

SCHALLQUELLEN- UND ÜBERTRAGUNGSANALYSE IM FLUGVERSUCH EINER A320 – TEILPROJEKT VON DLR4SIMKAB

C. Spehr⁺, L. Koop⁺, Bernt Seeland^{*}

⁺Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt,
Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik,
Bunsenstraße 10, 37073 Göttingen, Deutschland
^{*}Airbus

Kreetslag 10, Hamburg 21129, Deutschland

Zusammenfassung

Der Komfort von Verkehrsflugzeugen hängt in entscheidender Weise vom Kabinengeräusch ab. Je nach Flugzustand und Position im Innenraum können dabei unterschiedliche Geräusche dominieren. Von außen regen die Geräusche der Triebwerke und der Flugzeugstruktur den Flugzeugrumpf zu Schwingungen an, die diese an die Luft im Kabineninnenraum mit den verschiedenen Sitzpositionen weitergibt. Auch Schwankungen in der Rumpfgrenzschicht werden über den Flugzeugrumpf in den Kabineninnenraum übertragen. Im Innenraum selbst wirkt das Klimaanlage-System als zusätzliche Schallquelle.

Das Ziel der hier vorgestellten Flugversuche ist es, sowohl die Stärke der einzelnen Quellen zu quantifizieren als auch das Übertragungsverhalten der Flugzeugzelle hinsichtlich der einzelnen Quellen zu bestimmen. Zudem sollen die Rumpfanregung durch die transsonische Grenzschicht, die Strukturantwort des Flugzeugrumpfes und die Schallabstrahlung in die Kabine vermessen werden, um Validierungsdaten für die numerische Modellierung des Kabinenlärms bereitzustellen zu können.

Es werden zwei Flugtests mit Sensorpositionen in verschiedenen Bereichen der Kabine an einer A320 durchgeführt. In beiden Flugtests werden die akustisch relevanten Quellen, die Schallübertragungen über die Rumpfstruktur und der Empfang an den Passagierpositionen gleichzeitig durch ein mehrkanaliges System aufgezeichnet. Durch unterschiedliche Flugzustände werden dabei die einzelnen Quellen in ihrer Zusammensetzung variiert, die Auswirkungen auf die Übertragung der Innengeräusche ermittelt und somit der Einfluss der Einzelquellen auf das Gesamtgeräusch an den einzelnen Sitzpositionen bestimmt.

1. EINLEITUNG

Der DLR Anteil des Projektes SIMKAB (DLR4SIMKAB) soll im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Sicherheit und Passagierfreundlichkeit“ die Voraussetzung dafür schaffen, den akustischen Komfort für die Passagiere im Reiseflug zu verbessern. Hierbei liefert die zuverlässige messtechnische und numerische Bestimmung der Schallquellen und die Vermessung der Übertragungswege die Grundlage für die Entwicklung zukünftiger passagierfreundlicher Flugzeugkabinen. In psychoakustischen Untersuchungen sollen zudem die komfortbezogenen Lärmschwellen und Optimierungspotenziale für die Flugzeugkabine im Hinblick auf die sprachliche Kommunikation definiert werden.

Das in diesem Projekt gewonnene Wissen soll dazu beitragen, die Geräuschbelastung der Passagiere durch intelligentes Design zu verringern und somit auch den notwendigen Einsatz gewichtsintensiver akustischer Dämmmaterialien zu verringern. Gleichzeitig werden mit diesen Untersuchungen die notwendigen Voraussetzungen dafür geschaffen, den akustischen Herausforderungen für die Passagierfreundlichkeit durch neue leichte Materialien und Maßnahmen zur aktiven Innenraumlärmreduktion in Übereinstimmung mit dem Forschungsschwerpunkt „Effiziente Luftfahrzeuge“ zu begegnen.

2. EINORDNUNG DES FLUGVERSUCHES IN DAS PROJEKT DLR4SIMKAB

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die DLR Arbeiten in Projekt SIMKAB gegeben, um den Flugversuch innerhalb des Projektes einzuordnen. Im Weiteren soll dann nur auf das Teilprojekt Flugversuch eingegangen werden.

Innerhalb des DLR sind folgende Institute beteiligt:

- 1) Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik (Teilprojekte 1, 2 und 3)
- 2) Institut für Aeroelastik (Teilprojekte 3)
- 3) Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptionik (Teilprojekt 1)
- 4) Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin (Teilprojekt 4)

Das Ziel des Projektes DLR4SIMKAB ist es, einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion des Kabinenlärms in zukünftigen Flugzeugkonzepten zu leisten. Das Projekt ist Teil des Verbundvorhabens SIMKAB (Simplifizierte Kabine), welches von Airbus Deutschland koordiniert wird. Die Aktivitäten des DLR gliedern sich in vier Teilprojekte, welche alle das Kabinengeräusche zum Thema haben:

- 1) Aktive Innenlärmreduktion für moderne CFK-Rumpfstrukturen
- 2) Vorhersage und Validierung von instationären Druck-

schwankungen in einer turbulenten transsonischen Grenzschicht

- 3) Schallquellen- und Transferpfadanalyse im ATRA Flugtest
- 4) Humanspezifische Wirkung und Bewertung von Flugzeugkabinenlärm

Das zentrale Thema des hier erläuterten Vorhabens ist der Flugtest mit dem ATRA. Ziel dieses Flugversuches ist die messtechnisch fundierte Analyse des Schallfeldes im Kabineninnenraum im Hinblick auf die Frage nach dem Quellort, den Hauptübertragungswegen und der Schallabstrahlung. Die Ergebnisse aus den geplanten Messungen dienen zum einen dem physikalischen Verständnis der Schallentstehungs- und Transportmechanismen in der Flugzeugkabine. Zum anderen sind die Messergebnisse für die Validierung von semiempirischen und numerischen Modellen zur Berechnung des Kabinenlärms notwendig und daher Voraussetzung für die übrigen Teilprojekte. Darüber hinaus werden die gemessenen Daten von anderen Partnern innerhalb des Verbundes genutzt.

Im Teilprojekt 1 soll vor dem Hintergrund der akustischen Herausforderungen von Materialsystemen aus Faser-verbundwerkstoffen und deren Verwendung in modernen CFK-Rumpfstrukturen, ein aktives System zur leichtbaugerechten Reduktion von Kabinenlärm entwickelt werden.

Ziel ist die betriebszustandsunabhängige Verminderung der Transmission von breitbandigem, stochastischem Schall durch systematische Auslegung und Implementierung einer aktiven Struktur-Akustik-Regelung mit besonderer Effizienz im tieffrequenten Bereich. Die Definition einer realitätsnahen Strukturanregung für den Entwurf und die experimentelle Validierung des Struktur-Akustik-Regelungs-Systems soll auf Basis der im Flugtest (ATRA) ermittelten Rumpfgrenzschichtdruckschwankungen und Flugzeugstrukturschwingungen erfolgen.

Im Teilprojekt 2 soll ein Werkzeug entwickelt werden, um die Anregung der Rumpfstruktur durch die turbulente Grenzschicht zu berechnen. Das Teilprojekt zielt auf die Validierung und Erprobung von numerischen Vorhersageverfahren für Oberflächenwechseldrücke unter der turbulenten Rumpfgrenzschicht. Die Vorhersagen sollen in zwei Stufen validiert werden:

- 1) Windkanaltests im Transsonischen Windkanal Göttingen,
- 2) Flugtests auf dem Testflugzeug A320 ATRA des DLR.

Im den im Teilprojekt 4 durchzuführenden Untersuchungen bewerten Probanden die akustische Situation in der Flugzeugkabine als Grundlage für akustische Zielwerte zukünftiger Entwicklungen. Hauptaugenmerk liegt auf dem Einfluss tonaler Komponenten im Hintergrundgeräusch und auf der besonders sicherheitsrelevanten Sprachverständlichkeit von Lautsprecherdurchsagen. Die akustischen Daten für die Beschallung der Passagiere werden in Geräuschaufnahmen des ATRA gewonnen.

3. STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Der Schalldruckpegel in der Flugzeugkabine setzt sich im Reiseflug aus drei wesentlichen Quellmechanismen zusammen: dem Freistrahlergeräusch der Triebwerke, den turbulenten Druckschwankungen der Rumpfgrenzschicht und den verschiedenen Komponenten der Klimaanlage. Die Wanddruckschwankungen einer turbulenten Grenz-

schicht sind im Bereich kleiner Machzahlen bereits relativ gut untersucht. Für diesen Bereich existieren einige gut validierte empirische Modelle (Corcos 1963, Chase 1980), welche die statistischen Eigenschaften der Wanddruckschwankungen beschreiben. Im supersonischen Bereich sind in der Vergangenheit ebenfalls experimentelle und theoretische Untersuchungen durchgeführt worden (Zormuski 1987). Dagegen sind die Wanddruckschwankungen im Bereich hoher Unterschall-Machzahlen, die der Geschwindigkeit eines Passagierflugzeugs im Reiseflug entsprechen, relativ wenig erforscht. Messungen von Ehrenfried und Koop (2008) an einer ebenen Platte bei $M=0.8$ zeigten, dass die für kleine Machzahlen entwickelten Modelle nicht ausreichen, um die Druckfluktuationen im transsonischen Bereich vollständig zu beschreiben.

Das Thema Triebwerkslärm gliedert sich in die Bereiche Fan-, Verbrennungs- und Freistrahllärm. Die Untersuchungen speziell zum Thema Freistrahllärm begann in den 1950er Jahren mit den ersten theoretischen Arbeiten von Sir J. Lighthill (Lighthill 1952) und hatte eine Vielzahl von experimentellen und theoretischen Untersuchungen zur Folge.

Im Bereich der Kabinenakustik gibt es bereits eine Vielzahl von Untersuchungen zur Bestimmung der Hauptschalleinträge in die Flugzeugkabine. Dazu werden in der Regel Schallintensitätsmessungen in der Kabine durchgeführt oder über inverse Methoden die Bereiche mit der größten Schallabstrahlung in die Kabine ermittelt (Sklanka et al. 2006). In anderen Untersuchungen werden über Vergleichsmessungen verschiedene Maßnahmen zur Lärmreduktion in der Flugzeugkabine untersucht (Marulo et al. 2006). Außerdem gibt es eine Vielzahl von experimentellen und numerischen Untersuchungen an Kabinenmodellen oder einzelnen Bauteilen von Flugzeugkabinen. Diese bestehen in der Regel aus der Bestimmung der Absorptionsgrade oder des Schalldämmmaßes (Blaise 1994, Pope 1983, Osman 2004).

Die Untersuchung dieser Einzelquellen zusammen an einem Flugzeug unter realen Reiseflugbedingungen fehlt in den bisher genannten Forschungsbereichen. Aus diesem Grund hat Boeing bereits im Jahre 2005 umfangreiche Flugtests an einer Boeing 777 im Rahmen der Quiet-Technology-Demonstrator 2 (QTD2) Kampagne am Boden und im Flug durchgeführt. Ziele dieser Untersuchungen waren:

- Vermessung verschiedener Triebwerkskonzepte (Bultemeier 2006)
- Vergleich von Grenzschicht- und Triebwerkslärm (Mengle 2006)
- Reduktion des Freistrahllärms, Chevron Düse, neue Liner Konzepte (Yu 2006)
- Überflugsärmessungen und Auswirkung von neuen Triebwerkskonzepten auf die Anwohner (Brusniak 2006, Nesbitt 2006)
- Reduktion des Fahrwerkslärms

Außerdem sollten durch diese Messergebnisse neu entwickelte Modelle zur Beschreibung der Strukturschwingung nach Anregung durch starke Wechseldrücke validiert werden (Montgomery 2004).

Da die Messdaten aus diesen umfangreichen Tests für europäische Forschungseinrichtungen und Unternehmen

nicht zugänglich sind, sollen im Teilprojekt 3 ähnlich wie im QTD2 Test die Wanddruckschwankungen im Reiseflug an der Außenhaut bzw. Fenster vermessen werden. Zeitsynchron werden die Innenschalldruckschwankungen erfasst. Der Fokus in den hier vorgestellten Messungen liegt jedoch nicht auf dem Triebwerkslärm, d. h. es werden keine neuen Triebwerkskonzepte verglichen. Das Ziel der Messung ist vielmehr, den Status Quo des Flugzeuges (A320-ATRA) so genau wie möglich zu untersuchen, um ein besseres physikalisches Verständnis über die Quellmechanismen zu erlangen und numerische und semiempirische Modelle validieren zu können. Daher werden in diesem Test auch im Gegensatz zu den QTD2 Tests umfangreichere Messungen der Strukturantwort der Kabine mittels Beschleunigungssensoren während des Flugtests durchgeführt.

4. DURCHFÜHRUNG

Es sollen zwei Tests im Reiseflug auf ein A320 von Airbus durchgeführt werden. Vorgesehen ist dafür die MSN 659 (D-ATRA), Baujahr 1997, der seit 2006 dem DLR gehört. Die Position der Messsensoren soll zwischen den beiden Testflügen variiert werden, um den unterschiedlichen Einfluss der Quellen und Übertragungswege auf die Schallabstrahlung in verschiedenen Kabinenzonen zu untersuchen. Im ersten Flugtest werden Messungen im vorderen Bereich (Spant 34 bis 37) und im zweiten Flugtest im hinteren Bereich der Kabine (Spant 54 bis 57) durchgeführt.

Zusätzlich ist ein Längsschnitt durch die gesamte Kabine an Mikrophonpositionen in Kopfhöhe geplant, die in beiden Flugtest konstant gehalten werden.

In beiden Flugtests werden die akustisch relevanten Quellen, die Übertragung über die Rumpfschwingungen und der Empfang an den Passagierpositionen gleichzeitig durch ein massiv mehrkanaliges System aufgezeichnet.

Die verwendeten Messtechniken sind:

- Erfassung der Körperschallschwingungen der Flugzeugstruktur durch Beschleunigungssensoren
- Erfassung der Schallabstrahlung in den Kabineninnenraum über Mikrophone
- Erfassung der instationären Anregung des Flugzeugrumpfes durch Drucksensoren auf der Außenhaut und in Blindfenstern

Insgesamt sollen in den Messungen ca. 260 Sensoren (66 Mikrofone, 153 Beschleunigungssensoren, 40 Drucksensoren) eingesetzt werden, so dass durch Auswertung der Korrelation zwischen den Sensoren die Übertragung der Schwingungsenergie in den Flugzeugrumpf analysiert werden kann.

Die Anregung durch die unterschiedlichen Quellmechanismen soll während der Flugtests durch unterschiedliche Flugstände variiert werden. Der erste Flug ist im ersten Quartal 2011 geplant. Die Vorbereitungen inklusive der Erarbeitung der Flugtauglichkeitsunterlagen laufen.

Die Kabine wird dabei vollständig mit einer „Standard-Economy-Class“ Bestuhlung ausgestattet sein. Im vorderen Bereich des Flugzeuges ist das auf Grund der für den Flugversuch notwendigen Ausrüstung nicht möglich. Die ersten vier Sitzreihen werden durch Rack-Einbauten ersetzt, die akustisch von der restlichen Kabine

abgekoppelt werden müssen.

5. MESSANLAGE

5.1. Kabinensensoren Innen

5.1.1. Querschnitt

In den beiden geplanten Flugtests werden die Kabinensensoren im vorderen bzw. hinteren Bereich der Kabine installiert. BILD 1 zeigt die Position des Messquerschnittes („Test section“) mit Blindfenstern und die für den Flug notwendigen Rack- Einbauten mit der Datenerfassungsanlage und der Flugtestinstrumentierung.

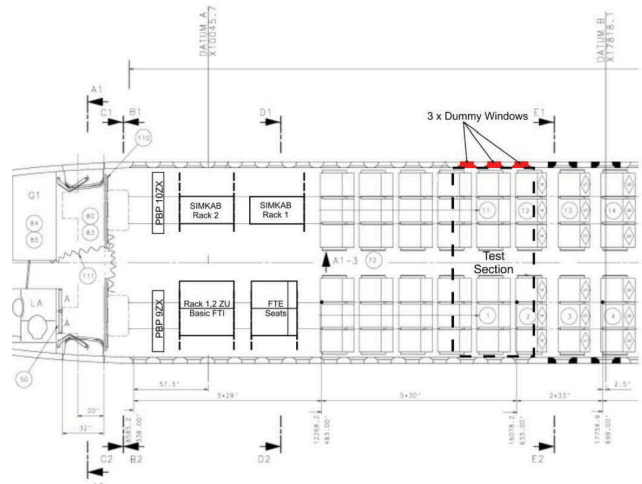


BILD 1. Vorderteil der A320 mit Rack für Datenerfassungsanlage, Flugtestinstrumentierung, Blindfenster und Position der Kabinensensoren („Test section“)

Mikrophone

Zur Erfassung des in die Kabine übertragenen Luftschalls werden im vorderen Bereich der Kabine 44 Mikrophone installiert. Diese Mikrophone werden auf einem variablen Halter befestigt, welcher sowohl die Möglichkeit bietet, im Bereich der Passagiersitze als auch im Gangbereich zu messen, aber gleichzeitig auch den Sicherheitsanforderungen bei Start- und Landung entspricht. Die Positionen der Mikrophone sind in BILD 2 skizziert.

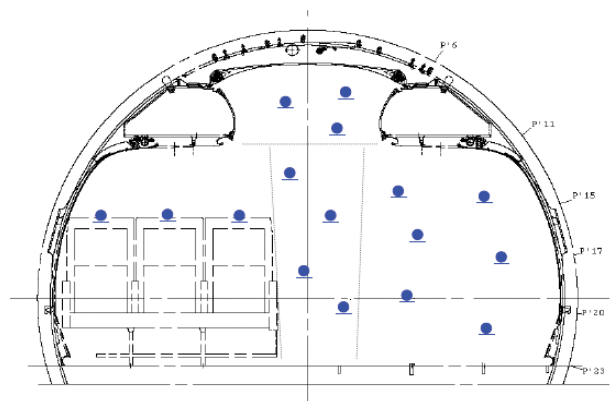


BILD 2. Positionen der Mikrophone im vorderen

Messquerschnitt im Bereich der Passagier

Die Übertragung der Schallenergie über Luftschall von der Außenhaut in die Kabine soll durch zusätzliche Mikrophone in allen relevanten Hohlräumen erfasst werden, d.h.:

- Im Bereich über der Kabinendecke
- Innerhalb und außerhalb der Gepäckfächer
- Im Bereich der Seitenverkleidung und der Verkleidung im Fußbodenbereich
- Im Bereich des Kabinenfensters
- Unterhalb des Kabinenbodens

Die Positionen der hierfür vorgesehenen Mikrophone sind in BILD 2 skizziert.

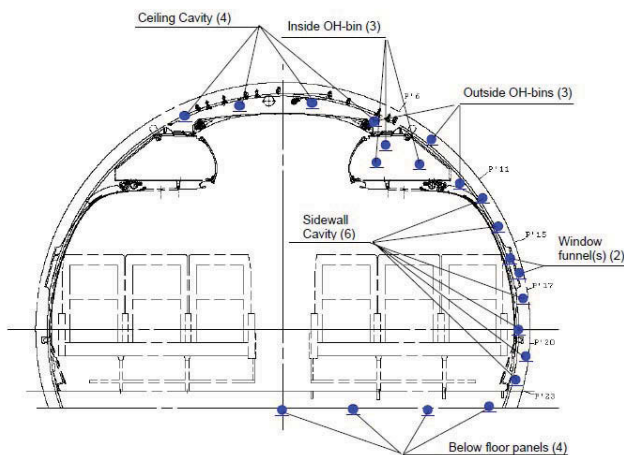


BILD 3. Mikrofonpositionen im Bereich des Messquerschnitts zur Erfassung der Luftschallübertragung

Beschleunigungssensoren

Im gleichen Kabinenbereich, d.h. zwischen den Spanten 34 und 37, werden Beschleunigungssensoren auf möglichst allen relevanten Flugzeugstrukturen verteilt. Dies bedeutet, dass Sensoren auf der Außenhaut und den tragenden Stringern und Spanten sowie den Längsträgern des Kabinenbodens befestigt werden. Des Weiteren werden Beschleunigungssensoren auf den Wand- und Deckenverkleidungen, den Gepäckablagefächern und dem Fußboden verteilt. Zusätzlich werden Beschleunigungssensoren auf den Befestigungspunkten der Gepäckfächer und der Wandverkleidung befestigt.

Es werden möglichst leichte eindimensionale Beschleunigungssensoren verwendet, die in Richtung der erwarteten Hauptbeschleunigung aufgeklebt werden. Lässt sich die Hauptbeschleunigungsrichtung nicht vorhersagen, werden mehrere Beschleunigungssensoren in unterschiedlicher Ausrichtung verwendet.

5.1.2. Längsschnitt

Zusätzlich zu den Mikrofonpositionen im Querschnitt soll auf Höhe der Passagierköpfe ein Längsschnitt der Schallpegel in der Kabine aufgenommen werden. Dazu werden auf jeweils einem Gangsitz pro Reihe Mikrophone installiert. Die Mikrophone werden dabei in ca. 20 cm Abstand von der Kopfstütze in senkrechter Position

installiert, so dass die Mikrofonkapsel auf Kopfhöhe senkrecht zur Decke zeigt. Diese Mikrofonpositionen bleiben in beiden Flugtests konstant, so dass anhand der Daten des Längsschnittes die akustische Vergleichbarkeit zwischen den Flügen kontrolliert werden kann.

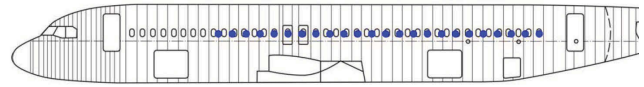


BILD 4. Längsschnitt der Kabine mit Mikrofonpositionen auf den Gangsitzen

5.2. Außensensoren

Um die Schwingungsanregung der Rumpfstruktur zu bestimmen, sollen die Druckschwankungen direkt auf der Außenhaut gemessen werden. Auf Grund der beschränkten Zugänglichkeit auf der Rumpfaußenhaut bieten sich zwei Möglichkeiten an, die beide genutzt werden sollen. Zum einen ist die Messung der instationären Druckschwankungen durch in Blindfenstern installierte piezoresistive Drucksensoren vorgesehen. Zum anderen ist die Installation von Oberflächenmikrophonen auf der Rumpfaußenhaut geplant.

5.2.1. Drucksensoren in Blindfenstern

Im Bereich des Messschnittes sollen drei Fenster durch Blindfenster ausgetauscht werden, in denen Bohrungen zur Installation von Drucksensoren eingebracht werden können (Siehe BILD 1).

Das Ziel ist dabei eine Beurteilung der Druckschwankungen sowohl hinsichtlich der Relevanz für die Anregung der Rumpfstruktur als auch der Natur der Druckschwankungen (akustische Wellen/ turbulente Grenzschicht).

5.2.2. Oberflächenmikrophone

Um Druckschwankungen auch außerhalb des Bereiches der Fenster, insbesondere im relevanten Deckenbereich, erfassen zu können, sollen auf der Rumpfoberfläche aufgeklebte Oberflächenmikrophone die instationären Druckschwankungen messen.

Der Einfluss der unterschiedlichen Messmethoden auf die Ergebnisse der instationären Druckmessungen in der turbulenten Grenzschicht wird in einem anderen Teilprojekt von SIMKAB im transsonischen Windkanal Göttingen untersucht.

5.3. Datenerfassungsanlage

Die Datenerfassungsanlage hat die Aufgabe, alle Sensordaten mit der voreingestellten Verstärkung zeitsynchron aufzuzeichnen. Die Datenerfassungsanlage ist in zwei in Flugrichtung angeordneten Racks untergebracht (SIMKAB Rack 1 und 2 in BILD 1).

Zusätzlich wird in diesen beiden Racks der Spannungskonverter inklusive der Notausschaltung und der Steuer- PC zur Überwachung der Datenaufzeichnung eingebaut. Das Rack auf der rechten Seite (Rack 12 ZU) enthält die Basis- Flugtestinstrumentierung des ATRA.

5.4. Flugversuch

Um die Anteile der Quellen am Gesamtgeräuschpegel zu bestimmen, ist es notwendig die Quellen gezielt einzeln zu variieren, um aus der daraus resultierenden Variation des Gesamtgeräusches den Einfluss der Quellanteile zu identifizieren. Hierzu werden Messungen in verschiedenen Flugphasen durchgeführt:

- Reiseflug bei verschiedenen Geschwindigkeiten unter Beibehaltung der Flughöhe
- Reiseflug bei verschiedenen Flughöhen unter Beibehaltung der Reisegeschwindigkeit
- Sinkflug bzw. Steigflug bei verschiedenen Triebwerksleistungen unter Beibehaltung der Geschwindigkeit
- Reiseflug mit Variation der Leistung der Klimaanlage

Das ausgearbeitete Flugprogramm ist auf eine Flugdauer von 4 Stunden ausgelegt.

6. AUSWERTUNG

Eine sofortige Datenauswertung der Schwankungsgrößen im Flugtest erscheint weder notwendig noch möglich. Alle Daten werden getrennt nach Flugzuständen aufgezeichnet und nachträglich ausgewertet.

Die Daten der piezoresistiven Drucksensoren sollen primär zur Charakterisierung der turbulenten Grenzschicht auf der Rumpfoberfläche dienen. Die Auswertung beruht dabei auf den Autokorrelations- und Kreuzkorrelationspektren. Ziel ist die Überprüfung der Anwendbarkeit des Modells der Strukturen des turbulenten Druckfeldes (Coros 1963) auf die Rumpfanregung durch die transsonische Grenzschicht. Dabei sollen auch die Anregungen aus der turbulenten Grenzschicht von den akustischen Anregungen des Treibwerkslärms separiert werden.

Darüber hinaus sollen die instationären Druckdaten der Anregung mit den Wechselgrößen der Kabinensensoren korreliert werden, um eine messtechnisch fundierte Analyse der primären Anregemechanismen zu ermöglichen.

7. DANKSAGUNG

Das Projekt SIMKAB wird gefördert vom Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo IV) des deutschen Ministeriums für Wirtschaft und Technologie. Besonderer Dank gilt darüber hinaus den Mitarbeitern des Institutes für Flugversuchstechnik, dem Entwicklungsbetrieb und dem Projekt- und Anlagenmanagement des ATRA.

8. SCHRIFTTUM

- [1] G. M. Corcos, Resolution of pressure in turbulence, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, 1963, Seiten 192-199
- [2] D. M. Chase, Modeling the wavevector-frequency spectrum of turbulent boundary layer wall pressure, J. Sound Vib., Vol. 70, 1980, Seiten 29-67
- [3] W. E. Zorumski, Fluctuating pressure loads under high speed boundary layers, NASA Technical memorandum 100517, 1987
- [4] K. Ehrenfried und L. Koop, Experimental study of pressure fluctuations beneath a compressible turbulent boundary layer, AIAA-Paper 2008-2800, 2008

- [5] B. J. Sklanka et al., Acoustic Source Localization in Aircraft Interiors Using Microphone Array Technologies, AIAA-Paper 2006-2714, 2006
- [6] F. Marulo et al., Interior Noise Sources Identifications, in-Flight Measurements and Numerical Correlations of an Advanced Business Aircraft, AIAA-Paper 2006-2491, 2006
- [7] J. M. Montgomery, Modeling of Aircraft Structural-acoustic Response to Complex Sources Using Coupled FEM-BEM Analyses, AIAA-Paper 2004-2822, 2004
- [8] Blaise, A. and Lesueur. C., Acoustic transmission through a "3-D" orthotropic multi-layered infinite cylindrical shell, part I: Formulation of the problem, J. Sound & Vib., Vol. 171(5), 1994, pp. 651-664.
- [9] L. D. Pope et al., Aircraft Interior Noise Models: Sidewall trim, stiffened structures, and Cabin Acoustics with floor partition", J. Sound & Vib., Vol. 89(3), 1983, pp. 371-417
- [10] H. Osman, Transmission Loss Testing and Analysis of a Curved Sandwich Composite Panel, AIAA-Paper 2004-2821, 2004
- [11] M. J. Lighthill: On sound generated aerodynamically. I. General theory. Proc. Roy. Soc. 211(A) S. 564-587, London, 1952
- [12] E. J. Bultemeier et al., Effect of Uniform Chevrons on Cruise Shockcell Noise, AIAA-Paper 2006-2440, 2006
- [13] J. Yu et al., Quiet Technology Demonstrator 2 Intake Liner Design and Validation, AIAA-Paper 2006-2458, 2006
- [14] V. G. Mingle et al., Flight Test Results for Uniquely Tailored Propulsion-Airframe Aeroacoustic Chevrons: Shockcell Noise, AIAA-Paper 2006-2439, 2006
- [15] L. Brusniak et al., Acoustic Imaging of Aircraft Noise Sources Using Large Aperture Phased Arrays, AIAA-Paper 2006-2715, 2006
- [16] E. Nesbitt et al., Flight Test Results for Uniquely Tailored Propulsion-Airframe Aeroacoustic Chevrons: Community Noise, AIAA-Paper 2006-2438, 2006