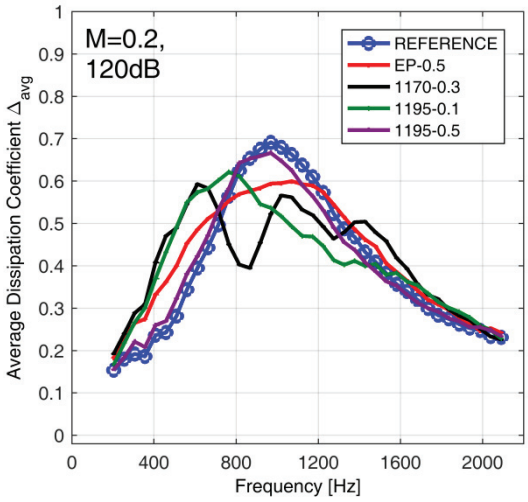

Abbildung 7: Dissipation der Liner mit flexiblen Zwischenwänden im Vergleich zur Referenz (steife Zellwände). Überströmung, Machzahl auf Kanal-Mitte Ma=0.2.

Schalldruckmessungen innerhalb der Zellen

Zur genaueren Untersuchung der Vorgänge in den Zellen des Liners wurden einige Liner mit Bohrungen in drei benachbarten Zellen versehen (siehe schematische Darstellung in Abbildung 8). Durch spezielle Adapter konnte in jeder der 3 Zellen jeweils ein Mikrofon wandbündig eingebaut werden.

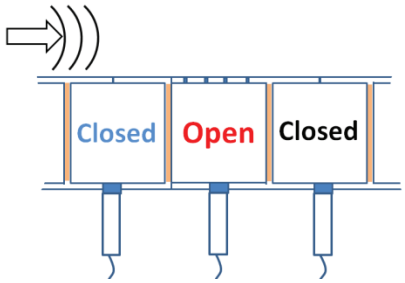

Abbildung 8: Mikrofon-Anordnung in den Liner-Zellen. Hier jeweils außen eine sekundäre Kavität (Kommunikation mit Strömungskanal nur über Ventilationsöffnung), in der Mitte eine primäre Kavität (reguläre Perforation der Deckschicht)

In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind Schalldruckpegel und Phasengang (in Bezug auf die Mittelzelle) in allen 3 Zellen des Referenzliners (Abbildung 9) und eines Liners mit flexiblen Zwischenwänden (Abbildung 10) gezeigt. Erwartungsgemäß sinkt der Pegel für die verschlossenen Zellen des Referenzliners stark ab. Über die kleine Ventilationsöffnung erfolgt nur ein sehr geringer Schalleintrag. Bei den flexiblen Zwischenwänden (1170-0.3) ist durch die Auslenkung der Wand auch in den sekundären Kavitäten (Closed/Tape) ein nahezu gleich hoher Schalldruck messbar.
Der Phasenverlauf beim Referenzliner in Bezug auf das Mikrofon in der Mittelzelle zeigt eine verzögerte Ausbreitung durch die abgeklebte Deckschicht. Das kleine Ventilationsloch in der Abklebung bedingt einen Phasenversatz von ca. 50°, wie mit einer einfachen 1-D-Simulation der realen Geometrie (inkl. Abklebung) gezeigt werden konnte.

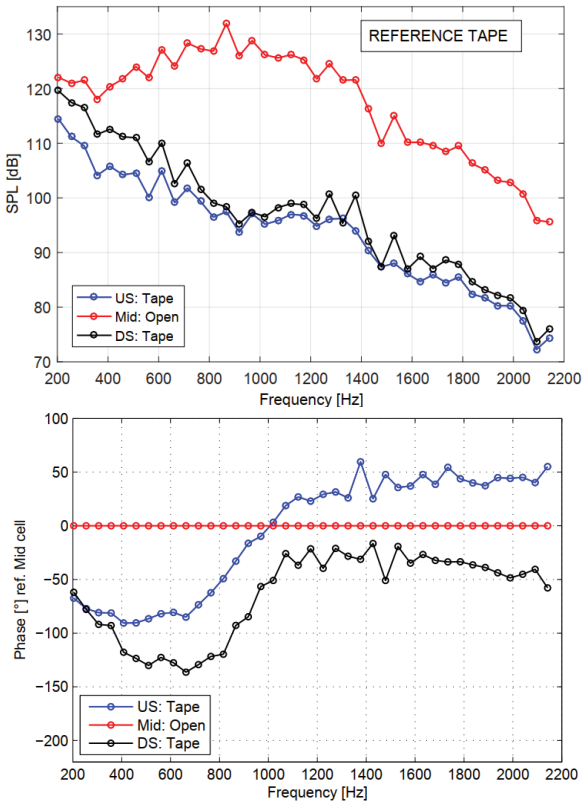

Abbildung 9: Schalldruckpegel SPL (oben) und Phasenunterschied (unten) zur Mittelzelle für Referenzliner.

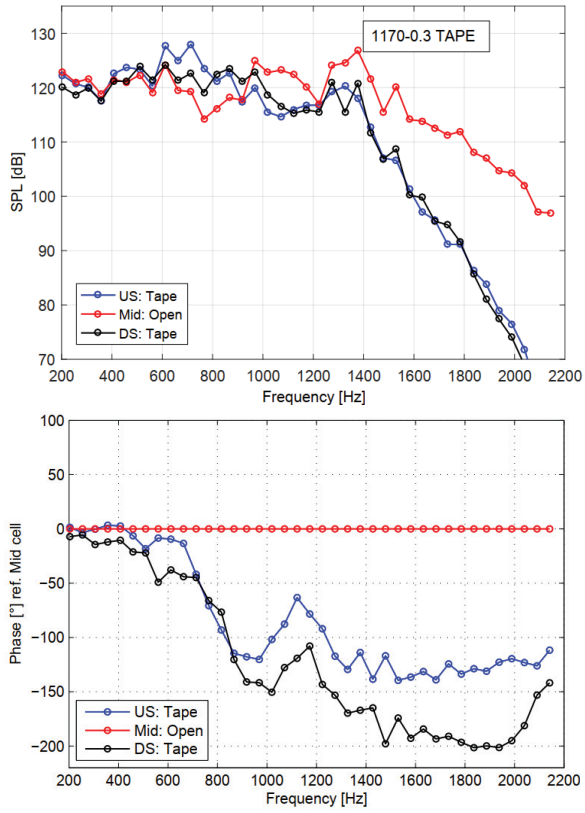

Abbildung 10: Schalldruckpegel SPL (oben) und Phasenunterschied (unten) zur Mittelzelle für 1170-0.3.

Bei den flexiblen Wänden gibt es für tiefe Frequenzen nahezu keinen Phasenversatz. Die Auslenkung der Zellwände ist damit indirekt nachgewiesen, aber noch nicht quantifizierbar. Für die anderen Wandmaterialien ist ähnliches Verhalten (1195-0.1, nicht dargestellt) bzw. eine Mischung aus Referenz und flexibler Wand (EP-0.5, nicht dargestellt) zu beobachten.

Zusammenfassung und Ausblick

Umfangreiche Versuche wurden an mehreren Prototypen eines neuen Linerkonzepts durchgeführt. Dieses beinhaltet flexible Zellwandbereiche, die einen zusätzlichen akustischen Dämpfungsmechanismus darstellen.
Im Strömungsakustikkanal DUCT des DLR-Berlin wurde die Dissipation akustischer Energie für diese Prototypen ohne und mit Überströmung bestimmt. Es wurde durchgehend eine Vergrößerung der Dämpfung bei tiefen Frequenzen gefunden, für einige Materialien auch eine Erhöhung der Gesamtdämpfung. Dieser Effekt tritt mit und ohne Überströmung gleichermaßen auf.
Messungen im Zellinneren weisen die Bewegung der Wand indirekt nach. Hier sind jedoch in der Zukunft noch weitere Untersuchungen geplant, die genaueren Aufschluss über die Auslenkung und die Schwingungsform der flexiblen Wände geben soll und damit schließlich die Grundlage für eine Modellierung des neuen Konzepts liefern werden.

Danksagung

Die finanzielle Förderung der Untersuchung im Rahmen des LuFo V-2 Verbundvorhabens „Lärmabsorbierende Kunststoffstrukturen („LaKS“) erfolgte durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 20E1502A) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Autoren danken den Kollegen von TU Berlin (Prof. Sarradj), BTU Cottbus-Senftenberg (Prof. Höschler), Fraunhofer IAP/ PYCO (Dr. Kahle und Hr. Uhlig) und TU Dresden (Prof. Modler, Dr. Dannemann) für die vielfältigen Beiträge während der Bearbeitung des Projekts und die gute Zusammenarbeit.

Literatur

[1] Drevon, E.: “Measurement methods and devices applied to A380 nacelle double degree-of-freedom acoustic liner development”. In: *10th AIAA/CEAS aeroacoustics conference* (2004). S. 2907.

[2] Sutliff, D., Nark, D., Jones, M.; “Efficacy of a Multiple Degree of Freedom Acoustic Liner Installed in the Bypass of a Scale Model High Speed Fan”. In: *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (2016) S. 3005.

[3] Ayle, E.: "Acoustic septum cap honeycomb." U.S. Patent No. 7,434,659. 14 Oct. 2008

[4] Ayle, E.: "Acoustic honeycomb with perforated septum caps." U.S. Patent No. 8,413,761. 9 Apr. 2013.

[5] BASF: "Thermoplastic polyurethane elastomeres. Elastollan® - Material Properties“ (Sept. 2017), URL: http://www.polyurethanes.basf.de/pu/Elastollan/Elastollan_Materialeigenschaften abgerufen 07.11.2017