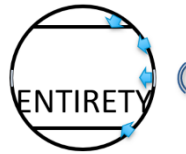


Abschlussbericht für das LuFo VI-2 Verbundvorhaben



Engineered Tailored Tranquility

Förderkennzeichen	20X2101C
Laufzeit des Vorhabens	01.11.2022 – 31.12.2025
Zuwendungsempfänger	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Berliner Tor 5, 20099 Hamburg
Teilvorhaben	Konzepte für eine komfortable und effiziente VIP-Flugzeugkabine (KoKoVIP)

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Benedikt Plaumann (Projektleitung und Ansprechpartner)

M.Sc. Martin Knorr (Wissenschaftlicher Mitarbeiter)

M.Sc. Ashish Chodvadiya (Wissenschaftlicher Mitarbeiter)

Berichtsdatum: 01.04.2026

Table of Contents

Kurzbericht.....	3
Aufgabenstellung	3
Voraussetzungen.....	3
Stand der Wissenschaft und Technik.....	4
Planung und Ablauf.....	5
Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
HAP1: Analyse.....	7
AP1.1: Stand der Technik Kabinenbauweisen, Entwurfs- und Nachweiswerkzeuge für eine leise Flugzeugkabine	7
HAP2: Messung Istzustand und Konzeptentwurf	8
AP2.2: Erfassung von Messdaten VIP Kabine und Komponenten.....	8
Die Anregung in der Klima- Akustik-Kammer im KKS-Labor	9
Schallintensitätspegel und dominante Schallpfade	10
Power Transmission in Strukturpfaden	11
AP2.3: Konzeptentwürfe für akustisch effiziente VIP-Kabinen	11
Komponentenanalysen für Konzeptentwicklung.....	12
Skin Damping & Masseneffekt	12
Decoupling: Benchmarking Isolatoren	12
Bodenmessungen - verschiedene Teppichaufbau auf dem floor panel.....	14
Einfluss des Frachtraums (Cargo) auf die Kabine.....	15
HAP3: Implementierung	15
AP3.3: Experimentelle und theoretische Konzeptstudien neuer VIP Kabinenentwürfe	15
Entwicklung von additiv gefertigte (AM-) Vibrationsisolatoren	16
Erzeugung einer äquivalenten Anregung in der Klima-Akustikkammer auf der Grundlage von realen Flugschallanregungsprofilen	17
Entwicklung eines Schalleistungsmodells zur Analyse dominanter Schallpfade in VIP-Kabinen.	20
HAP4: Validierung	21
AP4.1: Integration Funktionsmuster für Kabinenausstattung in realitätsnahen Technologiedemonstrator	21
AP4.2: Validationstests (VIP-Kabinenausstattung, Entwurfs- und Nachweiswerkzeuge) in realitätsnahe Technologiedemonstrator	22
Schallintensität und Schalldruckpegel - Messungen in VIP- und Standardkabinen	22
Untersuchung verschiedenster Bodenaufbauten.....	22
Weitere Entwicklung von 3D-gedruckte Isolatoren und gebaut im VIP-Kabinen-Demonstrator .	23
Verschiedenen aufbauten mit Schallminderungsmaßnahmen im VIP Demonstrator	23

AP4.3: Entwicklung von Modellierungs-, Test- und Design-Guidelines, Bewertung von Unsicherheiten.....	24
Veröffentlichungen	25
Zeitschriftenbeiträge.....	25
Konferenzbeiträge.....	25
Patente.....	26
Studentische Arbeiten.....	26
Literaturen	27

Kurzbericht

Aufgabenstellung

In heutigen VIP-Flugzeugen führt die zusätzliche Masse von Schallschutzkomponenten zu einem erhöhten Treibstoffverbrauch und verringert somit die Effizienz der Flugzeuge. Durch gezielt abgestimmte und neuartige, leichtgewichtige Schallschutzmaßnahmen soll für einen hohen akustischen Komfort in VIP-Flugzeugkabinen mit einem minimalen Masseeintrag gesorgt werden. Ziel dieses Teilvorhabens der HAW Hamburg ist es, Schallreduktionstechnologien für VIP-Flugzeugkabinen zu entwickeln, die bei möglichst geringem Gesamtgewicht der Kabine zu einer deutlichen Verringerung des Kabinenschallpegels führen. Zur Erreichung dieses Ziels wird es erforderlich sein, bisher unzureichend erforschte Schalltransferpfade in VIP-Flugzeugkabinen zu identifizieren und darauf aufbauend Schallreduktionsmaßnahmen zu generieren und bis hin zu einem hohen Technologiereifegrad von TRL 5 (Technology Readiness Level) zu validieren.

Zur Erreichung des Projektziels werden von der HAW Hamburg folgende Arbeiten durchgeführt: Analyse und messtechnische Erfassung von dominanten Schalltransferpfaden in nach dem aktuellen Stand der Technik ausgestatteten VIP-Flugzeugkabinen zur Identifikation von Optimierungspotenzialen; Entwicklung sowie experimentelle und theoretische Analyse von Schall- und Schwingungsisolationskonzepten, die genau an den zuvor identifizierten Optimierungspotenzialen ansetzen und im Einklang mit den Anforderungen die Sprachverständlichkeit in VIP-Flugzeugkabinen erheblich verbessern sollen; Validierung von Funktionsmustern der entwickelten Konzepte in einem realitätsnahen Messaufbau.

Voraussetzungen

Die HAW Hamburg verfügt durch intensive Mitarbeit in verschiedenen Forschungsprojekten in Kooperation mit Airbus oder Lufthansa Technik über umfangreiches Wissen im Bereich der Kabinenakustik und Kabinensysteme von Passagierflugzeugen.

Das Studium des Studiengangs Flugzeug an der HAW Hamburg in der Fakultät Luftfahrt- und Fahrzeugsysteme profitiert und ist eng abgestimmt mit Forschungsergebnissen aus Projekten wie ENTIRETY, u.a. in Modulen zur Technischen Akustik, Technischen Mechanik und numerischen Modellbildung. Die HAW Hamburg verfügt über verschiedene Labore, die für die Bearbeitung des Projekts ENTIRETY genutzt werden können. Davon sind vor allem folgende Labore von Bedeutung:

- *Akustiklabor:* Seit Mitte 2018 steht an der HAW Hamburg ein neues Akustiklabor zur Verfügung. In diesem Labor befindet sich ein Hallraum mit 4 angrenzenden Freifeldräumen. Zur Probenherstellung kann eine gut ausgestattete Werkstatt genutzt werden.
- *Leichtbaulabor:* In dem Leichtbaulabor können verschiedene mechanische Prüfeinrichtungen (z. B. für Zugproben, Shaker) oder verschiedene Werkzeuge der Metallverarbeitung genutzt werden.
- *Labor für Kabine und Kabinensysteme:* In dem Labor für Kabine und Kabinensysteme, örtlich angesiedelt im Hamburg Centre of Aviation Training (HCAT) sind viele Messumgebungen speziell für Flugzeugkabinensysteme aufgebaut. Innerhalb des Projekts können entwickelte Schallminderungsmaßnahmen in einer Klima-Akustikkammer mit einem A320-Rumpfsegment getestet werden.
- *3Dspace Labor:* Das 3D-Druck Labor dient als modern ausgestattete Forschungs- und Entwicklungsumgebung zur Herstellung von physischen Prototypen und funktionalen Bauteilen mittels additiver Fertigungsverfahren.

Innerhalb des Akustiklabors stehen u.a. folgende Messgeräte zur Charakterisierung von Schallminderungskonzepten zur Verfügung:

- Drei Intensitätssonden (Brüel & Kjaer Type 3654),
- Zwei Handschallpegelmessgeräte (Brüel & Kjaer Type 2270),
- Mehrere Mikrofone, Beschleunigungssensoren und entsprechende Kalibriergeräte
- Ein Impedanzrohr (Brüel & Kjaer Type 4206-T), mit dem für kreisförmige Proben im Frequenzbereich von 50 bis 6300 Hz Absorptionsgrade und Transmissionsgrade gemessen werden können,
- Mehrere Shaker und Lautsprecher,
- Mehrere Mehrkanal-Messsysteme (LAN-XI) von Brüel & Kjaer,
- Vibration Controller (VR10500),
- Laservibrometer (Polytec PSV-500 Xtra).

Zur Auswertung von Messergebnissen, für analytische Berechnungen und für numerische Simulationen stehen folgende Softwareprogramme zur Verfügung:

- Comsol Multiphysics und Siemens SimCenter als FEM-Programm zur numerischen Simulation,
- Siemens NX CAD-Software z. B. für die Zeichnungserstellung und Fertigungsanweisung von Funktionsmustern,
- MathsWorks MATLAB und Diadem Berechnungssoftware z. B. zur Messdatenauswertung und zur Berechnung analytischer Modelle.

Stand der Wissenschaft und Technik

Der Schallpegel in einer Flugzeugkabine ist ein wichtiges Qualitätskriterium für den Komfort der Passagiere und für den Arbeitsschutz der Flugzeugbesatzung. Bei Flugzeugkabinen für VIP-Flugzeuge besitzt die Akustik einen besonders hohen Stellenwert, da die Sprachverständlichkeit (z.B. in Besprechungsräumen in Kabine) und der Komfort (z.B. in Schlafbereichen) für den Kunden sehr wichtig ist. Ein in der Luftfahrtindustrie gängiges Maß zur Bewertung der akustischen Qualität einer VIP-Kabine ist der Speech Interference Level (SIL3) [1], der dem arithmetischen Mittelwert der unbewerteten Schallpegel in den Oktavbändern 1 kHz, 2 kHz und 4 kHz entspricht. In nach dem heutigen Stand der Technik ausgestatteten VIP-Kabinen wird typischerweise ein SIL3-Pegel von 50-55 dB re 20µPa erreicht, teilweise auch 45-47 dB [2]. Dieser Wert ist deutlich geringer als in Linienflugzeugen, wo der SIL3 typischerweise im Bereich von 55 bis 70 oder zumindest 65 dB liegt [2,3] – dieser Unterschied ist in erster Linie darin begründet, dass Passagiere in Linienflugzeugen eine gewisse akustische Maskierung ihrer Gespräche gut annehmen. Auf VIP-Flugzeuge trifft dies aber nicht zu.

Die Schalldämmung in Flugzeugen wird zu einem großen Teil von der Flugzeugseitenwand übernommen. Diese besteht aus einem zweischaligen Aufbau aus Rumpfstruktur und Kabinenverkleidung (Lining) und ist zur thermischen und akustischen Isolation bzw. Dämmung mit leichtgewichtiger Glaswolle gefüllt. Um eine ausreichende akustische Wirkung zu erreichen, ist in typischen Flugzeugen eine beträchtliche Menge an Glaswollmaterial nötig, die einen großen Masseeintrag mit sich bringt (z.B. bis zu 0,5% der Startmasse [4]). Bei der akustischen Ausstattung von VIP-Flugzeugkabinen wird heutzutage eher heuristisch vorgegangen, indem bei zu hohen Schallpegeln mehr schallabsorbierende Materialien (wie z.B. Glaswolle oder gar Masselayer) hinzugefügt werden, bis akzeptable Schallpegelwerte erreicht werden. Hinzu kommt außerdem, dass jede VIP-Kabinenausstattung praktisch eine Einzelanfertigung ist und man nur bedingt (nicht wie z.B. bei der Serienfertigung von Linienflugzeugen) auf vorhergehende Erfahrungen aufbauen kann. Aus diesen Gründen besteht bei VIP-Flugzeugen ein hohes Potential zur Gewichtseinsparung (bei gleichen

akustischen Eigenschaften) bzw. zur Verbesserung des Komforts in der Kabine (bei gleichem Gewicht), wenn Schallminderungsmaßnahmen gezielt entwickelt und in der VIP-Kabine eingesetzt würden. Damit dies jedoch erfolgreich ist, muss erstens bekannt sein, welche Schallübertragungspfade in VIP-Flugzeugen dominieren, und zweitens müssen Schallminderungstechnologien entwickelt werden, die effizient in diese Übertragungspfade eingreifen und kompatibel mit den industriellen Anforderungen sind.

Die Übertragung von Schall in eine Flugzeugkabine erfolgt über zwei Wege: Über den Luftschallpfad werden akustische Druckschwankungen auf der Rumpfaußenseite durch die Seitenwand in die Kabine transmittiert. Im für den SIL3 relevanten Frequenzbereich ist hierfür die turbulente Grenzschicht eine der Hauptursache [3,5], insbesondere im vorderen Kabinenbereich, wo an der Flugzeugaußenwand die Grenzschichtdicke gering genug ist. Bei dicker werdenden Grenzschichten im hinteren Kabinenbereich sinkt die Frequenz des Pegelmaximums der turbulenten Anregung, so dass in diesen Bereichen auch der von den Triebwerken abgestrahlte Schall (Jet Noise) relevant sein kann [5]. Ein weiterer deutlicher Schalleintrag entsteht in der Nähe der Türen, die typischerweise unzureichend akustisch isoliert sind. Der zweite Übertragungspfad von Schall in Flugzeugkabinen ist der Körperschallpfad. Dies sind vor allem Schwingungen der Triebwerke, die sich über die Triebwerksaufhängung und die Flugzeugstruktur ausbreiten und in die Kabine als Schall abgestrahlt werden können [3,5]. Insbesondere bei den VIP-Flugzeugen (aber auch generell in allen modernen Passagierflugzeugen) kommen aufgrund der geringen geforderten Kabinenpegel auch die Systeme innerhalb der Flugzeugkabine (z.B. Luftauslässe, Kühlaggregate, etc.) als mögliche relevante Schallquellen hinzu [6].

Zur akustischen Isolierung haben sich in der Luftfahrt in erster Linie poröse Absorber (vor allem Glaswolle und offenporige Schäume) sowie viskoelastische Dämpfungsschichten etabliert [5,6]. In der Literatur gibt es jedoch eine Reihe weitergehender Schallminderungstechnologien, die eine deutlich höhere Schallminderungseffizienz versprechen, jedoch noch nicht in VIP-Flugzeugen eingesetzt werden: Aerogele weisen deutlich geringere thermische Leitfähigkeiten als die Glaswolle in Flugzeugen auf [7] und könnten deshalb die erforderliche Menge an thermischem Isolationsmaterial in VIP-Flugzeugkabinen reduzieren, was mehr Platz und Gewichtsspielraum für gezielte akustische Maßnahmen ermöglichen könnte. Mikroperforierte Absorber werden häufig in der Raumakustik eingesetzt – es wurde aber auch gezeigt, dass durch die Einbettung mikroperforierter Folien in Glaswollmatten die Schalldämmung einer Rumpfstruktur insbesondere im hohen Frequenzbereich deutlich verbessert werden kann [8]. Helmholtz-Resonatoren wurden in der Vergangenheit zur Verbesserung der Schalldämmung von Flugzeugseitenwänden untersucht [9]. Zwar dienten die Helmholtz-Resonatoren in diesen Untersuchungen der Dämmung von tonalen Schallquellen im tiefen Frequenzbereich, jedoch konnte vor kurzem demonstriert werden, dass mit Helmholtz-Resonatoren auch breitbandige Schalldämmmaßnahmen in doppelschaligen Wandaufbauten erreicht werden können [10]. Zur Dämmung von Frequenzbändern mit störenden Schallanteilen haben sich in den letzten Jahren akustische Metamaterialien als mögliche Lösungen etabliert. Bei der periodischen Anordnung von resonanten und nicht-resonanten Streukörpern können im Frequenzbereich Bandlücken erzeugt werden, in denen keine Wellenausbreitung möglich ist [11–13]. Neben den oben genannten rein passiven Ansätzen können auch semi-aktive Varianten in VIP-Flugzeugkabinen zum Einsatz kommen, um die Effizienz von Schallminderungsmaßnahmen zu steigern [14,15].

Planung und Ablauf

Der Projektablaufplan für das Teilvorhaben der HAW Hamburg ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Gesamtlaufzeit des Vorhabens erstreckte sich ursprünglich vom 1. November 2022 bis zum 31. Juli

2025, später verlängert auf 31. Dezember 2025. Ein Cyberangriff auf die HAW Hamburg hatte leider negative Auswirkungen auf den Projektstart, da ein erneutes Durchlaufen des Ausschreibungsprozesses zur Stellenausschreibung zur Besetzung der zwei vakanten der wissenschaftlichen Mitarbeiterstellen für das Projekt weitere Verzögerungen verursacht hat. Eine Einstellung der wissenschaftlichen Mitarbeiter erfolgte jeweils im Juni und Juli der Jahres 2023. Ebenso gab es teils erhebliche Einschränkungen in der Kommunikation, dem Zugriff, der Speicherung und Austausch von Daten über Monate nach dem Cyberangriff auf die HAW Hamburg. Aus diesen Gründen wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens auf den 31. Dezember 2025 beantragt, die vom Projektträger genehmigt wurde. Die Darstellung in Abbildung 1 zeigt die Planung unter Berücksichtigung der entsprechenden Verlängerung.

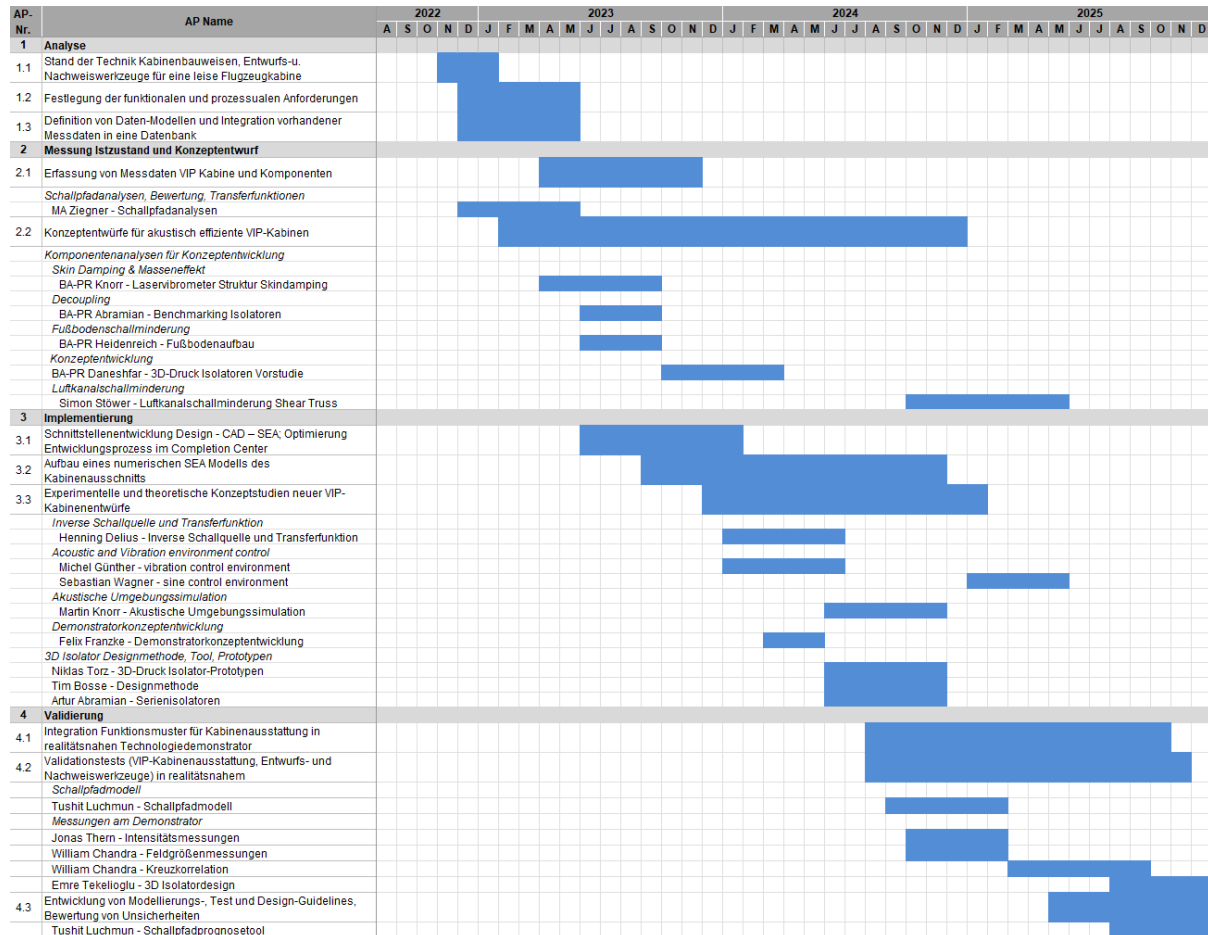


Abbildung 1 : Zeitplan

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zu Beginn der Arbeiten wurden die Messungen gemeinsam mit der Lufthansa Technik AG durchgeführt. Auch zu einem späteren Zeitpunkt des Projekts fanden weitere Messungen mit ihrem Support statt. Im Rahmen des Projekts wurde ein VIP-Messplatz in den Airbus A320 OEM-Kabinendemonstrator integriert, um gezielte Untersuchungen zu Lärminderungsmaßnahmen in einer VIP-Kabinenumgebung durchzuführen. Mit Unterstützung von Lufthansa Technik wurden sämtliche benötigten Bauteile und Werkzeuge bereitgestellt, um den VIP-Demonstrator aufbauen zu können. Anschließend wurden gemeinsam mit Lufthansa Technik verschiedene Schallminderungsmaßnahmen im Demonstrator getestet und bewertet.

HAP1: Analyse

AP1.1: Stand der Technik Kabinenbauweisen, Entwurfs- und Nachweiswerkzeuge für eine leise Flugzeugkabine

VIP-Flugzeugkabinen kommen in Privat-, Geschäfts- oder Regierungsflugzeugen zum Einsatz und zeichnen sich durch ein hohes Maß an Komfort, individuelle Gestaltungsmöglichkeiten und die Erfüllung spezieller Kundenanforderungen aus. Im Gegensatz zu Standardkabinen werden VIP-Kabinen nahezu immer als Einzelanfertigungen umgesetzt, da das Layout vollständig durch den Auftraggeber definiert wird. Typische Bereiche umfassen VIP-Badezimmer, Schlafzimmer, Lounge, Büro, Gäste-Lounge, Essensbereich, Gästeschlafzimmer oder auch Trainingsbereiche [16]. Bevor der Einbau solcher Konfigurationen erfolgen kann, müssen alle Komponenten luftrechtlich geprüft werden.

Im Vergleich zu Standardkabinen weisen VIP-Kabinen deutliche Unterschiede in den Kabinenbauweisen auf. VIP-Kabinen verfügen über höherwertige Sitze, fest integrierte Tische sowie optisch und akustisch optimierte Bodenaufbauten, wobei Teppiche nicht nur eine ästhetische, sondern auch eine schallabsorbierende Funktion erfüllen. Wand- und Deckenverkleidungen bestehen im Gegensatz zu den in Standardkabinen üblichen Sandwichpanels mit Polyvinylfluorid-Beschichtungen [17] aus hochwertigen Leder- oder Stoffmaterialien. Der Seitenwandaufbau ist in VIP-Kabinen häufig komplexer, da dickere oder höherwertige Glaswollen und zusätzliche Masseschichten eingesetzt werden, um die akustische Performance zu verbessern. Zudem entfallen in vielen VIP-Konfigurationen die Gepäckfächer, was eine konstruktive Anpassung der Seitenwand- und Deckenelemente erforderlich macht und zusätzliche Flächen für akustisch wirksame Materialien ermöglicht. Auch die Fenster können durch spezielle Sonnenschutzsysteme optisch und funktional angepasst oder vollständig abgedeckt werden.

Weitere Unterschiede betreffen das Belüftungssystem: Während Standardkabinen meist über individuelle Luftauslässe unterhalb der Gepäckfächer verfügen, werden in VIP-Kabinen Luftauslässe häufig in die Seitenwandaufbauten und Deckenbauteile integriert. Die Beleuchtung wird oft in Form von großflächigen Lichtkuppeln realisiert, die einen hochwertigeren Raumeindruck erzeugen. Der Dado-Bereich, ein kritischer Bauraum unterhalb der Fensterlinie, muss weiterhin funktionsfähig bleiben, da er im Falle eines Druckabfalls sicherheitsrelevante Funktionen erfüllt [18]; dennoch unterscheidet sich seine äußere optische Gestaltung deutlich von der Ausführung in Standardkabinen. Insgesamt verbessern die hochwertigeren und teilweise absorbierenden Materialien in VIP-Kabinen die akustische Umgebung und beeinflussen den Schalldruckpegel positiv.

Für die akustische Auslegung ist die Identifikation relevanter Schallquellen und Schallpfade entscheidend. Moderne Flugzeuge weisen jedoch zahlreiche Quellen mit ähnlichen Beiträgen auf, was die Auswahl geeigneter Maßnahmen komplex macht [19]. Schallminderungsmaßnahmen umfassen passive und aktive Methoden, wobei passive Maßnahmen dominieren [19,20]. Aktive Systeme erzeugen ein sekundäres Schallfeld, werden jedoch aufgrund geringer Betriebserfahrung und Wirkung über breite Anregungs- und Anwendungsbereiche hinweg weniger eingesetzt [20,21].

Die wichtigsten passiven Wirkmechanismen im Flugzeugkabinenbau sind Masseerhöhung, Entkopplung und Absorption. Seitenwandaufbauten bestehen aus der äußeren Struktur, offenporigen Materialien wie Glasfasermatten und einer Oberflächenverkleidung, wodurch eine akustisch wirksame Doppelwand entsteht [19]. Masselayer, etwa Mass Loaded Vinyl mit Metallpartikeln, steigern den Schallübertragungsverlust insbesondere bei niedrigen Frequenzen, während viskoelastisches Skin Damping die Dämpfung der Rumpfstruktur erhöht [19,22]. Vibrationsdämpfer zwischen Struktur und

Verkleidung reduzieren die Übertragung von Triebwerksvibrationen und senken den Schalldruckpegel moderner Flugzeuge um etwa 5–6 dB(A) [23]. Diese Prinzipien gelten auch für den Bodenaufbau, bei dem Panels über Sitzschienen und Bodenbalken mit der Struktur verbunden sind [24]. Darüber hinaus beeinflussen Materialien und Einbauten wie Teppiche, Sitze, Schränke oder Trennwände den Schalldruckpegel durch ihre Absorptionseigenschaften. Oberflächenmaterialien werden in Membran-, Resonanz- und poröse Absorber unterteilt. Membran- und Resonanzabsorber wirken in schmalen Frequenzbereichen, während poröse Absorber traditionell eingesetzt werden und oberhalb von 800 Hz effektiv sind [25].

Die Anforderungen an VIP-Kabinen umfassen daher sowohl technische als auch sicherheitsrelevante, akustische und wirtschaftliche Aspekte. Alle kundenspezifischen Baugruppen müssen zertifiziert und hinsichtlich Lufttuchtigkeit geprüft werden, wobei das Brandverhalten eine entscheidende Rolle spielt. Konstruktiv müssen der Bodenaufbau, die Seitenwände und Deckenstrukturen so ausgelegt sein, dass die erhöhten Anforderungen an Komfort, Akustik und Design erfüllt werden, ohne sicherheitsrelevante Funktionen zu beeinträchtigen. Akustisch wird ein höherer Standard durch dickere Dämmmaterialien, zusätzliche Masselayer und hochwertige Oberflächenmaterialien erreicht [19,20]. Wirtschaftlich ist stets ein Kompromiss zwischen Gewicht, Einbauaufwand, Kosten und akustischer Leistungsfähigkeit zu finden, da ein höheres Gewicht zu erhöhten Betriebskosten führt [26,27]. Simulationstools helfen, verschiedene Designvarianten vorab zu bewerten, den Testaufwand zu reduzieren und kostenintensive äußere strukturelle Modifikationen zu vermeiden [28–30].

Aus diesen Gegebenheiten ergeben sich verschiedene Schallminderungsmaßnahmen, die in VIP-Kabinen zur Anwendung kommen können. Hierzu zählen der Einsatz hochwertiger Glaswollen und zusätzlicher Masseschichten im Seitenwandaufbau, die Verwendung akustisch günstigerer Oberflächen wie Leder und Stoff und die Integration akustisch wirksamer Boden- und Verkleidungssysteme. Auch Einbauten wie Schränke oder Kredenzen können als absorbierende oder schalldämmende Elemente wirken. Darüber hinaus tragen optimierte Luftauslasspositionen und spezielle Bodenaufbauten zu einer verbesserten akustischen Umgebung bei.

HAP2: Messung Istzustand und Konzeptentwurf

In diesem Hauptarbeitspaket wurden VIP-Kabinen und -Einzelkomponenten akustisch vermessen. Dafür identifizierte die HAW Hamburg geeignete Messmethoden, führte die Messungen durch und analysierte die Messergebnisse. Dabei wurde festgestellt, welche Komponenten einen kritischen Lärmbeitrag leisten. Auf dieser Basis wurden Schallisolationskonzeptentwürfe entwickelt und Optimierungspotenziale gegenüber aktuellen Installationen aufgezeigt.

AP2.2: Erfassung von Messdaten VIP Kabine und Komponenten

In diesem Arbeitspaket wurden die Messungen in der Klimaakustikkammer im KKS-Labor begonnen, mit dem Ziel, verschiedene Schallpfade in der Kabine zu quantifizieren und dominante sowie weniger dominante Schallpfade zu identifizieren. Die Ergebnisse dienen als

Segment/Panel	Größe [m ²]
1. Floor Panel Inboard	0,53
2. Floor Panel Middle	0,53
3. Floor Panel Outboard	0,47
4. Dado Gap	0,06
5. Dado Panel	0,42
6. Lower Sidewall Panel	0,55
7. Window (-Panel)	0,20
8. Upper Sidewall Panel	0,55
9. ECS Gap	0,03
10. Closure Panel	0,42
11. Service Area Panel	0,41
12. Ceiling ECS Gap	0,05
13. Ceiling	0,53

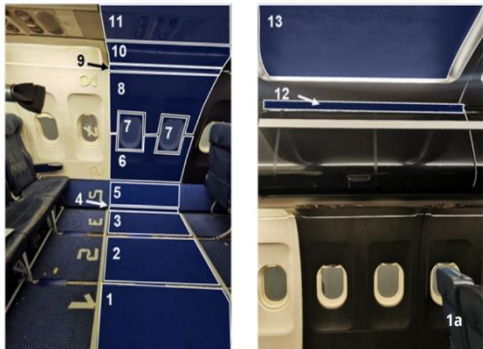


Abbildung 2: Definierte Segmente der Messfläche.

Grundlage zur Minimierung von Schallpfaden. Es wurden Intensitätsmessungen zweier Testreihen durchgeführt, wobei jeweils die Schallleistungsbeiträge bestimmt wurden. In der ersten Testreihe wurde im Demonstrator ein Messverfahren etabliert, das für weitere Tests genutzt wurde. Die Bestimmung der eingebrachten Schallleistungen erfolgte im Kabinen-Demonstrator gemäß DIN EN ISO 9614-2 [31], unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen. Dafür wurde ein zwei Spanten breiter Querschnitt des Flugzeugrumpfs in 13 Segmente unterteilt und einzeln abgetastet, wie in der Abbildung 2 definiert.

Gemäß den Normvorgaben muss bei hohen Hintergrundgeräuschen eine Schallabschirmung verwendet werden. Eigene Untersuchungen ohne eine solche Abschirmung zeigten klar eine zu hohe Einstrahlung von Reflektionsschall bei Messungen in einer Kabine, u.a. durch einen zu hohen PI-Index. Daher wurde für Messflüge und Demonstrator-Messungen eine

„Intensitätsmesskiste“ gebaut, die auf das zu vermessende Segment aufgesetzt werden kann. Sie misst innen 40 cm × 25 cm und besteht aus Standardsandwichpaneelen; außen mit halbzölligem Filz bezogen und innen mit 40 mm offenporigem Basotect® ausgekleidet, wie in Abbildung 3 ersichtlich. Hier dargestellt ist eine

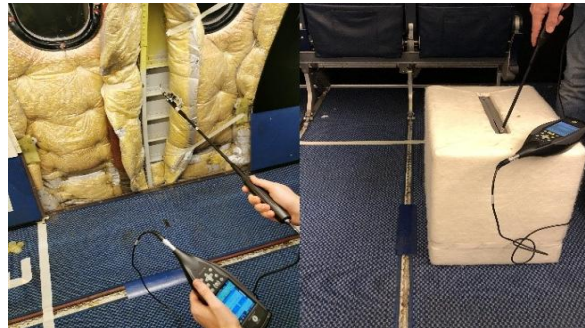


Abbildung 3 : Intensitätsmessung ohne(M1) und mit(M2) Reduktion der Nebenschallquellen.

erste Entwicklung durch Lufthansa Technik. Später wurden zusammen mit der HAW Hamburg weitere, viel bessere Versionen im Rahmen des Projekts entwickelt. Hierbei ist eine möglichst gute Schallabschirmung der Störeinträge bei gleichzeitig möglichst geringer interner Störung, z.B. durch Reflektionen in der Kiste zu realisieren. Die Intensitätssonde wird durch einen schmalen Spalt eingeführt, wodurch eine Abtastung entlang eines definierten Messpfades möglich ist. Pro Segment kann somit nur eine Teilfläche in der Größe des Innenmaßes vermessen werden, die anschließend auf die Gesamtfläche hochgerechnet wird.

Die Anregung in der Klima- Akustik-Kammer im KKS-Labor

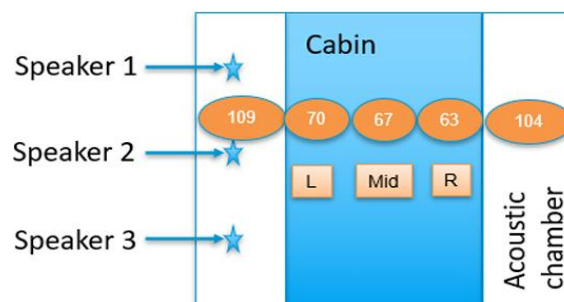


Abbildung 4 : Anregung der Akustikklammer mit drei Dodekaeder Lautsprechern, Übersicht Schalldruckpegel in Akustikklammer und Kabine mit Positionsangabe.

Die Anregung wurde durch drei dodekaedrische Lautsprecher innerhalb der akustischen Klimakammer erzeugt, wie in Abbildung 4 dargestellt. Die Lautsprecher waren auf Stativen in unterschiedlichen Höhen auf einer Seite des Flugzeugrumpfs montiert, um auf der für die Untersuchungen gewählten Referenzseite ein möglichst homogenes und diffuses Schallfeld zu erzeugen. Dieses Schallfeld wurde untersucht, indem der Schalldruckpegel in einem Abstand von 10 cm vom Flugzeugrumpf in verschiedenen Höhen gemessen wurde. Der Schalldruckpegel wurde außerdem auf der dem Lautsprechersystem gegenüberliegenden Seite des Flugzeugrumpfs sowie an mehreren Positionen in der Kabine gemessen. Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, ist er überall gleich. Leicht

unterschiedliche Pegel auf der linken und rechten Seite der akustischen Klimakammer führten auch zu entsprechenden Pegelunterschieden auf beiden Seiten der Kabine, wie in Abbildung 4 dargestellt.

Schallintensitätspegel und dominante Schallpfade

Zur Bewertung der Wirksamkeit der Intensitätskiste wurden alle Messreihen sowohl ohne (M1) als auch mit Intensitätskiste (M2) durchgeführt, wie dies in Abbildung 2 dargestellt und gemessen ist. Der Schallanalysator bestimmte für jedes Segment und Terzband den p_i -Index zur Einstufung der Messgenauigkeit. Über alle 13 Segmente und 14 Terzbänder im Bereich von 250–5000 Hz gemittelt, ergab sich für M1 ein durchschnittlicher p_i -Index von 7,2, während M2 mit 2,0 einen deutlich niedrigeren Wert erzielte – ein Hinweis auf höhere Messgenauigkeit.

Der Gesamt-Schalleistungspegel L_W wurde aus der Messreihe M2 auf Basis der Schallquellen der einzelnen Segmente berechnet. Die Berechnung erfolgte gemäß DIN EN ISO 9614-2[31] unter Verwendung der folgenden Formel:

$$L_W = 10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^N \frac{P_i}{P_0} \right] \text{ dB}$$

In der Formel ist P_i die berechnete Teilschalleistung eines Segments aus der über ein Segment i gemittelten Normalkomponente der Schallintensität I_{ni} multipliziert mit der Fläche des Segments S_i .

Der gesamte eingehende Schalleistungspegel für die Messreihe M2 beträgt 47,8 dB SIL3 oder 68,8 dB(A).

Die prozentualen Beiträge jedes Segments des Messbereichs werden aus der Teilschalleistung und der gesamten eingehenden Schalleistung berechnet. Um die dominanten Schallwege zu untersuchen, wurden die Oktavbänder 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz aus den jeweiligen Terzbandbereichen berechnet. Diese Oktavbänder sind entscheidend für die Berechnung des SIL-bewerteten Schalldruckpegels, der häufig zur Angabe des Schalldruckpegels in VIP-Flugzeugen verwendet wird. Die Schalleistungsbeiträge der drei Terzbänder für die Messreihe M2 sind in Abbildung 5 dargestellt.

Segmente mit einem hohen prozentualen Beitrag stellen dominante Schallpfade dar. Für das Outboard Floor Panel konnten diese unabhängig von der Frequenz erkannt werden. Auch das Lower und Upper Sidewall Panel erwiesen sich als dominante Schallpfade. Obwohl Dado Gap und ECS Gap die höchsten Schallintensitätspegel zeigten, stellten sie aufgrund ihrer relativ kleinen Fläche keine dominanten Schallpfade dar. Die geringsten Beiträge lieferten die Segmente Ceiling ECS Gap und Ceiling.

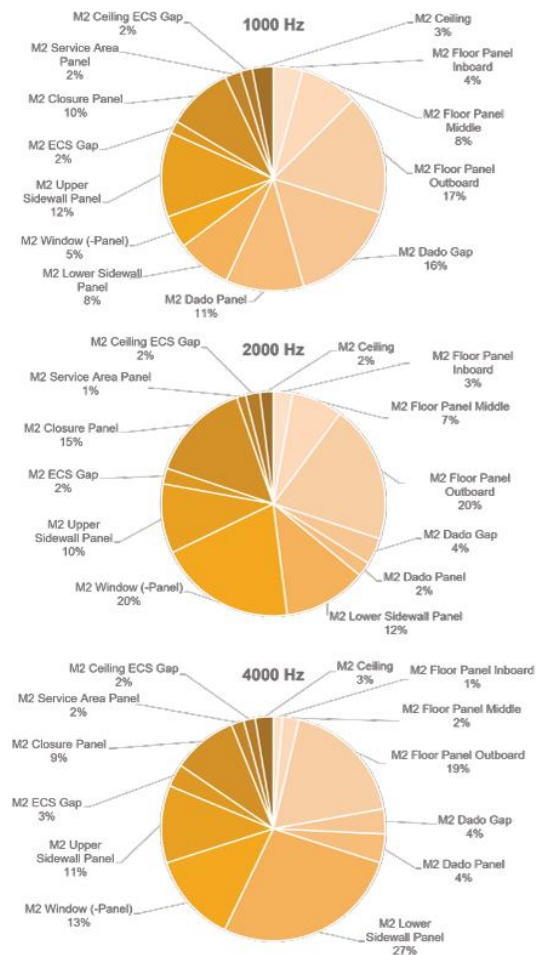


Abbildung 5 : Schalleistungsbeiträge für drei Terzbänder.

Power Transmission in Strukturpfaden

Um die wesentlichen Strukturschallpfade zu identifizieren und erste Schätzwerte für ein SEA-Modell zu erhalten, wurden Messungen mit Beschleunigungssensoren durchgeführt. Unter Annahme einer gewissen Amplitudenlinearität ermöglicht die vergleichende Betrachtung eine Bewertung, welche Strukturschallpfade wie viel Beitrag zur Schallabstrahlung leisten. Dazu wurde ein besonders steifer Knotenpunkt von Spanten und Stringern mit Anbindung zur Fußbodenstruktur als Referenzpunkt gewählt (rot in Abbildung 6), von dem aus Transferfunktionen zu relevanten Oberflächen gemessen wurden (blaue Pfeile).



Abbildung 6 : Transferpfadanalysen der Strukturschallpfade.

Es wird angenommen, dass die Leistung proportional zum Quadrat der Beschleunigung ist. Die verwendete Power Spectral Density (PSD) [32] ermöglicht mit dem Quadrat der Beschleunigung über normierte Frequenzschritte einen Vergleich im Frequenzbereich. Die Schallabstrahlung einer bekannten vibrierenden Oberfläche zu einem Punkt im Raum kann z. B. mit dem Rayleigh-Integral berechnet werden [33].

Mit Division der PSD-Kurve am Ausgangsbeschleunigungs-Sensor durch die PSD-Kurve des Referenzanregungspunktes lassen sich zu vergleichenden Zwecken Verluste der Transferpfade ermitteln. Abbildung 7 zeigt dabei einige ausgewählte Verhältnisse von Ausgangs-PSD zu PSD am Referenzanregungsmesspunkt für die in Abbildung 6 bezeichneten Flächen.

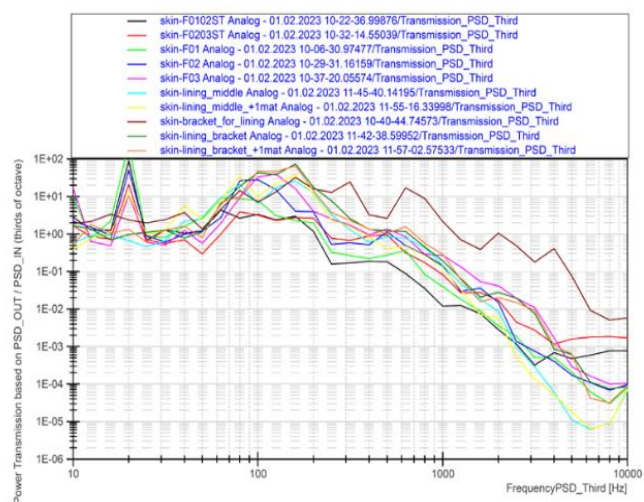


Abbildung 7 : Beispielhafte Auswahl verschiedener Transferpfade.

Diese Arbeitsergebnisse wurden von der HAW Hamburg auf der DAGA 2023 – 49. Jahrestagung für Akustik in Hamburg [2] und in der Fachzeitschrift für Konstrukteure von Mobiles e. V , Volume 44 veröffentlicht [34].

AP2.3: Konzeptentwürfe für akustisch effiziente VIP-Kabinen

Auf Grundlage des Stands der Technik sowie den in AP 2.1 erfassten Messdaten werden Konzeptentwürfe generiert, die den akustischen Komfort in VIP-Kabinen deutlich steigern sollen. Zu Beginn wurden an der HAW im FTZ-Labor die Einflüsse verschiedener Skin Damping Materialien bei Raumtemperatur untersucht, um zu bestimmen, ob die gemessene Wirkung überwiegend auf einem Masseffekt oder auf einem CLD (Constrained Layer Damping)-Effekt beruht. Da die Outboard- und Middle-Floor-Panels gemäß AP 2.1 die Hauptschallquellen in der Kabine darstellen, wurden verschiedene VIP-Teppichaufbauten untersucht – jeweils in Kombination aus Schaumstoffschichten und unterschiedlichen Flächenmassen, um eine optimale Balance zwischen Schallreduktion und

Gewicht zu erzielen. Diese Untersuchungen wurden in der Klimaakustikkammer im KKS durchgeführt. Zusätzlich wurde der Einfluss der Cargo-Zone auf das Kabinenschallniveau bewertet, insbesondere hinsichtlich der Frage, ob der Schall überwiegend luftgetragen oder als Körperschall eingetragen wird. Die Messung von AP2.2 zeigt, dass auch ein Anteil des Schalls als Körperschall in die Kabine gelangt. Darüber hinaus wurden die Eigenschaften verschiedener Vibrationsisolatoren, die in VIP-Flugzeugen benutzt wurden, am Shaker im Leichtbaulabor der HAW analysiert.

Komponentenanalysen für Konzeptentwicklung

Skin Damping & Masseneffekt

Im Rahmen der Untersuchung von bereits eingesetzten Maßnahmen zur Schallminderung in VIP-Kabinen wurde der Einsatz Composit layer Damping (CLD) in unterschiedlichen Ausführungen auf Bereichen des Rumpfes untersucht und mit einfachen Masselayer verglichen. Dafür steht im Akustiklabor des Forschungs- und Transferzentrum für Technische Akustik an der HAW Hamburg ein Hallraum mit Anbindung zu mehreren Freifeldräumen und ein drei Spanten-Rumpfteil eines A320

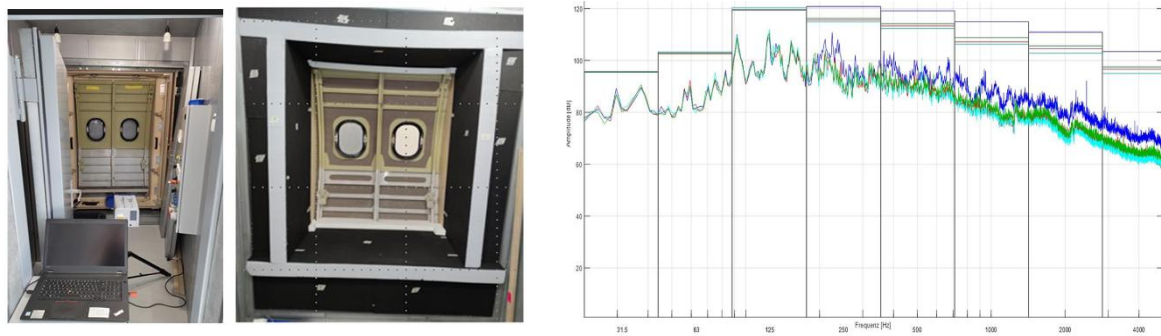


Abbildung 8 : Messaufbau mit verschiedenen CLD-Materialien und Masselayern am A320-Segment im FTZ Akustiklabor (links) und die Ergebnisse in Amplitude vs. Frequenz (rechts).

Flugzeugs zur Verfügung. Die Messung erfolgt durch einen Laservibrometer der Firma Polytec, das zuerst das Rumpfteil digital erfasst und eine Messung der Schallschnelle an einer vordefinierten Zahl an Punkten und in einer vordefinierten Fläche durchführt, wie in Abbildung 8, links gezeigt. Bei der Untersuchung der verschiedenen CLDs konnte nur ein geringer Unterschied über den Masseffekt hinaus festgestellt werden, die Ergebnisse sind in Abbildung 8, rechts in Amplitude versus Frequenz dargestellt.

Decoupling: Benchmarking Isolatoren

Als druckdichter Raum erfolgt der Schalleintrag in die Flugzeugkabine stets zumindest über die Außenhaut. Diese kann direkt in den Innenraum abstrahlen oder verbundene Strukturen anregen, die wiederum Luftschall abstrahlen. Untersuchungen von oben zeigen, dass ein wesentlicher Anteil des Luftschalls über Strukturschallwege übertragen wird. Zur Reduktion werden Vibrationsisolatoren verbaut, um abstrahlende Oberflächen gegenüber der Rumpfstruktur zu isolieren. In der Abbildung 9 zeigt der A320classic: Das links abgebildete Dado-Panel ist über ein Elastomerelement teilweise entkoppelt. Die Resonanz- bzw. Eckfrequenz hängt von Masse, Steifigkeit und Vorspannung ab. Vertikal muss eine Vorspannung das Gewicht aufnehmen, während horizontal eine besonders gute Entkopplung nötig ist. Da



Abbildung 9 : Befestigung von Dado Panel und Sidewall Lining. Links: Befestigung an Panel, rechts an Primärstruktur.

Masse und Anregungsspektrum oft vorgegeben sind, muss die Steifigkeit konstruktiv angepasst werden. Die Herausforderung liegt bei Passagierflugzeugkabinen und insbesondere VIP-Kabinen in der hohen Anzahl an konstruktiven Varianten für Vibrationsisolatoren.

Deswegen wurden die Serienisolatoren, die in der VIP-Kabine benutzt werden, auf dem Shaker gemessen, um das Verhalten des Dämpfungs- und Isolationsbereichs zu überprüfen. Abbildung 10 zeigt den Schwingungsübertragungsprüfstand, der zur Analyse der Leistungsfähigkeit von Isolatoren für Flugzeuganwendungen eingesetzt wird. Die Tests erfolgen bei zwei Beschleunigungsniveaus (1 m/s^2 und 10 m/s^2). Mit einer Sinus-Sweep-up- und Sweep-down-Methode wird die Schwingungsübertragung über einen breiten Frequenzbereich präzise vermessen. Die ausgewählten Serienisolatoren besitzen unterschiedliche Bauformen und wurden entsprechend ihrer Geometrie in vier Gruppen eingeteilt: A, B, C und D, wie in der Abbildung 11 dargestellt. Die Isolatoren der Gruppe A sind als Stoßabsorber ausgelegt. Die Gruppe B umfasst Bushingtype-Isolatoren; hierzu gehören auch die Isolatoren der Gruppe C. Die Isolatoren der Gruppe D werden für die Montage von Dado-Panels verwendet.

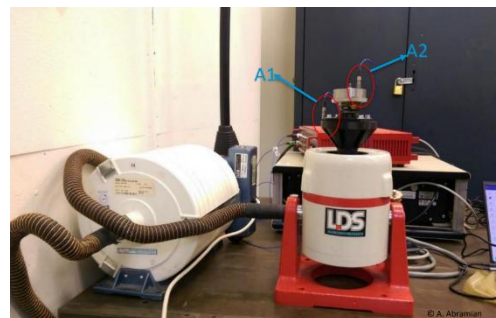


Abbildung 10 : Messaufbau Schwingungsübertragungsprüfstand.



Abbildung 11 : Gruppe von Serienisolatoren unter Untersuchung.

Ziel der Messungen ist die Bewertung ihrer dynamischen Eigenschaften im Hinblick auf Dämpfung und Isolation. Die Abbildung 12 zeigt die Transmissibilitätskurven für alle Isolatoren bei 1 m/s^2 . Die Kurven sind auf die Eigenfrequenz normiert. Trotz der Unterschiede in der Dämpfung zwischen den Isolatoren zeigen beide Abbildungen jedoch, dass alle Isolatoren ein ähnliches Isolationsverhalten aufweisen, das durch eine log-logarithmische Steigung von etwa $-2,5$ gekennzeichnet ist.

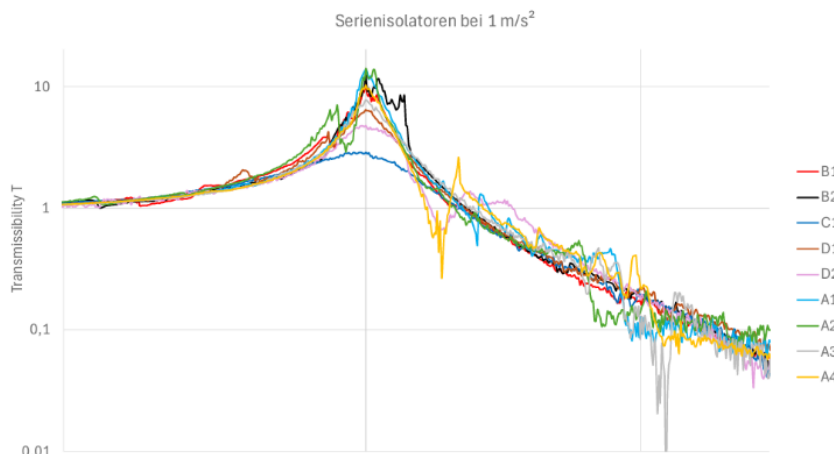


Abbildung 12 : Übertragungskurve aller Serienisolatoren bei 1 m/s^2 .

Diese Arbeitsergebnisse wurden von der HAW Hamburg auf der 22. Norddeutsche Simulationsforum 2023, Hamburg präsentiert.

Bodenmessungen - verschiedene Teppichaufbau auf dem floor panel

Da sich im Bodenbereich der Kabine ein dominanter Schallpfad befindet wurden der Effekt von verschiedenen Bodenabdeckungen und Schichtaufbauten auf den Schalldruckpegel und die Schallintensität in der VIP-Flugzeugkabine untersucht. Die Messungen wurden wieder am Demonstrator in der Klimaakustikkammer im KKS-Labor durchgeführt. Im Vergleich zu freien Bodenpanel und dem Standard-Teppich wurden zwei VIP-Teppiche in Kombination mit unterschiedlich dicken Schaumschichten und unterschiedlich dicken Masseschichten untersucht.

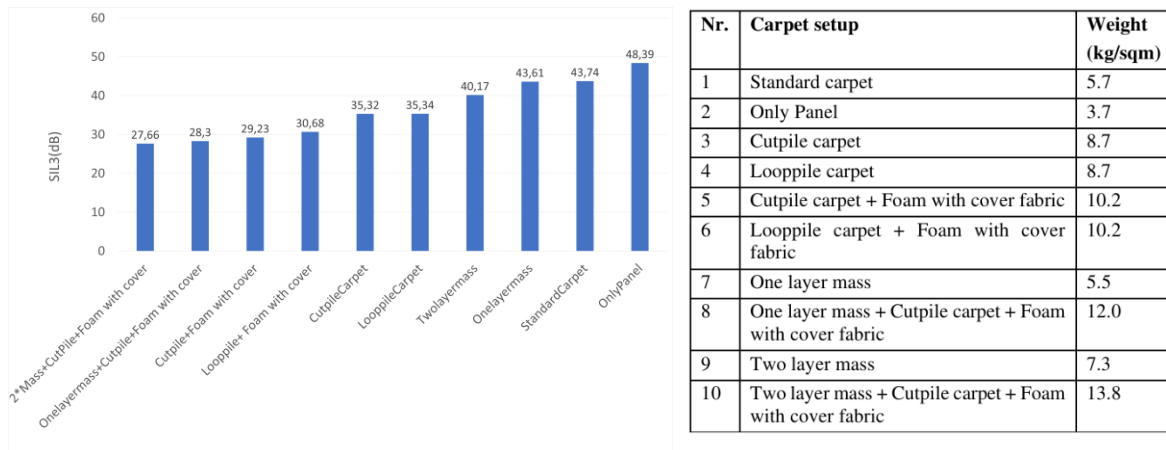


Abbildung 13 : SIL3-Werte für verschiedene Teppichaufbau auf dem Outboard floor panel.

Abbildung 13 zeigt die SIL3-Werte für verschiedene Teppiche auf dem Outboard floor panel und die Tabelle zeigt die Werte für das Gewicht des Aufbaus in kg/m². Beide VIP-Teppiche weisen eine nahezu gleichwertige Schalldämmung auf dem Boden auf. Darüber hinaus hat der VIP-Teppich in Kombination mit Schaumstoff nahezu identische SIL3-Werte. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kombination aus 2*Mass layer + Cutpile carpet + Foam with fabric cover den niedrigsten SIL3-Wert aufweist. Wenn nur die Platte als Referenz herangezogen wird, beträgt die Schalldämmung etwa 21 dB. Diese Kombination ist jedoch hinsichtlich Schalldämmung und Gewicht auf dem Boden nicht optimal.

Wenn man die SIL3-Werte gegen das Gewicht (kg/m²) in Abbildung 14 (links) aufträgt, wird deutlich, dass Cutpile und Looppile Teppiche mit Schaumstoff einen reduzierten Geräuschpegel in der Kabine

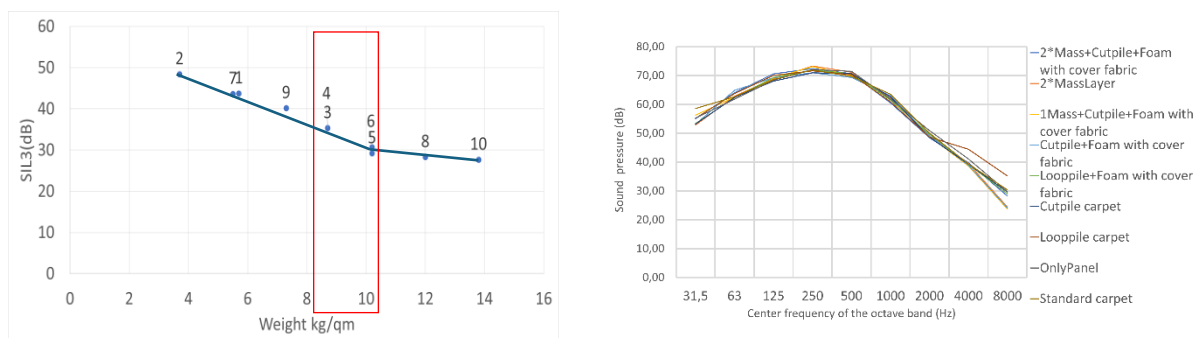


Abbildung 14 : SIL3-Werte gegen das Gewicht von Teppichaufbauten (links), Gesamt-Schalldruckpegel der Teppichaufbauten (rechts).

und auch ein geringeres Gewicht pro Quadratmeter aufweisen, während die zusätzliche Masse nicht so effektiv ist. Es ist auch zu beobachten, dass der SIL3-Wert mit zunehmender Masse abnimmt.

Abbildung 14 (rechts) zeigt die Oktavbänder für den Gesamt-Schalldruckpegel der verschiedenen Teppichaufbauten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Schalldruckpegel in einer mit absorbierendem Schaum ausgekleideten Messbereich über alle Oktavbänder hinweg bei allen Teppichaufbauten nahezu gleich sind. Dies liegt daran, dass viele Schallübertragungswege zum Kabinenlärm beitragen und ein großer Effekt nicht beobachtet werden kann, wenn präventive Maßnahmen nur für einen einzelnen Schallübertragungsweg ergriffen werden.

Diese Arbeitsergebnisse wurden von der HAW Hamburg auf der DAGA 2024 – 50. Jahrestagung für Akustik in Hannover veröffentlicht [35].

Einfluss des Frachtraums (Cargo) auf die Kabine

In diesem Zusammenhang wurde auch der Schalleintrag aus dem Einfluss des Frachtraums (Cargo) auf die Kabine durch den Fußboden in die Kabine untersucht. Über eine Vergleichsmessung wurde zuerst der Schalldruckpegel mit einem leeren Frachtraum (Cargo) gemessen und so dessen Auswirkung auf die Kabine bestimmt um anschließend die Auswirkung auf die Kabine eines mit absorbierendem Material gefüllten Frachtraums (Cargo) zu bestimmen. Ein für den Kabinenschallpegel signifikanter Unterschied konnte nicht festgestellt werden, wie in der Abbildung 15 (rechts) dargestellt. Dies erlaubt den Rückschluss, dass der wesentliche Schalleintrag über die Struktur bzw. über die Anbindung des Fußbodens zur Rumpfstruktur erfolgt.

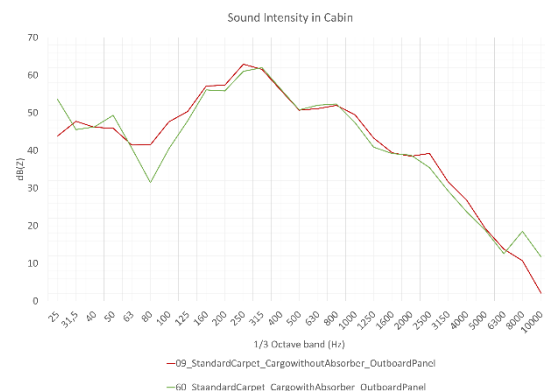


Abbildung 15 : Frachtraum mit absorbierendem Material (links), Schallintensität in der Kabine bei leerem Frachtraum und mit absorbierendem Material im Frachtraum (rechts).

HAP3: Implementierung

Hierfür bestand die Hauptaufgabe der HAW Hamburg darin, anhand experimenteller und analytischer Methoden die Schallminderungskonzepte zu detaillieren und zu optimieren, bevor diese anschließend vom Projektpartner ZAL im Simulationsmodell implementiert wurden.

AP3.3: Experimentelle und theoretische Konzeptstudien neuer VIP Kabinenentwürfe

Da die Serienisolatoren trotz unterschiedlicher Materialien und Geometrien weitgehend identische Isolationsverläufe mit einer Steigung von etwa $-2,5$ aufweisen, ergeben sich nur geringe Optimierungsspielräume im Material. Die Optimierung der Geometrie ermöglicht allerdings eine Einstellung der Resonanzfrequenz, ab der eine Isolationswirkung auftritt bei gleichzeitiger Berücksichtigung der vielfältigen Randbedingungen. Additiv gefertigte („3D-gedruckte“)

Elastomerisolatoren bieten hingegen deutlich größere Freiheitsgrade, da ihre Steifigkeit, Vorspannung und Richtungsabhängigkeit ohne zusätzliche Werkzeuge gezielt angepasst werden können. Zur Validierung und Verifizierung wurden die Anregungen in der Klimaakustikkammer im KKS-Labor anhand realer Flugmessungen reproduziert. Neben der realitätsnahen Simulation akustischer Umweltbedingungen ist für weiterführende Untersuchungen zur Lärminderung ein tiefgehendes Verständnis der Schallübertragung im Flugzeug entscheidend. Hierzu wurde ein Schalleistungsmodell in Excel aufgebaut, das die Schalldruckpegel in der Kabine zuverlässig vorhersagen kann.

Entwicklung von additiv gefertigte (AM-) Vibrationsisolatoren

Für die Untersuchung der akustischen und dynamischen Eigenschaften von additiv gefertigten (AM) Vibrationsisolatoren wurden zunächst einfache geometrische Formen gewählt, angelehnt an Serienisolatoren der Gruppen B und C (wie in der Abbildung 11). Ringförmige Isolatoren 3DC1 wurden in zwei Dicken (5 mm und 10 mm) aus Vollmaterial gefertigt, um den Einfluss der Dicke auf die Steifigkeit zu prüfen. Komplexere Varianten 3DB1 mit Noppen (5 bzw. 10 Auflagepunkte, Noppenhöhe



Abbildung 16 : AM-Isolatoren 3DC1-t5, 3DC1-t10, 3DB1-N5 und 3DB1-N10.

1,5 mm, Gesamtdicke 5 mm) erlauben eine gezielte Veränderung der Auflagefläche und damit der Steifigkeit. In der Abbildung 16 zeigt den gedruckten Isolatoren. Die Befestigung erfolgte beidseitig des Adapters, jeweils zwei Isolatoren in Reihe verschraubt, um reproduzierbare Messbedingungen zu gewährleisten. AM-Isolatoren wurden auf dem Shaker mit definierten Beschleunigungswerten getestet, wie in Abbildung 17 (rechts) des Messaufbaus dargestellt. Die Abbildung 17 zeigt Übertragungskurven von Serienisolatoren und AM-Isolatoren bei 1 m/s^2 . Die experimentellen

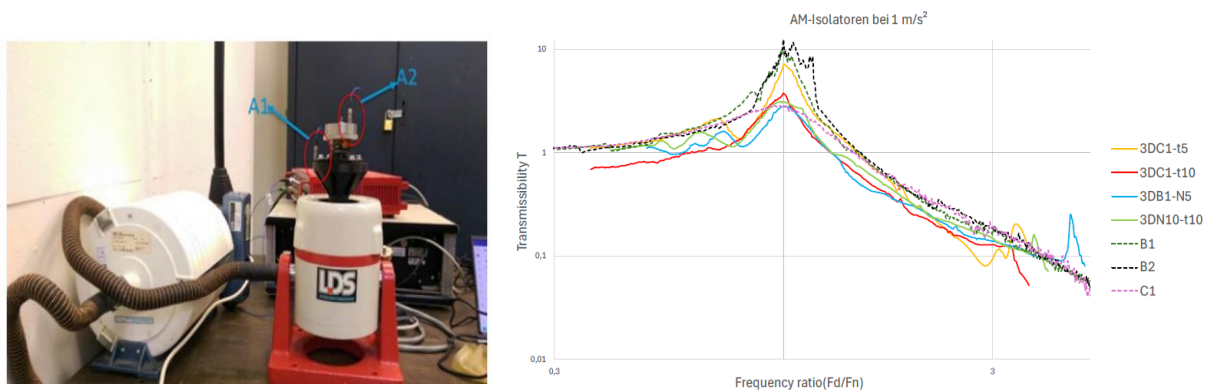


Abbildung 17 : Messaufbau Schwingungsübertragungsprüfstand (links), Übertragungskurve Serienisolatoren und AM Isolatoren bei 1 m/s^2 (rechts).

Untersuchungen zeigen, dass die optimierten Isolatoren das gewünschte Vibrationsverhalten aufweisen und das Konzept zielführend ist. Weitere Entwicklungen zu AM-Isolatoren braucht erscheinen sinnvoll und lohnenswert.

Diese Arbeitsergebnisse wurden von der HAW Hamburg auf der Deutschen Luft- und Raumfahrtkongresses 2024 (DLRK2024) in Hamburg veröffentlicht [36].

Erzeugung einer äquivalenten Anregung in der Klima-Akustikkammer auf der Grundlage von realen Flugschallanregungsprofilen

Die zu unter Laborbedingungen zu reproduzierenden akustischen Schalldruckspektren stammen aus In-flight-Messungen, die auf mehreren verschiedenen Flügen mit A320 CEO und entsprechenden Derivaten durchgeführt wurden, während sich die Messmikrofone jeweils in demselben Rumpfabschnitt befanden, der auch in der Laborumgebung (Abbildung 18) eingesetzt wird. Ziel dieser Messkampagne war es, Referenzmaterial aus unterschiedlichen Flug- und Betriebszuständen zu gewinnen, um eine belastbare Datenbasis für die spätere Laborreplikation zu schaffen.

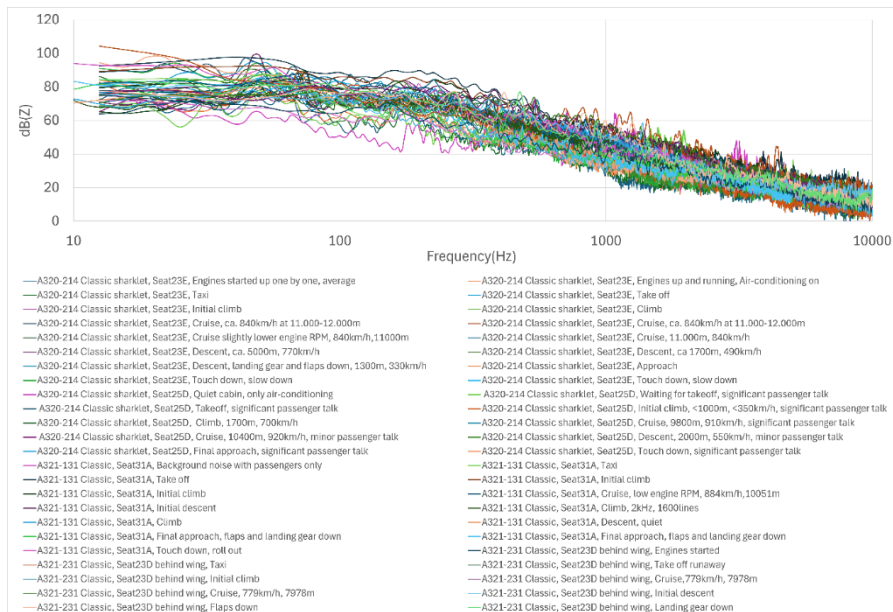


Abbildung 18 : Überblick über die Spektren der bereitgestellten allgemeinen Datensätze. Für die spätere Replikation einer Fahrphase wurden nur einige.

Zur Reproduktion des realen Schalldruckpegels aus Flugversuchen im Klimakammer-Setup wurde der Aufbau iterativ optimiert. Die finale Konfiguration umfasst Lautsprecher für Höhen, Mitten und Subwoofer für tiefe Frequenzen (Abbildung 19), gesteuert über ein Regelsystem für stochastische Signale (Abbildung 20). Nichtlinearitäten und automatische Leistungsbegrenzung erschwerten die Parametrierung.

Um diese Limitierungen zu beheben, wurde ein Feedforward-Ansatz mit spektraler Vorsteuerung erprobt. Breitbandige Equalizer-Bänder wurden gezielt angepasst, um das Schalldruckspektrum innerhalb der Kabine iterativ an das Referenzspektrum der Flugmessungen anzugleichen. Durch diesen deterministischen Ansatz konnte das Anregungssignal so modifiziert werden, dass die akustische

Antwort im Kabineninnenraum das gewünschte Frequenzspektrum genau reproduziert. Erst durch die Kombination von Vorsteuerung und Equalizing ließ sich die Zielkurve präzise erreichen.

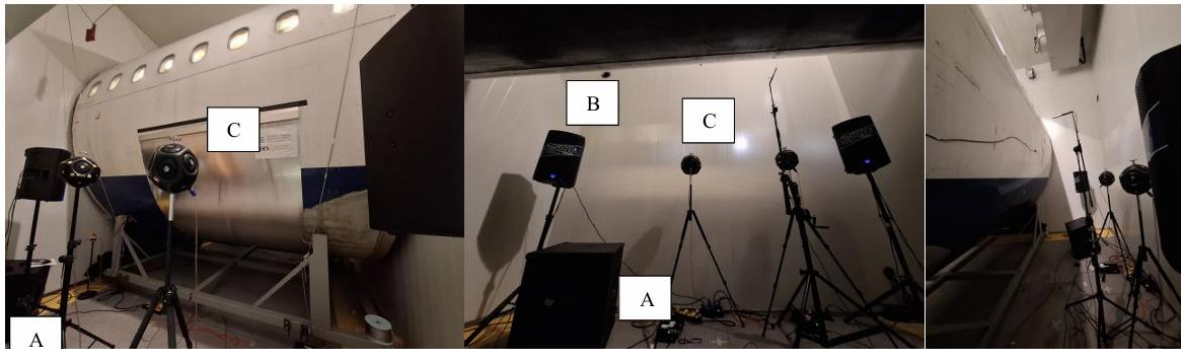


Abbildung 19 : Lautsprecheranregung mit einem Subwoofer(A), zwei Breitbandlautsprechern(B) und zwei Dodekaedern(C) auf jeder Seite des der Flugzeugrumpfssektion in der akustischen Klimakammer (HCAT).

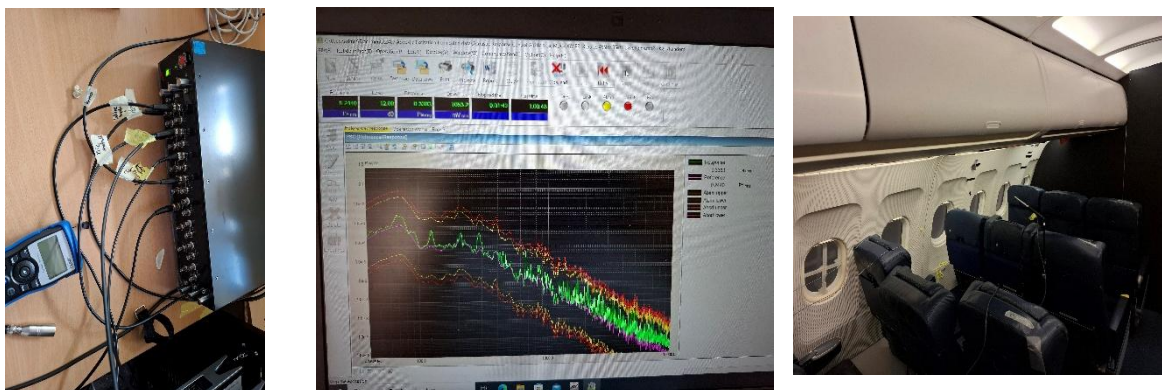


Abbildung 20 : Setup mit professionellem Regler zur Erstellung eines realen Flugspektrums

Abbildung 21 zeigt das erzielte Schalldruckspektrum in der Kabine, das durch die äquivalente Außenanregung (blau gestrichelt) erzeugt wurde. Außerdem sind in der Abbildung mehrere Schalldruckspektren aus realen Flugmessungen in der Reiseflugphase dargestellt, die als Referenzsignale ausgewählt wurden. Die grün gestrichelte Linie stellt das erreichte Zielniveau dar. Die

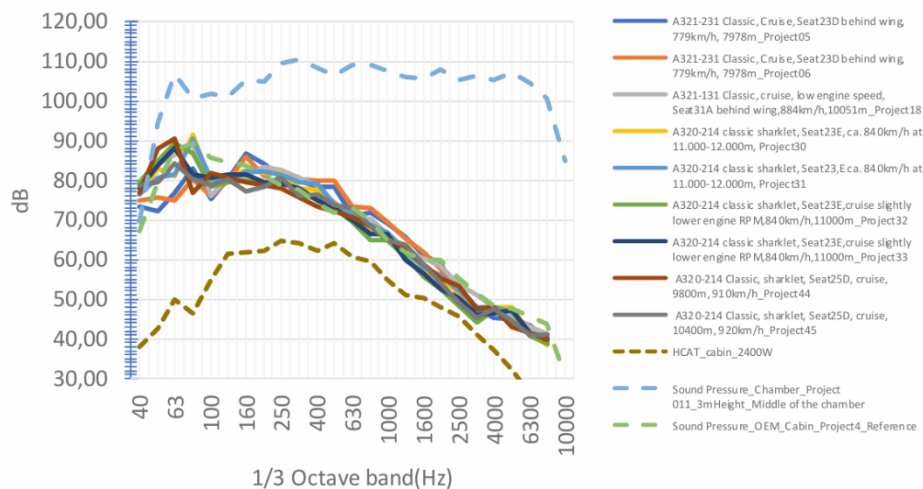


Abbildung 21 : Resultierende Response in der Kabine des Prüfstandrumpfes (grün gestrichelt) unter äquivalenter akustischer Anregung (hellblaugestrichelt) außen. Einige ausgewählte Cruise Flugmessungen sind als durchgezogene Linien dargestellt.

braun gestrichelte Linie stellt eine frühere Anregungskonfiguration dar, die vor der finalen Auslegung der Lautsprecheranregung verwendet wurde (vgl. AP2.2). Das optimierte Verfahren liefert

vielversprechende Ergebnisse, die künftig realitätsnahe Simulationen akustischer Bedingungen und Untersuchungen zu Lärminderungsmaßnahmen ermöglichen.

Zur Bestimmung der Homogenität wurden Mikrofone auf Stativen in unterschiedlichen Höhen positioniert und an insgesamt 28 Messpunkten entlang der Kabinenaußenhaut platziert (siehe

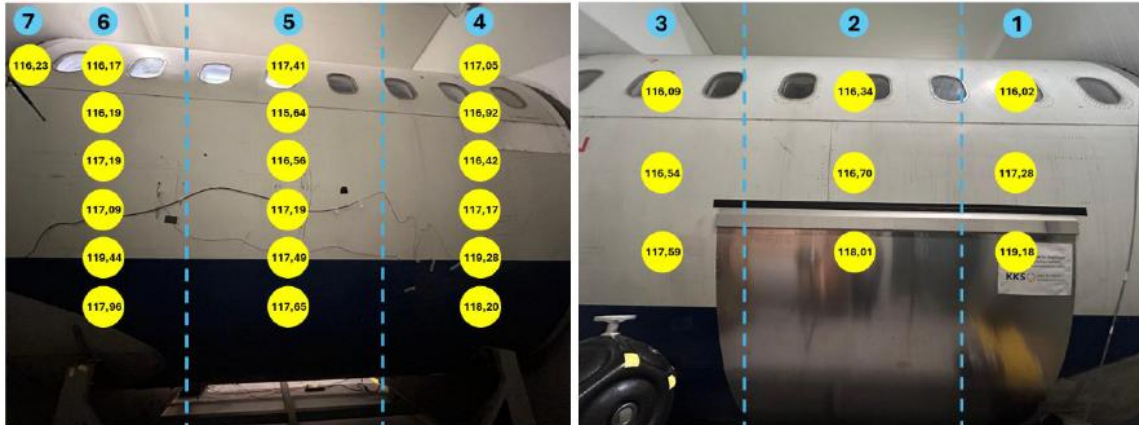


Abbildung 22 : Untersuchung der Homogenität der Außenanregung in der Akustik- und Klimakammer am HCAT.

Abbildung 22). Die Messergebnisse zeigen, dass der Schalldruckpegel über alle Messpunkte hinweg nahezu identisch ist, was auf eine hohe räumliche Homogenität des Schallfeldes in der Kammer hinweist. Weiterhin haben Simulationen am ZAL gezeigt, dass möglicherweise auftretende lokale Unterschiede der Schalldrücke und Schallschnellen durch die steife Außenhaut über sehr breite Frequenzbereiche zuverlässig räumlich „verschmiert“ werden, so dass hier eine sehr realistische Abbildung der realen Umgebung angenommen wird.

Neben der realitätsnahen Simulation akustischer Umweltbedingungen ist für weiterführende Untersuchungen zur Lärminderung auch das tiefgehende Verständnis der Schallübertragung im Flugzeug entscheidend. Insbesondere die Differenzierung zwischen Luft- und Körperschall entlang desselben Übertragungswegs spielt hierbei eine zentrale Rolle. Eines der Hauptziele dieses Versuchsaufbaus ist es, die Anteile der Luft- und Körperschall-Leistungskomponenten entlang eines gemeinsamen Übertragungswegs zu quantifizieren. Der Körperschallpfad von der Rumpfhaut durch eine Halterung in das Seitenwandpaneel wird geometrisch bestimmt, wie in Abbildung 23 dargestellt. Für einen A320 Classic ergibt sich überwiegend ein Mindestabstand von grob 12,5 cm. Zur Durchführung der Messungen wurden Schalldruck und Beschleunigung sowohl in der Kabine als auch im Hallraum erfasst. Die Echtzeit-Datenerfassung von sechs Kanälen erfolgte mit einem LAN-XI-Modul.



Abbildung 23 : Beispielaufbau für die Unterscheidung von Luft- und Körperschall (Link). 6 Kanälen LAN-XI Module (Recht).

Abbildung 24 zeigt einen ausgeprägten ersten Peak knapp unter 0,1 ms (orangefarbene Linie), was einer Körperschallgeschwindigkeit von etwa 2100 m/s bei einer Laufstrecke von 125 mm entspricht. Diese vergleichsweise geringe Geschwindigkeit steht im Einklang mit Literaturwerten für Materialien wie glasfaserverstärkte Polymere, Elastomere und Aluminium. Im Gegensatz dazu sollte der Luftschallpfad (hellblaue Linie) bei einer Geschwindigkeit von 340 m/s unter den gegebenen Testbedingungen eine Zeitdifferenz von etwa 0,36 ms aufweisen. Die Analyse zeigt jedoch, dass die Luftschallübertragung im Vergleich zur Körperschallübertragung signifikant geringer ausfällt.

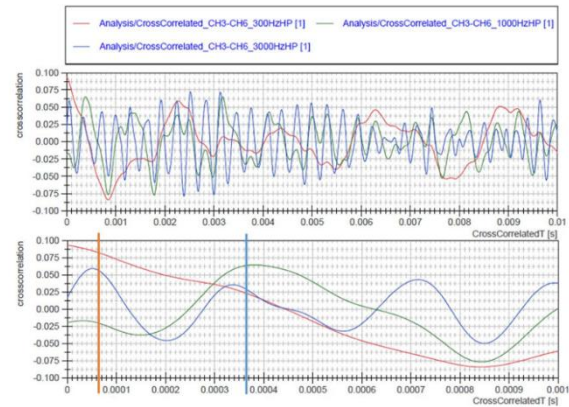
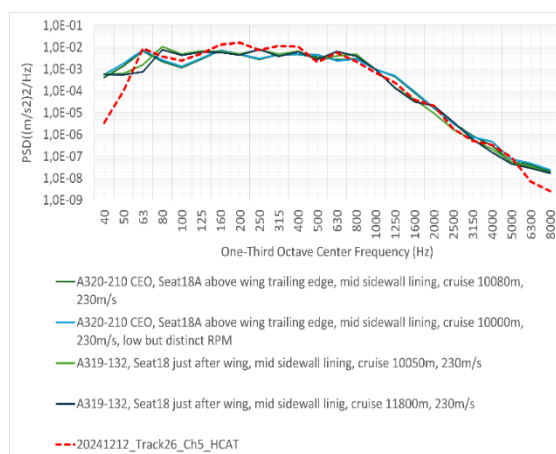


Abbildung 24 : Kreuzkorrelationsergebnisse für den Anregungssensor und den Antwortsensor im Inneren mit verschiedenen Hochpassfrequenzen.

Zur Einstellung der äußerst anspruchsvollen Messungen mit zeitlichen Laufzeiten im Bereich von zweistelligen Nanosekunden waren umfangreiche Maßnahmen zur Sicherung der Messqualität außerhalb des eigentlichen Akustiklabor in der Klimaakustikkammer am mehrere Kilometer entfernten KKS-Labor zu realisieren. Dazu musste eine lokal aufzubauenden, in einem Großprüfstand lokal nutzbare und gut transportierbare Mess- und Analyseperipherie mit u.a. mehreren kleinen Oszilloskopen, Audiotechnik, flexibler Anschlusstechnik und Rechnerumgebung beschafft und aufgebaut werden.

Diese Arbeitsergebnisse wurden von der HAW Hamburg auf 94. Shock and Vibration Symposium 2024 in Dallas, Texas, USA veröffentlicht [37].

Die Vibration im realen Flug wurde ebenfalls gemessen, wie in der Mitte der Panel-Abbildung 25 dargestellt. Um eine direkte Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden die Flugvibrationsmessungen an denselben Positionen durchgeführt wie die Labor-Messungen. In der Abbildung 25 zeigt sich eine hohe Übereinstimmung mit dem realen Flug.



Flight measurement position



HCAT measurement position

Abbildung 25 : Vergleich der Vibrationen in der Mitte des Panels zwischen dem realen Flug und den Labor-Messungen.

Entwicklung eines Schalleistungsmodells zur Analyse dominanter Schallpfade in VIP-Kabinen

Im zurückliegenden Projektzeitraum wurde im Rahmen einer studentischen Arbeit ein Vorhersagemodell zur Schalleistungsübertragung in Flugzeugkabinen entwickelt (siehe Abbildung 26). Ziel dieses Tools ist es, eine vereinfachte, aber praxistaugliche Methode zur Analyse der Schalleistung bereitzustellen, mit der dominante Übertragungswege effizient identifiziert werden können. Dabei

wurde ein Modellierungsansatz auf Basis von Übertragungsfunktionen (TFs) gewählt, um sowohl Luft- als auch Körperschallpfade quantitativ zu erfassen.

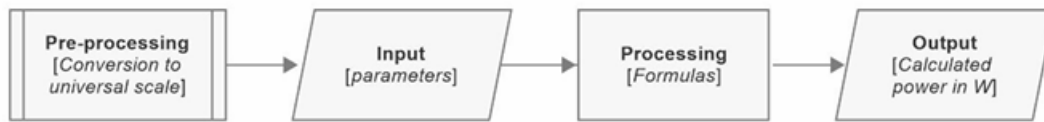


Abbildung 26 : Flussdiagramm des Schalleistungsmodells.

Der Entwicklungsprozess umfasste zunächst die Definition der Anforderungen sowie die Implementierung eines grundlegenden Modells, das eine erste Vorhersage der eintretenden Schalleistung ermöglicht. Zur Validierung wurden experimentelle Messdaten aus Bodentests herangezogen, um die Modellgenauigkeit mit realen Szenarien abzugleichen. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte Tool eine zuverlässige Abschätzung der Schalleistungsübertragung erlaubt und kritische Schallpfade frühzeitig identifizieren kann. Dabei stellt das Modell eine effiziente und kostengünstige Alternative zu aufwendigen numerischen Simulationen dar und ermöglicht eine gezielte Optimierung von Lärminderungsmaßnahmen sowie eine verbesserte Vorhersagegenauigkeit der akustischen Effekte in VIP-Kabinen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen sind weitere Verfeinerungen geplant, um zusätzliche Einflussfaktoren in das Modell zu integrieren und die Präzision der Vorhersagen weiter zu erhöhen.

HAP4: Validierung

AP4.1: Integration Funktionsmuster für Kabinenausstattung in realitätsnahen Technolgie-demonstrator

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde ein VIP-Messplatz in den Airbus A320-Kabinendemonstrator integriert, um gezielte Untersuchungen zu Lärminderungsmaßnahmen in einer VIP-Kabinenumgebung durchzuführen. Diese separate Einhausung wurde schrittweise aufgebaut und bietet eine unabhängige Messumgebung, die frei von äußeren Einflüssen der Standardkabine ist. In diesem abgetrennten Bereich wurden zahlreiche VIP-spezifische Komponenten implementiert, darunter Boden-, Decken- und Seitenpaneele sowie eine entsprechende VIP-Sitzkonfiguration. Darüber hinaus wurden in diesem Raum verschiedene Lärminderungsmaßnahmen integriert, um gezielte Untersuchungen zur Schallabsorption, Strukturübertragung und akustischen Optimierung unter realitätsnahen Bedingungen zu ermöglichen. Der Messraum ist von einer speziellen schallisierenden Struktur, der sogenannten „Absorptionshöhle“, umgeben, die eine möglichst störungsfreie akustische Messumgebung gewährleistet. Der schrittweise Ausbau dieses VIP-Messraums in den letzten Monaten ermöglicht nun detaillierte Vergleichsmessungen zwischen der OEM-Kabine und der VIP-Konfiguration, ohne dass Einflüsse aus anderen Kabinenbereichen berücksichtigt werden müssen. Dies bildet eine essenzielle Grundlage für die Entwicklung und Validierung neuer Lärminderungsstrategien in VIP-Kabinen, die sowohl den akustischen Komfort optimieren als auch Gewichts- und Materialeinsparungen ermöglichen. Abbildung 27 zeigt die gebaute VIP-Kabine im Großprüfstand des A320-Rumpfes in der Klimaakustikkammer am KKS-Labor.

Am Ende des Arbeitspakets HAW wurde mit Lufthansa Technik der gesamte Testplan erstellt, um die Schallminderungsmaßnahmen zu vermessen.



Abbildung 27 : OEM Kabine (links), VIP Kabine (rechts).

AP4.2: Validationstests (VIP-Kabinenausstattung, Entwurfs- und Nachweiswerkzeuge) in realitätsnahem Technologiedemonstrator

Schallintensität und Schalldruckpegel - Messungen in VIP- und Standardkabinen

Nach dem erfolgreichen Aufbau der separierten VIP-Messumgebung und der Erweiterung des Lautsprechersystems zur Anregung wurden erste Untersuchungen zur Schallintensitätsverteilung in verschiedenen Kabinenkonfigurationen durchgeführt. Die Schallintensität und der Schalldruckpegel wurden sowohl in der Standardkabine als auch in der VIP-Kabinenkonfiguration erfasst und miteinander verglichen. Der in Abbildung 28 dargestellte Vergleich zeigt die einfließende Gesamt-Schalleistung in beiden Kabinenkonfigurationen. Die Analyse der Messergebnisse liefert wertvolle Erkenntnisse zur akustischen Optimierung der VIP-Kabine und ermöglicht eine präzisere Bewertung der Effektivität der implementierten Schalldämmmaßnahmen.

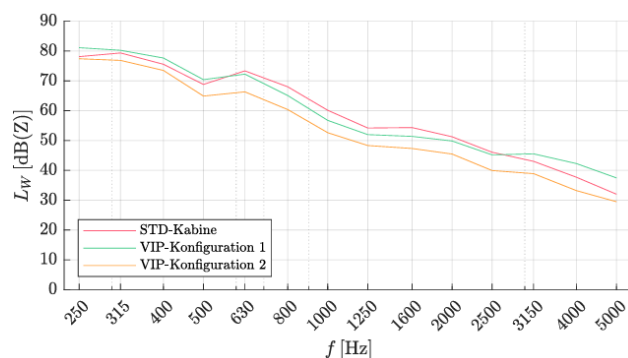


Abbildung 28 : Vergleich der einfließenden Schalleistungen der unterschiedlichen Kabinenkonfigurationen.

Untersuchung verschiedenster Bodenaufbauten

Für die Weiterentwicklung des Aufbaus wurde gezielt ein Ansatz der Impedanzanpassung (Impedanz-Mismatch) untersucht, um dadurch die Übertragung von Körperschall zu reduzieren. Als möglicher Ansatz wird der Einsatz einer Noppenbahn betrachtet, deren punktuelle Struktur theoretisch lokale Impedanzunterschiede erzeugen und damit eine Schallentkopplung begünstigen könnte.

Im Rahmen der studentischen Untersuchungen wurden verschiedenen Materialien und Kombinationen – darunter OEM- und VIP-Teppich, Akustikschaum, Vlies, Noppenbahn und Gummi – systematisch auf ihr Verhalten hinsichtlich Schalldämmung und Körperschallübertragung untersucht, wie in der Abbildung 29 zeigt. Dabei wurden Standardaufbauten mit alternativen Materialien sowie Baumarktprodukten im Labor verglichen. Zwar zeigten einige Kombinationen Ansätze zur Verbesserung, jedoch konnte kein Aufbau die Absorptionseigenschaften des VIP-Aufbaus übertreffen. Zudem traten bei vielversprechenden Varianten praktische Einschränkungen auf, etwa Wellenbildung, Instabilität oder Verformungen beim Begehen, was eine Umsetzung im realen Einsatz deutlich erschwerte.



Abbildung 29 : Messkampagne Bodenaufbauten

Weitere Entwicklung von 3D-gedruckte Isolatoren und gebaut im VIP-Kabinen-Demonstrator

Die 3D-gedruckten Isolatoren wurden weiterentwickelt. Die Isolatoren wurden parametrisch entworfen, und verschiedene Designs wurden untersucht. Es wurde sichergestellt, dass die Isolatoren über zwei Steifigkeitsstufen verfügen: Im Normalbetrieb wird eine optimale Isolationsfläche bereitgestellt, während im Crashfall die Steifigkeit deutlich erhöht wird, sodass die auftretenden Lasten aufgenommen werden können.

Darüber hinaus wurden die unterschiedlichen Designs mit verschiedenen Materialien und 3D-Druckverfahren hergestellt, darunter FDM- und SLA-Prozesse. Verwendet wurden dabei TPU-Materialien mit Härtegraden von 70A, 85A und 45D sowie Resin 70A (wie in Abbildung 30). Die Isolatoren auch wurden auf dem Shaker getestet, wie in der Abbildung 10 dargestellt.



Abbildung 30 : Parametrisch gestaltete 3D-gedruckte Isolatoren aus verschiedenen Materialien (Rot: TPU45D, Weiß: TPU70A, Schwarz: TPU85A und Transparent: Resin70A).

Diese Arbeitsergebnisse wurden von der HAW Hamburg auf der Deutschen Luft- und Raumfahrtkongresses 2025 (DLRK2025) in Hamburg veröffentlicht [38].

Die Isolatoren, die aus TPU70A hergestellt wurden weiterhin im VIP Kabine Demonstrator getestet. Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 31 dargestellt.



Abbildung 31 : Messaufbau von 3D gedruckte Isolatoren in VIP Kabine Demonstrator (Links : Serenisolatoren, Rechts: TPU70A Isolatoren).

Verschiedenen aufbauten mit Schallminderungsmaßnahmen im VIP Demonstrator

Im Rahmen von AP2.1 einer systematischen Untersuchung wurden die Hauptschallpfade des Demonstrators identifiziert und detailliert analysiert. Anschließend wurden gezielte Schallminderungsmaßnahmen angewendet, um sowohl luft- als auch strukturgebundene

Schallübertragungen zu reduzieren. Dabei kamen verschiedene akustische Maßnahmen in Zusammenarbeit mit Lufthansa zum Einsatz, unter anderem VIP-Carpet +Foam with cover fabric, Skindamping, VIP Blankets usw.

In der finalen Konfiguration (VIP_V2) konnte ein Schallintensitätspegel (SIL3) von 45,81 dB erreicht werden. Dies stellt eine deutliche Verbesserung gegenüber der Ausgangssituation dar und bestätigt die Wirksamkeit des eingesetzten Maßnahmenpakets. Abbildung 32 zeigt den Schalldruckpegel bei verschiedenen Versionen der VIP-Kabinen, und die Tabelle enthält die SIL3- und dB(A)-Werte für die Kabinenversionen.

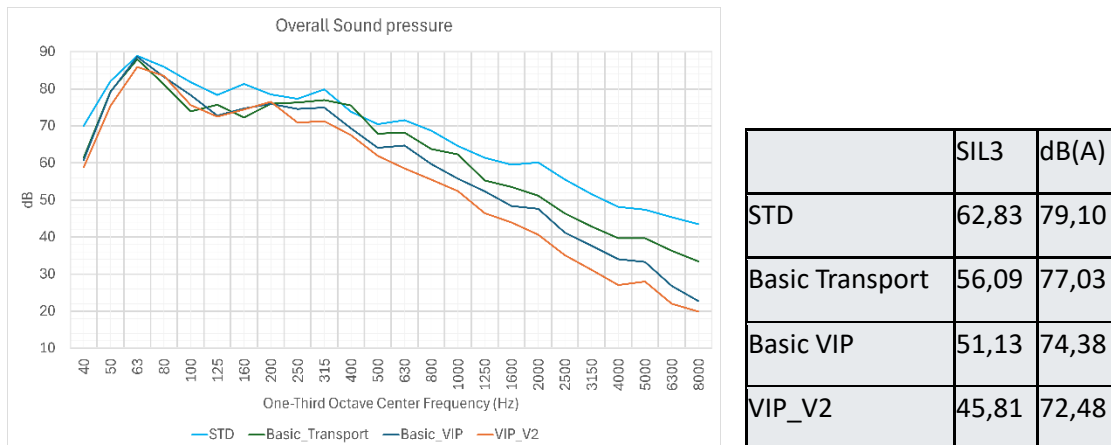


Abbildung 32 : Schalldruckpegel für die verschiedenen Versionen der VIP-Kabine mit Schallminderungsmaßnahmen.

AP4.3: Entwicklung von Modellierungs-, Test- und Design-Guidelines, Bewertung von Unsicherheiten

Der PI-Index (Pressure-Intensity Index) ist ein wesentliches Qualitätsmaß bei Schallintensitätsmessungen und beschreibt die Differenz zwischen dem Schalldruckpegel und dem zugehörigen Schallintensitätspegel. Er dient zur Bewertung des Einflusses von Störschall, Reflexionen und reaktiven Schallanteilen auf die Messung. Ein niedriger PI-Index weist auf einen dominierenden Anteil propagierenden Schalls und damit auf eine hohe Messzuverlässigkeit hin, während hohe PI-Index-Werte die Aussagekraft der Messergebnisse einschränken. Die Einhaltung der zulässigen PI-Index-Grenzwerte ist daher Voraussetzung für eine normkonforme und belastbare Schallintensitätsauswertung. Die Messunsicherheit der durchgeführten Schallintensitätsmessungen wird im Rahmen der Studienarbeit von Jonas Thern anhand der Einhaltung der normativen Gütekriterien sowie unter Berücksichtigung frequenzabhängiger Störeinflüsse bewertet. Zur Beurteilung der Messgüte werden ausschließlich die Kriterien 1 und 2 herangezogen, welche insbesondere den Einfluss von Störschall, Phasenfehlern und reaktiven Schallanteilen erfassen. Aufgrund des verwendeten Mikrofonabstands von $\Delta r = 12$ mm ist eine zuverlässige Auswertung auf den Frequenzbereich von 125 Hz bis 5 kHz begrenzt, da außerhalb dieses Bereichs die normativen Anforderungen an die Genauigkeit der Schallintensitätsbestimmung nicht mehr erfüllt werden. Die Überprüfung der Messunsicherheit wurde für sämtliche durchgeführten Schallintensitätsmessungen vorgenommen, sodass die ausgewerteten Ergebnisse als messtechnisch abgesichert gelten können.

Die Überprüfung des Kriteriums 1 anhand des PI-Index zeigt, dass insbesondere bei Messungen ohne Verwendung der Messkiste ein signifikanter Anteil der Messdaten die Anforderungen der Güteklasse GK 2 nicht erfüllt. In diesen Fällen treten erhöhte PI-Indizes sowie vermehrt negative Teilschalleistungen auf, was auf einen erhöhten Einfluss von Störschall und Reflexionen hindeutet. Der überwiegende Teil der Messdaten lässt sich bei Verwendung der Messkiste den Güteklassen GK 2 oder GK 3 zuordnen, wobei die Ergebnisse größtenteils in GK 2 liegen. Die ermittelte Standardabweichung der Intensitätspegel beträgt in diesem Fall $s = 1,5$ dB und weist somit auf eine hohe Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit der Messergebnisse hin.

Veröffentlichungen

Insgesamt wurden von der HAW Hamburg im Rahmen des Verbundvorhabens ENTIRETY zwei Zeitschriftenbeiträge und 6 Konferenzbeiträge veröffentlicht. Außerdem wurde während der Projektlaufzeit 2 Erfindungsmeldungen angefertigt, die Lufthansa Technik als Patentanmeldungen eingereicht hat. Zusätzlich wurden während der Projektlaufzeit insgesamt 20 studentische Arbeiten (Bachelorarbeiten, Masterarbeiten und Projektarbeiten im Bachelor und Master) eingereicht. Eine detaillierte Auflistung der Veröffentlichungen mit Beteiligung der HAW Hamburg ist in den folgenden Abschnitten gegeben.

Zeitschriftenbeiträge

[34] T. Ziegner, B. Plaumann, and T. Tews, "Flugzeugakustik: Schalleistungsbeiträge in der Flugzeugakustik," 2023, doi: 10.48441/4427.1254.

[39] Knorr M, Chodvadiya A, Plaumann B, Tews T. Development of Parameterized and Additively Manufactured Vibration Isolators for Improved Vibration Decoupling in Commercial Aircraft. CEAS Aeronautical Journal 2026; in submission. (Submission ID : 1cb97ab2-8563-4338-a3f5-aad36541c1d3)

Konferenzbeiträge

„Investigation of the characteristics of vibration isolators of aircraft“ präsentiert auf dem 22. Norddeutsche Simulationsforum 2023.

[2] Plaumann B, Ziegner T, Tews T, Hansen J. Untersuchung und Optimierung der Schallpfade in die VIP-Kabine. Tagungsband - Proceedings "Fortschritte Der Akustik - DAGA 2023" : DAGA 2023 : 49 Jahrestagung Für Akustik, 06-09 März 2023 in Hamburg 2023. <https://doi.org/10.48441/4427.720>.

[35] A. Chodvadiya, B. Plaumann, E. Hein, T. Tews, J. Hansen, and P. Cordes, "Influence of VIP floor setups on noise reduction in aircraft cabin," *Tagungsband - Proceedings "Fortschritte der Akustik - DAGA 2024" : DAGA 2024 - 50. Jahrestagung für Akustik, 18. - 21. März 2024, Hannover*, pp. 592–595, 2024, doi: 10.48441/4427.1502.

[36] E. Hein, A. Chodvadiya, B. Plaumann, and T. Tews, "Reduktion von Schalleistungsbeiträgen in der Flugzeugakustik durch individuell ausgelegte Isolatoren," presented at the Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2024, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., Nov. 2024. doi: 10.25967/630130.

[37] B. Plaumann, T. Kletschkowski, A. Chodvadiya, and E. Hein, "Inverse test based estimation of equivalent acoustic excitation based on aircraft cabin response measurements," *Shock and Vibration Exchange*, pp. 82–98, 2025, doi: 10.48441/4427.2897.

[38] M. Knorr, A. Chodvadiya, B. Plaumann, T. Tews, and E. Abi Raad, "Entwicklung parametrisierter und additiv gefertigter Vibrationsisolatoren zur verbesserten Schwingungskopplung in Verkehrsflugzeugen," presented at the Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress, Augsburg, Germany, 25.09 2025.

Patente

Wie im vertraulichen Teil des Erfolgskontrollberichts beschrieben, ist zum Zeitpunkt der Verfassung des Berichts 2 Patentanmeldungen zu Teilergebnissen des Projekts beim Industriepartner LHT in Prüfung und Arbeit.

Studentische Arbeiten

1. Michel Günther: Framework und Weiterentwicklung einer Vibrationsregelstrecke, Projekt im Bachelor
2. Simon Stöwer: Auslegung einer Simulationsmöglichkeit von Fluggeräuschen im Groundtest und zur Untersuchung von Testmaterialien mit einer Alpha Kabine, Projekt im Master
3. Felix Franzke: Prozessseitige Entwicklung einer modularen Demonstrator-Umgebung zur Validierung von Geräuschpegelminimierungskonzepten, Bachelorarbeit (Prof. Wiesemann) in VIP-Flugzeugen
4. Henning Delius: Literaturrecherche und der Umrechnung der Transferfunktionen zur realen Schallanregung in der Flugzeugkabine, Projekt im Bachelor
5. William Chandra: Design of Experiments und Parametereinflussanalyse – Recherche und beispielhafte Umsetzung, Bachelorarbeit
6. Martin Knorr: Laservibrometermessungen an Damped Structures: Untersuchung von Schallminderungsmaßnahmen (Schalldämpfungsmaßnahmen) zur akustischen Optimierung von VIP-Flugzeugkabinen, Projekt im Master
7. Shedly Heidenreich: Analyse verschiedener Fußbodenaufbauten zur Isolation und Dämpfung von Lärm/Vibration, Projekt im Bachelor
8. Artur Abramian: Vibrationserfassung an Dämpferbauteilen, Projekt im Bachelor
9. Hawar Daneshfar: 3D-Druck-basierte Grommet Lösung zur effektiven Entkopplung (Isolation und Dämpfung) der Verkleidung (Linings), Projekt im Bachelor
10. Tom Ziegner: Quantifizierung und Minimierung von Schallleistungsbeiträgen in der VIP Flugzeugkabine und Prognose des Kabinenpegels anhand eines Schallleistungsmodells, Masterarbeit
11. Torben Dierks: Entwicklung und Implementierung einer teilautomatisierten Regelung einer Vibrationssimulationsregelstrecke für das Benchmarking MEMS und piezoelektrische Beschleunigungssensoren, Projekt im Bachelor
12. William Chandra: Evaluierung der Schallisolierung in Flugzeugkabinen: Eine differenzierte Vergleichsanalyse der Feldgrößen zwischen Standard- und VIP-Kabinenkonfigurationen, Projekt im Master
13. Martin Knorr: Entwicklung, Implementierung und Validierung eines Umweltsimulationsregelkreises zur Nachbildung der Kabinenakustik von Verkehrsflugzeugen, Masterarbeit
14. Tushit Luchmun: Development of a Noise Power Transfer Prediction Model for VIP Aircraft, Bachelorarbeit
15. Simon Stöwer: Entwicklung eines Schallminderungskonzepts für die Shear Truss Area, Masterarbeit

16. Jonas Thern: Akustische Analyse und Simulation von Schallintensitäten einer A320 VIP-Kabine, Projekt im Bachelor
17. Sebastian Wagner: Weiterentwicklung Vibroakustische Regelungsumgebung, Projekt im Bachelor
18. William Chandra: Automatisierte Analyse und Bewertung von Körperschall- und Luftschallanteilen mittels Kreuzkorrelation in Flugzeugkabinen, Masterarbeit
19. Tushit Luchmun: Advanced Development of a Noise Prediction Model using transfer functions for VIP Aircraft Cabins, Projekt im Master
20. Emre Tekelioglu: Entwicklung und Untersuchung von Vibrations-Isolatoren zur Entkopplung von Kabinenbauteilen, Projekt im Master

Literaturen

- [1] Hoge K, Rescheleit M, Estorff O von. Validierung eines Ray-Tracing-Modells zur Simulation der Akustik in Flugzeugkabinen, Düsseldorf: 2011.
- [2] Plaumann B, Ziegner T, Tews T, Hansen J. Untersuchung und Optimierung der Schallpfade in die VIP-Kabine. Tagungsband - Proceedings "Fortschritte Der Akustik - DAGA 2023" : DAGA 2023 : 49 Jahrestagung Für Akustik, 06-09 März 2023 in Hamburg 2023. <https://doi.org/10.48441/4427.720>.
- [3] Hubbard HH. Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice. Volume 2: Noise Control. NASA Langley Research Center; 1991.
- [4] Kuznetsov VM. Noise control problems of passenger airplanes (A review). *Acoust Phys* 2003;49:241–62. <https://doi.org/10.1134/1.1574351>.
- [5] Wilby JF. Interior Noise of General Aviation Aircraft. SAE Technical Paper Series, SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; 1982. <https://doi.org/10.4271/820961>.
- [6] Tate RB, Langhout EKO. Aircraft Noise Control Practices Related to Ground Transport Vehicles, Dearborn, Michigan, United States: 1981, p. 810853. <https://doi.org/10.4271/810853>.
- [7] Riffat SB, Qiu G. A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 2013;8:1–6. <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts001>.
- [8] Ghinet S, Bouche P, Padois T, Pires L. Experimental validation of acoustic metamaterials noise attenuation performance for aircraft cabin applications, Seoul, Korea: 2020, p. 222–32.
- [9] Prydz RA, Wirt LS, Kuntz HL, Pope LD. Transmission loss of a multilayer panel with internal tuned Helmholtz resonators. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1990;87:1597–602. <https://doi.org/10.1121/1.399407>.
- [10] Langfeldt F, Hoppen H, Gleine W. Broadband low-frequency sound transmission loss improvement of double walls with Helmholtz resonators. *Journal of Sound and Vibration* 2020;476:115309. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115309>.
- [11] Cummer SA, Christensen J, Alù A. Controlling sound with acoustic metamaterials. *Nat Rev Mater* 2016;1:16001. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.1>.
- [12] Ma G, Sheng P. Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons. *Sci Adv* 2016;2:e1501595. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501595>.
- [13] Zangeneh-Nejad F, Fleury R. Active times for acoustic metamaterials. *Reviews in Physics* 2019;4:100031. <https://doi.org/10.1016/j.revip.2019.100031>.
- [14] Symans MD, Constantinou MC. Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. *Engineering Structures* 1999;21:469–87. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00225-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00225-3).
- [15] Hurlebaus S, Gaul L. Smart structure dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2006;20:255–81. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.08.025>.

- [16] VIP aircraft n.d. <https://www.lufthansa-technik.com/en/vip-aircraft> (accessed December 10, 2025).
- [17] DuPont de Nemours, Inc. Attractive, Easy-to-clean, Scuff-resistant Surface Protection to Aircraft Interiors | DuPont™ Tedlar® n.d. <https://www.dupont.com/tedlar/tedlar-aerospace-applications.html> (accessed December 11, 2025).
- [18] Mohamad H-T, Schwarz F, Taddiken M. Decompression Panel For Aircraft Partition. USA Patent 4899960, 1990.
- [19] Wilby JF. Interior Noise of General Aviation Aircraft, San Francisco, California, United States: 1982, p. 3133–44. <https://doi.org/10.4271/820961>.
- [20] Paonessa A. The passive and active noise control strategy in the aircraft interior noise. *Journal de Physique IV Proceedings* 1994:C5-51-C5-53.
- [21] Liu ZS, Lee HP, Lu C. Passive and active interior noise control of box structures using the structural intensity method. *Applied Acoustics* 2006;67:112–34. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.04.010>.
- [22] Aearo Technologies LLC. Noise, Vibration and Thermal Control for the Aerospace Industry 2021. https://www.rshughes.com/p/Aearo-Technologies-E-A-R-ADC-126-2-25-Ft-Width-X-4-Ft-Length-X-0-25-In-Thick-Advanced-Damping-Composite-Sheet-640-0126/640_0126/ (accessed December 11, 2025).
- [23] Weisbeck J. Quieting aircraft cabin noise. *Aerospace Manufacturing and Design* 2015. <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/amd0415-reducing-cabin-noise-aircraft/> (accessed December 11, 2025).
- [24] Cotoni V, Gardner B, Cordioli JA, Carneal J, Fuller C. Advanced Modeling of Aircraft Interior Noise using the Hybrid FE-SEA method, Florianopolis, Brazil: 2008, p. 2008-36–0575. <https://doi.org/10.4271/2008-36-0575>.
- [25] Zverev AY. Noise control mechanisms of inside aircraft. *Acoust Phys* 2016;62:478–82. <https://doi.org/10.1134/S1063771016040187>.
- [26] Vance F, Young J. Design, development, and validation of acoustic insulation packages for business and VIP aircraft. *Inter Noise 2022*;264:800–9. <https://doi.org/10.3397/NC-2022-813>.
- [27] Casalino D, Diozzi F, Sannino R, Paonessa A. Aircraft noise reduction technologies: A bibliographic review. *Aerospace Science and Technology* 2008;12:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2007.10.004>.
- [28] Orrenius U, Cotoni V, Wareing A. Analysis of sound transmission through aircraft fuselages excited by turbulent boundary layer or diffuse acoustic pressure fields. *International Congress and Exposition on Noise Control Engineering* 2009;38:2637–45.
- [29] Cordioli JA, Gerges SNY, Pererira AK, Carmo M, Grandi C. *Vibro-Acoustic Modeling of Aircrafts Using Statistical Energy Analysis*, Sao Paulo, Brazil: 2004, p. 2004-01–3337. <https://doi.org/10.4271/2004-01-3337>.
- [30] Erhard RM, Clarke MA, Alonso JJ. A Low-Cost Aero-Propulsive Analysis of Distributed Electric Propulsion Aircraft. *AIAA Scitech 2021 Forum, VIRTUAL EVENT: American Institute of Aeronautics and Astronautics*; 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-1200>.
- [31] DIN EN ISO 9614-2 Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen, Teil 2; Messung mit kontinuierlicher Abtastung 1996.
- [32] Harris CM, Piersol AG. *Harris' shock and vibration handbook*. 5th ed. New York: McGraw-Hill; 2002.
- [33] Fahy F, Gardonio P. *Sound and structural vibration: Radiation, transmission and response* / Frank Fahy, Paolo Gardonio. 2nd ed. Amsterdam; London: Elsevier/Academic; 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373633-8.X5000-5>.
- [34] Ziegner T, Plaumann B, Tews T. *Flugzeugakustik : Schalleistungsbeiträge in der Flugzeugakustik* 2023. <https://doi.org/10.48441/4427.1254>.
- [35] Chodvadiya A, Plaumann B, Hein E, Tews T, Hansen J, Cordes P. Influence of VIP floor setups on noise reduction in aircraft cabin. *Tagungsband - Proceedings "Fortschritte Der Akustik - DAGA*

- 2024" : DAGA 2024 - 50 Jahrestagung Für Akustik, 18 - 21 März 2024, Hannover 2024:592–5. <https://doi.org/10.48441/4427.1502>.
- [36] Hein E, Chodvadiya A, Plaumann B, Tews T. Reduktion von Schallleistungsbeiträgen in der Flugzeugakustik durch individuell ausgelegte Isolatoren, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V.; 2024. <https://doi.org/10.25967/630130>.
- [37] Plaumann B, Kletschkowski T, Chodvadiya A, Hein E. Inverse test based estimation of equivalent acoustic excitation based on aircraft cabin response measurements. *Shock and Vibration Exchange* 2025:82–98. <https://doi.org/10.48441/4427.2897>.
- [38] Knorr M, Chodvadiya A, Plaumann B, Tews T, Abi Raad E. Entwicklung parametrisierter und additiv gefertigter Vibrationsisolatoren zur verbesserten Schwingungsentkopplung in Verkehrsflugzeugen, Augsburg, Germany: Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress; 2025.
- [39] Knorr M, Chodvadiya A, Plaumann B, Tews T. Development of Parameterized and Additively Manufactured Vibration Isolators for Improved Vibration Decoupling in Commercial Aircraft. *CEAS Aeronautical Journal* 2026;in submission. (Submission ID : 1cb97ab2-8563-4338-a3f5-aad36541c1d3)