

KABINENAKUSTIK IN DER LUFTFAHRTFORSCHUNG

C. Thomas, H. Scheel,
Airbus Operations GmbH, EPA-Akustik, Kreetslag 10, 21129 Hamburg, Deutschland

Zusammenfassung

Ein wichtiger Bestandteil des akustischen Entwurfs von Verkehrsflugzeugen ist die Kabinenakustik. Die Schwerpunktsetzung der Forschung im Bereich Kabinenakustik orientiert sich dabei an der strategischen Ausrichtung der Airbus Konzernforschung. In diesem Zusammenhang stehen den Akustikingenieuren Herausforderungen wie neue Antriebssysteme, Kostendruck in der Herstellung, kundenspezifische Anforderungen und kürzere Entwicklungszyklen entgegen. Vor allem die Aussicht auf neue Antriebssysteme wie sog. Ultra High Bypass Ratio (UHBR) Fans, neuartige Propellerantriebe, Hybridisierung oder verteilte Antriebssysteme erfordern eine besondere Betrachtung um den derzeitigen Komfort zukünftig absichern zu können. Daher ist im Rahmen von Luftfahrtforschungsprojekten in einen Akustikdemonstrator investiert worden, der einerseits die Validierung von Simulationsmodellen erlaubt, aber auch die Reduktion der Anzahl von Flugtests für Themen der Kabinenakustik ermöglicht. Beide Fragestellungen sind wesentliche Bestandteile, um unter anderem eine Verkürzung der Produktentwicklungszeiten zu unterstützen. Zukünftig ist in Zusammenarbeit mit dem DLR geplant eine automatisierte Vernetzung der akustischen Berechnungstools mit den Systemen von Designern, Konstrukteuren und Statikern aufzubauen.

Keywords

Lärmwahrnehmung, Passagierkomfort, Vibroakustik, tonaler Lärm, tieffrequenter Lärm, Lärmsignatur, Lärmanregung, Maßnahmen, Acoustic FlightLAB

1. EINLEITUNG

Der Passagierkomfort in Flugzeugen wird zunehmend auch von der Qualität der akustischen Wahrnehmung geprägt. Die Erwartungen an zukünftige Neuentwicklungen werden immer stärker von sozialen Aspekten und dem Vergleich mit konkurrierenden Transportmitteln wie Hochgeschwindigkeitszügen getrieben.

Die Reduktion von den Passagier störenden Einflüssen ist jedoch häufig mit gewichtsintensiven Maßnahmen verbunden. Im Sinne der Ökoeffizienz ergibt sich somit das Ziel mit möglichst niedrigem Gewicht von Gegenmaßnahmen eine möglichst hohe akustische Wirksamkeit zu erlangen. Für Flugzeugkonfigurationen mit neuartigen Antriebstechnologien ist davon auszugehen, dass sich die Kabinengeräusche im tieffrequenten Bereich im Vergleich zu aktuellen Antrieben verändern werden. Bei diesen neuen Antrieben sind neben Jet-Antrieben mit sehr hohem Nebenstromverhältnis auch Trends wie Hybridisierung und Elektrifizierung akustisch zu bewerten. Weiterhin ist dabei von einer zunehmenden Tonalität des Antriebsgeräuschs auszugehen. Dieses kann durch verkürzte Triebwerksgondeln und damit einhergehend, höheren Anregungspegeln oder durch zusätzliche Systeme für die Elektrifizierung des Antriebs hervorgerufen werden. Die Aussicht auf eine geänderte Kabinenlärmsignatur steigt.

Ebenfalls können diese neuartigen Antriebe zu wahrnehmbaren Vibrationen in der Kabine führen, die sich ebenfalls von den heute bekannten Signaturen unterscheiden. Einerseits ist es wichtig, die Transferpfade dieser künftigen Technologien zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung des Gesamtsflugzeugs bewerten zu können, um dann die Integration erforderlicher Maßnahmen

Gewichtseffizient zu ermöglichen. Andererseits ist auch die Wahrnehmung dieser neuartigen vibroakustischen Reize durch den Passagier bislang unklar und kann somit ein Risiko im Hinblick auf die Akzeptanz darstellen. Weiterhin gilt es auch die Anzahl von Testflügen zu minimieren, um mögliche unbekannte neue akustische Signaturen zu analysieren.

Zusätzlich werden durch die Digitalisierung sowohl der Entwicklungszyklus als auch die Herstellung deutlich verändert, so dass auf unvorhergesehene Lärmprobleme möglicherweise erst sehr spät reagiert werden kann.

Es besteht daher der Wunsch nach einem akustischen Gesamtkonzept, das flexibel und auch später auf verschiedene Gegebenheiten angepasst werden kann, ohne zusätzliche Kosten oder Verzögerungen in der Produktion zu erzeugen.

2. HERAUSFORDERUNGEN DER KABINENAKUSTIK

In diesem Abschnitt wird zunächst der Kontext der sich ändernden Anforderungen und Ansprüche an die Kabinenakustik beleuchtet.

2.1. Evolution des Kabinenlärms in Verkehrsflugzeugen

Das Geräusch innerhalb der Flugzeugkabine ist ein Komfortparameter, der bei Überschreiten eines persönlichen Schwellwertes direkt zu Unbehagen führt. Das Verkehrsflugzeitalter begann mit dem Antrieb durch Propellermaschinen wie die Lockheed Super Constellation, die Tupolew TU-114 oder den Boeing 377 Stratocruiser in denen

Passagiere sehr hohen Lärmpegeln von 90dB(A) bis zu 105dB(A) ausgesetzt waren. Diese sind in BILD 1 nach [4] ganz links aufgetragen. Dabei wurden teilweise tausende Kilogramm für lärmindernde Maßnahmen verbaut, um insbesondere den Einfluss der tieffrequenten Töne in der Kabine abzuschwächen.

Das Jet-Zeitalter begann in der Mitte der 50er Jahre mit der ersten Generation von Turbofan-Antrieben, die eine Reduktion des Kabinenlärms von etwa 5dB ermöglichten, aber insbesondere auch das Kabinenlärmspektrum veränderten. Das durch tieffrequente, tonale Komponenten geprägte Spektrum verschob sich zu einem breitbandigen Spektrum mit ausgeprägten Tiefen und Mitten. Gleichzeitig wanderte auch der Bereich maximalen Lärmeintrags in die Kabine von einer Lärmbeaufschlagung vor dem Triebwerk zu einem Bereich hinter dem Triebwerk. Flugzeuge wie die De Havilland Comet, die Convair CV880, die Boeing 367, McDonnell Douglas DC-8, die Sud Aviation Caravelle und die Tupolew TU-104 beeindruckten die Passagiere damals mit einem neuen Kabinenlärmstandard bei Pegeln von 85dB(A) bis 90dB(A) in Abhängigkeit vom Sitzplatz.

Eine Reduktion der Pegel auf 83dB(A) bis 85dB(A) ergab sich erst mit der zweiten Generation von Jet-Triebwerken in den 1960ern bei Flugzeugen wie den Boeing 707 und 727 oder der DC-9, wie in BILD 1 mittig dargestellt. Seit dieser Zeit findet sowohl bei Flugzeug- wie Triebwerksherstellern eine stetige Verbesserung der Jet-Triebwerke z.B. durch höhere Nebenstromverhältnisse und der Lärminderungsmaßnahmen statt. So ermöglichen die neuen Technologien eine deutliche Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs unter Beibehaltung eines niedrigen Gewichtsniveaus.

Heutzutage stellt sich bei einem Geräuschpegel in der Flugzeugkabine von etwa 74dB(A) bis 80dB(A) die Frage, ob eine weitere Lärmreduktion sinnvoll oder nötig ist [4]. Ein wesentlicher Gesichtspunkt ist dabei die Wahrnehmung des Kabinenlärms durch Passagiere und Crew.

schiedensten Lärmquellen innerhalb und außerhalb des Druckrumpfes sowie dem jeweiligen Schalltransmissionspfad geprägt.

Im vorderen Kabinenbereich wird der Geräuscheindruck bei Reiseflug von breitbandigem Grenzschichtlärm definiert, der durch Druckverwirbelungen auf der Außenhaut entsteht. Je höher dabei die Druckgradienten sind, desto kleiner werden die Wirbel und umso hochfrequenter ist der entstehende Lärm. In Richtung der hinteren Kabine nimmt die Größe der Druckwirbel zu und damit verschiebt sich das Spektrum des so erzeugten Lärms zu tieferen Frequenzen. Zusätzlich wird bei der heute üblichen Triebwerksanordnung unterhalb der Tragflächen der hintere Kabinenbereich auch durch ebenfalls breitbandigen Triebwerkslärm mit tieffrequentem Schwerpunkt angeregt. Die wesentlichen Quellen des Triebwerkslärms sind dabei der Gebläsefan, der Abgasstrahl, Druckstöße bei Vermischung mit dem Nebenstrom und in geringem Umfang Geräusche aus den Verdichterstufen. Der aus den Druckstößen resultierende Lärm wird auch als Shock-Cell-Lärm bezeichnet. Dabei sind Abgasstrahl und Shock-Cell-Lärm nach hinten gerichtet. Lediglich der vordere Fan ist bei einigen Triebwerken heute manchmal im anfänglichen Steigflug auch im vorderen Kabinenbereich durch ein multitonales Geräusch wahrnehmbar.

Von Bedeutung bei der Untersuchung des Lärmeintrags in die Kabine ist auch die hohe Fluggeschwindigkeit, die knapp unterhalb der Schallgeschwindigkeit liegt. Diese führt bei Reiseflughöhe zu einer Verkürzung der Wellenzahl der anregenden Lärmquelle entgegen der Strömungsrichtung und zu einer Verlängerung der Wellenzahl in Strömungsrichtung. In Verbindung mit dem eher tieffrequenten Charakter der anregenden Lärmquellen in der Grenzschicht oder vom Triebwerk ergibt sich im hinteren Kabinenbereich eine Koinkidenz der Wellenzahl von Struktur und Anregung.

Zusätzliche Lärmquellen befinden sich auch innerhalb des Flugzeugs und erzeugen einerseits breitbandigen Lärm wie z.B. das Strömungsgeräusch der Klimaanlage oder sie weisen andererseits tonale Lärmkomponenten auf, die auf die Rotation von Gebläsen, Motoren und Pumpen zurückzuführen sind. Insbesondere die tonalen Komponenten können sich störend auf den akustischen Gesamteindruck der Flugzeugkabine auswirken.

Vereinfacht kann das Frequenzspektrum des Kabinenlärms als Breitbandlärm mit unterschiedlichem Kurvenverlauf bezüglich Maximalfrequenz und Frequenzanstieg beschrieben werden [4], wie in BILD 2 gezeigt. In Abhängigkeit von der Position entlang des Kabinengangs kann man von vorne kommend drei verschiedene Spektren betrachten: Vorne ein hochfrequentes Maximum mit einem Plateau zwischen 1kHz und 4kHz, mittenbetontes Maximum bei 600Hz bis 800Hz und Hinten ein tieffrequentes Spektrum mit Maximalpegeln zwischen 250Hz und 500Hz.

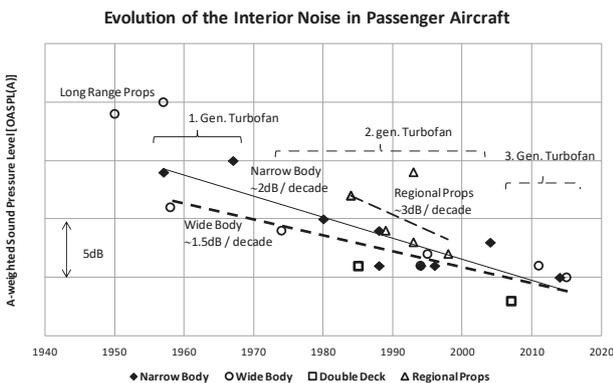


BILD 1: Entwicklung des Kabinenlärms in den letzten 80 Jahren [4]

2.2. Allgemeine Lärmsignatur von modernen Flugzeugkabinen

Allgemein variiert der Kabinenlärm deutlich in Abhängigkeit vom gewählten Sitzplatz und dem jeweiligen Flugzustand. Das Geräusch in der Kabine wird dabei von ver-

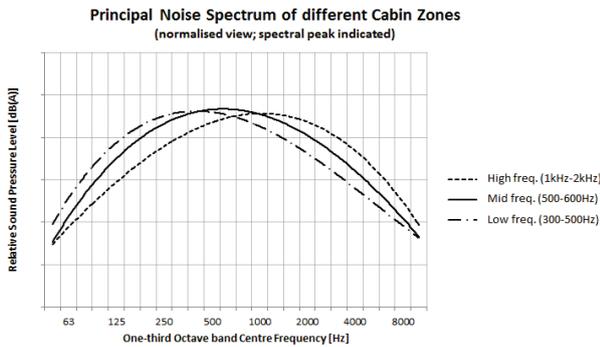


BILD 2: Vereinfachte Lärmsignaturen in der Flugzeugkabine [4]

2.3. Zukünftige Auswirkungen auf die Lärmsignatur

Es ist davon auszugehen dass sich mit der nächsten Generation von Jet-Triebwerken die Lärmcharakteristik ändern wird. Diese Antriebsgeneration weist neben einem sehr hohen Nebenstromverhältnis einen sehr großen Durchmesser des vorderen Fans auf, der auch bei niedrigerer Drehzahl läuft. Dabei ist der Einlauf des Triebwerks vergleichsweise kurz und somit die Möglichkeit der Positionierung akustischer Maßnahmen an der Quelle gering. Dieses wirkt sich vermutlich in einer Änderung der Lärmsignatur zu einem betont tieffrequenten Spektrum mit höherem tonalen Anteil aus. In Flugrichtung stromabwärts ist eine weitere Abnahme von hochfrequenten Anteilen des Triebwerkklärms durch Reduktion des Shock-Cell-Lärms zu erwarten, die sich positiv auf den Lärm in der hinteren Kabine auswirkt. Stromaufwärts hingegen können sich durch die ungünstigeren geometrischen Verhältnisse tonale Komponenten störend bemerkbar machen. Weiterhin ist es möglich, dass diese tonhaltigen Geräusche auch während des Reiseflugs auftreten, während sie heute nur teilweise während des Starts und Steigflugs hörbar sind. Beide Phänomene sind für die künftige Entwicklung von Lärminderungsmaßnahmen ebenso zu berücksichtigen wie der Lärmtransmissionspfad.

2.4. Maßnahmen

Zur Reduktion von störenden Einflüssen neuer Antriebstechnologien, aber auch unter Aspekten neuer Rumpf- und Kabinenarchitekturen, werden ebenfalls neue passive leichtgewichtige und kostengünstige akustische Maßnahmen benötigt. Dazu sind einerseits Maßnahmen zu entwickeln, die breitbandig bei tiefen Frequenzen wirken, und andererseits Komponenten die eine genaue Anpassung an das Frequenzmaximum tonaler Störgeräusche ermöglichen

Die Integration solcher einstellbaren, akustischen Materialien ermöglicht es auf späte Änderungen und unvorhergesehene akustische Problemstellungen gezielt und bei geringen Kosten zu reagieren. Voraussetzungen dafür sind zugelassene Designprinzipien, die in Flugzeugkomponenten bereits integriert sind und in der Herstellung auf die speziellen Eigenschaften abgestimmt werden können.

Wesentliche Voraussetzung dafür ist aus akustischer Sicht ein hoher technologischer Reifegrad. Da eine Testerprobung an Bord erster Prototypen im Entwicklungsab-

lauf zeitlich erst sehr spät möglich ist, werden andere experimentelle und numerische Methoden des Versuchs und der Vorhersage benötigt. Gerade im experimentellen Bereich ist bisher eine phasenrichtige Anregung des gesamten zu untersuchen Transmissionspfads nicht möglich.

In den folgenden Kapiteln wird daher die Vorgehensweise beschrieben, wie diese Herausforderung bei Airbus bearbeitet wird.

3. EINSATZ DES ACOUSTIC FLIGHTLAB DEMONSTRATORS (AFL)

Im Folgenden werden einige Aspekte der Forschung bei der Airbus Operations GmbH zum Thema Kabinenakustik skizziert. Speziell im Rahmen der passagierfreundlichen und ökoefizienten Kabine arbeitet Airbus an der Weiterentwicklung und Validierung des sogenannten Acoustic FlightLAB (AFL) Demonstrator, der eine kostengünstige und umweltaffiziente Alternative zu Flugtests darstellt. Dieses Flug-Labor erlaubt, zukünftige, effiziente Antriebs-, Rumpf- und Kabinenkonzepte im Hinblick auf die Innenakustik als integrierten Ansatz aus Struktur, Systemen, Materialien und modulare Kabinenkonfigurationen zu untersuchen. Weiterhin können, angepasste Lärmmaßnahmen entwickelt und unter realistischen in-Flug-Bedingungen getestet werden.

Ein wesentlicher Arbeitsinhalt besteht in der Integration von akustischen Maßnahmen in die Flugzeug- und Systemarchitektur. Dieses umfasst einerseits Vorgaben für das Design der Maßnahmen aber auch Vorgaben für die durchzuführenden Versuche. Dieses orientiert sich einerseits an der Analyse des Lärmtransfers und der Kenntnis zukünftiger Anregungen.

Tests mit einer generischen akustischen Anregung weisen eine sehr hohe Sensitivität des Kabinenlärms bezüglich des Phasenverlaufs der Anregung auf. Aus diesen Versuchen lässt sich ableiten, dass nicht nur die Menge des eingekoppelten Schalls durch die Phasenverteilung beeinflusst wird, sondern auch die Schalltransmissionspfade. Letzteres hat sich bei Untersuchungen mit und ohne Primärisolierung bestätigt. Dieses gilt auch für die Relevanz Integrationsbedingungen von Bauteilen möglichst Originalgetreu nachzustellen, wie es bisher nur im Acoustic FlightLAB möglich ist.

3.1. Konzept des Acoustic FlightLAB (AFL)

Mit dem Aufbau des Acoustic FlightLAB Demonstrators, der in BILD 3 skizziert ist, werden mehrere Ziele gleichzeitig verfolgt, die sich alle an dem Gesamtziel akustische Flugtests zukünftig am Boden durchführen zu können orientieren. Neben der Erprobung von Lärminderungskonzepten gehört dazu unter anderem auch die Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit von numerischen Modellen. Schon bei der Konzeption des AFL wurde daher berücksichtigt, dass eine Abbildung des AFL im numerischen Modell erfolgen soll. Dazu sind insbesondere die Randbedingungen des Demonstrators so eindeutig gewählt worden, dass sie z.B. mit der Finite Elemente Methode (FEM) im Modell direkt wiedergegeben werden können. Als Beispiel seien hier die vordere und hintere Abdichtung des Rumpfsegmentes aufgeführt, die berührungsfrei ausgeführt worden ist.

Da die heute üblichen Maßnahmen zur Geräuschreduktion für den Bereich unterhalb von 300Hz typischerweise mit hohem Gewicht verbunden sind, liegt ein erster Fokus der Untersuchungen mit dem AFL auf diesem Frequenzbereich. Da eine Abstimmung der Maßnahmen auf Flugzeugintegrationsniveau bisher im experimentellen Bereich erst zu einem späten Entwicklungszeitpunkt erfolgen kann, wird die akustische Entwicklung mit numerischen Methoden begleitet. In diesem Frequenzbereich findet heute die FEM bei der Vorhersage Anwendung, insbesondere wenn tonale Lärmkomponenten in der Anregung untersucht werden. Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung der FEM ist jedoch eine hinreichend genaue Abbildung des gesamten Transmissionspfades. Auf Ebene eines Gesamtflugzeugs stellt dieses heute eine große Herausforderung hinsichtlich der notwendigen Genauigkeit dar. Dieses zeigt sich insbesondere beim Vergleich mit Messergebnissen aus dem Flugversuch. Aufgrund teils unbekannter Randbedingungen und nur einer begrenzten Anzahl an Sensoren ist die Analyse der Ursache von Abweichungen zwischen Messung und Rechnung nur schwer möglich.

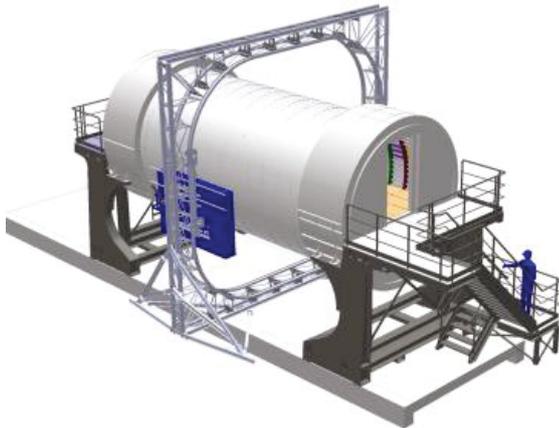


BILD 3: Konstruktionsentwurf des Acoustic FlightLAB mit Lautsprecherarray

3.1.1. Aufbau des Acoustic FlightLAB (AFL)

Der in BILD 4 gezeigte AFL ist in dem neu errichteten Halbraum des ZAL (Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung) in Hamburg aufgebaut worden.

Die Struktur ist im Design dem Airbus A320 nachempfunden jedoch im Detail vereinfacht und homogenisiert worden. So sind z.B. alle verwendeten Stringer und Spanten identisch. Die aufgebaute Sektion ist etwa 8,5m lang und hat einen Durchmesser von 4m.

Das AFL ist so aufgebaut, dass ein schrittweiser Abgleich mit einem parallel erstellten Simulationsmodell möglich ist. Neben den schon erwähnten möglichst eindeutigen Randbedingungen gehört dazu eine bekannte Anregung und eine vereinfachte Struktur, die ihrerseits Schritt für Schritt mit Systemen und Kabine ausgestattet werden soll [5].



BILD 4: Acoustic FlightLAB Demonstrator im Labor des ZAL Hamburg

3.1.2. Lautsprecherarray des AFL

Ein weiterer Schwerpunkt des AFL liegt auf dem Lautsprechersystem, das zur Anregung verwendet wird. Einerseits soll dieses System dazu dienen die Wechselwirkung von Struktur und Anregung in Abhängigkeit von der Phase bzw. des Schalleinfallswinkels zu untersuchen, aber auch die experimentelle Vorhersage von Kabinengeräuschen bei zukünftigen Triebwerksanregungen ermöglichen. Dazu sind zwei Lautsprecherarrays mit jeweils 222 unabhängig voneinander anzusteuern Lautsprechern aufgebaut worden, die rechts und links von dem Demonstrator positioniert sind, wie in BILD 5 und BILD 6 zu erkennen. Zwischen Lautsprecher und Struktur kann nun jedes beliebige Schallfeld für Wellenzahlen bis zu 20[1/m] aufgeprägt werden, wie auch in BILD 7 exemplarisch dargestellt. Damit kann insbesondere die Einkopplung von mittelfrequenter multi-tonaler Lärm in die Struktur untersucht werden. Gleichzeitig ist eine automatisierte messtechnische Erfassung des Anregungsspektrums vorgesehen, die auch für den Abgleich mit Simulationsergebnissen benötigt wird.



BILD 5: Lautsprecherarrays am Acoustic FlightLAB (1)

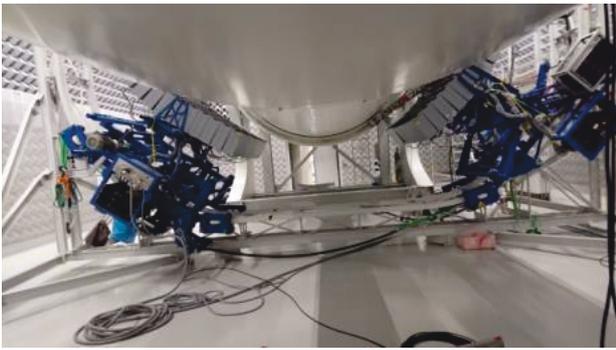


BILD 6: Lautsprecherarrays am Acoustic FlightLAB (2)

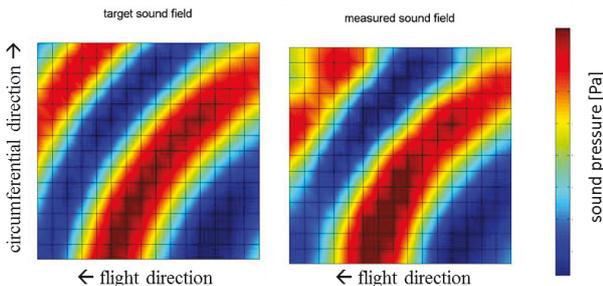


BILD 7: Aufgeprägtes Schallfeld im Vergleich Messung und Rechnung

3.2. Daten für äußere Lärmanregung

Eingangsdaten als Anregung für akustische Berechnungen und das Lautsprechersystem werden ihrerseits mittels Berechnungsverfahren für Grenzschicht- und Triebwerkslärm ermittelt. Teilweise basieren diese Daten auch auf Ergebnissen von Flugmessungen auf der Außenhaut oder Messungen im Windkanal.

Auch hier gibt es keine einfachen einheitlichen Verfahren, sondern verschiedene Vorgehensweisen, die sich am Charakter der Lärmquelle orientieren. Nach [8] werden für die Triebwerkslärmmodellierung drei unterschiedliche Lärmkategorien unterschieden: Tieffrequenter tonaler Lärm, hochfrequenter tonaler Lärm und Breitbandlärm. Wie bereits erwähnt, haben diese verschiedenen Lärm-signaturen erheblichen Einfluss auf den weiteren Lärmtransfer, so dass sich die folgenden Ansätze ergeben

Tieffrequenter tonaler Lärm wie er zum Beispiel von offenen Rotoren oder Propellern erzeugt wird, wird in der Kabinenakustik vorteilhaft mit der FEM gerechnet. Dazu sind auch entsprechend kleinteilig aufbereitete Eingangsdaten aus aeroakustischen numerischen Modellen notwendig. Bei höherfrequentem tonalen Lärm wie beispielsweise vorwärtsgerichtetem Fan-Lärm nimmt die Sensitivität des Rumpfes hinsichtlich der Anregung ab und empirische oder experimentelle Daten kommen zur Anwendung. Breitbandiger Triebwerkslärm hingegen kann heute noch nicht mit der Rumpfsseitig benötigten Genauigkeit numerisch berechnet werden, so dass auch hier empirische Ableitungen aus Kabinenlärmmessungen oder Messdaten von der Außenhaut aus Flugtests herangezogen werden.

Verschiedene Modelle zur Grenzschichtlärmvorhersage werden in [9] miteinander verglichen. Auch hier müssen für verschiedene Bereich im Flugzeug verschiedene Mo-

delle verwendet werden. Insbesondere die Grenzschichtlärmmodellierung bei hohen Druckgradienten z.B. im Bereich des Cockpit ist dabei eine Herausforderung.

3.3. Maßnahmenkatalog

Die heute in modernen Verkehrsflugzeugen eingesetzten akustischen Maßnahmen sind wesentlich für den mittel- bis hochfrequenten Lärmbereich bei breitbandiger Anregung ausgelegt. Gleichzeitig sind weitere Anforderungen an Installation, Integration, Gewicht, Kosten und Wartung einzuhalten. Die sogenannte Primärisolierung aus Glaswolle erfüllt dabei neben akustischen Anforderungen in ihrer wesentlichen Funktion auch die thermische Isolierung der Kabine.

Aufgrund ihres äußerst geringen Gewichts zeigt Glaswolle nur im Bereich oberhalb von 1kHz ein hervorragendes Schallreduktionsvermögen. Es ist möglich durch zusätzliche Lagen, höhere Dichten und verschiedene Strömungswiderstände die akustische Wirksamkeit auch im Bereich um 500Hz zu erhöhen, jedoch auf Kosten anderer Anforderungen. Auch zeigt Glaswolle wesentlich bei der Minderung der Luftschallübertragung ein vorteilhaftes Verhalten. In Abhängigkeit vom Schalltransmissionspfad sind zur Reduktion von Körperschall andere Maßnahmen wie schwere Dämpfungsbeläge aus akustischer Sicht zu bevorzugen.

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Übertragungswege

- Luftschall und
- Körperschall

und der verschiedenen Komponenten innerhalb dieser Übertragungswege

- Primärstruktur (Rumpf, Außenhaut)
- Primärisolierung
- Sekundärstruktur (Halter, Befestigungselemente)
- Kabinenverkleidung
- Fußbodenstruktur und -paneele

ergibt sich die Notwendigkeit einen Katalog von Maßnahmen zu entwickeln. Zusätzlich ist dieser Katalog an die verschiedenen Anregungsarten

- Breitbandig
- Multi-tonal
- Tonal

in den verschiedenen Frequenzbereichen

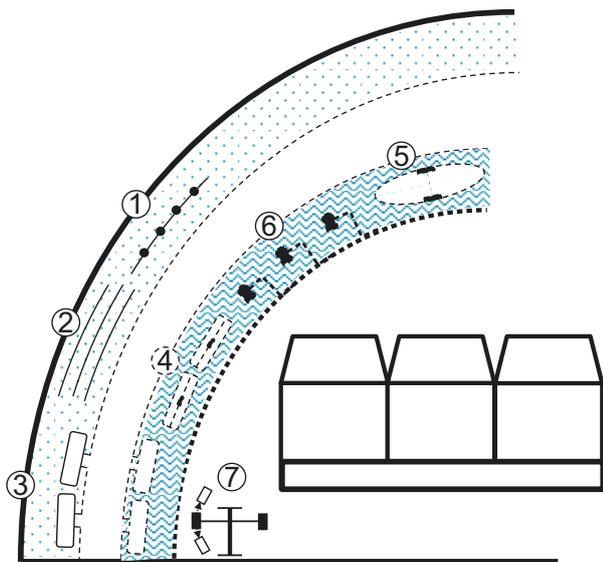
- Tieffrequent
- Mittelfrequent
- Hochfrequent

zu untergliedern. Die größte Herausforderung wird dabei an die tonalen oder multi-tonalen Ereignisse bei tiefen und mittleren Frequenzen gestellt. Für solch einen Katalog werden dafür Maßnahmen benötigt, deren genaue Arbeitsfrequenz in einem weiten Frequenzbereich angepasst werden kann. Diese Anforderung an die Anpassungsfähigkeit resultiert daraus, dass selbst bis zu einem sehr späten Entwicklungszeitpunkt die endgültige Drehzahl eines Systems (z.B. ein Triebwerk) und damit die tonale Lärm-signatur nicht umfänglich bekannt ist. Dies kann auch durch Unsicherheiten in der Vorhersage oder kurzfristige Änderungen am Komponentendesign hervorgerufen werden. Die Anforderung an ein anpassungsfähig-

ges bzw. adaptives Akustikkonzept für einen Maßnahmenkatalog ist somit, das Design an jede mögliche Änderung von Anregung und Transmissionspfad anpassen zu können.

Für tieffrequente tonale Lärmereignisse ist beispielhaft in [6] ein Konzept vorgestellt worden, das auf der Integration einstellbarer akustischer Materialien beruht. Dieser Ansatz wird vor allem durch neue Technologietrends wie 3D-Druck, Metamaterialien, neue Herstellungsprozesse und Modulbauweisen ermöglicht. Vier verschiedene grundsätzliche Lösungsansätze für ein Gesamtkonzept sind in [6] vorgestellt worden:

- Einbetten von Mikro- oder Sub-Strukturen
- Integration adaptiver Elemente
- Mehrschichtige, resonante Isolierungen
- Selbst-anpassende Schwingungsdämpfer



- ① resonante Massen
- ② mehrschichtige Isolierung mit Plattenschwingern oder angepasstem Strömungswiderstand
- ③ Helmholtz-Resonatoren
- ④ Membranresonatoren mit oder ohne einstellbaren Massen
- ⑤ (Mikro-)Strukturen z.B. Acoustic Black Holes
- ⑥ Verteilte Massenschwinger (stopp-band)
- ⑦ Selbst adaptierende Schwingungsdämpfer

BILD 8: Neuartiges Gesamtkonzept unter Anwendung der 4 Lösungsansätze

Wie aus BILD 8 zu entnehmen, kann die akustische Situation im Flugzeug als Raum-im-Raum dargestellt werden, wobei je nach Flugzeugtyp unterschiedliche Wandabstände vorherrschen. So sind z.B. mit eingebetteten Helmholtz-Resonatoren (vergleiche BILD 8 – Nr.3) Mittel gegeben eine mögliche Doppelwandresonanz zu bedämpfen, oder eventuelle Töne durch integrierte Membran- oder Massenschwinger im Schalltransmissionsweg zu reduzieren. Schwingungen der Primärstruktur können vorteilhaft mit sich selbst adaptierenden Schwingungstilgern nach [3] reduziert werden.

Untersuchungen zur Einbettung resonanter Massen [1] innerhalb von Isolationsmaterialien sind an einem akusti-

schen Strukturprüfstand durchgeführt worden. Hier wurden exemplarisch 2g bzw. 4g Massen in konstantem Rastermaß in einem leichtgewichtigen offenzelligen Schaum mittig eingelassen. Tests zur Schalltransmission und Vibrationsdämpfung wurden bei Schall- und Shaker-Anregungen durchgeführt. Im Vergleich zur Schaumkonfiguration ohne eingebettete Massen konnte eine Erhöhung des Schalldämmmaßes von 2-3dB im Bereich des eingestellten Frequenzbandes bei 160Hz - 200Hz erreicht werden.

Am Beispiel von Fußbodenpaneelen wurden verteilte Massenschwinger [2] untersucht. Dabei wurden lasergeschnittene Mikro-Schwingungstilger mit einer Bauteilmasse von 1,2g und einer Resonanzfrequenz von ca. 630Hz in Reihen rückseitig auf das Paneel aufgebracht. Insgesamt kamen bis zu 420 dieser Schwingungstilger mit einer Gesamtmasse von ca. 500g zum Einsatz. Im Vergleich mit einer Schwertschicht von 3kg/m² konnte im Bereich der Arbeitsfrequenz eine ähnliche Wirkung erzielt werden.

Eine Untersuchung der einzelnen Katalogmaßnahmen, kann dabei vorteilhaft im AFL erfolgen, da hier alle Transmissionspfade, Komponenten und die verschiedenen Anregungen unter Laborbedingungen untersucht werden können.

3.4. Integrierte Entwicklungsumgebung MBSE

Zur ganzheitlichen Bewertung neuer Flugzeug- und Kabinenentwürfe werden Model-Based Systems Engineering (MBSE) Ansätze als zielführend angesehen. Um zukünftig direkt in der frühen Entwurfsphase mit den Kollegen und Zulieferern der anderen Disziplinen Daten und Parameter austauschen zu können, wird zusammen mit dem DLR (Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt) [7] an einem MBSE-Ansatz für die akustische Bewertung neuer Komponenten gearbeitet.

Dabei kann unter anderem der gemeinsame Zugriff auf akustische Berechnungsprogramme untersucht werden, wie in BILD 9 skizziert. Ausgehend von einem detaillierten FEM Modell einer einzelnen Komponente, wie z.B. der Seitenwand, wird zunächst eine vereinfachte Benutzeroberfläche erzeugt. Über diese Benutzeroberfläche können verschiedene Designparameter variiert werden und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Schallübertragung bewertet werden. Über eine Plattform könnte dann der gemeinsame Zugriff von anderen Fachabteilungen oder auch Zulieferern gesteuert werden. Somit könnten Änderungen am Design jederzeit akustisch bewertet werden. Jedoch nur in einem begrenzten Rahmen, der durch die Variationsmöglichkeiten innerhalb der vorgegebenen Benutzeroberfläche aufgespannt wird.



BILD 9: Gemeinsamer Zugriff auf akustische Berechnungsprogramme

In einem weitergehenden Ansatz wird ein gemeinsames Datenaustauschmodell betrachtet. Zusätzlich werden Methoden zur multidisziplinären Optimierung (MDO) hinzugezogen. Ziel sind hierbei durchgängige Modelle und eine gemeinsame Sprache, die von allen beteiligten Disziplinen und Partner genutzt werden. Ein solcher kooperativer Entwurfsprozess zwischen den verschiedenen Disziplinen setzt eine gemeinsame Datenaustauschumgebung voraus. Das benötigte zentrale Datenmodell dient dabei z.B. dem Datenaustausch zwischen der Akustik-, Massen-, Bauraum- und Kostenbewertung. Der in [7] gezeigte Ansatz ermöglicht dabei die Kopplung von Modellen mit unterschiedlichem Detailgrad, wie z.B. akustischem FEM-Modell und analytischem Massemodell.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von einem Überblick der Evolution des Kabinengeräuschs in Abhängigkeit von der Triebwerksentwicklung sind typische Lärmsignaturen von Verkehrsflugzeugen aufgezeigt worden. Insbesondere hinsichtlich des möglichen verstärkten Auftretens von tonhaltigem Lärm sind neuartige Lärminderungskonzepte erforderlich, die auch in einer späten Entwicklungsphase an akustische Problemstellungen angepasst werden können. Dazu wird der Aufbau eines Katalogs mit adaptiven Maßnahmen vorgeschlagen. Die Integration solcher anpassungsfähigen akustischen Komponenten ermöglicht es auf diese späten Änderungen gezielt und schnell reagieren zu können. Voraussetzungen dafür sind bereits zugelassene Designprinzipien, eine den Flugbedingungen möglichst nahe Testumgebung und eine möglichst gute Vernetzung der akustischen Simulationstools mit gemeinsamen Datenaustauschmodellen.

Ein zukünftiger Schwerpunkt wird bei der Untersuchung der Kabinenakustik auch auf dem Bereich der Lärm- und Schwingungswahrnehmung durch den Passagier liegen. So hat insbesondere die heute vielfach verwendete A-Bewertung bei den erwarteten künftigen Lärmsignaturen Schwächen in einer für den Fluggast relevanten Komfortbeurteilung.

5. DANKSAGUNG

Der Aufbau des „Acoustic FlightLAB“ Demonstrator wurde und wird durch verschiedene Projekte im Rahmen von Luftfahrtforschungsprogrammen durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

Dank auch an die Unterstützung durch die beteiligten Hamburger Hochschulen und das DLR.

Die Autoren möchten auch Prof. W. Gleine von der Hamburger Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW) für sein langjähriges Engagement bei dem Aufbau verschiedenster Akustik Labore am Standort Hamburg danken.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Fuller C., Kondylas K.: „Active/passive distributed absorber for vibration and sound radiation control“, US Patent US20060131103A1, 2005
- [2] Claeys C. et al., 2017: Design and validation of metamaterials for multiple structural stopbands in waveguides. Extreme Mechanics Letters, vol.12 , pp. 7-22

- [3] Gustavsson M., 2016, A self-adaptive resonant device and its use for noise control in turbo-prop aircraft, Conference Proceedings Inter Noise 2016
- [4] Scheel H. et al., 2016, Next generation Aircraft – A challenge for Interior Acoustics Developments, Conference Proceedings Inter Noise 2016
- [5] Wandel M. et al., 2016, Design Requirements of Acoustic Flight LAB Platform, Conference Proceedings Inter Noise 2016
- [6] Scheel H. et al., 2018, Integration einstellbarer, akustischer Materialien im Flugzeugbau, Conference Proceedings DAGA 2018
- [7] Nagel B. et al., 2018, Model-Based Systems Engineering (MBSE) für die akustische Bewertung und Optimierung neuer innovativer Flugzeugkabinenkonzepte – Erste Schritte, Proceedings DLRK 2018
- [8] Omais M. et al., 2016, From Engine Integration to Cabin Noise: Drivers to Accurate Interior Noise Evaluations, Conference Proceedings Inter Noise 2016
- [9] Klabas A. et al., 2016, Fuselage Excitation During Cruise Flight Conditions : A new CFD based Pressure Point Spectra Model, Conference Proceedings Inter Noise 2016