

# Auswerteverfahren zur Ermittlung der akustischen Wirksamkeit von Linern bei breitbandiger Schallanregung

Karsten Knobloch, Fleming Kohlenberg, Maximilian Behn

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Abt. Triebwerksakustik, 10625 Berlin,  
E-Mail: Karsten.Knobloch@dlr.de

## Einleitung

Akustische Auskleidungen (Liner) sind für verschiedene Anwendungen in Strömungskanälen wichtig zur Reduktion der transportierten bzw. abgestrahlten Schallleistung. Im Bereich der Flugtriebwerke findet man solche Auskleidungen im Wandbereich sowohl im Einlass als auch im Nebenstromkanal („Bypass“) – oft in Form von Resonatorstrukturen mit entsprechender schalldurchlässiger Abdeckung. Die experimentelle Bestimmung der Wirksamkeit dieser Liner ist von hoher Wichtigkeit zur Validierung von Modellierungen, Rechenverfahren und Auslegung. In Flugtriebwerken besteht das Schallfeld aus breitbandigen Komponenten, die sich aus allen ausbreitungsfähigen Moden zusammensetzen, und wenigen dominanten Einzelfrequenzen, die durch spezifische Modenordnungen charakterisiert sind.

Dieser Beitrag untersucht anhand eines experimentellen Aufbaus, der ursprünglich für die Einzelmodenanregung und die Schallleistungsbestimmung mit dünn besetzten Mikrofonarrays konzipiert und aufgebaut wurde [1], die Anwendung dreier Auswerteverfahren für breitbandige Schallanregungen und deren Eignung zur Charakterisierung von Linern.

Bei den Verfahren handelt es sich um (1) die Bestimmung der Schallleistung durch eine vollständige Modenanalyse, die sowohl die Radial- als auch die Azimutalmodenordnungen berücksichtigt – im Folgenden „RMA“, (2) die Bestimmung der Schallleistung durch eine Azimutalmoden-Analyse und zusätzlicher Annahmen zur Leistungsverteilung zwischen den Moden – im Folgenden „AMA“ und (3) die Abschätzung des Durchgangsdämpfungsmaßes (engl.: Transmission Loss TL) durch Mittelung der gemessenen Schalldrücke in den Arrays vor und hinter dem Liner – im Folgenden „Avg.SPL“. Diese Methode erlaubt keine Bestimmung der Schallleistung, stellt aber ein weitverbreitetes Maß zur Charakterisierung der Linerwirkung dar.

## Experimenteller Aufbau

Für die vorliegende Studie wurde der Modensynthese-Prüfstand (Abbildung 1) der DLR-Abteilung Triebwerksakustik in Berlin genutzt, der bereits zur experimentellen Bestimmung des Dämpfungsverhalten verschiedener Linerstrukturen auf einzelne akustische Moden verwendet wurde [2,3].

Der Prüfstand wurde speziell für diese Art von Untersuchungen konzipiert, wobei Einzelmoden gezielt angeregt werden und weitere - ebenfalls ausbreitungsfähige Moden - durch entsprechend abgestimmte Anregung der Lautsprecher bestmöglich unterdrückt werden. Diese Art der Einzelmoden-Messung dient hier teilweise als Referenz.

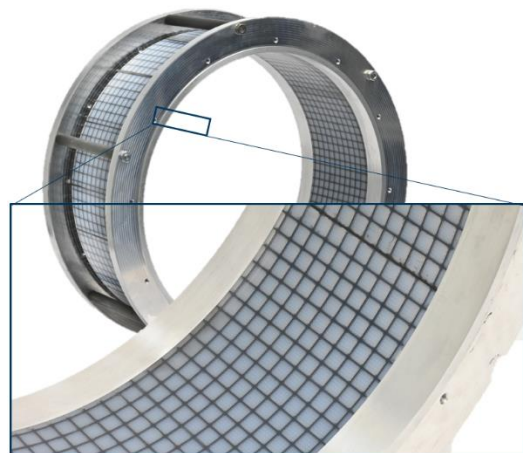
Die akustische Anregung des Versuchstandes besteht aus zwei Lautsprecher-Ringen mit jeweils 16 Lautsprechern

(BMS 4548), die für die Einzelmodenanregung jeweils ein individuell abgestimmtes und verstärktes Eingangssignal wiedergeben. Für die Breitband-Messungen wird mittels NI LabVIEW® ein gleichverteiltes weißes Rauschsignal erzeugt und über einen einzelnen Lautsprecher abgespielt. Die untere Grenzfrequenz der sinnvollen Auswertung ist durch die Übertragungseigenschaften des Lautsprechers bestimmt und liegt bei 500 Hz.



**Abbildung 1:** Modensynthese-Prüfstand „MOSY“ mit Lautsprecherringen, zwei Mikrofonarrays und reflexionsarmen Abschlüssen (gelb)

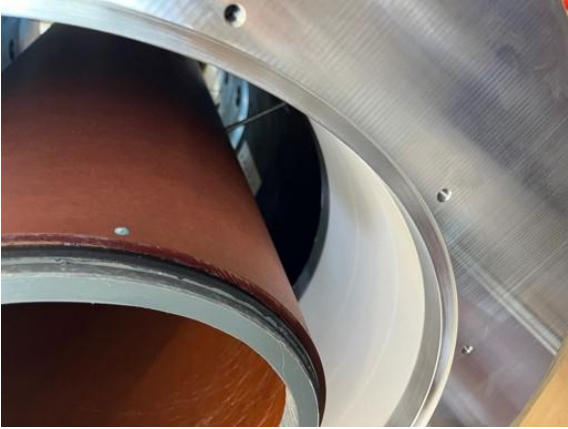
Vor und hinter dem Messobjekt (Abbildung 2 bzw. Abbildung 3) befindet sich jeweils ein Mikrofonarray mit je 98 Mikrofonen (GRAS 40BP) in folgender Anordnung:



**Abbildung 2:** Helmholtz-Resonator-Struktur „HR“, axiale Länge 170 mm mit Zellmaßen: 15 x 15 mm<sup>2</sup>, Tiefe 20 mm, Lochdurchmesser 1 mm, Perforation ca. 4.9 %

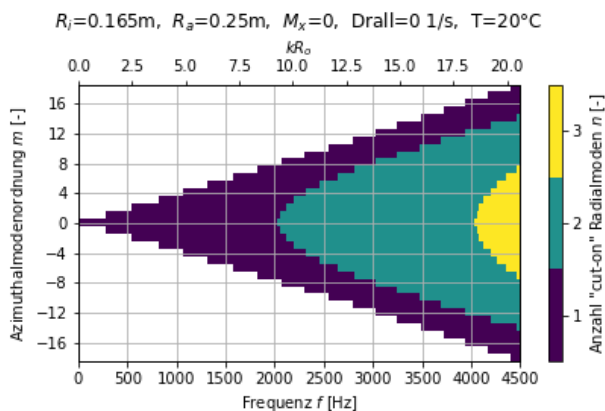
Ein Ring in Umfangsrichtung ist mit 33 Mikrofonen besetzt, in axialer Richtung gibt es fünf weitere Ringe mit jeweils 13 ungleichmäßig angeordneten Umfangspositionen. Sowohl auf der Reflexionsseite (der Seite der akust. Anregung, auch „1“) als auch auf der Transmissionsseite („2“) ist jeweils ein

reflexionsarmer Abschluss montiert. Zwischen beiden Mikrofonarrays ist jeweils das Untersuchungsobjekt - ein resonatorbasierter Liner (HR, Abbildung 2), ein Linersegment aus Akustikschaumstoff Basotect® (BT, Abbildung 3) oder ein Referenzsegment aus Aluminium (HW, „Hardwall“) montiert.



**Abbildung 3:** BT-Dämpfer: Basotect®-B-Material, 100 mm tief, axiale Länge 200 mm

Die in dieser Anordnung ausbreitungsfähigen akustischen Moden - ohne Strömung - sind in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4:** Ausbreitungsfähige Moden für den genutzten Ringkanal

Die ebene Welle ist stets ausbreitungsfähig, ab ca. 260 Hz ist die erste Umfangsmode  $m=1$  bzw.  $m=-1$  ausbreitungsfähig. Bei 1060 Hz sind bereits 8 Umfangsmode ( $m=-4\dots4$ ) ausbreitungsfähig. Ab ca. 2000 Hz kommt die erste höhere radiale Modenordnung  $n=1$  dazu.

## Auswerteverfahren

### Radialmodenanalyse („RMA“)

Die Radialmodenanalyse erfordert den größten Aufwand an Instrumentierung. Üblicherweise wird mit mehreren axial versetzt angeordneten und äquidistant über den Umfang verteilten Mikrofonringen das akustische Druckfeld simultan erfasst und dann in einer inversen Prozedur die Amplituden aller ausbreitungsfähigen Moden an die gemessene Druckverteilung z. B. in einem Least-Square-Error-Verfahren angepasst. Durch Störungen (Rauschen, Phasenfehler, in anderen Messungen auch Strömungseinfluss) ist die Invertierung nicht eindeutig bzw. die Stabilität des Verfahrens nicht immer gewährleistet [4]. Eine adaptive Regularisierung [5] kann in diesem Fall die Stabilität der Invertierung verbessern und

reduziert die Anfälligkeit gegenüber Störeinflüssen, wodurch die stochastischen Abweichungen im höheren Frequenzbereich reduziert werden. Der Nachteil der RMA ist die Begrenzung durch die höchsten aufzulösenden Modenordnungen (in Umfangsrichtung kleiner als die halbe Mikrofonanzahl auf dem Ring, für die Auflösung der Radialordnungen sind mind. drei axial versetzte Ringe für  $n=1$ , und 5 für  $n=2$  erforderlich). Die hier verwendeten Arrays sind nicht vollbesetzt und wurden für die Analyse von Schallfeldern optimiert, die wenige dominante Azimutalordnungen aufweisen. Eine detaillierte Analyse der erwarteten Genauigkeit ist mittels einer Bestimmung der Konditionszahl für die spezielle Anordnung möglich. Diese zeigt, dass die RMA-Ergebnisse bei Anregung aller ausbreitungsfähigen Moden bis ca. 2000 Hz vertrauenswürdig sind [6]. Die RMA erlaubt die Zerlegung in vor- und rücklaufende Anteile in beiden Sektionen – und damit auch eine Bestimmung der Reflexionsanteile auf der Anregungsseite.

### Azimuthalmodenanalyse („AMA“)

Bei der AMA wird nur ein Ring mit 33 Mikrofonen in jedem der beiden Arrays genutzt. Damit sind theoretisch Aussagen bis zu einer Modenordnung  $m=\pm 16$  (ca. 3900 Hz) möglich. Ab ca. 2030 Hz ist jedoch bereits die erste radiale Modenordnung ausbreitungsfähig, die mit nur einem Mikrofonring nicht separiert werden kann. Um die entsprechenden Modenkombinationen trotzdem abzudecken, wird hier die weitverbreitete Modellannahme der „Equal Mode Energy Density“ verwendet. Während durch die Modellannahmen auch eine Abschätzung der Schallleistungen der Einzelmoden und der Gesamtschallleistung möglich sind, ist eine Zerlegung in axialer Richtung nicht möglich.

### Mittelung der Schalldruckamplituden („Avg.SPL“)

Bei der Mittelung der Schalldruckamplituden einer großen Zahl von Einzelmikrofonen eines Arrays (hier jeweils 98 Stück) ergibt sich auch bei einer räumlichen Variation des Schallfeldes, die durch die Modenstruktur hervorgerufen wird, die Möglichkeit den mittleren Schalldruck vor und hinter dem Liner zu vergleichen und aus der Abnahme auf dessen Dämpfungsverhalten zu schließen. Der Vorteil liegt in der Einfachheit und Robustheit der Methode über einen Frequenzbereich, der über den der RMA und AMA-Methode hinaus geht.

Mit dieser Methodik ist keine Aussage über die reflektierten Anteile möglich – ebenso können Einzelmoden- und Gesamtschallleistung nicht bestimmt werden.

## Ergebnisse

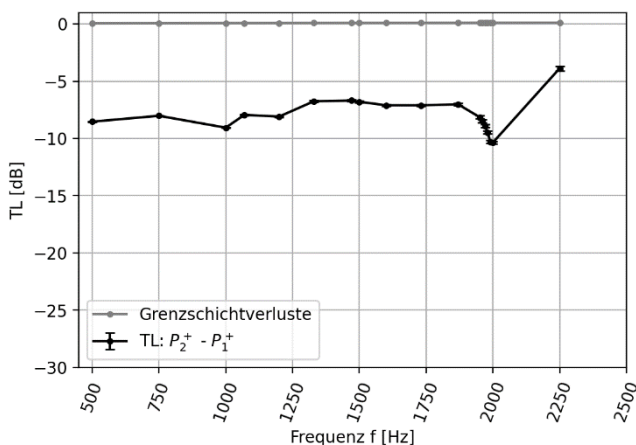
Im Folgenden werden die Ergebnisse bei Verwendung der verschiedenen Verfahren hauptsächlich in Form des Durchgangsdämpfungsmaßes (engl.: Transmission Loss TL) dargestellt. Dieses erlaubt einen sinnvollen Vergleich sowohl der Ergebnisse aus RMA und AMA, wo die Schallleistung bestimmt bzw. abgeschätzt wird als auch mit den aus den Mikrofonpegeln ermittelten Schalldrücken (Avg.SPL), die keine direkte Abschätzung der Schallleistung erlauben. Für die Berechnung wird hier die Differenz zwischen der Transmissionsseite und der Anregungsseite gebildet, so dass negative Werte eine akustische Dämpfung bedeuten.

Die Ergebnisse aus der Einzelmodenmessung dienen als Referenz bzw. als Plausibilitätscheck für die Breitband-

auswertungen und werden daher eingangs etwas ausführlicher dargestellt.

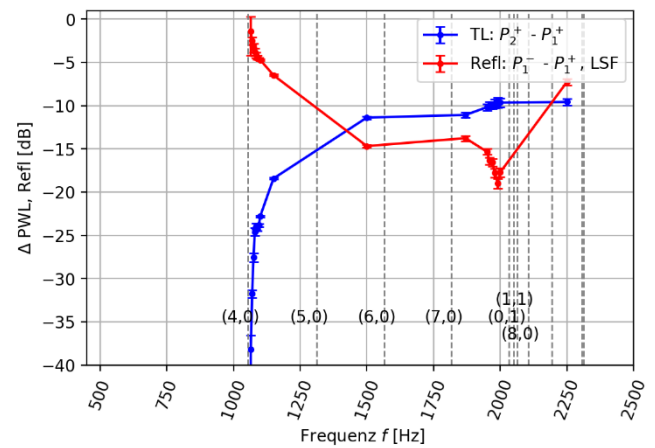
Die Güte und die Genauigkeit des RMA-Verfahrens für die Untersuchung mit Einzelmodenanregung wurden bereits in einer früheren Publikation gezeigt [2]. Der Abstand der angeregten Amplitude zu den anderen ausbreitungsfähigen Moden betrug hierbei in der Regel 20 dB. Die Verluste zwischen der Anregungs-Seite („1“) und der Transmissions-Seite („2“) bei Verwendung eines schallharten Ersatz-Segments („Hardwall-Referenz“) sind in sehr guter Übereinstimmung mit den Modellvorhersagen der thermoviskosen Verluste in der Grenzschicht [2].

Der Absorptionsgrad  $\alpha$  des verwendeten Materials für den BT-Liner ist laut Herstellerangaben [7] im betrachteten Frequenzbereich und der verwendeten Materialdicke sehr hoch (größer 0.8) und relativ frequenzunabhängig. Für den senkrechten Schalleinfall ist  $\alpha \geq 0.8$  ab ca. 400 Hz. In Abbildung 5 ist der mithilfe der RMA ausgewertete Verlauf des Durchgangsdämpfungsmaßes über der Frequenz aus einer Einzelmoden-Anregung der ebenen Welle ( $m=0, n=0$ ) gezeigt. Wie erwartet ist eine gute Dämpfung über einen großen Frequenzbereich zu erkennen, die nur wenig variiert.



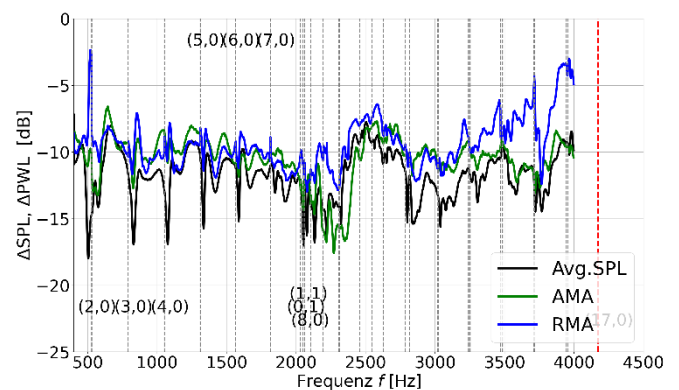
**Abbildung 5:** Dämpfung der ebenen Welle ( $m=0$ ), RMA-Auswertung der Einzelmodenanregung, BT-Liner

Wichtig für die Interpretation der Ergebnisse der Breitband-Anregung ist das Verhalten nahe der „cut-on“-Frequenzen, wenn also eine Mode mit zunehmender Frequenz von nicht ausbreitungsfähig (bzw. exponentiell gedämpft) zu ausbreitungsfähig wechselt. In Abbildung 6 ist die cut-on-Frequenz für die Umfangsmode ( $m=4, n=0$ ) durch eine gestrichelte Linie markiert. Die Anregung erfolgt hier ebenfalls für die Einzelmode, die Auswertung mit dem RMA-Algorithmus. Der scheinbar sehr hohe Transmission Loss, der bei Frequenzen gerade oberhalb der cut-on-Frequenz bestimmt wird, erklärt sich zum großen Teil durch massive Reflexionen am Liner selbst, so dass der reflektierte Schalleleistungsanteil  $P_1^-$  in diesem Frequenzbereich in Sektion „1“ nahezu gleich groß wie der in Richtung des Liners laufende Teil  $P_1^+$  ist. Anschaulich breitet sich die Mode nur sehr langsam in axialer Richtung aus, der Winkel der Wellenfront steht nahezu senkrecht zur Kanal-Achse. Mit zunehmender Frequenz sinkt die Reflexion dann stark und die Dämpfungswirkung des Liners dominiert den Transmission Loss (hier ab ca. 1500 Hz).



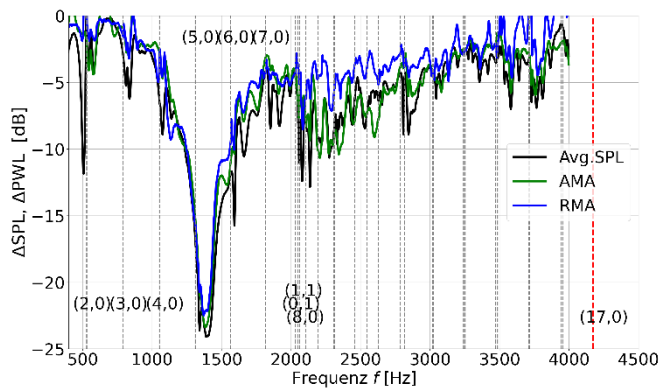
**Abbildung 6:** Verhalten des Transmission Loss (TL) und der Reflexion (Refl) bei Anregung der Einzelmode  $m=4$  ( $n=0$ ), Auswertung mit RMA, BT-Liner.

Für den Fall der Breitbandanregung mit installiertem BT-Liner sind in Abbildung 7 die drei Auswertemethoden verglichen. Die dargestellte Größe bezieht sich und in den folgenden Darstellungen für RMA und AMA auf die Gesamtschalleistung aller Moden.



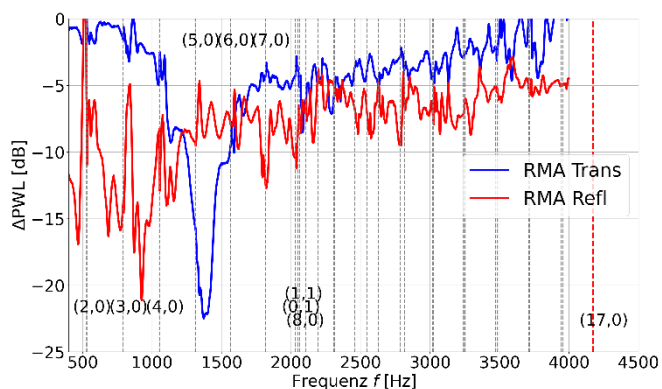
**Abbildung 7:** Methodenvergleich RMA, AMA, Avg.SPL für BT-Liner

Alle drei Methoden bestimmen die mittlere Dämpfung (PWL bzw. Avg.SPL) im Frequenzbereich unterhalb 2000 Hz zu ca. 10 dB - die in ähnlicher Größe auch in der Einzelmodenanregung (Abbildung 5) zu gemessen wurde. Jeweils in der Nähe der cut-on-Frequenzen kommt es zu Abweichungen sowohl bei RMA als auch bei Avg.SPL. Während die Avg.SPL (schwarz) sehr hohe Werte für den TL suggeriert, zeigt die RMA (blau) dass es sich hierbei nicht um Dämpfung im eigentlichen Sinne handelt, sondern eine hohe Reflexion in Sektion „1“ dafür verantwortlich ist (vgl. Abbildung 6 und im Folgenden Abbildung 9). Oberhalb von 2000 Hz unterschätzt die RMA die Dämpfung, während AMA (grün) und Avg.SPL ähnliche Werte liefern. In Abbildung 8 ist die analoge Darstellung für den HR-Liner gezeigt. Auch hier gibt es eine generelle Übereinstimmung der drei Methoden für den tieffrequenten Bereich. Die starke Dämpfung bei der Resonanzfrequenz um 1300 Hz wird von allen drei Methoden gleichermaßen erfasst. Größere Abweichungen treten wieder im Bereich der cut-on-Frequenzen und oberhalb von 2000 Hz auf.



**Abbildung 8:** Methodenvergleich RMA, AMA, Avg.SPL für HR-Liner

Abbildung 9 erlaubt zusätzlich noch die Betrachtung der Reflexion im Verhältnis zum Transmission Loss für die RMA für den HR-Liner. Unterhalb der Resonanzfrequenz treten nur im Bereich der cut-on-Frequenzen stärkere Reflexionen auf und sind bis ca. 1200 Hz sonst auf sehr niedrigem Niveau. Mit Einsetzen der Resonanz steigt die Reflexion dann deutlich an, was auf die starke Impedanzänderung von harter Wand zum Liner in der Nähe der Helmholtzresonanzfrequenz zurückzuführen ist.



**Abbildung 9:** Reflexion und Transmission Loss HR-Liner bei Breitbandanregung und RMA-Auswertung

## Zusammenfassung und Ausblick

Alle drei verwendeten Analyseverfahren sind prinzipiell zur Charakterisierung von Linerstrukturen unter Breitbandanregung geeignet. Verfahrensbedingte Unterschiede betreffen die Art des Ergebnisses (Schallleistung bei RMA und AMA, Avg.SPL liefert nur mittleren Schalldruck), die Möglichkeit zur Zerlegung in Reflexion und Transmission (nur RMA) und den Bereich der robusten Anwendung. Die RMA erfordert den größten Instrumentierungs- und Auswerteaufwand und ist mit den eingesetzten Arrays bis ca. 2000 Hz realisierbar. Mit einem größeren/vollbesetzten Array könnte dies noch weiter zu höheren Frequenzen ausgedehnt werden. Alle RMA-Ergebnisse nutzen die Regularisierung, wobei diese ab ca. 750 Hz erstmals eingreift und die Ergebnisse speziell oberhalb von 2200 Hz deutlich stabilisiert/verbessert (hier nicht separat gezeigt). Die AMA funktioniert im vorliegenden Fall bis ca. 4000 Hz.

Als nächster Schritt bei der weiteren Datenauswertung ist eine Studie zur Anzahl der erforderlichen Mikrofone für die „Avg.SPL“-Methode geplant – wobei sich durch die

vorhandenen Arrays eine Vielzahl von symmetrischen und asymmetrischen Kombinationsmöglichkeiten ergibt. Zusätzlich ist ein weiterer detaillierter Vergleich der Einzelmoden-Messungen mit den Breitband-Messungen geplant.

## Danksagung

Die Fertigung der Dämpfer-Strukturen erfolgte im Rahmen des LuFo VI-1 Projekts „FLIER“ (Flexible Wandstrukturen für akustische LInER, FKZ 20E1915B), dass auf Grund eines Beschlusses des Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz von 2020-2024 gefördert wurde.

Julia Genßler, Larisa Grizewski, Angelo Rudolphi und Sebastian Kruck gilt unser Dank für die Unterstützung der Messung, der ersten Auswertung und beim Aufbau der Messanordnung. Den Dresdner Kollegen um Moritz Neubauer und Prof. Niels Modler Dank und Anerkennung für die Realisierung der Resonator-Strukturen im Rahmen des o. g. Projekts.

Die Studie zur Breitband-Auswertung erfolgt im Rahmen des DLR-internen Projekts „INPHASE“ („Interior prediction of in-flight aircraft noise“).

## Literatur

- [1] Tapken, U., and Nagai, K., Effects Impairing the Synthesis of Acoustic Duct Modes with Loudspeaker Arrays, 19<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration, Vilnius, Lithuania, 2012.
- [2] Knobloch, K., Grizewski, L., Kohlenberg, F., Behn, M. and Genßler, J., Framework for modal based assessment of liner structures. In: 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2024, Rom, Italien. doi: 10.2514/6.2024-3298. ISBN 978-162410720-7.
- [3] Kohlenberg, F., Neubauer, M., Genßler, J., Radmann, V. and Knobloch, K., Manufacturing, Modelling and Testing of Acoustic Liners Extended with Flexible Walls. CEAS Aeronautical Journal. Springer. doi: 10.1007/s13272-025-00853-y. ISSN 1869-5590.
- [4] Tapken, U., and Enghardt, L., Optimisation of Sensor Arrays for Radial Mode Analysis in Flow Ducts, 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Cambridge, Massachusetts (USA), 2006. <https://doi.org/10.2514/6.2006-2638>.
- [5] Pereira, A., Antoni, J., Leclère, Q. Empirical Bayesian regularization of the inverse acoustic problem, Applied Acoustics, Volume 97, 2015, pp 11-29, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.03.008>.
- [6] Behn, M., Klähn, L. und Tapken, U., Comprehensive experimental investigation of mode transmission through stator vane rows: Results and calibration of an analytical prediction model. 23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Denver, Colorado, USA, 2017. doi: 10.2514/6.2017-3218.
- [7] Basotect(R): Akustik und Design (Stand: 2021-07), Broschüre des Herstellers BASF, aktueller Download unter: <https://plastics-rubber.basf.com>