

Flugzeugakustik

Schalleistungsbeiträge in der Flugzeugakustik

TOM ZIEGNER UND BENEDIKT PLAUMANN – HAW Hamburg, TJERK TEWS – Lufthansa Technik AG



Herr Prof. Dr.-Ing. Benedikt Plaumann lehrt seit 2020 an der HAW Hamburg. Seine Forschungsinteressen liegen in den Bereichen Noise, Vibration und Schock sowie elektrische Antriebssysteme.



Herr Tom Ziegner hat sein Masterarbeit zum Thema VIP-Kabinenakustik verfasst und sein Studium M. Sc. Flugzeugbau an der HAW abgeschlossen. Mittlerweile ist er als Projektmanager bei Lufthansa Technik im Engineering beschäftigt.

» An die Qualität der Akustik in einem Flugzeug bestehen besondere Kundenanforderungen, vor allem bei Flugzeugen mit VIP-Ausstattung hat sie einen hohen Stellenwert. Sie wirkt sich auf den Komfort, auf die Möglichkeit zur Erholung und zum Abhalten von Besprechungen und damit direkt auf die Kundenzufriedenheit aus. Eine Steigerung der Kundenzufriedenheit durch geringere Schalldruckpegel in der Flugzeugkabine wird durch die Optimierung von verbauten Schallisierungspaketen angestrebt. Die Optimierung von Schallpfaden ermöglicht es, geringere Schalldruckpegel in der Kabine zu realisieren oder die Betriebseffizienz von Flugzeugen durch Gewichtseinsparungen zu erhöhen. Die Umsetzung einer solchen Optimierung ist jedoch eine Herausforderung, da einerseits Flugtestprogramme einen hohen finanziellen Aufwand bedeuten, während Umweltsimulationen andererseits am Boden aufgrund der fehlenden Strömungsgeräusche und Triebwerksvibrationen nicht immer repräsentativ sind. Eine kostengünstigere und effizientere Lösung ist hier der Einsatz von validierten robusten Prognosewerkzeugen. Für ihre Entwicklung sind u. a. Informationen über dominante Schallpfade in die Kabine sowie über die Schallübertragungsmechanismen der einzelnen Schallpfade erforderlich.

Im Rahmen der Masterarbeit „Quantifizierung und Minimierung von Schalleistungsbeiträgen in der VIP-Flugzeugkabine und Prognose des Kabinenpegels anhand eines Schalleistungsmodells“ von Tom Ziegner wurden zunächst Schallintensitätsmessungen in einem Demonstrator und anschließend auf mehreren Messflügen in realer Umgebung durchgeführt. Die Masterarbeit wurde an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg in Kooperation mit der Lufthansa Technik und dessen Completion Center in Hamburg bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen. Benedikt Plaumann betreute die Masterthesis als Erstprüfer, Tjerk Tews als Zweitprüfer.

Schallintensitätsmessungen in einem Demonstrator. Erstes Ziel war, mit Schallintensitätsmessungen den insgesamt in die Kabine eingetragenen Schalleistungspegel zu ermitteln und die dominanten

Schallpfade anhand der prozentualen Beiträge einzelner Schallpfade zum Gesamtschalleistungspegel zu identifizieren. Die Messungen erfolgten zunächst in einem Demonstrator. Hierzu diente das etwa 5 m lange A320-Rumpfsegment im Hamburg Center of Aviation Training-Lab (HCAT) der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Ein weiteres Ziel war die Entwicklung eines Messverfahrens für Schallintensitätsmessungen, das für Messflüge und die dort bestehenden Rahmenbedingungen verwendet werden kann. So steht z. B. nur eine kurze Messzeit auf Reiseflughöhe zur Verfügung, die die Zahl der Messpunkte stark einschränkt. Hinzu kommt der begrenzte Raum in einer fertiggestellten Flugzeugkabine. Zudem sind die auf einem Messflug von der Flugsicherung vorgegebene Flughöhe und Fluggeschwindigkeit ein Aspekt, der aufgrund unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten und Triebwerksdrehzahlen bei der Auswertung berücksichtigt werden muss.

Modifizierte Messverfahren. Die Messungen wurden nach DIN EN ISO 9614-2 [1] unter Berücksichtigung der aus den beschriebenen Rahmenbedingungen resultierenden Abweichungen durchgeführt. Für die Schallintensitätsmessungen wurde ein zwei Spant breiter Querschnitt des Flugzeugrumpfs in 13 Segmente eingeteilt, die dann einzeln abgetastet wurden. Nach den Normvorgaben ist ein Schallschirm zu verwenden, wenn in der Messumgebung hohe Störschallpegel auftreten. Da dies vor allem bei Messflügen, aber auch in den Demonstratormessungen der Fall ist, wurde eine „Intensitätskiste“ genannte Vorrichtung gebaut, die auf das zu vermessende Segment gesetzt werden kann. Sie hat ein Innenmaß von 40 cm × 25 cm und besteht aus Standard-sandwichpanels, die von außen mit halbzölligem Filz sowie innen mit 40 mm dickem offenporigem Schaum (Material: Basotect®) bezogen sind. Die Intensitätssonde wird durch einen Spalt in die Intensitätskiste eingeführt. Durch den Spalt ist es möglich, die Abtastung entlang eines festgelegten Pfades durchzuführen. Aufgrund der Verwendung der Intensitätskiste und ihrer Abmessungen wird von einem Segment immer nur jeweils

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



Herr Dipl.-Ing. (TU) Tjerk Tews

ist Fachexperte für VIP-Kabinenakustik und Design Verification Engineer für Flugzeugmöbel. Studiert TU-Harburg Maschinenbau Fachrichtung Flugzeugsystemtechnik.

eine Teilfläche in Größe des Innenmaßes der Intensitätskiste abgetastet und die gemessene Intensität dann auf die Gesamtfläche übertragen. Da die Intensitätskiste nicht quadratisch ist, muss entweder horizontal oder vertikal abgetastet werden, da ein Wechsel der Abtastrichtung in einer unterschiedlichen Teilfläche resultieren würde. Vorversuche zeigten, dass horizontales und vertikales Abtasten keine Unterschiede bedingt. Um die Gesamtdauer der Messung zu halbieren, wurde auf Wiederholungsmessungen jedes Segmentes verzichtet. Dies wirkte sich jedoch auf die Genauigkeitsklasse der Messungen aus. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte in einem sich aus den oberen und unteren Grenzfrequenzen des verwendeten Messequipments ergebenden Frequenzbereich von 250 Hz bis 5000 Hz, eingeteilt in 14 Terzbänder.

Anregung in der Akustikklimakammer.

Die Anregung erfolgte durch drei Oktaederlautsprecher innerhalb der als Hallraum funktionierenden Akustikklimakammer. Die Lautsprecher waren mittels Stativen auf unterschiedlichen Höhen auf einer Seite des Flugzeugrumpfs montiert, um ein möglichst homogenes, diffuses Schallfeld auf der für die Untersuchungen gewählte Referenzseite zu erzeugen. Dieses Schallfeld wurde durch die Messung des Schalldruckpegels mit 10 cm Abstand zum Flugzeugrumpf bei verschiedenen Höhen untersucht. Ebenso wurde der Schalldruckpegel auf der den Lautsprechern gegenüberliegenden Seite des Flugzeugrumpfs sowie an verschiedenen Positionen in der Kabine gemessen.

Geringfügig unterschiedliche Pegel auf der linken und rechten Seite in der Akustikklimakammer resultierten ebenfalls in entsprechend unterschiedlich hohen Pegeln auf beiden Seiten in der Kabine. Da die Pegel für die verfolgten Untersuchungsziele und der relativen Transmissionsmessung auf beiden Außenseiten des Rumpfsegmentes jedoch sogar sehr ähnlich waren, konnte von einer homogenen Schallverteilung im Messbereich ausgegangen werden. Da sich der gewählte Messbereich lediglich auf der linken Seite (mit Oktaederlautsprechern) des Flugzeugrumpfes befindet, bei dem auf verschiedenen Höhen nahezu identische Pegel gemessen worden sind, kann dort von einer homogenen Schallverteilung ausgegangen werden. Die Anregung von der anderen Seite erfolgte in nur geringfügig verminderter Höhe, wurde für die Messung aber nicht betrachtet.

Ergebnisse – Verwendung der Intensitätskiste.

Zur Ermittlung der Wirksamkeit der Intensitätskiste wurde jede Messreihe ohne Intensitätskiste (M1) und mit Intensitätskiste (M2) durchgeführt. Der Schallanalysator gab für die Messreihen für jedes Segment und jedes Terzband einen Schalldruck-Schallin-

1a Definierte Segmente der Messfläche

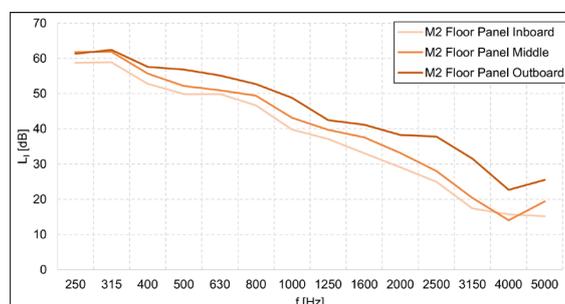
2 Anregung der Akustikklimakammer mit drei Oktaederlautsprecher



intensitäts-Index (pl-Index) aus, der für die Berechnung der Genauigkeitsklasse entscheidend ist. Gemittelt über die 13 Segmente und 14 Terzbänder von 250 Hz bis 5000 Hz ergab sich für M1 ein durchschnittlicher Wert für den pl-Index von 7,2. Für M2 lag dieser Wert bei 2,0, verbunden mit einer deutlich höheren Messgenauigkeit. Bei den folgenden Messreihen wurde jeweils ein Schallschirm verwendet. Die gemessenen Schallintensitätspegel waren für die Messreihe M2 stets geringer als für Messreihe M1. Ursache kann sein, dass das von innen verbaute offenporige Material nicht senkrecht von der Fläche abgestrahlten Schall absorbiert, bevor dieser von der Sonde gemessen wird. Des Weiteren könnte der Unterschied dadurch bedingt sein, dass lokal zu niedrig gemessene Werte auf die Gesamtheit der Fläche übertragen wurden. Solche lokal zu niedrig gemessenen Werte können dadurch entstehen, dass die Intensitätskiste immer in der Mitte eines Segments bzw. Panels aufgesetzt wurde. Tendenziell sind die Intensitäten jedoch an den äußeren Bereichen aufgrund von strukturellen Anbindungen höher. Diese Intensitätsunterschiede gilt es in zukünftigen Messungen genau zu bestimmen, um hierfür nach Möglichkeit eine Korrekturkurve zu berechnen.

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

Ergebnisse – Floor Panels. Für alle Segmente sank der gemessene Schallintensitätspegel mit zunehmender Frequenz. Der Intensitätspegel der Floor Panels nahm bei der Messreihe M1 sowie auf den Messflügen desto stärker ab, je weiter in Richtung Kabinenmitte gemessen wurde.



zwischen Frachtraum und Fußboden) als auch auf die geringere Anregung der Floor Panels durch Körperschall zurückzuführen sein. Der Einfluss der Luftschallanregung durch den Zwischenraum über dem Frachtraum dürfte jedoch deutlich geringer sein als die Körperschallanregung über die Struktur, da der Pegel im Frachtraum andernfalls ebenfalls entsprechend dem Abstand zur Außenhaut des Flugzeugrumpfs entlang den Messpositionen von Outboard und Inboard Floor Panel abnehmen müsste. Der Schalldruckpegel im Frachtraum konnte nicht gemessen werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass er im Frachtraum innerhalb des 0,5 m bis 1 m betragenden Abstands zwischen Outboard und Inboard Floor Panel keinen stärkeren Schwankungen unterliegt (annähernd diffuses Schallfeld im Messbereich), die die großen Unterschiede erklären könnten. Die hohen Intensitäten der Outboard Floor Panels und die geringeren Intensitäten der Inboard Floor Panels sind daher wahrscheinlich vor allem auf die Körperschallanregung zurückzuführen. Die zunehmende Dämpfung durch mehrere Kontaktstellen und den zunehmenden Masseneinfluss im Strukturpfad über der länger werdenden Strecke bis zur Kabinenmitte verringert den Einfluss der Floor Panels in der Kabinenmitte ebenfalls.

Ergebnisse – Schallintensitätspegel und dominante Schallpfade.

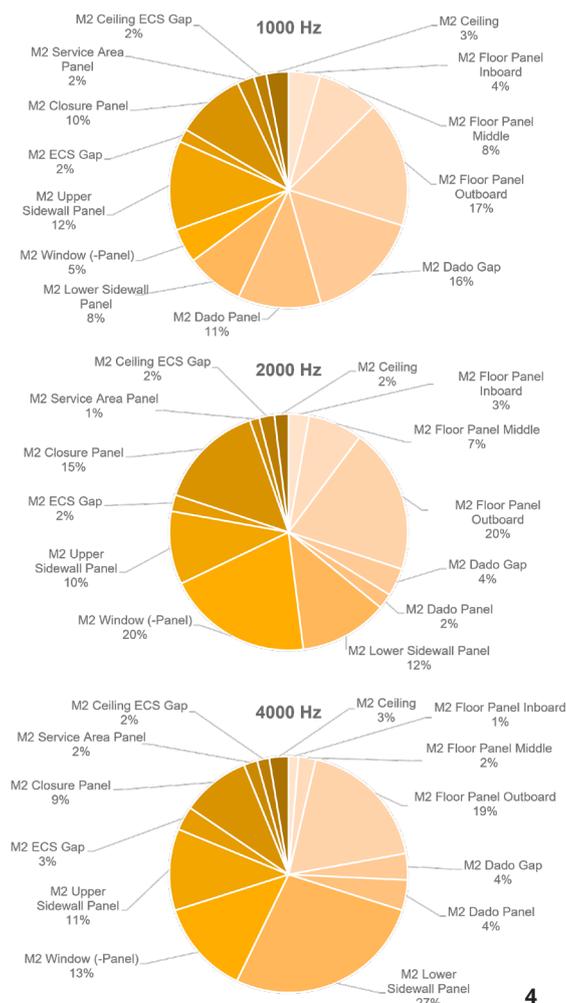
Aus den Geräuschquellen der einzelnen Segmente wurde der gesamt einfließende Schallleistungspegel L_W aus der Messreihe M2 berechnet. Die Berechnung erfolgte nach DIN EN ISO 9614-2 mit folgender Formel:

In der Formel ist P_i die berechnete Teilschallleistung eines Segments aus der über ein Segment i gemittelten Normalkomponente der Schallintensität $I_{n,i}$ multipliziert mit der Fläche des Segments S_i . Der gesamt einfließende Schallleistungspegel ergibt sich für Messreihe M2 zu 47,8 dB SIL bzw. 68,8 dB(A). Die prozentualen Beiträge jedes Segments der Messfläche berechnen sich aus der Teilschallleistung und der gesamt einfließenden Schallleistung. Die höchsten Schallintensitätspegel wurden für die Segmente Dado Gap und ECS Gap gemessen, die geringsten Pegel für das Inboard Floor Panel sowie die Ceiling. Für die Betrachtung der dominanten Schallpfade wurden die Oktavbänder 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz aus den jeweiligen Terzbändern berechnet. Diese Oktavbänder sind entscheidend für die Berechnung des SIL-bewerteten Schalldruckpegels, der vielfach für die Spezifikation des Schalldruckpegels in VIP-Flugzeugen herangezogen wird.

3 Gemessene Intensitätspegel Testreihe M2 der Segmente 1-3.

3

Dies könnte sowohl auf den zunehmenden Abstand zur Außenhaut des Flugzeugrumpfs und einen somit größeren Abstand von der Quelle (bezogen auf die Luftschallanregung durch die Fußbodenpanels aus dem Bereich



4

Segmente mit einem hohen prozentualen Beitrag stellen dominante Schallpfade dar. Diese waren unabhängig von der Frequenz für das Outboard Floor Panel zu erkennen. Lower und Upper Sidewall Panel waren ebenfalls dominante Schallpfade. Obwohl Dado Gap und ECS Gap die höchsten Schallintensitätspegel aufwiesen, stellten sie wegen ihrer relativ kleinen Fläche keine dominanten Schallpfade dar. Die geringsten Beiträge lieferten die Segmente Ceiling ECS Gap und Ceiling.

Auf den Messflügen konnten ähnliche dominante und nicht dominante Schallpfade identifiziert werden. Vor allem das Outboard Floor Panel und das Upper Sidewall Panel waren bei diesen Messungen ebenfalls dominante Schallpfade. Ein nicht dominanter Schallpfad war auch hier die Ceiling. Für nicht dominante Schallpfade können Aufwände im Schallschutzpaket bei zukünftigen Auslegungen aufgrund des geringen Beitrags zum gesamt einfließenden Schalleistungspegel reduziert werden. Der Schalldruckpegel würde dadurch nicht erhöht und es würde Gewicht eingespart, das für andere Schallpfade reinvestiert werden könnte. Wird das

Gewicht nicht reinvestiert, reduziert sich das Gesamtgewicht des Flugzeugs mit der Folge einer höheren Betriebseffizienz sowie der Reduktion des Treibstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen.

Entwickeltes Prognosewerkzeug. Mit den Messungen als Eingangsgrößen wurde im Rahmen der Masterarbeit ein einfaches Schalleistungsmodell zur Berechnung des Schalldruckpegels in der Kabine erstellt. Es dient als Unterstützung in der Auslegungsphase eines Schallschutzpakets. Durch die Veränderung der Eingangsparameter von Schallpfaden lässt sich der Aufwand abschätzen, der notwendig wäre, um den Schalldruckpegel in der Kabine weiter zu reduzieren. Hierfür können verschiedene Kabinenkonfigurationen zugrunde gelegt werden. Das Modell wurde für das Completion Center von Lufthansa Technik und dessen spezielle Bedürfnisse entwickelt (so wird dort nur eine erheblich geringere Stückzahl von Flugzeugen im Jahr fertiggestellt als z. B. beim Flugzeughersteller Airbus).

Ausblick. Die Messungen im Demonstrator und auf den Messflügen haben die Bedeutung eines Schallschirms für Intensitätsmessungen in realen Umgebungen gezeigt. Das entwickelte Messverfahren für Intensitätsmessungen in realen Umgebungen mit Störschallpegeln kann in verschiedenen Forschungsbereichen der Akustik von Flugzeugen verwendet werden. Es gilt, die Genauigkeit der Messungen noch zu verbessern und den Einfluss der Intensitätskiste oder ähnlicher Schallschirme auf die Messergebnisse genauer zu bestimmen. Die identifizierten dominanten und nicht dominanten Schallpfade setzen den Fokus für zukünftige Auslegungen und verweisen auf ein Optimierungspotenzial, das sich bei der Umsetzung positiv auf den Schalldruckpegel in der Kabine oder auf die Betriebseffizienz des Flugzeugs auswirkt. Das Prognosewerkzeug in Form eines Schalleistungsmodells in MS Excel dient Lufthansa Technik als Grundlage und kann mit seinen Funktionen die Auslegungsphase eines VIP-Flugzeuges unterstützen. <<

4 Schalleistungsbeiträge für drei Terzbänder.