

## Flugzeuginnenlärm: von der Kabine bis zur Auralisation

Alexander Kokott<sup>1</sup>, Stephan Algermissen<sup>1</sup>, Christian Hesse<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Systemleichtbau,  
38108 Braunschweig, Email: alexander.kokott@dlr.de

<sup>2</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt,  
21229 Hamburg, Email: christian.hesse@dlr.de

### Einleitung

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges ist nicht nur bei bodengebunden Fahrzeugen eine zukunftsweisende Technologie hinsichtlich geringerer Emissionen. Auch in der Luftfahrt stellen elektrische Antriebe, etwa auf Basis von Brennstoffzellen, eine Möglichkeit dar, klimaschädliche Gase während des Betriebs zu reduzieren bzw. zu vermeiden. Die Entwicklung elektrifizierter Flugzeuge umfasst jedoch nicht nur das Triebwerk an sich, sondern steht auch in Verbindung mit grundlegenden Modifikationen des Rumpfes, der Tragflächen und des grundlegenden Antriebskonzeptes, etwa der Wandel von vornehmlich Turbofan- auf Propellertriebwerke. All diese Änderungen implizieren auch eine Veränderung des vibroakustischen Verhaltens hinsichtlich der Quellen und Transmissionspfade.

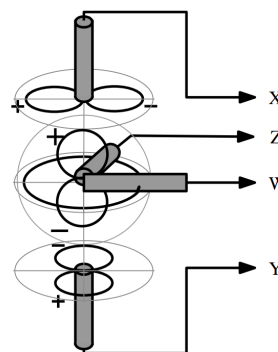
Das DLR-Projekt INTONATE (Future Aircraft **IN**TeriOr Noise and Vibr**AT**ion Evaluation) setzt sich in diesem Kontext zum Ziel, den Kabinenlärm neuartiger Flugzeuge bewerten zu können. Bestehende Simulationsprozeduren werden erweitert und zu einem digitalen Faden entlang der Transmissionspfade verknüpft. Zudem sollen die Simulationsergebnisse auch erlebbar gemacht werden, sodass Kabinenkonzepte etwa mittels Probandentests miteinander verglichen werden können. [1]

Diese „Erlebarmachung“ umfasst einerseits die detaillierte visuelle Darstellung der Kabine in einer Virtual Reality Umgebung, andererseits auch eine auditive Komponente. Die Simulationsergebnisse sollen nicht wie üblich nur als Grafiken (Spektren, Wasserfalldiagramme, etc.) ausgewertet, sondern auch hörbar gemacht (auralisiert) werden. Dies ermöglicht es, einen immersiven Eindruck der neuartigen Kabinenkonzepte zu vermitteln und die Resultate auch ohne technisches Hintergrundwissen bewerten zu können. Dieser Beitrag befasst sich daher mit dem Ende der Prozesskette: der Überführung der simulierten Druckfelder in der Kabine in eine Auralisationsumgebung. Die Daten basieren auf den vorgelagerten Simulationen für Triebwerke und der Berechnung der Propagation auf und über die Rumpfstruktur, die Sekundärstruktur bis hin zur Kavität [2–5].

### Erzeugung von Auralisationsdaten

Der Simulation entlang der Prozesskette endet mit der Berechnung der komplexen schmalbandigen Schalldrücke in der Kavität der Kabine mittels finiter Elemente Mo-

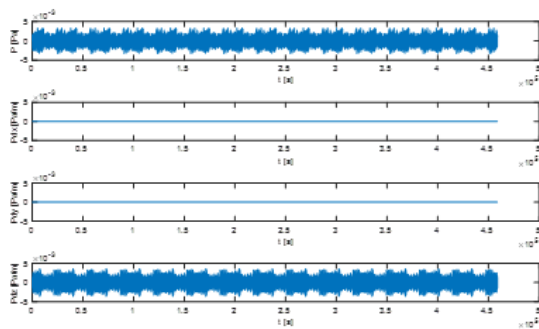
delle [2]. Um diese Ergebnisse hörbar zu machen, müssen einerseits entsprechende Zeitsignale generiert werden, andererseits müssen diese auch entsprechend physisch reproduziert werden um einen möglichst realen Eindruck zu ermöglichen. Eine Transformation der komplexen Spektren an bestimmten Beobachterpositionen erfüllt den Anspruch der Immersion nicht, da in diesem Fall nur ein Monosignal generiert wird und räumliche Informationen des Schallfeldes somit vernachlässigt werden. Es bedarf folglich eines Audioformats, das das Schallfeld nicht nur kanalbasiert (etwa Stereo oder 5.1, wie aus dem HiFi-Bereich bekannt), sondern physikalisch abspeichert. Aufgrund der geringeren Komplexität und der einfachen Implementierbarkeit in die später erläuterte Virtual Reality Umgebung wird Ambisonics erster Ordnung (First Order Ambisonics, FOA) als Format für die Audiozeitdaten gewählt. Dieses Format wurde bereits 1975 vom Mathematiker Michael Gerzon beschrieben [6], jedoch schaffte es das Format lange Zeit nicht über die Anwendung in Versuchsszenarien hinaus. In den späten 2010ern erlangte es neue Aufmerksamkeit und wird mittlerweile auch von den am weitesten verbreiteten 3D-Engines unterstützt. Auch spezielle Mikrofone zur Aufnahme von Ambisonics-Datensätzen wurden in dieser Zeit entwickelt.



**Abbildung 1:** First Order Ambisonics Kanalzuordnung. Schalldruck W und Druckgradienten X,Y,Z. [7]

Im Gegensatz zu kanalbasierten Formaten, in denen jeder Kanal dem Signal für einen konkreten Lautsprecher, also auch einer konkreten Richtung, entspricht, ist Ambisonics eine Beschreibung über Schallquellen (genauer sphärische Harmonische) [8]. Mithilfe eines entsprechenden Decoders lassen sich dann die beschriebenen Schallfelder in Signale für die Lautsprecher umrechnen, sofern deren Positionen in Relation zur Beobachterposition bekannt sind. Das codierte Schallfeld kann folglich auf verschiedenen Anordnungen und verschiedener Anzahl von

Lautsprechern (im einfachsten Fall Kopfhörern) reproduziert werden, die entsprechende Ordnung des Ambisonics vorausgesetzt. Das First Order Ambisonics besteht aus einem vier-kanaligen Zeitsignal. Diese Kanäle beschreiben den Schalldruck und die Druckgradienten in den drei Raumrichtungen (siehe Abb. 1 und Abb. 2). Für jede Schallquelle in der Kavität kann folglich eine Ambisonics-Quelle als Zeitsignal aus den FE-Daten generiert und für die spätere Reproduktion genutzt werden. Wie bereits erwähnt liegen die komplexen Schalldrücke in den FE-Knoten des Kavitätsmodells bereits vor. Je nach verwendetem Elementtyp werden sogar bereits die Druckgradienten berechnet und ausgegeben, alternativ können diese auch direkt aus der Punktwolke ermittelt werden. Über die Divergenz des Vektorfeldes werden einige Quellen bestimmt, an denen nachfolgend die Ambisonics-Datensätze generiert werden. Diese Ambisonics-Audiospuren dienen schlussendlich dem Decoder in der VR-Umgebung, um die Lautsprecher- bzw. Kopfhörersignale zu erzeugen.

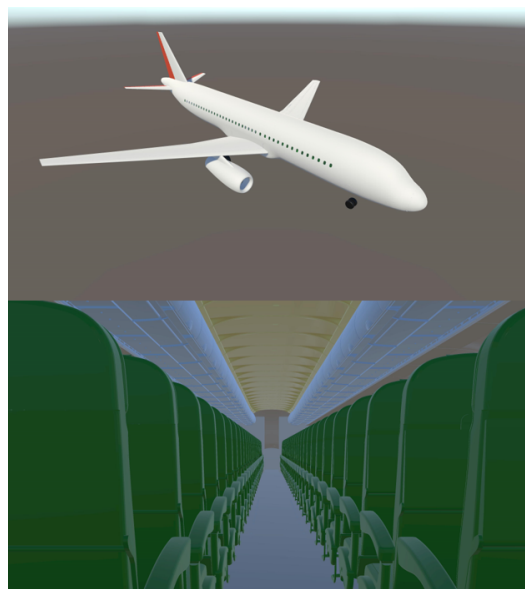


**Abbildung 2:** Exemplarischer Audiodatensatz für eine Ambisonics-Quelle. Kanal 1: Schalldruck, Kanäle 2-4: Druckgradienten in X,Y,Z.

## VR- und Auralisationsumgebung

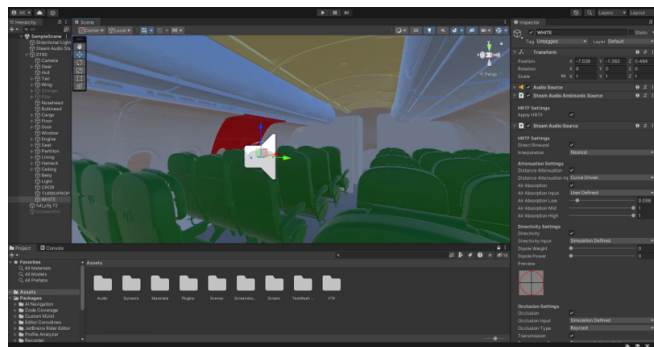
Mit den nun vorhandenen Zeitdaten des Schallfeldes muss eine Umgebung definiert werden, in der diese abgebildet und abgespielt werden können. An dieser Stelle kommt eine 3D-Engine aus der Spieleindustrie zum Einsatz, um die visuelle Umgebung bereitzustellen. In diesem Projekt wurde die Unity® Engine verwendet. Für diese wurde im Rahmen des Projektes eine bestehende Routine erweitert, mithilfe derer 3D-Modelle aus einem XML-Datenschema (CPACS vgl. [9] und [10]) automatisiert erstellt werden können. Diese Datensätze umfassen Systemparameter des Flugzeugs (Komponenten, Geometrien, Materialien, etc.), lediglich Farbgebung und Beleuchtung des Modells müssen manuell erstellt werden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine Außen- und Kabinenansicht eines im Projekt betrachteten Flugzeugmodells.

Als letzten Schritt des Umgebungsaufbaus werden die zuvor generierten Ambisonics-Quellen in das Modell eingefügt (Abb. 4). Die Decodierung der Quellen für die Reproduktion erfolgt mit Steam Audio®. Dieses lässt sich als Plug-In in die 3D-Umgebung implementieren und ar-



**Abbildung 3:** 3D-Modell des Flugzeugs und der Kabine in Unity®.

beitet mit First Order Ambisonics Eingabedaten.



**Abbildung 4:** Implementierung der Ambisonics-Quellen im Unity® Editor.

Die visuelle und auditive Umgebung zur „Erlebarmachung“ ist somit definiert. Als Schnittstelle zwischen Modell und Rezipient wird eine 3D-Brille (HTC Vive®, siehe Abb. 5) verwendet. Die auditive Reproduktion erfolgt in diesem Projekt binaural mittels Kopfhörern, um die Komplexität des Systems zunächst möglichst gering zu halten. Probanden können mittels diverser Eingabegeräte (Tastatur, Maus, Controller) oder durch das Headtracking der VR-Brille durch die VR-Umgebung navigieren und an verschiedenen Positionen in der Kabine den Schall wahrnehmen. Szenarien und Randbedingungen können skriptbasiert automatisch oder durch die Probanden verändert werden. Somit können beispielsweise verschiedene Kabinen- oder Flugzeugkombinationen direkt miteinander verglichen werden. Die physikalische Reproduktion der Veränderungen lässt sich dabei auf zwei Weisen realisieren: Einerseits können besagte Konfigurationen bereits mit der bestehenden Prozesskette vorberechnet werden und per Skript (de-)aktiviert werden. Andererseits besteht auch im Steam Audio® Decoder bzw. der 3D-Umgebung die Möglichkeit, Komponenten



**Abbildung 5:** Kabinengeräusche in einer virtuellen Umgebung erleben. ©DLR, CC BY-NC-ND 3.0

mit akustischen Materialparametern zu versehen. Letztere Variante ist dabei deutlich ungenauer, da die Parameter nicht so feingranular wie in der FE-Simulation adaptiert und simuliert werden können. Jedoch können hier einfacher und schneller Parameterveränderungen wahrgenommen werden um grundlegende Sensitivitäten in Erfahrung zu bringen. Für eine Bewertung, wie korrekt die akustische Umgebung bereits mit dieser einfacheren Methode abbildbar ist, ist dafür jedoch noch von Nöten.

## Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Paper wurde die Erweiterung der Prozesskette zur Kabinenlärmpgnose um die Auralisation von simulierten Schalldrücken in einer virtuellen Kabine vorgestellt. Die bisherige Prozesskette wurde um die Erstellung von Ambisonics-Daten aus der Finite-Elemente-Simulation erweitert. Diese Ambisonics-Daten wurden erfolgreich in eine 3D Umgebung integriert, die es Probanden ermöglicht, sich mithilfe einer VR-Brille in das Modell zu begeben und verschiedene Szenarien zu erleben. Durch die Integration von Kopfhörern können Probanden die akustische Umgebung immersiv wahrnehmen und sich frei durch das Modell bewegen. Verschiedene Szenarien können ausgewählt und Komponenten der Kabine verändert werden, um die Auswirkungen auf den wahrgenommenen Kabinenlärm zu untersuchen. Aktuell ist das Modell aufgrund der zugrundeliegenden FE-Simulation in der Frequenzbandbreite begrenzt, die sich aus der technisch limitierten Netzdichte der finiten Elemente ergibt. Der Prozess der Quellendefinition ist jedoch theoretisch auch für höhere Frequenzen anwendbar, so diese berechnet werden.

Für zukünftige Arbeiten gibt es demzufolge noch einige vielversprechende Erweiterungen. Zunächst muss die frequenzseitige Begrenzung des Modells, die durch die maximale Frequenz der FE-Rechnung verursacht wird, überwunden werden, da dies unabdingbar für ein realistisches Hörempfinden eines Menschen ist. Die triviale Herangehensweise ist die Verfeinerung des FE-Netzes, um auch höhere Frequenzen berechnen zu können. Die sich daraus ergebenden Modellgrößen und Rechenzeiten stellen jedoch selbst mit der heutigen Rechentechnik erhebliche Probleme dar, vor allem wenn mehrere Konfigurationen evaluiert werden sollen. Daher gilt es gegebenenfalls eine

andere Herangehensweise an die Auralisation vor allem hochfrequenter breitbandiger Schallquellen zu finden. Denkbar wären hier beispielsweise zusätzliche Mono-Schallquellen aus Rosa Rauschen oder auch Messdaten, um insbesondere breitbandige Quellen (etwa turbulente Grenzschichten) abbilden zu können. Darüber hinaus wäre es interessant, das Auralisationssystem auf die Wiedergabe über ein Lautsprecherfeld auszudehnen, um eine noch realistischere akustische Erfahrung zu ermöglichen. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Immersion wäre die Integration von Vibrationen in das virtuelle Modell, um auch die haptische Wahrnehmung der Probanden einzubeziehen. Diese Erweiterungen würden dazu beitragen, die Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit des entwickelten Systems für die Bewertung und Gestaltung von Flugzeugkabinen weiter zu verbessern.

## Literatur

- [1] INTONATE Homepage, URL: [https://www.dlr.de/ae/desktopdefault.aspx/tabid-17953/28468\\_read-73831/](https://www.dlr.de/ae/desktopdefault.aspx/tabid-17953/28468_read-73831/)
- [2] Algermissen, S., Hesse, C., Dewald, R.: Automatisierte Modellerstellung zur Berechnung von Innenlärm in Flugzeugen. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA), 2023
- [3] Hesse, C., et. al.: Wissensbasierte Modellgenerierung für die Vorhersage von Kabinenlärm im Kontext des Flugzeugvorentwurfs. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA), 2023
- [4] Dewald, R., et. al.: Angepasste Modellierungsvorschriften für vibroakustische Untersuchungen von Flugzeugrümpfen. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA), 2023
- [5] Zettel, S., Böswald, M., Winter, R.: Jet-engine vibration model for the estimation of pylon-wing interface loads. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA), 2023
- [6] Gerzon, M., Felgett, P.: Ambisonics. Part one: general system description'. Studio Sound, 1975
- [7] Zotter, F., Frank, M.: Ambisonics: A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality. Springer Open, 2019
- [8] Vorländer, M.: Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Springer Nature, 2020
- [9] Alder, M., Moerland, E., Jepsen, J., Nagel, B.: Recent Advances in Establishing a Common Language for Aircraft Design with CPACS. Aerospace Europe Conference, 2020
- [10] Walther, J., Hesse, C., Biedermann, J., Nagel, B.: Extensible Aircraft Fuselage Model Generation for a Multidisciplinary, Multi-Fidelity Context. Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), 2022