

Numerische Vorhersage von Kabinenlärm eines zukünftigen Kurzstreckenflugzeugs

Christian Hesse¹, Pia Allebrodt¹, Stanislav Proskurov², Jörn Biedermann¹

¹ *Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt, DLR e.V., 21129 Hamburg, Deutschland, Email: Christian.Hesse@dlr.de*

² *Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR e.V., 38108 Braunschweig, Deutschland*

Einleitung

Die Klimaziele des „European Green Deal“ erfordern die Entwicklung umweltfreundlicher Flugzeugantriebe und Verwendung nachhaltiger Brennstoffe. Dies rückt die Betrachtung effizienter wasserstoff-betriebener Propellerantriebe in den Fokus des Flugzeuggesamtentwurfs, welche im DLR-Projekt EXACT (EXploration of electric Aircraft Concepts and Technologies, <https://exact-dlr.de>) multi-disziplinär untersucht werden. Propellerantriebe stellen jedoch aufgrund ihres tieffrequenten Lärms eine große Herausforderung für die Kabinenakustik dar. Um die Nachentwicklung von masse- und kostenintensiven Maßnahmen zur Lärmreduktion in der späten Entwurfsphase zu vermeiden, sollte die Kabinenakustik möglichst früh im Entwurfsprozess mitbetrachtet werden. Hierfür liefert die wissensbasierte Methodik FUGA (Fuselage Geometry Assembler) einen geeigneten Ansatz, Flugzeugvorentwurfsdaten im CPACS-Format [1] (Common Parametric Aircraft Configuration Schema) um entsprechende Informationen anzureichern und hinreichend detaillierte vibro-akustische Simulationsmodelle zu erzeugen.

In diesem Beitrag werden die neuesten Entwicklungen des vibro-akustischen Modellgenerierungsprozesses mit Hilfe von FUGA aufgezeigt und der Kabinenlärm eines propeller-betriebenen Kurzstreckenflugzeugs aus Vorentwurfsdaten im CPACS-Format untersucht. Als Modellierungsgrundlage werden Rumpf- und Flügelstrukturen aus den CPACS-basierten Dimensionierungsprozessen verwendet und um interne Kabinenstrukturen und Kavitäten erweitert. Für die akustische Anregung wird eine Berechnung der Druckverteilung auf der Rumpfaußenhaut durch ein analytisches Modell der Propellerquellen in Kombination mit der Multipol-Randelementmethode durchgeführt. Die Prognose des Kabinenlärms wird im Reiseflugfall durchgeführt und die aus der Propelleranregung stammende Schalldruckverteilung in der Kabine analysiert. Abschließend wird am Beispiel der Integration von auf die Blattfolgefrequenz abgestimmten Tilgelementen zur passiven Lärmreduktion die flexible Erweiterungsmöglichkeit demonstriert.

Werkzeuge und Schnittstellen

Dieser Abschnitt beschreibt die hier verwendeten Methoden um den Kabinenlärm eines Propellerflugzeugs aus Vorentwurfsdaten im CPACS-Datenformat zu berechnen. Der Ablaufplan der Berechnung ist in Abbildung 1 in Form eines XDMS-Diagramms (eXtended Design Structure Matrix) gegeben. Der initiale Flugzeugentwurf wird dabei von OPENAD [2] als CPACS-Datensatz bereitgestellt. Dabei wird unter Verwendung von Handbuchme-

thoden ein Flugzeugentwurf erstellt, der die gewünschte Transportaufgabe erfüllt. Die Vorauslegung vom Antriebssystem erfolgt mit OPENPROP unter Verwendung der Blade Element Momentum Theorie. Der resultierende CPACS-Datensatz ist hierarchisch aufgebaut und beschreibt die Konfigurationsdetails des Flugzeugs inkl. der äußeren Geometrie. Der Datensatz wird im folgenden mittels FUGA.DESIGN [3] um einen initialen Rumpfantwurf und den Kabinenentwurf ergänzt. Der Rumpfantwurf umfasst dabei die Spante und Stringer sowie die Fußbodenstrukturen. Die Kabinenverkleidung, Sitze, Monumente und Ausgänge sowie der Frachtbereich werden im Kabinenentwurf platziert. Für den Dimensionierungsprozess vom Rumpf wird PANDORA [4] verwendet und für den Flügel LIGHTWORKS [5], wobei jeweils die Flug- und Bodenlasten aus LOADZERO und LGLOADZERO [6] verwendet werden. Die dimensionierten Rumpf- und Flügelmodelle werden ebenfalls in einem CPACS-Datensatz abgespeichert, welcher anschließend in FUGA.SIMULATION [7] für die Erstellung von wellenauflösenden FE-Modellen für die Kabinenlärmprognose verwendet wird.

Die Erstellung der Kabinenlärmprognosemodelle in der Python-basierten Methodik FUGA erfolgt über einen wissensbasierten Ansatz. Hierbei wird ein Wissensgraph erzeugt, welcher bekanntes und unbekanntes Entwurfswissen verknüpft und automatisch Regeln ausführt, um unbekannte Modelle nachzuberechnen. Dieses Vorgehen ermöglicht die Wahrung von Konsistenzbedingungen zwischen Rumpfstruktur und Kabinenverkleidung. Jede im Modell zu berücksichtigende Komponente wird mit Hilfe des OPEN CASCADE TECHNOLOGIES Geometriekernels (<https://dev.opencascade.org/doc/overview/html/>) als Geometriemodell erstellt und entsprechend spezifischer Vernetzungsanforderungen mittels GMSH [8] vernetzt. Damit erfolgt der Einsatz von FUGA.SIMULATION als Multi-Modell-Generator für diverse disziplinen-spezifische Modelle.

Für den Prozess der vibro-akustischen Modellgenerierung wurden gegenüber [7] einige Modellierungsdetails ergänzt, die hier beschrieben werden und in Auszügen in Abbildung 2 dargestellt sind. Zum einen wurden struktur-mechanische Modelle der Sitze in der Rumpfstruktur ergänzt und an den Sitzschienen angebunden; zum anderen wurden akustische Modelle in den akustischen Kavitätsmodellen eingefügt um die Schallabsorption der Sitzoberflächen durch Impedanzrandbedingungen abzubilden. Weiterhin wurde die wellenauflösende Vernetzung der Flügelstrukturen, bestehend aus Holmen, Rippen und Stringern, inkl. Anbindung an den zentralen

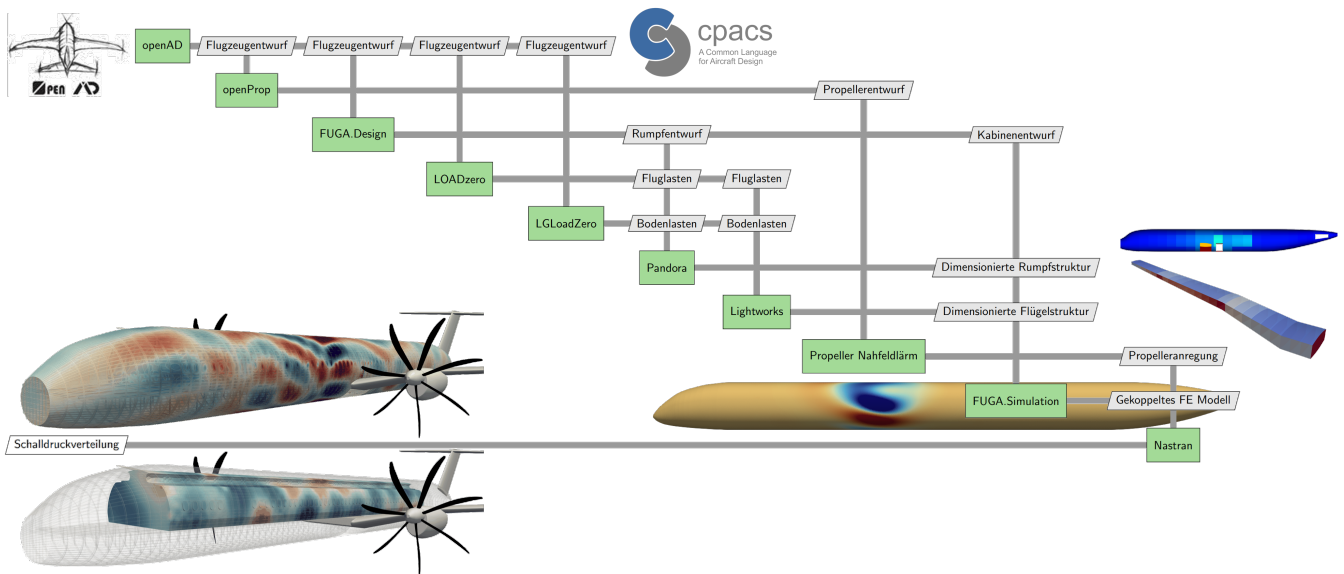


Abbildung 1: XDSM-Diagramm der verwendeten Berechnungskette zur Kabinenlärmpromgnose

Rumpfbereich ergänzt. Die thermo-akustische Isolierung zwischen Rumpfstuktur und Kabinenverkleidung wird als äquivalentes Fluid modelliert. Für weiterführende Details zur Erweiterung um wissensbasierte Entwurfsprozesse zum Wasserstofftank inkl. Anbindung und der Systemintegration in den Flugzeugrumpf sei auf [9] verwiesen. Auch hier lassen sich die wellen-auflösenden Vernetzungsprozesse aus FUGA.SIMULATION nutzen um diese Komponenten aus Flugzeugvorentwurfsdaten in Disziplinen-spezifischen Modellen einzubinden.

Die zusätzliche im Flug auftretende Last der Kabinenbedruckung kann an den strukturellen Hautoberflächen berechnet und in den FE-Modellen für die Verwendung in einer statischen Vorspannungsanalyse exportiert werden. Die statische Vorspannung skaliert die Eigenfrequenzen der Rumpfstuktur und ist damit ein wesentlicher Einflussfaktor für das akustische Transmissionsverhalten unter Reiseflugbedingungen.

Für die akustische Anregung vom Propeller wird die Druckverteilung auf der Rumpfaußenhaut berechnet. Dafür werden Leistungsparameter und Blattgeometrie der Propellerauslegung aus OPENPROP in einem analytischen Quellmodell verwendet. Die Installationseffekte am Rumpf werden mit Hilfe der Multipol-Randelementmethode berechnet, wobei der FMCAS-Löser [10] (Fast Multipole Code for Acoustic Shielding) zum Einsatz kommt. Diese vom DLR Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik zur Verfügung gestellte Anregung der ersten drei Harmonischen der Blattfolgefrequenz wird auf die Rumpfoberfläche interpoliert und im Finite Elemente Modell für die Berechnung vom Innenlärm verwendet. Die in diesem Prozess vorgestellten Methoden ergänzen damit die in [11] vorgestellte Berechnungskette für Turbofantriebwerke um Werkzeuge für die detaillierte Strukturdimensionierung von Rumpf und Flügeln, Propellerauslegung sowie -lärmpromgnose im akustischen Nahfeld.

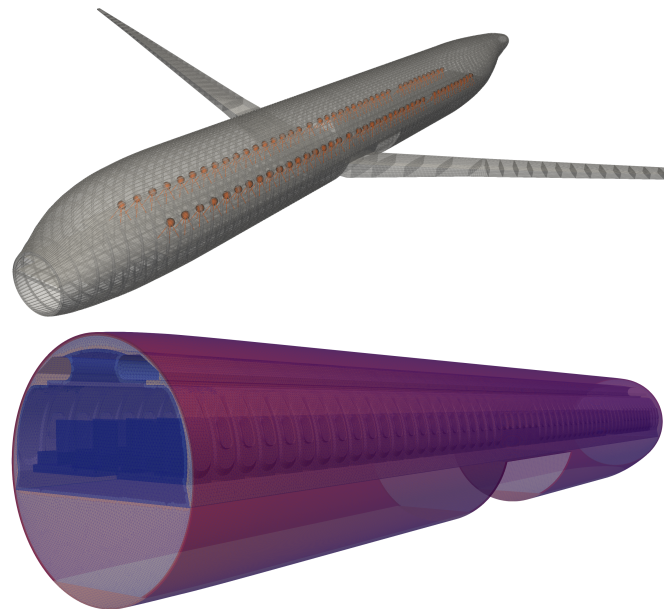


Abbildung 2: Modellierung der Sitze im Strukturmodell (oben) und im akustischen Kavitätsmodell (unten) inkl. zusätzlicher Isolierungskavität (rot)

Kabinenlärmpromgnose

Das in dieser Studie betrachtete Kurzstreckenflugzeug aus dem EXACT-Projekt des DLR ist in Abbildung 3 inkl. Rumpf- und Kabinentwurf aus FUGA.DESIGN dargestellt. Es handelt sich dabei um einen Flugzeugentwurf mit 240 Sitzplätzen in 2 Klassen sowie ein mit Flüssigwasserstoff betriebenes Turboprop-Antriebssystem. Der Strukturauslegungs- und Modellgenerierungsprozess wird gemäß der zuvor beschriebenen Berechnungskette durchgeführt. Dabei wird die Elementauflösung der erzeugten FE-Modelle gewählt, um die ersten drei Vielfachen der Blattfolgefrequenzen vom Propeller aufzulösen, für welche die Anregungsdaten zur Verfügung stehen. Das resultierende gekoppelte FE-

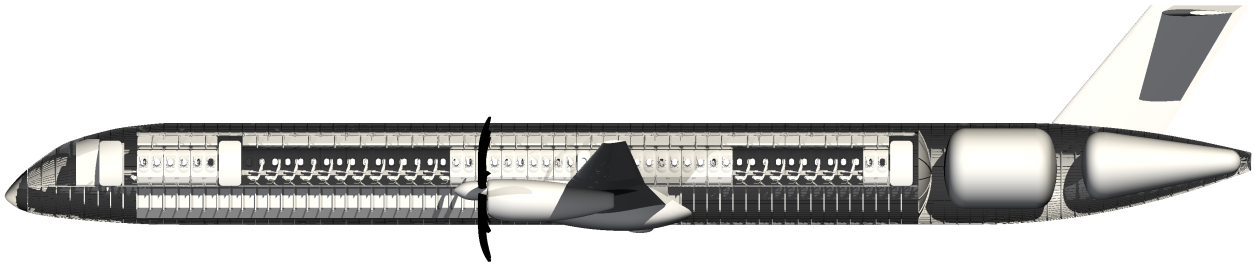


Abbildung 3: Betrachtete wasserstoff-betriebene Flugzeugkonfiguration aus dem EXACT-Projekt

Modell verfügt über $\approx 13 \cdot 10^6$ Freiheitsgrade und un-symmetrische Systemmatrizen; die Lösung für einen Frequenzschritt benötigt auf einer CPU vom Typ Intel Xeon Gold 6444Y@3.60GHz unter Verwendung von 8 Kernen in Nastran ca. 4 Stunden und weist einen Arbeitspeicherbedarf von mehr als 400 GB auf.

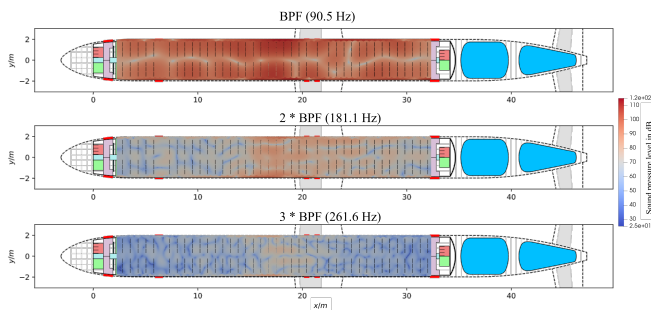


Abbildung 4: Resultierende Schalldruckverteilung in der Kabine in den ersten drei Vielfachen der Blattfolgefrequenz

Die resultierende Schalldruckverteilung in der Kabine ist in Abbildung 4 in den ersten drei Vielfachen der Blattfolgefrequenz aufgetragen. Diese ist in der Hörebene der Passagiere geschnitten dargestellt. Dabei zeigt sich insbesondere in der Blattfolgefrequenz ein hoher resultierender Schalldruckpegel über der gesamten Kabinenlänge. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die akustische Propelleranregung konservativ berechnet wurde und lärmindernde Effekte von der Blattsichelung nicht berücksichtigt wurden. Weiterhin handelt es sich um einen vorausgelegten Propellerentwurf, welcher nicht auf die Lärmabstrahlung optimiert wurde. Somit fällt die Propelleranregung sowie der resultierende Lärmpegel in der Kabine hier entsprechend hoch aus. In der zweiten und dritten Harmonischen der Blattfolgefrequenz ist das interne Schallfeld deutlich lokaler im Bereich um die Propellerebene ausgeprägt. Insgesamt sind hier die Schalldruckpegel deutlich geringer als in der Blattfolgefrequenz, sodass sich potentielle Lärmreduzierungsmaßnahmen auf diese konzentrieren sollten.

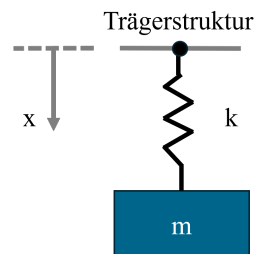


Abbildung 5: Tilgermodell als Masse-Feder-System

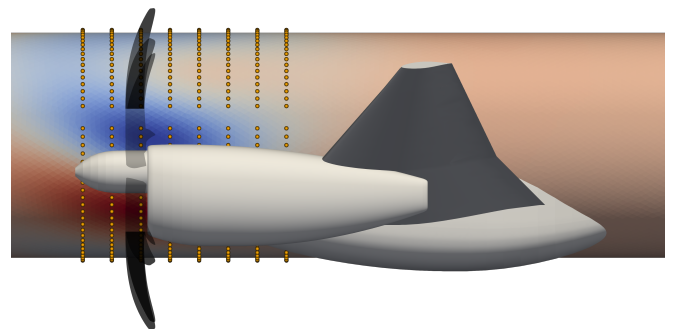


Abbildung 6: Tilgerpositionen an Schnittstellen von Spanten und Stringern um die Propellerebene mit akustischer Anregung in der Blattfolgefrequenz

Einen Vergleich der resultierenden Schalldruckverteilung in der Kabine ohne und mit Tilgerelementen zeigt Abbildung 7 in der Blattfolgefrequenz. Dabei ergibt sich in der Blattfolgefrequenz eine Reduktion im energetischen Mittel über der Passagierkavität von 5,3 dB. Dem steht eine gesamte Tilgermasse von ≈ 130 kg gegenüber.

Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel stellt einen Prozess zur numerischen Vorhersage vom Kabinenlärm im Kontext des Flugzeugvorentwurfs vor, in welchem Methoden für den Flugzeug-, Rumpf-, Kabinen-, sowie Propellerentwurf digital durchgängig miteinander verbunden sind. Vehikeldaten werden im CPACS-Format ausgetauscht um

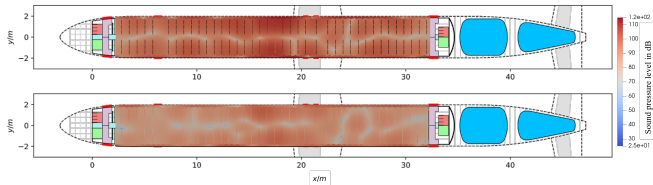


Abbildung 7: Resultierende Schalldruckverteilung in der Kabine in der Blattfolgefrequenz ohne (oben) und mit (unten) zusätzlichen Tilgerelementen

im Prozess mit konsistenten Daten zu arbeiten. Die Entwurfsprozesse werden mit Methoden der Propellerlärmprognose und der vibro-akustischen Simulation verknüpft. Auf CPACS basiert auch die detaillierte Modellgenerierung mit FUGA.SIMULATION, welche auf den Ergebnissen der Strukturdimensionierung aufbaut. Dies ermöglicht, dass in der Kabinenlärmprognose Strukturmodelle betrachtet werden können, welche den im Betrieb auftretenden Lasten standhalten.

Der Berechnungsprozess zur Kabinenlärmprognose wird anhand eines Kurzstreckenflugzeugs durchgeführt und demonstriert. Zahlreiche Erweiterungen im strukturellen und akustischen Modellierungsprozess der vibro-akustischen Prognosemodelle werden aufgezeigt. Abschließend wird mit der Ergänzung von zusätzlichen Tilgerelementen in die Rumpfstruktur als zusätzliche Lärminderungsmaßnahmen die flexible Erweiterbarkeit aufgezeigt. Letztere ermöglicht die direkte Betrachtung von Kabinenlärm im Flugzeugentwurfsprozess, indem das aus Lärminderungsmaßnahmen zusätzlich resultierende Systemgewicht direkt in der Analyse von Flugeigenschaften mit berücksichtigt werden kann.

In diesem Beitrag ist die Kabinenlärmprognose der Strukturdimensionierung nachgeschaltet. Um als gleichberechtigte Disziplin im Entwurfsprozess eingebunden zu werden, kann sie als Teil der Multidisziplinären Analyse und Optimierung (MDAO) betrachtet werden, was bspw. mit Hilfe von datenangepassten Surrogatmodellen gelingen kann [13]. Insbesondere die automatisierte Einbindung von Propellerentwurf und -lärmprognose kann hier den Entwurfsraum weit genug öffnen, um hinsichtlich Kabinenlärm optimierte Flugzeugentwürfe mit den Anforderungen an Leichtbau und Flugeigenschaften in Einklang zu bringen.

Literatur

- [1] M. Alder, C. Liersch, M. Hepperle, R. Maierl, S. Deiner, J. Kleinert, M. Siggel, D. Kohlgrüber, E. Moerland, and B. Nagel, “20 years of CPACS: A Brief History and Future Vision of Establishing a Common Language for Aircraft Design,” in *Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress (DLRK)*, Oktober 2024.
- [2] S. Wöhler, G. Atanasov, D. Silberhorn, B. Fröhler, and T. Zill, “Preliminary Aircraft Design within a Multidisciplinary and Multifidelity Design Environment,” in *Aerospace Europe Conference 2020*, April 2020.

- [3] J.-N. Walther, C. Hesse, J. Biedermann, and B. Nagel, “Extensible aircraft fuselage model generation for a multidisciplinary, multi-fidelity context,” in *ICAS 2022*, September 2022.
- [4] M. Petsch, D. Kohlgrüber, D. Schwinn, C. Leon Muñoz, and L. Marconi, “Enhancements of the DLR tool Pandora for automated detailed preliminary design and crash analyses.” DLRK 2025, Augsburg, Deutschland, September 2025.
- [5] S. Dähne, E. Werthen, D. Zerbst, L. Tönjes, H. Traub, and C. Hühne, “Lightworks, a scientific research framework for the design of stiffened composite-panel structures using gradient-based optimization,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Mai 2024.
- [6] T. Hecken, P. Balack, M. Petsch, and D. Zerbst, “Conceptual Loads Assessment of Aircraft with Fuselage Integrated Liquid Hydrogen Tank,” in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2022*, September 2022.
- [7] C. Hesse, P. Allebrodt, M. Teschner, and J. Biedermann, “Knowledge-based model generation for aircraft cabin noise prediction from pre-design data,” *CEAS Aeronautical Journal*, September 2024.
- [8] C. Geuzaine and J.-F. Remacle, “Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 79, no. 11, pp. 1309–1331, 2009.
- [9] S. Hellbrück, C. Hesse, T. Bielsky, F. Thielecke, J. Biedermann, and B. Nagel, “Knowledge-based engineering methods for hydrogen tank and system integration in aircraft fuselage design,” *CEAS Aeronautical Journal*, Februar 2026.
- [10] M. Lummer, “Installation: numerical investigation,” *CEAS Aeronautical Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 159–178.
- [11] C. Hesse, R. D. Dewald, S. Algermissen, A. Büchner, J. Dierke, and R. Winter, “Berechnungskette für die numerische Kabinenlärmprognose von Flugzeugen in der frühen Entwurfsphase,” in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK)*, 2025.
- [12] K. Kochan, “Robust multiobjective optimization of loudspeaker and microphone positions for active noise control systems in propeller aircraft,” in *Fortschritte der Akustik*, pp. 588–591, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2025.
- [13] P. Allebrodt, C. Hesse, J. Bussemaker, M. Petsch, Y. Hüpel, J. Biedermann, S. C. Langer, and B. Nagel, “Integration der Kabinenakustik in den multidisziplinären Flugzeugvorentwurfsprozess auf Basis datenangepasster Surrogatmodelle,” in *Fortschritte der Akustik*, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2026.