

Wissensbasierte Modellgenerierung für die Vorhersage von Kabinenlärm im Kontext des Flugzeugvorentwurfs

Christian Hesse¹, Jan-Niclas Walther¹, Pia Allebrodt¹, Martin Wandel², Stephan Algermissen³, Ray Dewald⁴

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

² *Airbus Operations GmbH, 21129 Hamburg, Deutschland, Email: Martin.Wandel@airbus.de*

³ *Institut für Systemleichtbau, 38108 Braunschweig, Deutschland, Email: Stephan.Algermissen@dlr.de*

⁴ *Institut für Aeroelastik, 37073 Göttingen, Deutschland, Email: Ray.Dewald@dlr.de*

Einleitung

Die gezielte Auslegung von Lärmschutzmaßnahmen für die Flugzeugkabine erfordert verlässliche und effiziente Berechnungsmethoden des Schalltransmissionsverhaltens. Die Schalltransmission beginnt bei den individuellen Quellen (z.B. Triebwerken), setzt sich über die turbulente Grenzschicht fort auf die Rumpfaußenhaut und regt diese zu Schwingungen an. Diese Schwingungen pflanzen sich über die Rumpf- sowie Kabinenstruktur in den Innenraum fort, wo sie von Bordpersonal und Passagieren wahrgenommen werden. Insbesondere bei der Auslegung neuer, klimaeffizienter Konzepte im Kontext des Flugzeugvorentwurfs sind üblicherweise keine ausreichenden Informationen für eine detaillierte Modellierung von Rumpfstruktur und Kabinenbauteilen vorhanden, welche eine aussagekräftige Vorhersage der Schwingungen und damit des Kabinenlärms erlaubt. Zur gezielten Anreicherung von Vorentwurfsdaten mit Wissen zur numerischen Detailanalyse wird das wissensbasierte Werkzeug FUGA (FUSELAGE GEOMETRY ASSEMBLER) entwickelt [1].

Der vorliegende Beitrag beschreibt die wissensbasierte Geometrie- und Modellgenerierung in FUGA für die Kabinenlärmprognose. Modellierungsgrundlage bilden dazu Luftfahrzeugdatensätze im Vorentwurfsdatenformat CPACS (www.cpacs.de) [2]. Diese beschreiben zunächst die äußere Hülle des Vehikels und werden um detaillierte Strukturinformationen erweitert, welche die Randbedingungen im Kabinenentwurf definieren. Für die Kabinenbauteile werden mit Hilfe des quelloffenen Geometriekernels OCCT (OPEN CASCADE TECHNOLOGY) [3] Geometrien in dem Detaillierungsgrad bereitgestellt, wie er für anschließende Analysen benötigt wird. Die Geometriemodelle können anschließend in quelloffenen (bspw. GMSH [4]) oder kommerziellen Vernetzern diskretisiert und für die numerische Analyse weiterverwendet werden.

Wissensbasierte Methodik

Dieser Abschnitt beschreibt die wissensbasierte Entwurfsmethodik (engl. KBE: *knowledge-based engineering*), welche in FUGA implementiert ist und für die Ableitung von multi-fidelity Geometrien verwendet wird. Diese umfasst im Wesentlichen die folgenden drei Bausteine:

- ein Datenrepositorium, welches die Produktdaten enthält,

- das Wissensrepositorium, welches die Entwurfsregeln umfasst,
- einen Regelinterpreter, welcher die Ausführungsreihenfolge der Regeln festlegt.

Die Rolle des Datenrepositoriums wird in der vorliegenden Arbeit vom Produktmodell CPACS übernommen. Die detaillierte Beschreibung der Primärstruktur in CPACS kann SCHERER & KOHLGRÜBER [5] entnommen werden; die Flugzeugkabine ist in WALTHER ET AL. [6] beschrieben.

Entwurfsregeln werden in ausführbaren Python-Klassen implementiert, welche von einer gemeinsamen Basisklasse erben. Jede Regel liefert einen Wert im Datenrepositorium, welches (CPACS-native bzw. -fremde) Daten in jeglicher Form enthalten kann, bspw. numerische Werte, Tabellen, Geometrien, aber auch Berechnungsnetze für Finite Elemente Modelle.

In FUGA wird ein graphen-basierter Regelinterpreter auf Grundlage des Python-Paketes NETWORKX [7] verwendet. Diese Bausteine können verwendet werden, um die verfügbaren Informationen zur Flugzeugkonfiguration innerhalb eines CPACS-Datensatzes zu erweitern und konsistent zusätzliche Produktdaten zu generieren. Eine detaillierte Beschreibung der Entwurfsmethodik kann WALTHER ET AL. [1] entnommen werden; diese ist die Grundlage der im nachfolgenden Kapitel beschriebenen, automatisierten Generierung von CAD-Geometrien sowie einer Solver-agnostische Erstellung von FE-Berechnungsgittern.

Regeln für Rumpf- und Kabinenentwurf

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Regelformulierung der Modellgenerierung im gekoppelten Rumpf- und Kabinenentwurf gegeben. Grundlage bilden dabei Flugzeugvorentwürfe, wie sie beispielsweise im Werkzeug OPENAD [8] erstellt werden. Die Modellgenerierung teilt sich auf in den CAD-basierten Geometrieentwurf sowie die automatisierte Vernetzung dieser Geometrien.

Im DLR-Projekt INTONATE (FUTURE AIRCRAFT INTERIOR NOISE AND VIBRATION EVALUATION) soll der digitale Faden für die Bewertung der Kabinenakustik neuartiger Flugzeugentwürfe aufgebaut werden. Dafür werden die Berechnungswerkzeuge von der Quelle mit samt der Transmission über den Strukturpfad bis zum

Passagier miteinander gekoppelt. Ziel ist es dabei, FE-Modelle der Primärstruktur, wie sie bspw. von DEWALD ET AL. [9] für die Optimierung von Steifigkeitsparametern der Strukturanbindungen untersucht werden, mit der Kabinenausstattung zu koppeln und den Lärm in der Kabine zu prognostizieren.

Für die geometrische Modellierung der primären Rumpfstruktur kann dabei auf die etablierte Definition innerhalb von CPACS zurückgegriffen werden [5]. Die Umsetzung eines CPACS-Datensatzes in eine Geometrie erfolgt dabei regelbasiert mit Hilfe von Geometrieoperationen, welche auf Grundlage von OCCT implementiert sind. Dadurch lassen sich Strukturelemente wie Spante, Stringer, Querbalken und die Sitzschienen in verschiedenen Fidelitätsgraden wie bspw. in Form von Balken- oder Schalenelementen instanzieren. Jedoch lassen sich nicht lediglich Rumpftonnen mit gleichverteilten Strukturbereichen umsetzen; auch Sonderbereiche wie bspw. der Flügel-Rumpf-Übergang lassen sich definieren und können als Geometrien berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zur Primärstruktur sind Bauteile der Kabinenverkleidung noch nicht im Detail in CPACS parametrisiert; die aktuelle Definition [6] betrachtet diese als Zukaufteile mit eigener interner Parametrik. Daher wird für die Modellerstellung dieser Bauteile eine eigene Parametrisierung verwendet, grundlegende Informationen wie bspw. die Positionierung und Anordnung werden jedoch aus CPACS übernommen. Eine wesentliche Modellierungsanforderung ist dabei, dass sich die Sekundärstrukturen wasserdicht miteinander verbinden lassen. Wenn diese Anforderung erfüllt ist, lassen sich aus den Berandungsflächen Volumina ableiten, welche ihrerseits vernetzt werden können, um damit bspw. den luftgefüllten Raum in der Passagierkavität bzw. die Glaswolle der Isolierung abzubilden.

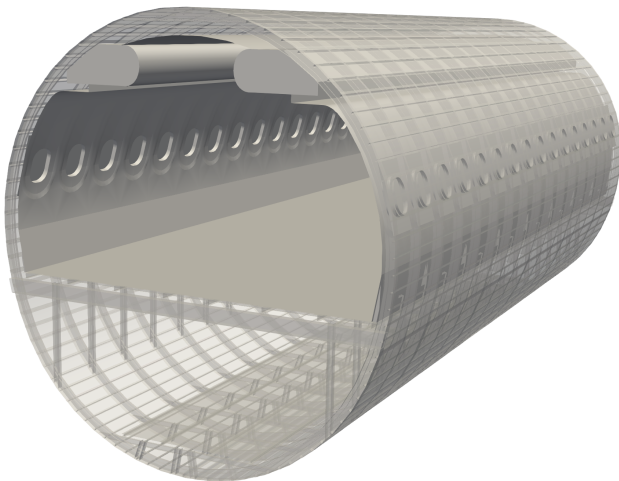


Abbildung 1: Geometriemodellierung von Primär- und Sekundärstruktur für ACOUSTIC FLIGHT-LAB

Eine beispielhafte Darstellung der resultierenden Geometrien für Primärstruktur und Kabinenverkleidung ist in Abbildung 1 am Beispiel vom ACOUSTIC FLIGHT-LAB[12] dargestellt. Komplementäre Geometrien der Kavitäten zeigt Abbildung 2, wobei bspw. in Grün die Iso-

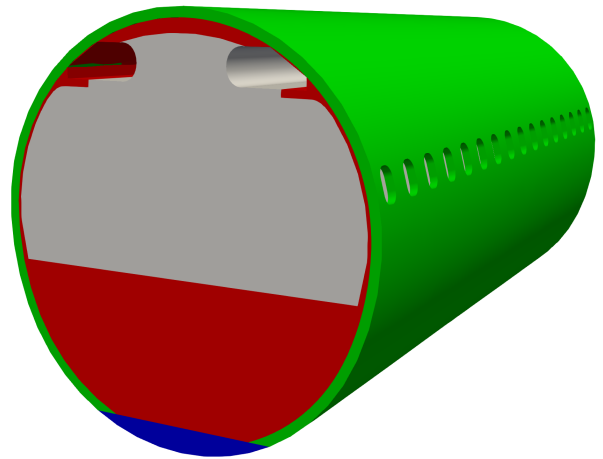


Abbildung 2: Geometriemodellierung von Kavitäten für ACOUSTIC FLIGHT-LAB

lierungskavität und in Grau die Passagierkavität dargestellt ist. Diese Bauteile können als annotierte Geometrien bspw. im STEP-Format exportiert und dadurch mit Meta-Informationen angereichert werden. In einem begleitenden CPACS-Datensatz werden die strukturellen Bauteildefinitionen der Geometrien definiert und mit den Projektpartnern ausgetauscht. Sie bilden damit die Grundlage für die von ALGERMISSEN ET AL. [10] beschriebene automatisierte Modellerstellung von gekoppelten FE-Modellen mit Fluid-Struktur-Interaktion in Ansys. In einem alternativen Ansatz unter Verwendung quelloffener Bibliotheken wird im folgenden Abschnitt die automatisierte Vernetzung mit Hilfe von GMSH innerhalb von FUGA betrachtet.

Anwendungsbeispiele der Vibroakustik

Ein wesentlicher Vorteil der Modellgenerierung auf Grundlage eines zentralen Datenformats wie bspw. CPACS besteht in der Tatsache, dass verschiedene Disziplinen mit unterschiedlichen Modellierungsanforderungen mit konsistenten Daten arbeiten können. So kann bspw. die Strukturauslegung, welche üblicherweise globale Finite Elemente Modelle (GFEM) mit Balkenrepräsentationen für die Versteifungselemente verwenden, konsistent zur vibroakustischen Bewertung erfolgen. Letztere erfordert viel detailliertere Komponentenmodelle wie bspw. extrudierte und als Schalen vernetzte Versteifungselemente. In diesem Abschnitt werden Beispiele für die automatisierte Vibroakustik-Modellgenerierung mittels FUGA gegeben.

Die Modellerstellung innerhalb von FUGA läuft dabei unter Verwendung von GMSH wie folgt ab: Alle Strukturbauteile werden individuell mit dem in [11] beschriebenen Algorithmus zur Erstellung quad-dominiertes, quasi-strukturierter Berechnungsgitter vernetzt. Dieser ermöglicht sowohl die Verwendung von Schalenelementen mit linearen sowie quadratischen Ansatzfunktionen. Anschließend werden strukturelle Verbindungen durch bspw. Niete oder Vibrationsisolatoren über Elemente wie CFAST bzw. CBUSH erzeugt. Ein beispielhaftes FE-Netz mit einer Zielelementauflösung von 0,05 m vom

im vorangegangenen Abschnitt betrachteten ACOUSTIC FLIGHT-LAB ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Modellerstellung erfolgt dabei nicht spezifisch auf eine FE-Software zugeschnitten, sondern Solver-agnostisch. Dementsprechend können die Modelle in das gewünschte Solverformat konvertiert und exportiert werden; aktuell werden sowohl NASTRAN als auch ANSYS unterstützt, welche jeweils von DEWALD ET AL.[9] und ALGERMISEN ET AL.[10] verwendet werden.

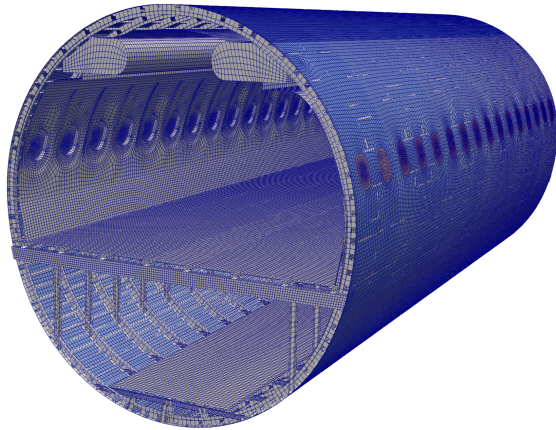


Abbildung 3: FE-Berechnungsnetz von Primär- und Sekundärstruktur für ACOUSTIC FLIGHT-LAB

Da die Modellierung der Struktur vom ACOUSTIC FLIGHT-LAB inklusive Kabinenverkleidung und Kavitäten sich experimentell validieren lässt, sollen daraus Modellierungsrichtlinien für die gesamte Flugzeug- und Kabinenstruktur abgeleitet werden. Eine Referenzkonfiguration aus dem Projekt INTONATE ist die D180-Konfiguration bei der es sich um ein generisches Mittelstreckenflugzeug mit 180 Passagieren handelt. Ein erster Entwurf für ein resultierendes FE-Modell ist dabei in Abbildung 4 dargestellt. Darin sind zusätzliche Strukturen wie bspw. detailliert als Schalen vernetzte Druckschotte und Flügel-Rumpf-Übergang inkl. Keelbeam vorhanden. Auch eine dedizierte Modellierung der Flügelstrukturen kann für die Lärmprognose im Innenraum von Relevanz sein, wenn die Propagation von Triebwerksvibrationen mitbetrachtet werden soll, wie sie bspw. von ZETTEL ET AL.[14] in der Anregung prognostiziert werden.

Ein weiterer Anwendungsfall aus dem Projekt CATECO (CABIN ACOUSTICS AT THE HEART OF ECO-RESPONSIBILITY) betrifft die Vorhersage des Kabinenlärms für den Entwurf neuer, klimaeffizienterer Flugzeugkonfigurationen. Hier wird ein mit Flüssigwasserstoff betriebenes Turboprop Konzept aus dem DLR-Projekt EXACT (EXPLORATION OF ELECTRIC AIRCRAFT CONCEPTS AND TECHNOLOGIES) betrachtet. Dieses ist mit zwei Wasserstofftanks im unbedruckten Teil des Rumpfes hinter dem Druckschott ausgestattet, was wiederum den Strukturentwurf entsprechend beeinflusst. Die betrachtete Flugzeugkonfiguration ist in Abbildung 5a dargestellt. Die Schalldruckanregung des Propellers auf der Rumpfhaut im Reiseflug zeigt Abbildung 5b; die in NASTRAN berechnete resultierende Vibrationsantwort der Primärstruktur sowie Kabinenverkleidung ist in Abbil-

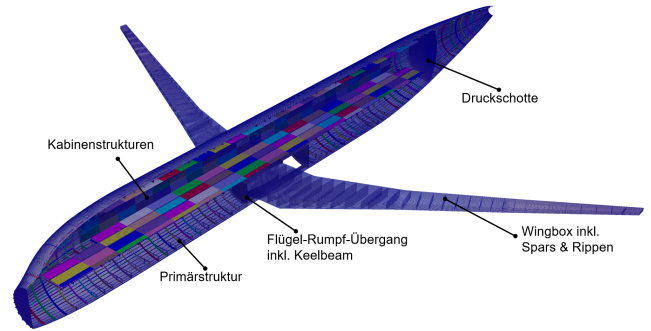


Abbildung 4: FE-Berechnungsnetz von Primär- und Sekundärstruktur für Mittelstreckenflugzeug

dung 5c gegeben. Damit ist eine durchgängige Berechnungskette vom Flugzeug-Gesamtentwurf bis zur vibroakustischen Betrachtung der Kabine auf Gesamtflugzeugebene konzeptionell nachgewiesen. Für eine abschließende Vorhersage des resultierenden Schalldrucks innerhalb der Kabine sind noch Detailmodelle der Kavitäten inklusive der Isolierung etc. sowie zusätzliche Strukturen und Geometrien (bspw. Sitze, Monumente, Systeme und weitere Anbauteile) innerhalb der Kabine notwendig. Diese werden in anschließenden Untersuchungen modelliert und in den automatisierten Modellierungsprozess integriert.

Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel beschreibt eine wissensbasierte Entwurfsmethodik, welche die Erstellung vibro-akustischer Vorhersagemodelle auf Gesamtflugzeugebene aus Flugzeugvorentwurfsdaten ermöglicht. Für letztere wird auf das CPACS-Datenformat zurück gegriffen, dessen Strukturdefinition sich in der Fidelität als hinreichend zur Erstellung hoch-aufgelöster Modelle erweist. Naturgemäß ist die akkurate Vorhersage von Kabinenlärm ein hochkomplexer, Disziplinen-übergreifender Prozess; Simulationsmodelle enthalten viele Modellierungsannahmen und Parameterunsicherheiten, welche bestimmt und auf Korrektheit geprüft werden müssen. Hierfür bietet das in [12] beschriebene ACOUSTIC FLIGHT-LAB die optimale Plattform.

Weiterhin besteht das Gesamtflugzeug aus vielen, weiteren Komponenten, welche aktuell nicht berücksichtigt werden. Für diese zusätzlichen Strukturen wie Sitze, Kabinenmonumente, Systeme und weitere Anbauteile werden in kommenden Untersuchungen benötigte Fidelitätsgrade analysiert und diese in die Modellerstellung integriert. Auch die automatisierte Erstellung von akustischen Kavitäten inklusive der Passagierkabine, Isolierung, etc. sowie die Kopplung mit den Strukturen, welche für die tatsächliche Lärmprognose im Innenraum benötigt werden, erfolgt in anschließenden Arbeiten. Die Voraussetzungen dafür sind mit der bereits erfolgten geometrischen Modellierung gegeben.

Potentiell soll sich mit den auf diese Weise erstellten

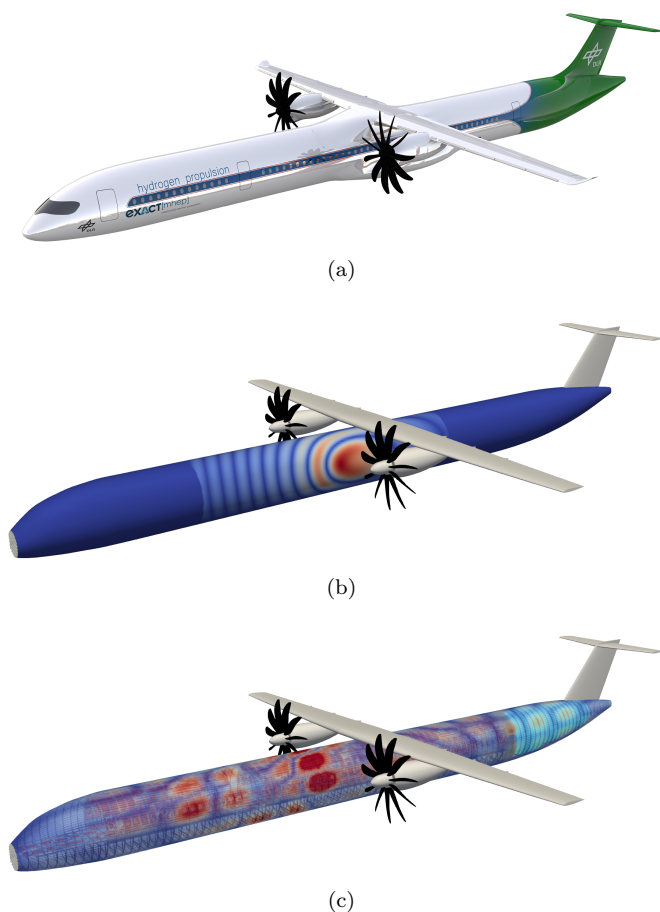


Abbildung 5: Betrachtete Flugzeugkonfiguration (a), Propelleranregung der ersten Blattfolgefrequenz auf dem Rumpf (b) und resultierende Betriebsschwingform bei 112 Hz (c)

Modellen der Kabinenlärms bereits in den frühen Phasen des Flugzeuggesamtentwurfs gleichberechtigt mit allen anderen relevanten Disziplinen prognostizieren lassen. Dies steht im direkten Kontrast zum aktuellen Vorgehen, wo die Lärmvorhersage relativ spät im Entwurfsprozess erfolgt; Potentiale für Verbesserungen hinsichtlich des Kabinenlärms sind dann bereits relativ gering. Auf die hier beschriebene Weise können notwendige Lärmreduzierungsmaßnahmen für den Innenraum effektiv evaluiert und gezielt ausgearbeitet werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Hamburgischen Investitions- und Förderbank (IFB Hamburg) für die Förderung der Aktivitäten im Projekt CATECO (CABIN ACOUSTICS AT THE HEART OF ECO-RESPONSIBILITY) im Rahmen des GATE-Förderprogramms (GREEN AVIATION TECHNOLOGIES).

Literatur

[1] J.-N. Walther, C. Hesse, J. Biedermann, B. Nagel: *Extensible aircraft fuselage model generation for a multidisciplinary, multi-fidelity context*, 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), 2022.

[2] M. Alder, E. Moerland, J. Jepsen, B. Nagel: *Recent*

Advances in Establishing a Common Language for Aircraft Design with CPACS, Aerospace Europe Conference 2020.

[3] Thomas Paviot: *pythonocc (7.7.0)*, Zenodo, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3605364>, 2022.

[4] C. Geuzaine, J.-F. Remacle: *Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities*, International Journal for Numerical Methods in Engineering 79(11), pp. 1309-1331, 2009.

[5] J. Scherer, D. Kohlgrüber: *Fuselage structures within the CPACS data format*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal Emerald Group Publishing Limited, 2016.

[6] J.-N. Walther, C. Hesse, M. Alder, J. Biedermann, B. Nagel: *Expansion of the cabin description within the CPACS air vehicle data schema to support detailed analyses*, CEAS Aeronautical Journal, 2022

[7] A. A. Hagberg, D. A. Schult, P. J. Swart, *Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX*, Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy2008), Pasadena, USA, pp. 11–15, 2008

[8] S. Wöhler, G. Atanasov, D. Silberhorn, B. Fröhler, T. Zill: *Preliminary Aircraft Design within a Multidisciplinary and Multifidelity Design Environment*, Aerospace Europe Conference 2020, 25.-28. Feb. 2020, Bordeaux, Frankreich, 2020.

[9] R. Dewald, T. Klimmek, S. Algermissen, C. Hesse, R. Winter: *Angepasste Modellierungsvorschriften für vibroakustische Untersuchungen von Flugzeugrümpfen*, 49. Jahrestagung für Akustik (DAGA), 2023.

[10] S. Algermissen, C. Hesse, R. Dewald: *Automatisierte Modellerstellung zur Berechnung von Innenlärm in Flugzeugen*, 49. Jahrestagung für Akustik (DAGA), 2023.

[11] M. Reberol, C. Georgiadis, J.-F. Remacle: *Quasi-structured quadrilateral meshing in Gmsh—a robust pipeline for complex CAD models*, arXiv preprint arXiv:2103.04652, 2021.

[12] M. Wandel, C. Thomas, M. Teschner: *Acoustic Flight-Lab - Eine einzigartige Integrationsplattform zur Optimierung vibro-akustischer Maßnahmen an Flugzeugen*, 49. Jahrestagung für Akustik (DAGA), 2023.

[13] J.-N. Walther, M. Petsch, D. Kohlgrüber, *Modeling of CPACS-based fuselage structures using Python*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 89 No. 5, pp. 644-653, 2017.

[14] S. F. Zettel, R. Winter, M. Norambuena, M. Böswald: *Jet engine vibration model for the estimation of pylon-wing interface loads during flight*, 49. Jahrestagung für Akustik (DAGA), 2023.