

Untersuchung und Optimierung der Schallpfade in die VIP-Kabine

Benedikt Plaumann¹, Tom Ziegner², Tjerk Tews³, Jan Hansen⁴

¹ HAW Hamburg, 20099 Hamburg, E-Mail: benedikt.plaumann@haw-hamburg.de

² HAW Hamburg, 20099 Hamburg, E-Mail: tom.ziegner@haw-hamburg.de

³ Lufthansa Technik AG, 22335 Hamburg, E-Mail: tjerk.tews@lht.dlh.de

⁴ Lufthansa Technik AG, 22335 Hamburg, E-Mail: jan.hansen@lht.dlh.de

Einleitung

Kabinengeräusche in Flugzeugen beeinträchtigen Komfort und Sicherheit. Gerade in VIP-Flugzeugen sind die Anforderungen besonders hoch, die technischen Gegebenheiten mit vielen steifen VIP-Einbauten aber akustisch nachteilig. Die im Stand der Technik eingesetzten Maßnahmen wiegen teilweise mehrere Tonnen pro Flugzeug und stellen damit ein erhebliches Optimierungspotential für eine Erhöhung der Betriebseffizienz von Flugzeugen und damit verbundenen Einsparungen an CO₂-Emissionen bei technisch gleichwertigen oder besseren akustischen Eigenschaften dar.

Das zusätzlich eingebrachte Gewicht für ein akustisches Isolierungspaket in ein Großraumflugzeug (A350), welches bis zur Hälfte der Kabinenlänge eine VIP-Ausstattung erhält, beläuft sich auf etwa 1,4 Tonnen. Dies entspricht 1 % des Leergewichts des Flugzeugs. Das Gesamtgewicht eines akustischen Isolierungspakets für die gesamte Kabinenlänge eines Schmalrumpfflugzeuges (A320) beläuft sich auf etwa 1 Tonne und damit 2-3% des Leergewichts. Die Angaben beziehen sich auf vergangene Projekte im Lufthansa Technik Completion Center in Hamburg.

Das akustische Isolierungspaket und das damit zusätzlich eingebrachte Gewicht bewirkt einen niedrigeren Schalldruckpegel in der Kabine. Standardkabinen von Fluggesellschaften weisen üblicherweise einen Pegel von 55-65 dB SIL3 auf. In VIP-Kabinen wird dieser Pegel abhängig von der Ausstattung und den Randbedingungen einer Flugzeugkabine häufig auf 50-55 dB SIL3 gesenkt. Die Spitzenwerte liegen bei 45-47 dB SIL3. Allgemein sind Großraumflugzeuge leiser als Schmalrumpfflugzeuge, da zusätzlicher Bedarf an Bauraum und Gewicht für akustische Maßnahmen ökonomisch weniger nachteilig sind.

Im Folgenden wird ein erster Zwischenstand des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten LuFo-Projekts ENTIRETY vorgestellt. Die Projektziele sind

- Identifikation und Quantifizierung von bisher unzureichend erforschten Luft- und Körperschalltransferpfaden in VIP-Flugzeugkabinen
- Generierung von optimierten Schallminderungskonzepten für die für den Schalleintrag besonders kritischen Kabinenkomponenten
- Experimentelle Validierung der Konzepte in realitätsnaher Umgebung
- An der VIP-Kabine lernen und entwickeln, was auch in der Serie funktioniert
- Verzicht von „Schwerbau“ in der Schallminderung

Der im Projekt gewählte Fokus auf VIP-Kabinen ist für ein Forschungsvorhaben besonders gut gewählt, da die Palette an in die Kabine zu integrierenden Komponenten deutlich breiter ist als bei Serienflugzeugen und gleichzeitig der prototypische Charakter von Neuentwicklung kein Hinderungsgrund für die Umsetzung ist.

Die sehr hohe technologische Breite macht ein besonders umfangreiches Verständnis der Grundlagen notwendig, da unterschiedlichste Schallpfade und Schallminderungsmaßnahmen verstanden und beherrscht werden müssen. Ein in Serienflugzeugen zu beobachtender sehr hoher Optimierungsgrad auf sehr spezifische Sets von Parametern wie Seitenwandaufbau, Kabinenmonumente etc. kann bei VIP-Kabinen nicht allgemein festgelegt werden. Entsprechend breit müssen wesentliche Schalleinträge und Schallpfade untersucht, verstanden und in Berechnungsmodellen zur Beherrschung abgebildet werden.

Die stetige Neuentwicklung von Details macht VIP-Kabinen zu einem idealen Versuchsumfeld für neuartige, auf Leichtbau und akustische Performance optimierte Maßnahmen. Besonders vielversprechende Lösungen können anschließend auf die in Serienflugzeugen noch deutlich stärker gewichtete Faktoren wie schnelle und einfache Montage und Wartung und auch allgemein Kosten optimiert werden. Dann können sie ihr volles Einsparpotential an CO₂ bei gleichzeitiger Verbesserung der akustischen Performance über große Flotten ausspielen.

Methoden

Akustische Schallanregung auf A320-Rumpffsegment von außen

Im Projekt ENTIRETY (Engineered Tailored Tranquility) wurden zahlreiche Messung am A320-Rumpffsegment in der Klimaakustikkammer der HAW Hamburg am HCAT durchgeführt. Die Anregung der hier dargestellten Untersuchungen erfolgte stets über eine akustische Lautsprecheranregung auf die Außenhaut der Rumpffektion, siehe Abbildung 1. Es wurden unter anderem Untersuchungen durchgeführt zu:

- Strukturschallpfade mit Vibrationen
- Lokale Schallintensitäten
- Lokale Schallpegel
- Nachhallzeiten



Abbildung 1: Schallanregung von außen auf A320 Rumpfssegment mit drei Lautsprechern ca. 109 dBA

Für die Qualifizierung des Inputs wurde auf verschiedenen Höhen entlang eines Rumpf-Querschnitts der Schalldruckpegel gemessen. Die Schallanregung ist in Abbildung 1 dargestellt, die Messergebnisse für verschiedene Positionen in Abbildung 2.

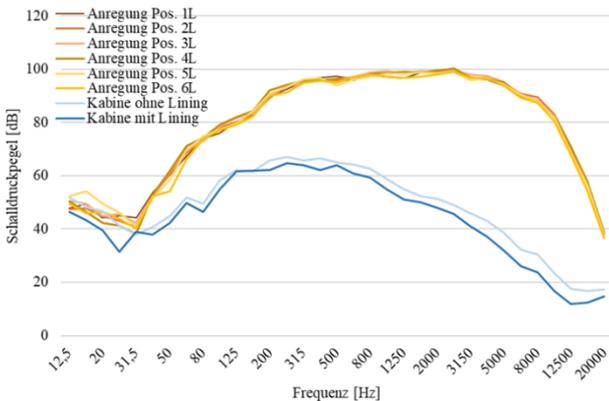


Abbildung 2: Schallpegel außerhalb und innerhalb der Kabine

Die erstaunlich gute Homogenität der Schallverteilung über die für die Transferpfadmessungen relevante Einleitungs-bereiche (unter Reduktion von Nebenschallpfaden und Reflektionen durch allseitige Anregung) wurde in weiteren Untersuchungen vermessen. Zukünftige Messungen im Projekt werden weiterhin die Verteilung auf der Außenhaut bei unterschiedlichen Anregungen untersuchen.

Power Transmission in Strukturpfaden

Um die wesentlichen Strukturschallpfade identifizieren und zumindest mit ersten Schätzwerten für ein Modell auf Basis der Statistical Energy Analysis (SEA) berechenbar zu machen, wurden Messungen mit Beschleunigungssensoren durchgeführt.

Anders als bei detaillierteren Messungen zur Modalanalyse mit Kenntnis zweier mechanisch relevanter Größen, zumeist Kraft und eine Bewegungsgröße wie etwas bei einer Messung mit Impulshammer und Beschleunigungssensor wurden hier nur in-situ-Pfade unter realitätsnaher Außenanregung verglichen.

Die vergleichende Betrachtung ermöglicht unter Annahme einer gewissen Amplitudenlinearität im gewählten Arbeitspunkt eine Bewertung, welche Strukturschallpfade wie viel Beitrag zu einer späteren Schallabstrahlung leisten.

Dazu wurde ein zentraler, besonders steifer Knotenpunkt von Spanten und Stringern mit Anbindung zur Fußbodenstruktur als Referenzpunkt zur Quantifizierung des Beschleunigungsinputs in die Struktur durch die äußere akustische Anregung gewählt, siehe rot in **Abbildung 3**.



Abbildung 3: Transferpfadanalysen der Strukturschallpfade

Dann wurden diverse Transferfunktionen von diesem Referenzanregungspunkt zu einzelnen relevanten Oberflächen gemessen, siehe blaue Pfeile.

Im Sinne der SEA und um eine vergleichende Untersuchung zu Ergebnissen mit Modalanalysen aus der Literatur oder dem späteren Projektverlauf zu ermöglichen, wurde hier eine Ersatzbetrachtung der übertragenen Leistung durchgeführt. Zwar wurden lediglich Beschleunigungswerte gemessen und keine Kraftinformationen, z.B. der anregenden Luft-Struktur-Interaktion auf der Außenhaut, aber für die hier lediglich unter gleichen Bedingungen vergleichende Proportionalitätsbetrachtung wird angenommen, dass die Leistung sich proportional zum Quadrat der Beschleunigung verhält. Dieses Verfahren wird beispielsweise in der Elektrotechnik mit dem Quadrat der Spannung unter Annahme konstanter ohm'scher Widerstände durchgeführt. Gleiches lässt sich in der Strukturmechanik unter Annahme gleichbleibender Massen-, Steifigkeits- und Dämpfungsverhältnisse in der Untersuchung auch für die mechanische Leistung aus der Beschleunigungsmessung sagen. Die dazu verwendete Power Spectral Density (PSD) [1] ermöglicht mit dem Quadrat der Beschleunigung über einem normierten Frequenzschritt weiterhin einen Vergleich im Frequenzbereich unter Vermeidung von Fehlern aus Randbedingungen der Messdatenbasis bei Frequenzbereichstransformationen.

Die Schallabstrahlung für eine bekannte vibrierende Oberfläche zu einem bestimmten Punkt im Raum kann anschließend beispielsweise durch das Rayleigh-Integral [2] berechnet werden.

Schallintensitätsmessungen von Oberflächen im Inneren

In den Messreihen wurden sowohl lokale Schallpegel an kleinen Messoberflächen wie auch generelle Schallintensitäten betrachtet, um daraus die wesentlichen Beiträge zum Kabinenschall aus von außen auf die Außenhaut einwirkenden Lärmquellen zu identifizieren.

Die Schallintensität ist dabei das bevorzugte Maß, da analog zur strukturdynamischen Power Spectral Density auch hier eine Leistungsbetrachtung (normiert auf eine Bezugsfläche) ermittelt wird. Dabei wird die abgestrahlte mechanische Leistung der Oberfläche durch Messung von zwei lokalen Schalldrücken mit definiertem Abstand in eine Information zum Schalldruck (letztlich eine physikalische Kraftinformation) und zur Schallschnelle (letztlich eine Bewegungsinformation) ermittelt. [2]

Ein wesentliches Qualitätsmerkmal für die Bewertung von Schallintensitätsmessungen ist der PI-Index, welcher sich aus der Differenz zwischen Schalldruckpegel und Schallintensitätspegel berechnet [3]. Ein hoher PI-Index tritt bei hohen Störgeräuschen auf, welche die Messergebnisse verfälschen. Dies kommt vor allem bei nicht dominanten Quellen vor.

Durch zahlreiche Reflektionen von vielen unterschiedlichen Schallpfaden und Abstrahloberflächen (Störgeräusche) in der Flugzeugkabine ist die mit einer reinen Intensitätssonde gemessene Intensitätsverteilung über die Oberfläche mit relativ hohen PI-Werten versehen, die große Bereiche der Messdatenmatrix ohne weitere Maßnahmen nahezu unbrauchbar machen.

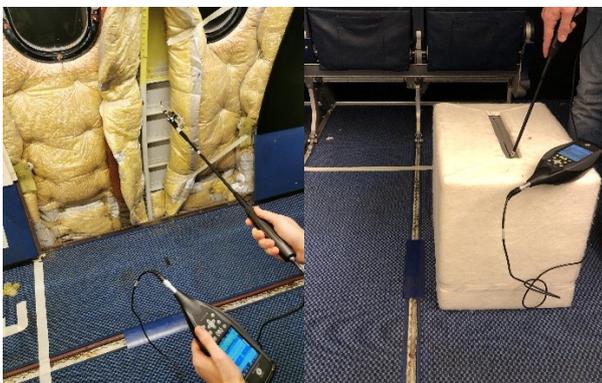


Abbildung 4: Intensitätsmessung ohne und mit Reduktion der Nebenschallquellen

Im Projekt wurde dazu eine besonders reflektionsarme Messkiste für den pragmatischen Messeinsatz auf Messflügen in VIP-Kabinen und beengten lokalen Messbereichen zur örtlichen Auflösung der Hauptschallbeiträge entwickelt, siehe Abbildung 4.

Eine Darstellung der untersuchten Messflächen der Kabineninnenseite ist in Abbildung 5 dargestellt.

1. Floor Panel Inboard
2. Floor Panel Middle
3. Floor Panel Outboard
4. Dado Gap
5. Dado Panel
6. Lower Sidewall Panel
7. Window (-Panel)
8. Upper Sidewall Panel
9. Air Conditioning/ECS Gap
10. Closure Panel
11. Service Area Panel
12. Ceiling ECS Gap
13. Ceiling

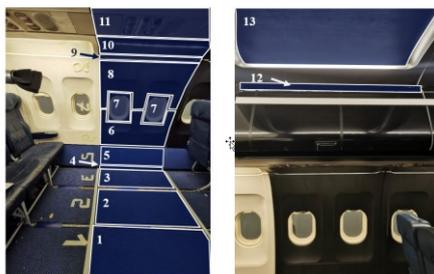


Abbildung 5. Messflächen der Analyse

Ergebnisse

Als erste Erkenntnisse konnten für das Projekt in Q1/2023 folgende Punkte ermittelt werden:

- Anregung in Klimaakkustikkammer ist hinreichend homogen (+/- 1dB im relevanten Anregungsbereich)
- wesentliche Schallpfade sind identifizierbar
- Strukturschallpfade sind für VIP-Einbauten sehr relevant
- Zahlreiche Erkenntnisse für die Vorbereitung von Detailmessungen und Modellbildung

Beiträge zum Schalldruckpegel aus Intensitätsmessungen mit Reduktion der Störreflektionen

In der folgenden Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Intensitätsmessungen für 1, 2 und 4 kHz in Terzbändern mit Reduktion von Störeinflüssen durch eine mobile Messkiste.

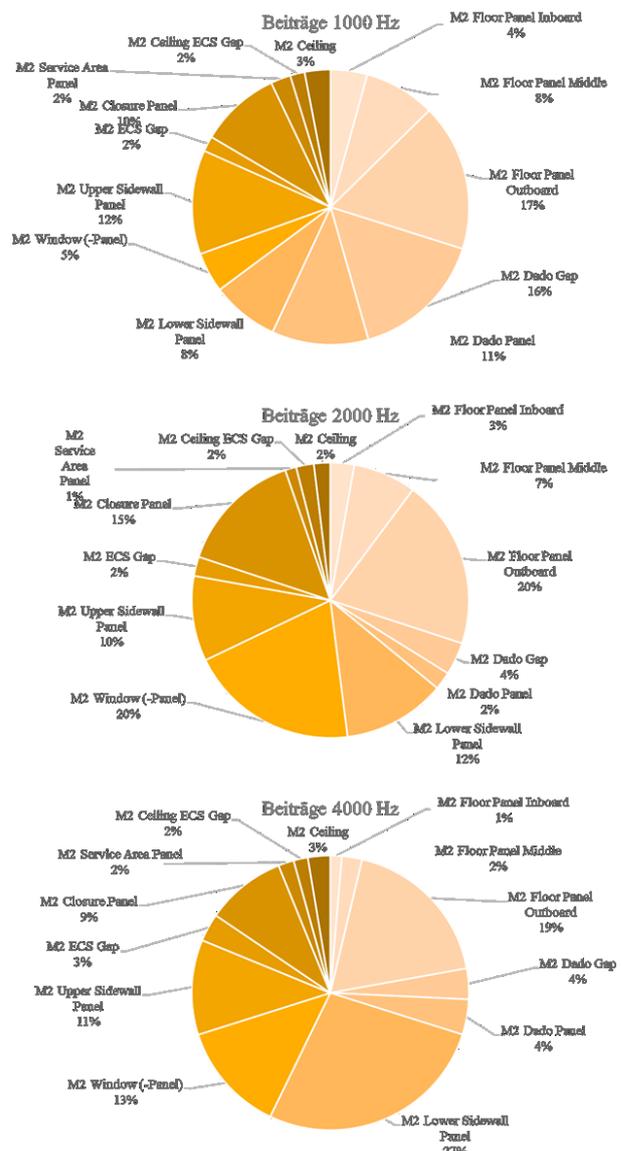


Abbildung 6 Schallbeiträge bei 1, 2, 4kHz

Das äußere Fußboden-Panel sowie einzelne Lining-Panel stellen dominante Schallpfade dar. Eine weitere Erkenntnis ist, dass die eingetragene Schallleistung in Bezug auf die Floor Panel geringer wird, je weiter in Richtung Kabinenmitte gemessen wird. Die weiteren Messergebnisse haben gezeigt, dass mit höheren Frequenzen der Anteil des Fußbodens abnimmt und dafür der Anteil der Lining-Panel zunimmt. Der gesamte Leistungsanteil sinkt mit zunehmender Frequenz.

Transmission Losses in Strukturschallpfaden

Mit Division der PSD-Kurve am Ausgangsbeschleunigungssensor durch die PSD-Kurve des Referenzanregungspunktes lassen sich zu vergleichenden Zwecken Verluste der Transferpfade ermitteln.

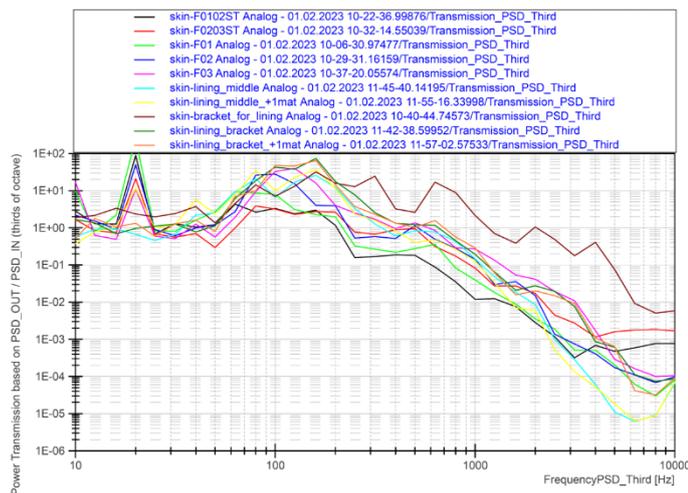


Abbildung 7: Beispielhafte Auswahl verschiedener Transferpfade

Abbildung 7 zeigt dabei einige ausgewählte Verhältnisse von Ausgangs-PSD zu PSD am Referenzanregungsmesspunkt für die in Abbildung 5 bezeichneten Flächen.

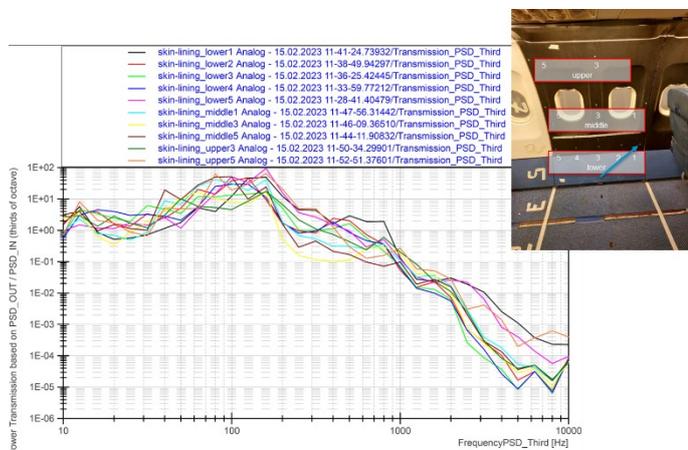


Abbildung 8: verschiedener Transferpfade für ein Lining Panel

Abbildung 8 zeigt die Transferpfaduntersuchungen für definierte Ausgangs-PSDs von Messpunkten auf dem Lining Panel mit Bezug zur Referenzanregung.

Grenzen der Untersuchung

Die Untersuchungen stellen bislang nur einen ersten Schritt zur groben Identifizierung relevanter Schallbeiträge für eine spätere Optimierung dar.

Bei den Intensitätsmessungen ist zu berücksichtigen, dass zahlreiche weitere Messungen mit anderen Messverfahren, insbesondere zur lokalen Schallpegelmessung darauf hinweisen, dass die Intensitätsmessungen insbesondere die Beiträge starker lokaler Schallquellen wie die Luftauslässe nicht korrekt abbilden.

Bei den Beschleunigungsmessungen wurden lediglich in-situ-Messungen mit Beschleunigungswerten durchgeführt. Es sind ohne Messung einer Kraftinformation keine z.B. für die FEM-Modellierung relevanten Informationen zu modalen Masse-, Steifigkeits- oder Dämpfungsparametern möglich. Allerdings lassen sich für die untersuchten Pfade in einer vergleichenden Untersuchung auch bei Veränderung einzelner Parameter Transferpfad-Verluste (Transmission Losses) für etwaige spätere SEA Modelle ermitteln.

Zusammenfassung

Um relevante Schalleinträge und deren Körper- und Luftschallpfade in die Kabine zu untersuchen wurden mehrere Messreihen bei einer akustischen Anregung auf die Außenhaut eines A320 durchgeführt.

Die Schallintensitätsmessungen haben erste Erkenntnisse über dominante Schallpfade in Flugzeugkabinen geschaffen und zudem ein verlässliches Verfahren für Messflüge etabliert, bei dem Störgeräusche durch die Verwendung einer Messkiste die Intensitäts-Messungen nicht verfälschen. Auf Messflügen werden im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes verschiedene VIP-Kabinen vermessen.

Im weiteren Verlauf werden für die identifizierten primären Schallpfade effiziente Schallminderungsmaßnahmen entwickelt, um das Gewicht aktueller Schallisolationen bei besserer Leistung deutlich zu reduzieren.

Das LuFo- Projekt ENTIRETY wird Gefördert durch



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] C. M. Harris and A. G. Piersol, *Harris' shock and vibration handbook*, McGraw-Hill, New York, 2002.
- [2] F. Fahy and P. Gardonio, *Sound and structural vibration: Radiation, transmission and response / Frank Fahy, Paolo Gardonio*, Elsevier/Academic, Amsterdam, London, 2007.
- [3] DIN EN ISO, "DIN EN ISO 15186-1 : Bestimmung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen aus Schallintensitätsmessungen," 2003, DIN EN ISO 15186-1.