

QUANTIFIZIERUNG UND MODELLIERUNG VON SCHALLLEISTUNGSBEITRÄGEN IN DER VIP FLUGZEUGKABINE

T. Ziegner*

* HAW Hamburg, Berliner Tor 5, 20099 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Die Anforderungen an eine VIP-Flugzeugkabine unterscheiden sich erheblich von Standard-Kabinen kommerzieller Fluggesellschaften. Der Fokus bei VIP-Kabinen liegt auf der Minimierung des Schalldruckpegels zwecks Erhöhung des Passagierkomforts sowie der Realisierung effizienter Besprechungen im Reiseflug. Im Rahmen meiner Masterarbeit bei der HAW Hamburg in Kooperation mit der Lufthansa Technik wurden sowohl grundlegende Untersuchungen von Schallintensitäten in einem Demonstrator als auch unter Realbedingungen im Flug durchgeführt. Aus den Messergebnissen wurden dominante Schallpfade identifiziert, um ein Schallleistungsmodell zu entwickeln. Dieses Modell berechnet den Schalldruckpegel in der Kabine, ermöglicht die theoretische Reduzierung dominanter Schallpfade und zeigt Optimierungspotentiale in der Auslegung des Schallschuttpaketes. In diesem Beitrag werden die Methodik der Schallintensitätsmessungen, deren Messergebnisse sowie die Hauptfunktionen des Schallleistungsmodells erklärt und ausgeführt.

1. EINFÜHRUNG

Die Akustik in einem Flugzeug ist eine elementare Kundenanforderung in Bezug auf das Komfortempfinden und der Kommunikationsmöglichkeiten von Passagieren und Besatzung [1]. Anspruchsvolle Kunden von VIP-Flugzeugen beauftragen die Kabinenausstatter möglichst geringe Schalldruckpegel zu realisieren. Zwei Faktoren sind bei der Auslegung und der Optimierung eines Schallschuttpaketes zu beachten. Erstens, erzeugen Flugtestprogramme zum Testen und Validieren eines bestimmten Schallschuttpaketes hohe finanzielle Belastungen [2]. Zweitens, sind Umweltsimulationen aufgrund der fehlenden Strömungsgeräusche und Triebwerksvibrationen am Boden nicht immer repräsentativ [2]. Schallschuttpaketmodelle stellen somit eine optimale Alternative dar, wenn sie zuverlässig funktionieren, einfach anzuwenden sind und die notwendige Genauigkeit aufweisen.

Die folgend vorgestellten Schallintensitätsmessungen im Flug und im Demonstrator sowie die dabei angewendeten Methodiken geben Aufschluss über dominante Schallpfade und somit Optimierungspotentiale. Für die Auswertung ist vor allem der Hörbereich der Menschen zu berücksichtigen, welcher zwischen 16 Hz und 16 kHz liegt, abhängig von Lebensalter und körperlicher Verfassung [3]. Die Ergebnisse dieser Ausarbeitung wurden im Rahmen einer Masterarbeit an der HAW Hamburg in Kooperation mit der Lufthansa Technik AG und dessen Completion Center in Hamburg erarbeitet, welches die Auslegung und Installation sowie finale Abnahme mit dem Kunden anhand Messungen im Flugbetrieb durchführt.

Die Überführung der Messergebnisse und Erkenntnisse in ein Modell ist maßgeblich, um die Auslegung im Betrieb zu vereinfachen und letztendlich Verbesserungen des Schallschuttpaketes in die Realität umzusetzen. Somit können die miteinander konkurrierenden Aspekte Reichweite, Gewicht sowie verfügbare Bauräume optimaler vereinbart werden.

2. HINTERGRÜNDE FLUGZEUGAKUSTIK

Um die relevanten Messungen durchführen zu können, ist es notwendig, die unterschiedlichen Einflussfaktoren, aus denen sich der Schalldruckpegel zusammensetzt, zu kennen und zu verstehen. Dabei sind vor allem die Schallschuttpaketmaßnahmen für verschiedene Schallquellen von Bedeutung sowie die Flughöhe und -geschwindigkeit.

2.1. Schallquellen und Einflussfaktoren

Bei Schallquellen im Flugzeug muss zwischen internen und externen Quellen unterschieden werden. Externe Quellen sind vor allem die Strömungs- und Triebwerksgeräusche [4]. Messungen haben gezeigt, dass der Schalldruckpegel in der Kabine mit einer Erhöhung der tatsächlichen Fluggeschwindigkeit von 10 % um 3-4 dB(A) ansteigt [5]. Zudem wird der Schalldruckpegel mit höherem Fluglevel geringer, da die Luftdicke sinkt und somit der Einfluss der turbulenten Grenzschicht reduziert wird [5]. Interne Quellen stammen von elektrischen und hydraulischen Systemen, der Klimaanlage und Spalten, z.B. zwischen Kabine und Frachtraum [6]. Die Übertragung in die Kabine findet über Luftschall- und Körperschallpfade statt [7]. Luftschall beschreibt die Schallübertragung aufgrund von Öffnungen und Undichtigkeiten, Körperschall beschreibt die Abstrahlung von Schall durch eine angeregte Struktur [7]. Weitere Einflussfaktoren sind lokale Effekte von Flugzeugsystemen (z.B. Pumpen im Unterbau) und die Abstrahlcharakteristik von Triebwerken [6].

2.2. Schallschuttpaketmaßnahmen

Maßnahmen zur Schallschuttpaketung können entweder die Quelle selbst betreffen oder den Schallpfad, über den der Schall übertragen wird [6]. In der Luftfahrt werden vor allem passive anstatt aktiven Methoden verwendet, unter anderen da die Performance der Systeme und deren Verwendung in realen Umgebungen bekannt ist [8]. Wichtige passive Wirkmechanismen, welche in unterschiedlichen Kombinationen abhängig vom zur Verfügung stehenden Bauraum verwendet werden, sind das Hinzufügen von Masse und schallschuttpaketabsorbierendem Material sowie das Entkoppeln von Strukturverbindungen [6].

Steife Verbindungen zwischen Flugzeugstrukturen wirken sich negativ auf den Schalldruckpegel in der Kabine aus [9]. Deswegen werden Vibrationsdämpfer, bestehend aus einem Metallstift und zwei Gummiteilen, verwendet. Vibrationsdämpfer gibt es in verschiedenen Formen, Größen sowie Dicken und durch ihre Verwendung wurde in neueren Flugzeugen der Schalldruckpegel um 5-6 dB(A) reduziert [10]. Bei begrenztem Bauraum werden mit Metall versehene Vinylfolien oder viskoelastische Klebestreifen mit Aluminiumbeschichtung an der Seitenverkleidung oder direkt am Rumpf angebracht [6]. Absorbierendes Material wird abhängig vom Funktionsprinzip in Membran- und Resonanzabsorber sowie poröse Absorber mit unterschiedlichen Absorptionsbändern unterteilt [9]. Die verwendeten Materialien für Sitze, Kabinenverkleidung und Teppiche sind von hoher Bedeutung für die Absorptionseigenschaften des Schallisolierungskonzepts.

Die Möglichkeit zur Verwendung von den beschriebenen Schalldämmmaßnahmen unterscheidet sich bei Standard- und VIP-Kabinen erheblich. Die Gründe dafür sind zum einen der größer ausfallende, zur Verfügung stehende Bauraum bei VIP-Kabinen, wodurch ein höherer Anteil von absorbierendem Material eingebracht werden kann [11]. Zum anderen besteht in VIP-Kabinen die Möglichkeit aufgrund der geringen Nutzlast (Passagier und Fracht) einen höheren Masseanteil in die Seitenverkleidung zu integrieren als bei Standard-Kabinen.

3. MESSVERFAHREN FÜR SCHALLINTENSITÄTSMESSUNGEN IM FLUG

Die Möglichkeit Messungen miteinander zu vergleichen und Regelmäßigkeiten festzustellen wird durch ein einheitliches Messverfahren sichergestellt. Für Messungen im Flug wird aus der DIN EN ISO 9614-2 (Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen, Teil 2; Messung mit kontinuierlicher Abtastung) ein reproduzierbares Messverfahren entwickelt, um es im Flug anzuwenden. Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen nach [12] beschrieben.

3.1. Grundlagen DIN EN ISO 9614-2

Die DIN EN ISO 9614-2 beschreibt, dass für die Intensitätsmessungen eine zu untersuchende Messfläche in angrenzende Segmente (mindestens vier Segmente) aufgeteilt wird, welche entlang eines festgelegten Pfades abgetastet werden. Bei der Messung können Intensitäten aus Fremdschallquellen durch Schallschirme abgeschirmt werden. Die Intensitätssonde wird bei der manuellen Messung mit einer Geschwindigkeit von 0,1 m/s bis 0,5 m/s an dem Segment mindestens 20 Sekunden mit einem Abstand von ca. 20 cm entlanggeführt. Die Teilschalleistungen lassen sich nach Formel (1) berechnen.

$$(1) P_i = I_{ni} \cdot S_i$$

- P_i : Teilschalleistung eines Segmentes
- I_{ni} : gemittelte Normalkomponente der Schallintensität über ein Segment
- S_i : Flächeninhalt eines Segmentes

Aus den Teilschalleistungen der Segmente wird der Schalleistungspegel der Messfläche nach Formel (2) ermittelt. Dabei lassen sich dominante Schallpfade

erkennen, wenn sie einen entscheidenden prozentualen Anteil zur gesamten Schalleistung beitragen.

$$(2) L_W = 10 \cdot \log \left| \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{P_0} \right| \text{ dB}$$

- L_W : Schalleistungspegel
- P_0 : Bezugsgröße der Schalleistung

In der DIN EN ISO 9614-2 sind drei Kriterien zur Bestimmung der Genauigkeitsklasse und Gültigkeit beschrieben. Einschränkungen für Messungen ergeben sich, wenn diese Kriterien, welche aus den Feldindikatoren (Messflächenschalldruck-Intensitäts-Indikator, kurz PI-Index, und Indikator zur Kennzeichnung negativer Teilschalleistungen) berechnet werden, nicht oder nur teilweise erfüllt werden.

3.2. Entwicklung Messverfahren im Flug

Da Flugtestprogramme mit einem hohen finanziellen Aufwand verbunden sind und die zur Verfügung stehende Zeit von Messungen auf gleicher Flughöhe und Geschwindigkeit stark limitiert ist, muss ein einfaches, effizientes und reproduzierbares Messverfahren entwickelt werden [2]. Dafür werden in Zusammenarbeit mit dem LuFo-Projekt ENTIRETY (Engineered Tailored Tranquility) Testmessungen an einem A320 Rumpfsegment der HAW Hamburg am HCAT (Hamburg Centre of Aviation Training-Lab) durchgeführt.

Für die Umweltsimulation werden in der Akustikklimakammer vom HCAT (Hallraum) Lautsprecher außerhalb des Flugzeugrumpfes platziert, um ein möglichst homogenes und diffuses Schallfeld zu erzeugen. Referenzmessungen an der Rumpfaußenseite zeigen, dass die Anregung nahezu homogen ist:

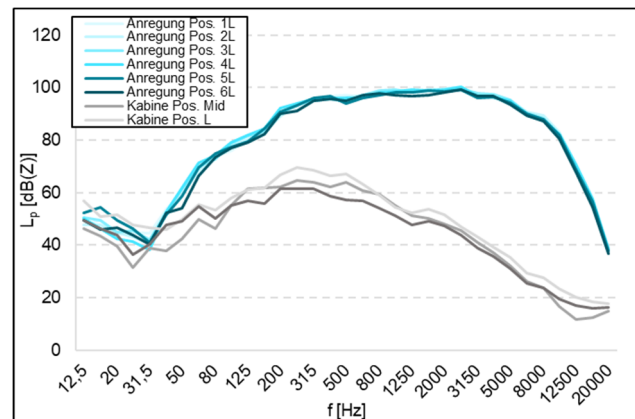


BILD 1. Gemessener Schalldruckpegel außerhalb und innerhalb vom Rumpf

Für die Messung wird die Messfläche abhängig von Boden, Seiten- und Deckenaufbau der Kabine in unterschiedliche Messbereiche eingeteilt.

Segment/Panel	Größe [m²]
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

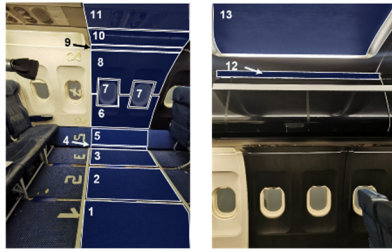


BILD 2. Definierte Segmente (Panels) der Messfläche

Vorversuche haben gezeigt, dass Messungen ohne Schallschirm aufgrund der hohen Störschallpegel relativ hohe Werte für den PI-Index ergeben und somit nahezu unbrauchbar sind. Die Messungen werden deswegen mit einer Intensitätssonde und einer eigens gebauten Messkiste (Innendurchmesser: 40 x 25 cm) durchgeführt, welche auf das zu messende Segment gesetzt werden kann. Aufgrund der Verwendung der Messkiste und der folgenden Messungen im Flugbetrieb (geringe Messzeit) sind Abweichungen von der Norm notwendig:

- 1) Segmente werden nicht komplett abgetastet, sondern nur die Fläche von der Größe der Messkiste. Die gemessene Intensität des Teilbereichs wird auf das komplette Segment angerechnet.
- 2) Segmente werden nur horizontal oder vertikal abgetastet.
- 3) Es werden keine Wiederholungsmessungen durchgeführt. Nach Norm kann somit Kriterium drei für die Genauigkeitsklasse zwei nicht überprüft werden.

4. ERGEBNISSE

Dominante Schallpfade der Messung des Kabinenquerschnitts lassen sich durch einen hohen prozentualen Beitrag eines Segmentes zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel erkennen. Für Flugzeugkabinen ist vor allem der für die Sprachverständlichkeit entscheidende Frequenzbereich von 0,5 kHz bis 4 kHz interessant [13]. Der sogenannte Sprach-Störschallpegel (Speech-Interference-Level – SIL) wird somit häufig für die Bewertung des Geräuschkomforts in Flugzeugkabinen auf den 1 kHz, 2 kHz und 4 kHz Frequenzbändern angegeben [14]. Folgend werden beispielhaft die Beiträge der zwölf Segmente aus Bild 2 für 2 kHz dargestellt.

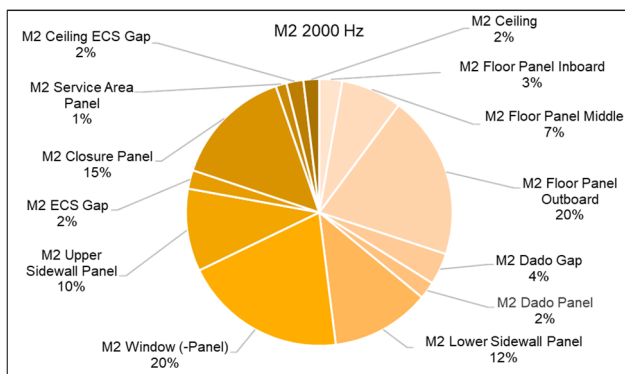


BILD 3. Gemessene Schallbeiträge der Messreihe „M2“ bei 2 kHz

4.1. Erkenntnisse Bodenpaneele

Eine besondere Auffälligkeit wurde bei der Betrachtung der Intensitätspegel der Fußbodenpaneele festgestellt, wie in der folgenden Abbildung zu erkennen:

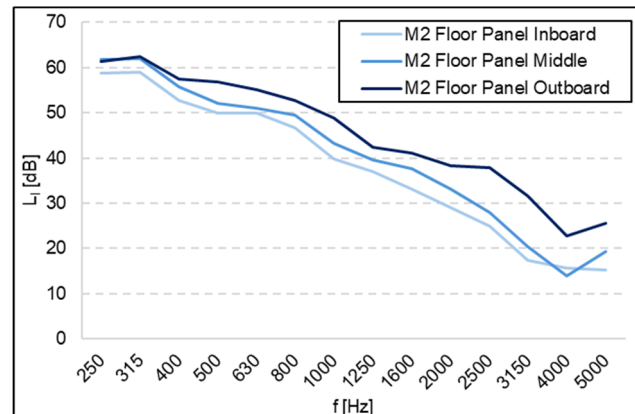


BILD 4. Gemessener Intensitätspegel der Messreihe „M2“ für Bodenpaneele

Der Intensitätspegel wird geringer, je weiter in Richtung Kabinenmitte gemessen wird. Diese Abnahme kann auf die beiden Schallübertragungsmechanismen Luft- und Körperschall zurückgeführt werden, deren Einzelleistungen zusammen die Gesamtschallleistung ergibt. In Bezug auf die Bodenpaneele kann folgende Unterscheidung getroffen werden:

- 1) Luftschall: zunehmender Abstand zur Außenhaut des Flugzeuges und somit zur Quelle, welche in diesem Fall angenommen der Frachtraum ist
- 2) Körperschall: geringere Anregung der Struktur von Bodenpaneelen durch den zunehmenden Abstand zur Außenhaut

Der Einfluss der Luftschallanregung dürfte dabei aufgrund der nahezu homogen gemessenen Schallverteilung im Frachtraum jedoch geringer sein als der Einfluss durch Körperschall. Der Einfluss auf die Bodenpaneele wird mit längerer Strecke bis zur Kabinenmitte aufgrund der zunehmenden Dämpfung geringer.

4.2. Dominante Schallpfade

Durch mehrere Messflüge ließen sich dominante Schallpfade aus den Messungen im HCAT bestätigen, da folgende Regelmäßigkeiten festgestellt worden sind: Das obere Seitenwandpaneel sowie Spalte und Luftauslässe sind wiederkehrende dominante Schallpfade. Nicht dominante Schallpfade entspringen der Deckenverkleidung und Bodenpaneele in der Kabinenmitte.

5. ÜBERFÜHRUNG DER ERKENNTNISSE IN EIN SCHALLEISTUNGSMODELL

Für den Aufbau eines Schalleistungsmodells sind die Anforderungen zu definieren und dessen Einsatzgebiet zu berücksichtigen. Daraus ergeben sich notwendige Vereinfachungen. Zusätzlich sind wirtschaftliche Aspekte bei der Anwendung und Weiterentwicklung abzuwägen.

5.1. Anforderungen

Für die Definition der Anforderungen ist es essenziell das Ziel des Schalleistungsmodells festzulegen: Dies soll ein einfaches, grundlegendes Modell sein, welches aus

Intensitätspegeln einen Kabinen-Schalldruckpegel berechnet. Es muss die Möglichkeit zulassen, diesen Pegel durch ein iteratives Verfahren zu reduzieren. Das Modell soll den Auslegungsprozess für Unikatfertigungen im Lufthansa Technik Completion Center für VIP-Flugzeuge unterstützen und vereinfachen. Neben der Prognose des Schalldruckpegels soll das Modell darstellen, wie welche Änderungen im Schallsisolierungspaket auf bestimmten Schallpfaden den Schalldruckpegel beeinflussen. Die Modellierung darf nicht zu komplex werden, d.h. Eingabeparameter sollten auf ein sinnvolles Maß beschränkt werden. Dies hat drei Hintergründe:

- 1) Eingabeparameter können teils nur aufwendig bestimmt werden.
- 2) Explizite Kundenwünsche machen eine akustisch optimale Auslegung nicht immer möglich.
- 3) Die Sensitivität auf das Endergebnis wird mit einer hohen Anzahl an Eingabeparametern eingeschränkt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt im Kontext Lufthansa Technik betrifft die geringen, einstelligen Produktionsmengen pro Jahr. Das Modell wird somit nicht häufig angewendet, muss auf der einen Seite aufgrund der Produktionsmengen generisch und grob sein und auf der anderen Seite ausreichend gut der Realität entsprechen.

Weitere Aspekte betreffen die Spiegelung der Modellierungsrichtung sowie der Möglichkeit zur Modellerweiterung. Die Spiegelung der Modellierungsrichtung bezieht sich darauf, dass das Modell einen bestimmten Pegel vorgegeben bekommt und mögliche Schallsisolierungskonzepte vorschlägt. Die Möglichkeit zur Modellerweiterung macht es notwendig, ein Modell zu erstellen, welches einfach verständlich und anpassbar ist.

5.2. Funktionen des Modells

Aus den Anforderungen lassen sich die Funktionen des Modells ableiten. Dieses lässt sich in zwei Hauptfunktionen unterteilen. Die erste Hauptfunktion beschreibt die Berechnung des Schalldruckpegels. Da das grundlegende Modell Messwerte als Eingangsgröße hat, müssen zuerst die (um Messfehler korrigierten) Messwerte eingegeben werden (Eingangsgrößen): Schallintensitäten der einzelnen Segmente, Nachhallzeit der Kabine und das betrachtete Kabinenvolumen. Anschließend findet die Klassifizierung der Paneele nach Anwendung (z.B. in Seitenwand- und Bodenaufbauten) statt. Aus der Darstellung der Beiträge einzelner Paneele zum gesamt einfließenden Schalleistungspegel lassen sich dominante Schallpfade und somit Optimierungspotenziale identifizieren.

Diese Optimierungspotenziale können mit der zweiten Hauptfunktion, der Minimierung vom Schalldruckpegel, umgesetzt werden. Technisch wird dies im Modell durch die Manipulation der Eingabeparameter durchgeführt. Entsprechend der vorgestellten Schalldämmmaßnahmen in Abschnitt 2.2, ergeben sich für die Minimierung die folgenden fünf Optimierungsbausteine:

- 1) Erhöhung der Masse
- 2) Verringerung der Spalte
- 3) Entkopplung der Struktur
- 4) Veränderung der Steifigkeit von Paneelen
- 5) Erhöhung der Gesamtaborption

Für die Minimierung im Modell werden mehrere Iterationsschleifen durchlaufen, bei denen jeweils die Beiträge eines Schallpfades durch die Optimierungsbausteine reduziert werden. Das Modell gibt

dem Anwender automatisiert Vorschläge, wie welcher Schallpfad als nächstes zu minimieren ist.

Die Funktionen des Schalleistungsmodells werden in einem Ablaufplan nach DIN 66001 festgehalten. Dieser Plan „beschreibt durch Verwendung von Sinnbildern symbolisch den Ablauf oder die Reihenfolge logischer Operationen, die zur Lösung von Problemen notwendig sind“ [15].

6. EXEMPLARISCHE MINIMIERUNG

Folgend werden Highlights der Minimierung anhand der Testreihe „M2“ im HCAT beispielhaft aufgezeigt. Der Ausgangspunkt der Minimierung ist das erfolgreiche Durchlaufen der ersten Hauptfunktion des Schalleistungsmodells. Für die exemplarische Minimierung wird angenommen, dass der Ziel-Schalldruckpegel 3 dB SIL 3 unter dem berechneten Schalldruckpegel von 47,69 dB SIL 3 liegen soll. Das Modell fragt bei der Anwendung zuerst ab, ob der Optimierungsbaustein Erhöhung der Gesamtaborption angewendet werden kann. Dies wird in diesem Beispiel vorgenommen, da sich die Kabine im HCAT in einer Standardkonfiguration befindet und somit das Einbringen von zusätzlichem absorbierendem Material bei der Anwendung auf ein VIP-Flugzeug realistisch ist. Technisch erfolgt die Umsetzung im Modell durch die Reduzierung des Eingabeparameters der gemessenen Nachhallzeit von 1,67 Sekunden auf 1,4 Sekunden, wodurch der Schalldruckpegel in der Kabine um 0,74 dB sinkt.

Folgend werden mehrere Iterationsschleifen durchlaufen, bei denen mehrere Schallpfade jeweils reduziert werden. Das Modell schlägt zuerst vor, den dominantesten Schallpfad mit bestimmten Materialien, abhängig von der Optimierungsrichtung und Paneel-Klassifizierung, zu reduzieren.

Minimierungsvorschlag		Beispiele Mögliche Optimierungen		
Aktuell	M2 Floor Panel	Zusätzliches Gewicht	Veränderte Konfiguration	Geringerer Spalt
Dominanter Schallpfad:	Outboard	[kg/m ²]		
	19%	Teppichunterbau: 2,5	N/A	N/A
Klassifizierung:	Bodenaufbau	VIP Teppich mit Unterbau: 6,7	N/A	N/A
Optimierungsrichtung:	Masse	STD Teppich: 3	N/A	N/A
		Masselayer 2: 1,4	N/A	N/A

BILD 5. Minimierungsvorschlag und Beispiele zur möglichen Optimierung aus dem Schalleistungsmodell

Die realistische Erhöhung der Masse wird somit durch Verwendung von Eigenschaften echter Materialien im (VIP-) Flugzeugbau unterstützt. Durch die Klassifizierung der Segmente in der ersten Hauptfunktion zeigt das Modell beim Minimierungsvorschlag nur sinnvolle Materialien an. Durch die Eingabe einer bestimmten Masse und die Berechnung des Δ dB-Wertes mit Hilfe des Massegesetzes wird der Beitrag des Schallpfades zum gesamt einfließenden Schalleistungspegel im Modell reduziert. Für die erste Iteration im Beispiel wird ein zusätzlicher Teppichunterbau mit 2,5 kg/m² gewählt.

Für dieses Anwendungsbeispiel müssen mit Hilfe der Optimierungsvorschläge vom Modell insgesamt 9 Iterationen durchlaufen werden um den Schalldruckpegel um 3 dB SIL 3 zu reduzieren. Die folgende Abbildung stellt das Ergebnis dieser Minimierung dar.

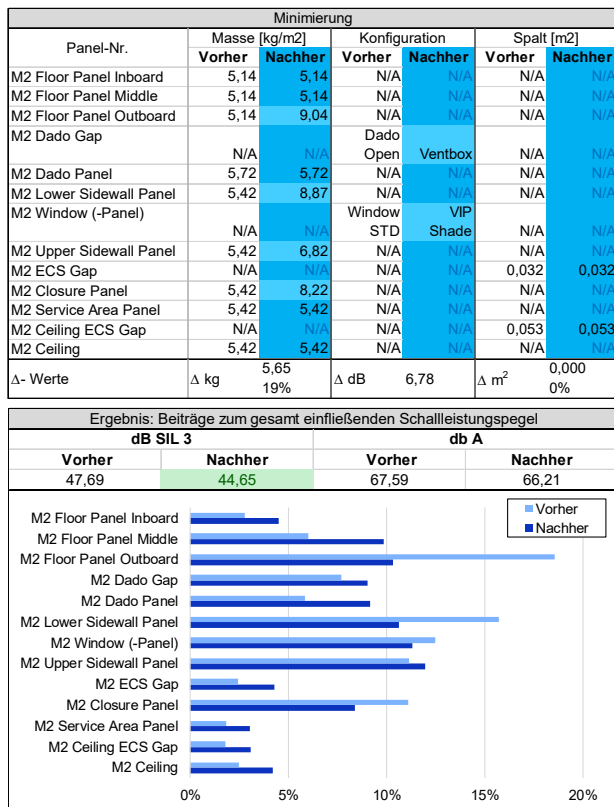


BILD 6. Endergebnis der Minimierung nach Iteration 9

Durch die Iterationen wurden dem Schallschirmpaket 5,65 kg und somit 19 % vom Gesamtgewicht hinzugefügt. Neben dem Hinzufügen von Masse wurden zudem Konfigurationen von einem Spalt und einer Fensterverkleidung geändert. Der berechnete Schalldruckpegel beträgt nach der neunten Iteration noch 44,65 dB SIL 3. Bei der Minimierung wurden die Beiträge der einzelnen Schallpfade zum gesamt einfließenden Schalleistungspegel zunehmend angeglichen. Dieses Prinzip ist die Grundlage für eine effiziente Auslegung, damit beispielsweise nicht unnötig viel Masse auf einem Schallpfad eingebracht wird, welcher kein dominanter Schallpfad ist. Somit sind gleiche prozentuale Beiträge zum gesamt einfließenden Schalleistungspegel ein Gütekriterium für effiziente Auslegungen und resultieren in Kosten- und Gewichtseinsparungen.

7. GRENZEN DER UNTERSUCHUNG

Intensitätsmessungen unter realen Bedingungen resultieren durch die Verwendung der Messkiste als notwendigen Schallschirm bereits in einer deutlichen Steigerung der Messgenauigkeit. Dadurch werden verwertbare Ergebnisse erzielt, aus welchen sich dominante Schallpfade bestimmen lassen.

Bei der Anwendung des Modells auf verschiedene Referenzmessungen und somit unterschiedlichen Eingabeparametern, hat sich ergeben, dass der berechnete Schalldruckpegel stets geringer ist als der gemessene Schalldruckpegel. Da das Modell im ersten Schritt die Messwerte als Eingabeparameter zur Berechnung des Schalldruckpegels verwendet, können fehlerhafte Messungen deswegen eine Fehlerquelle darstellen. Dies kann verschiedene Gründe haben.

- 1) Erstens könnten die gemessenen Schallintensitäten aufgrund der Konstruktion (im Inneren ist absorbierendes Material verbaut) der verwendeten Messkiste und dem Messverfahren geringer sein als die realen Intensitäten. Die Eingangswerte wären zu gering und der berechnete Pegel ebenfalls.
- 2) Zweitens besteht die Möglichkeit, dass bei der Definition der Segmente nicht alle Schallpfade berücksichtigt worden sind. Diese würden nicht in die Berechnung einfließen, den gemessenen Schalldruckpegel jedoch trotzdem beeinflussen.
- 3) Drittens könnte die Ursache im gemessenen Schalldruckpegel liegen, welcher auch durch Schallquellen beeinflusst werden könnte, die nicht im definierten Messbereich liegen.

Neben der Verbesserung der Messgenauigkeit von Intensitäten (Eingabeparameter) stellt das Modell noch nicht die akustischen Zusammenhänge genau dar, z.B. die Unterscheidung zwischen Luft- und Körperschall für die Implementierung der Optimierungsbausteine Steifigkeit und Entkopplung. Diese sind aufgrund der gewählten Systemgrenzen im Modell nicht berücksichtigt. Des Weiteren ist die in den Anforderungen erläuterte Spiegelung der Modellierungsrichtung noch nicht berücksichtigt.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Dominante Schallpfade sind anhand ihrer Beiträge zum gesamt einfließenden Schalleistungspegel zu erkennen. Für deren Identifizierung ist im realen Kontext ein stabiles Messverfahren notwendig, bei dem Störgeräusche das Ergebnis nicht verfälschen. Das entwickelte Verfahren erfüllt dieses Kriterium und kann in verschiedenen Forschungsbereichen der Akustik von Flugzeugen und primär bei Messflügen verwendet werden. Optimierungspotentiale liegen vor allem in der Erhöhung der Messgenauigkeit sowie der Bestimmung einer Korrekturkurve für den verwendeten Schallschirm.

Mit dem Modell ist es möglich in kürzester Zeit, nach einmaliger Eingabe der Messergebnisse, qualitative Vergleiche von unterschiedlichen Optimierungsmöglichkeiten anzustellen. Für den definierten Anwendungsfall stellt das Modell eine sehr gute und wirtschaftliche Möglichkeit zur Unterstützung des Auslegungsprozesses bei Lufthansa Technik dar. Hervorzuheben ist, dass der Anwender des Schalleistungsmodells ein erfahrener Ingenieur sein sollte, der z.B. realistisch einschätzen kann, ob der Bauraum bei der Minimierung mit bestimmten Materialien ausreicht. In Zukunft gilt es, das Modell durch die Implementierung weiterer akustischer Zusammenhänge sowie durch Erkenntnisse aus dessen Betrieb zu erweitern. Strukturpfade werden im weiteren Verlauf vom ENTIRETY Projekt untersucht und zusätzliche VIP-Kabinen auf Flügen vermessen.

Die Messergebnisse, das entwickelte Messverfahren und das Schalleistungsmodell erlauben es, weitere Potentiale in zukünftigen Auslegungen auszuschöpfen. Das eingesparte Gewicht nicht dominanter Schallpfade kann entweder für dominanter Schallpfade reinvestiert werden oder resultiert in einer erhöhten Betriebseffizienz und damit verbundenen Einsparungen an CO₂-Emissionen.

Das LuFo-Projekt ENTIRETY wird gefördert durch das



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ISO 9614-2 Bestimmung der Schalleistungspegel
von Geräuschquellen aus
Schallintensitätsmessungen, Teil 2; Messung mit
kontinuierlicher Abtastung,“ Berlin, 1996.

- [13] H. Lazarus, C. A. Sust, R. Steckel, M. Kulka und P. Kurtz, Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation, Springer-Verlag, 2007.
- [14] E. Parizet, Y. Padayashi und O. Collery, „Efficiency of loudness models for the evaluation of airplane cockpit noise comfort,“ in *Acoustics 2012*, 2012.
- [15] E. Hering, Software-Engineering, Wiesbaden: Springer-Verlag, 1984.

Literaturverzeichnis

- [1] W. Timm, „Lufthansa Technik on air - Episode 02: VIP aircraft,“ [Online]. Available: <https://www.lufthansa-technik-broadcast.com/aviation-podcasts.html>. [Zugriff am 5 September 2024].
- [2] U. Orrenius, V. Cotoni und A. Wareing, „Analysis of sound transmission through aircraft fuselages excited by turbulent boundary layer or diffuse acoustic pressure fields,“ in *38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Ottawa, Canada, 2009, pp. 2637-2645.
- [3] M. Möser, Technische Akustik, Springer-Verlag, 2015.
- [4] Luminary Air Group, „Aircraft Insulation Basics,“ [Online]. Available: <https://luminary.aero/cabin-comfort-systems/aircraft-insulation-basics/>. [Zugriff am 1 September 2024].
- [5] N. Hu, H. Buchholz, und M. Herr, „Contributions of Different Aeroacoustic Sources to Aircraft Cabin Noise,“ in *19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Berlin, 2013.
- [6] J. F. Wilby, „Interior Noise of General Aviation Aircraft,“ in *SAE Transactions, Vol. 91*, 1982, pp. 3133-3144.
- [7] R. Sinambari und S. Sentpali, Ingenieurakustik, Frankenthal und München: Springer-Verlag, 2014.
- [8] A. Paonessa, „The passive and active noise control strategy in the aircraft interior noise,“ in *Journal de Physique IV Proceedings*, 1994, pp. C5-51-C5-53.
- [9] A. Y. Zverev, „Noise Control Mechanisms of Inside Aircraft,“ in *Acoustical Physics, Vol. 62, No. 4*, Moscow, Russia, 2016, p. 478-482.
- [10] J. Weisbeck, „Quieting aircraft cabin noise,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/amd0415-reducing-cabin-noise-aircraft/>. [Zugriff am 8 September 2024].
- [11] Lufthansa Technik AG, „VIP Aircraft Services - It's all about you,“ [Online]. Available: <https://www.lufthansa-technik.com/vip-aircraft>. [Zugriff am 25 November 2022].
- [12] DIN - Deutsches Institut für Normung, „DIN EN