

Schlussbericht des Vorhabens

Technologien für ein innovatives Luftsystem und ein aktives Lining im Rahmen einer Energie-autarken, intelligenten Kabine

<p>Zuwendungsempfänger</p> <p>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Linder Höhe, 51147 Köln</p>	<p>FKZ 20K1101E</p>
<p>Berichtersteller</p> <p>Dr. Johannes Bosbach (Teilprojekt 1 und Koordination), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Göttingen</p> <p>Malte Misol (Teilprojekt 2), Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, DLR Braunschweig</p>	
<p>Laufzeit des Vorhabens</p>	<p>01.01.2012 – 30.06.2014</p>
<p>Datum</p>	<p>31.12.2014</p>

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 20K1101E gefördert. Die Form des Berichtes entspricht den Nebenbestimmungen für Zuwendungen auf Kostenbasis des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (NKBF98). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis	4
1 Kurzdarstellung	5
1.1 Aufgabenstellung.....	5
1.1.1 TP1 – Technologien für ein innovatives Luftsystem	6
1.1.2 TP2 – Technologien für ein aktives Lining	6
1.2 Voraussetzungen des Vorhabens	6
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn	9
1.5 Zusammenarbeit	11
2 Eingehende Darstellung.....	12
2.1 Erzielte Ergebnisse.....	12
2.1.1 TP1 – Technologien für ein innovatives Luftsystem	12
2.1.2 TP2 – Technologien für ein aktives Lining	21
2.2 Voraussichtlicher Nutzen	29
2.3 Fortschritte bei anderen Stellen	29
2.4 Veröffentlichungen und Erfindungsmeldungen.....	30
2.5 Abschlussarbeiten	30
Literaturverzeichnis	31

Abkürzungsverzeichnis

ANC	Active Noise Control
AP	Arbeitspaket
ASAC	Active Structural Acoustic Control
ATB	Akustischer Transmissionsprüfstand Braunschweig
ATRA	„Advanced Technology Research Aircraft“ des DLR
AVC	Active Vibration Control
CAD	Computer Aided Design
CCDV	Deckenseitige Verdrängungsbelüftung (engl. „Ceiling Based Cabin Displacement Ventilation“)
CDV	Kabinen Quellbelüftung (engl. „Cabin Displacement Ventilation“)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
Dac	Firma DIEHL Aircabin
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Do 728	Dornier 728 Versuchsträger des DLR Göttingen
DV	Verdrängungsbelüftung (engl. „Displacement Ventilation“)
ECS	Environmental Control System
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methoden
HV	Hybride Ventilation
IR	Infrarot
KLA	Kabinen Luftauslass
LHS	Lokale Wärmequelle (engl. „Local Heat Source“)
LUFO	Luftfahrtforschungsprogramm des Bundes
MV	Mischbelüftung (engl. „Mixing Ventilation“)
PAX	Passagier
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
SLDV	Scanning Doppler Laser Vibrometer
TP	Teilprojekt
TPD	Thermische Passagiermodelle (engl. „Thermal Passenger Dummies“)
URANS	Unsteady RANS

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Erforschung zweier innovativer Technologien zur Verbesserung des thermischen und akustischen Passagierkomforts in zukünftigen Generationen von Passagierflugzeugen. Hierfür waren die strömungsmechanischen Möglichkeiten für eine situationsbezogene Kabinenklimatisierung und die Wirksamkeit aktiver Lining-Module zur Reduktion des Lärm Eintritts in die Kabine zu erforschen.

Die im Rahmen des LUFO IV.2-Verbundprojektes SINTEG [8] mit dem ATRA [6] durchgeführten Flugversuche haben gezeigt, dass sich unter realen Flugbedingungen in der Regel keine stationären thermischen Bedingungen einstellen, sondern vielmehr von instationären Klimabedingungen ausgegangen werden muss. Die Ursachen dafür liegen teilweise in äußeren Einflüssen, wie Sonneneinstrahlung oder Außentemperatur, aber auch in thermischen Kapazitäten in der Kabine (Sitze, Gepäckfächer, Unterbodenbereich, etc.) sowie räumlich ungleichmäßig oder zeitlich veränderlich verteilten internen thermischen Lasten (unvollständig besetzte Kabine, Passagierbewegungen, Einschalten von Unterhaltungselektronik, etc.) begründet.

Bisherige numerische und experimentelle Untersuchungen der Kabinen-Innenraumströmung sowie des Kabinenklimas wurden unter Bereitstellung möglichst stationärer Bedingungen durchgeführt. In diesem Vorhaben sollten jedoch explizit die Auswirkungen dynamischer Klima-Randbedingungen auf die Kabinenströmung und die Temperaturverteilung adressiert werden. Vor diesem Hintergrund sollte das dynamische Verhalten verschiedener Belüftungssysteme in Bezug auf lokale, zeitabhängige Wärmelasten und Impulsströme untersucht und charakterisiert werden.



Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur des Vorhabens.

Flugzeugexterne Störquellen wie die turbulente Grenzschicht oder die Triebwerke tragen maßgeblich zum Schalldruckpegel in der Flugzeugkabine und damit zur Lärmexposition der Passagiere und der Besatzung bei. Der Grad der Lärmabstrahlung in den Innenraum wird durch das Schalldämmmaß des Rumpf-Lining-Systems bestimmt. Numerische Methoden zur Berechnung der Transmission externer Schallquellen in die Flugzeugkabine sind von essenzieller Bedeutung für die Luftfahrtindustrie, da durch sie eine methodische und kosteneffiziente Entwicklung moderner Leichtbaustrukturen mit erhöhter Schalldämmung und reduziertem Gewicht möglich wird. Die passive Optimierung (Geometrie, Masse, Dämpfung, etc.) ist zielführend im mittleren

und hohen Frequenzbereich, stößt jedoch im tieffrequenten Bereich (Frequenzen unterhalb von 1000 Hz) an physikalische Grenzen. Aktive Maßnahmen wie die aktive Struktur-Akustik-Regelung (ASAC) können diese Grenzen verschieben und somit eine leichtbaukonforme Verbesserung der tieffrequenten Schalldämmung bewirken. Daher sollte ein dynamisches Finite-Elemente-Modell (FEM) eines Lining-Systems entwickelt werden, welches sich zur Durchführung von Simulationen der Schalltransmission in die Kabine (akustisches Freifeld) sowie zur Bewertung und Optimierung der Sensorik und Aktuatorik eines aktiven Lärmreduktionssystems eignet.

Das Teilvorhaben DLR4DIANA gliedert sich in zwei Teilprojekte, deren jeweilige Zielsetzung im Folgenden im Detail beschrieben wird.

1.1.1 TP1 – Technologien für ein innovatives Luftsystem

Ziel des Teilprojektes 1 war es, die strömungsmechanischen Möglichkeiten für eine situationsbezogene Kabinenklimatisierung zu prüfen, die ihre Kühlleistung lokal autark an die Passagierzahl sowie die lokalen Wärmelasten anpasst und dadurch bei höherem Passagierkomfort energieeffizienter arbeitet als konventionelle Systeme.

Dazu sollte das zeitliche und räumliche Antwortverhalten der Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung in einer Flugzeugkabine (Do728) für verschiedene Belüftungssysteme detailliert experimentell untersucht und charakterisiert werden. Bei den untersuchten Lüftungssystemen handelte es sich um ein deckenseitiges Verdrängungslüftungssystem, das solitär und auch in Kombination mit bodenseitiger Quellbelüftung betrieben wird, sowie ein klassisches Mischluftsystem. Diese sollten hinsichtlich ihrer dynamischen Eigenschaften bzgl. Impuls- und Wärmeausbreitung verglichen werden. Die Ergebnisse sollten den Grundstein zu einer Datenbasis legen, die in zukünftigen Projekten die Entwicklung nichtlinearer Reglerkonzepte zur Umsetzung der eingangs erwähnten mehrdimensionalen Klimaregelung erlaubt.

Insbesondere sollten dabei der Einfluss der Luftmengenverteilung zwischen deckenseitiger und bodenseitiger Quellbelüftung sowie der Einfluss der Heizleistung der lokalen Wärmequelle auf die Wärmeausbreitung untersucht werden.

1.1.2 TP2 – Technologien für ein aktives Lining

Teilprojekt 2 adressierte die Aspekte der numerischen Berechnung der Schalltransmission und der Entwicklung eines aktiven Linings mit erhöhtem Schalldämmmaß im tieffrequenten Bereich. Zunächst sollte ein dynamisches Finite-Elemente-Simulationsmodell (FE-Modell) eines flugzeugtypischen Rumpfabschnitts mit primärer Rumpfstruktur und sekundärer Seitenwandstruktur (Lining) entwickelt werden. Das FE-Modell dieses Systems sollte sich zur Berechnung der Schalltransmission in die Flugzeugkabine sowie zur Auslegung der Sensorik und Aktuatorik eines aktiven Lining-Moduls mit erhöhter Schalldämmung eignen. Es war ein Laborversuch mit einem Lining-Serienbauteil in einem akustischen Transmissionsprüfstand geplant, welcher der Validierung der Messumgebung, der Messmethodik und der numerischen Berechnungskette dienen sollte.

Weitere Aufgaben waren die Entwicklung eines Konzepts zur echtzeittauglichen Kompensation der Nichtlinearitäten von Piezoaktuatoren sowie die Modellierung elektrodynamischer Erreger und deren Einbindung in die numerische Berechnungskette. Dadurch sollte die Verfügbarkeit geeigneter Aktuatoren innerhalb der gesamten Bandbreite des aktiven Systems sichergestellt werden.

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Das Vorhaben baute auf eine erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen der Fa. DIEHL Aircabin (DAc) und dem DLR im Rahmen des LUFO IV.2 Verbundvorhabens SINTEG [8] auf. Es war Teil

des LUFO IV.4 Verbundprojektes DIANA („Die Technologien für eine Energie-autarke, intelligente Kabine“) unter der Verbundführerschaft von DAC.

Aufbauend auf der Kompetenz des DLR in den Bereichen experimentelle Darstellung und Erfassung von Mischkonvektionsvorgängen in Flugzeugkabinen sowie der Entwicklung adaptiver Systeme bot sich mit diesem Vorhaben die Gelegenheit für einen Ausbau der Zusammenarbeit zwischen dem DLR und dem Luftfahrt-Zulieferer. Mit der Expertise und Marktcompetenz der Fa. DAC bei der Herstellung moderner Kabineninterieurelemente und den im Rahmen der vorangegangenen Projekte gewonnenen Erfahrungen waren optimale Voraussetzungen für die Erforschung und Entwicklung neuer Kabinentechnologien gegeben.

Der Versuchsträger Do 728 [7] war zum Projektbeginn bereits mit drei verschiedenen Belüftungssystemen ausgestattet. Hierbei handelte es sich um das originale Mischbelüftungssystem (MV – „Mixing Ventilation“), ein Kabinen-Quellbelüftungssystem (CDV – „Cabin Displacement Ventilation“) sowie das im Rahmen von SINTEG entwickelte und unter stationären Bedingungen charakterisierte deckenseitige Verdrängungsbelüftungssystem (CCDV – „Ceiling based Cabin Displacement Ventilation“). Ferner war der Versuchsträger bereits mit einer Basis-Messtechnikinstallation ausgerüstet, die im Rahmen des Vorhabens weiter ausgebaut wurde.

Die Thematik eines adaptiven lärmreduzierten Linings (Smart Lining) wurde bereits im Rahmen des SINTEG Verbundvorhabens gemeinsam mit dem Industriepartner DAC verfolgt. Am Beispiel eines Lining-Bauteils ohne Fenstereinheiten (Spacer-Lining) wurde die akustische Wirksamkeit des Smart Linings experimentell im akustischen Transmissionsprüfstand Braunschweig (ATB) des DLR nachgewiesen. Das Smart-Lining Konzept erscheint vielversprechend, der Nachweis für ein komplexes Serienbauteil mit Fenstereinheiten steht jedoch noch aus. Flankierend zu den Experimenten im ATB wurden dynamische Simulationen durchgeführt. Im Rahmen von SINTEG wurden daher Kompetenzen in den Bereichen Simulation und Vermessung von Lining-Bauteilen aufgebaut und die Basis für eine erfolgreiche Fortführung der Arbeiten gemeinsam mit DAC im Rahmen von DIANA gelegt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

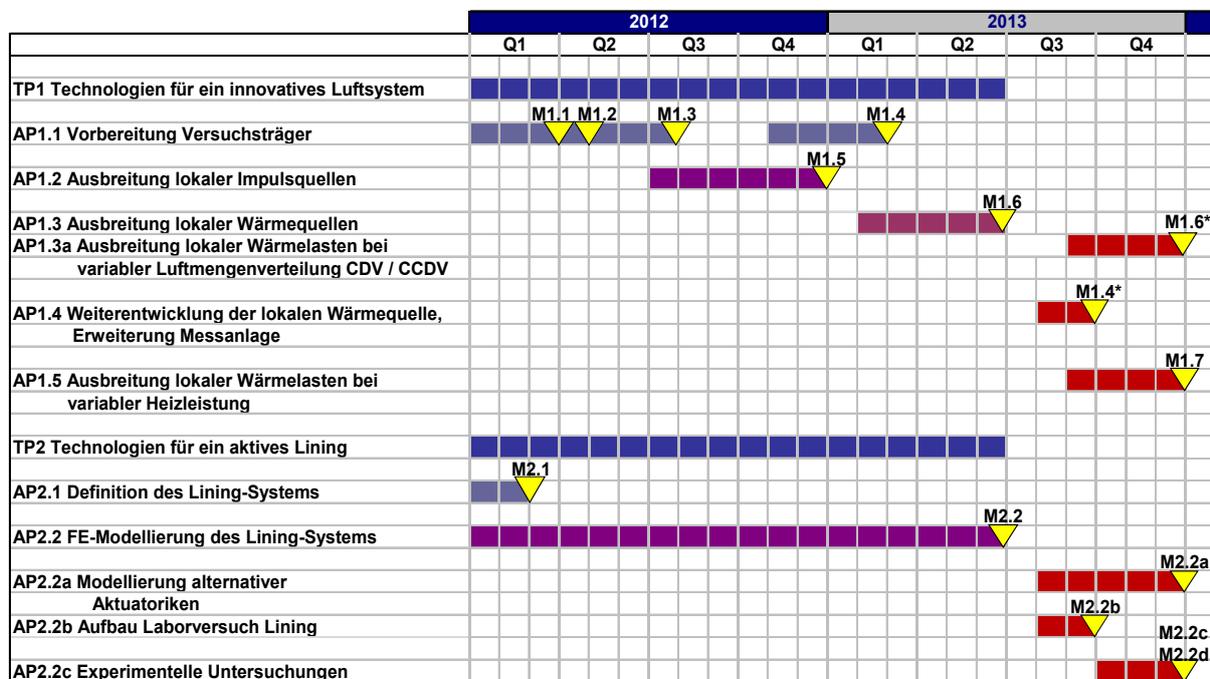


Abbildung 2: Arbeitsplan des Vorhabens.

Die ursprüngliche Planung des Vorhabens ist in Abbildung 2 dargestellt. Die zugehörigen Meilensteine sind in Tabelle 1 erläutert. Der ursprüngliche Antrag umfasst dabei die bis Ende Q2 2013 geplanten Arbeiten. Die in Q3 und Q4 2013 geplanten Arbeiten wurden im Rahmen eines Aufstockungsantrages genehmigt.

Teilprojekt 1 gliedert sich in die Arbeitspakete 1.1 bis 1.5. AP1.1 umfasst dabei die Arbeiten an dem Versuchsträger Do 728 und der Messanlage, die zur Durchführung der Messreihen in den AP1.2 „Ausbreitung lokaler Impulsquellen“ und AP1.3 „Ausbreitung lokaler Wärmequellen“ erforderlich sind. Diese umfassen [REDACTED] die Erweiterung der Messanlage um weitere Temperatursensoren, etwa auf Brusthöhe auf allen Sitzplätzen sowie in den Luftauslässen und Absaugeschlitzen. Nicht zuletzt hatte dieses Arbeitspaket auch Auslegung, Konzeption, Test und Bereitstellung der lokalen Wärmequelle zum Inhalt.

Während in den AP1.2 und AP1.3 zunächst zwei Klimafälle (MV und CCDV) bei einer konstanten Heizleistung der Wärmequelle (AP1.3) untersucht wurden, ergab sich mit der Bewilligung der Aufstockung die Möglichkeit, den untersuchten Parameterbereich wesentlich zu erweitern. Nachdem zunächst die Ansprechzeit der lokalen Wärmequelle in AP1.4 auf einen Bruchteil einer Luftwechseldauer reduziert wurde, konnten in den AP1.3a und AP1.5 weitere Belüftungsfälle im Bereich der hybriden CDV / CCDV sowie zwei weitere Heizleistungen der Wärmequelle untersucht und charakterisiert werden.

Tabelle 1: Liste und Bezeichnung der Meilensteine aus Abbildung 2.

M1.1	Sensorpositionen definiert
M1.2	Erweiterter Zuluftstrang definiert
M1.3	Modifizierter Zuluftstrang einsatzbereit
M1.4	Lokale Wärmequelle einsatzbereit
M1.4*	Verbesserte Wärmequelle einsatzbereit
M1.5	Ausbreitung lokaler Impulsquellen charakterisiert
M1.6	Ausbreitung lokaler Wärmequellen charakterisiert
M1.6*	Ausbreitung lokaler Wärmequellen bei variabler CDV / CCDV-Luftmengenverteilung charakterisiert
M1.7	Ausbreitung lokaler Wärmequellen bei variabler Heizleistung für MV und CCDV charakterisiert
M2.1	Definition des Lining-Systems abgeschlossen
M2.2	FE-Modellierung des Lining-Systems abgeschlossen
M2.2a	Konzept zur Kompensation der Piezo-Nichtlinearitäten verfügbar
M2.2b	Aufbau des Laborversuchs abgeschlossen
M2.2c	Messumgebung ATB experimentell validiert
M2.2d	FE-Modell des Linings experimentell validiert

Das Teilprojekt 2 ist in die Arbeitspakete AP2.1 „Definition des Lining-Systems“ und AP2.2 „FE-Modellierung des Lining-Systems“ gegliedert. Die Bearbeitung von Teilprojekt 2 erfolgte zunächst planmäßig entsprechend des in Abbildung 2 dargestellten Balken- und Meilensteinplan. Infolge der hohen Strukturkomplexität des Lining-Bauteils sowie der unerwartet starken Nichtlinearitäten der Piezoaktuatoren, ergab sich ein Bedarf an zusätzlichen Forschungsarbeiten. Der zusätzliche Forschungsbedarf mündete in einen Aufstockungsantrag mit den genannten Teilarbeitspaketen AP2.2a, AP2.2b und AP2.2c. Durch die im Rahmen der Aufstockung bereitgestellten Mittel war es möglich, das reale Lining-Bauteil im Transmissionsprüfstand zu vermessen und das FE-Simulationsmodell der Lining-Subkomponente anhand der Messdaten zu validieren. Ferner wurde im Rahmen des Aufstockungsanteils ein Konzept zur Kompensation der Piezo-Nichtlinearitäten erarbeitet.

Bedingt durch die Terminierung der Zuwendung des Aufstockungsanteils war eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung um 6 Monate bis Mitte 2014 erforderlich. Durch die beschriebenen Maßnahmen konnten alle Ziele des Vorhabens erreicht werden. Die zeitliche Verzögerung des Vorhabens führte zu keinen Restriktionen oder negativen Auswirkungen auf andere Teilprojekte des DIANA-Verbundes.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

Bei der Belüftung von Flugzeugkabinen wird heutzutage eine möglichst gleichmäßige Volumenstromverteilung im Passagierbereich angestrebt, die auf den Fall der voll besetzten Kabine ausgelegt ist. Die Kabine unterteilt sich hierbei in zwei Temperaturzonen: Die sog. „FWD“ Zone im vorderen und die „AFT“ Zone im hinteren Bereich. Die Temperaturen werden über jeweils einen eigenen Regelkreis und jeweils einen zentralen Sensor für die Lufttemperatur geregelt. Hieraus ergibt sich, dass inhomogene Wärmelastverteilungen innerhalb der Zonen im laufenden Betrieb nicht kompensiert werden können. Je nachdem, an welcher Stelle sich der Temperatursensor relativ zu den Wärmelasten befindet, resultiert dies in einer lokalen Verschwendung von Kühlleistung oder in einer lokal ungenügenden Kühlung.

Die aktuell verwendeten Belüftungssysteme beruhen auf dem Prinzip der Mischbelüftung, bei dem die Frischluftverteilung durch die Anordnung und den Verlauf der Zuluftstrahlen in der Kabine gegeben ist. Zusätzliche Wärmelasten verändern dabei tendenziell das Verhältnis von Trägheitskräften und Auftriebskräften und können im Extremfall zu einer Veränderung des Strahlverlaufs führen [9][10]. Während bei der Mischbelüftung die Trägheitskräfte die Auftriebskräfte deutlich übertreffen, ist das Kräfteverhältnis bei alternativen Belüftungskonzepten, wie etwa die CDV oder die CCDV, häufig genau umgekehrt. Die Strömungsstrukturen dieser Systeme werden im Wesentlichen durch die Auftriebskräfte bestimmt. Bei diesen Systemen stellt sich die Frage, inwieweit diese durch zusätzliche Wärmelasten gestört werden oder ob diese etwa selbstkompensierend arbeiten, dahin gehend, dass zusätzliche Wärmelasten lokal mehr zuströmende kühle Luft einhergehend mit einer lokal höheren Kühlleistung zur Folge haben. Zur Beurteilung dieser Effekte fehlt es jedoch an wissenschaftlichen Studien der dynamischen Eigenschaften der Thermo-Fluidodynamik des Systems Flugzeugkabine.

Während zahlreiche Veröffentlichungen zum Verhalten aktueller und neuartiger Belüftungsverfahren bei stationären Randbedingungen existieren (siehe etwa [8][9][11][12][13][14]), gibt es nur sehr wenige Studien, die sich mit dem dynamischen Verhalten und der Stabilität bei nicht-idealen Randbedingungen auseinandersetzen. Diese können jedoch für den operationellen Betrieb entscheidend sein. Die Effekte, die die Leistung der Kabinenbelüftung beeinflussen können, sind zahlreich und umfassen zeitliche Variationen von Wärmelasten (etwa durch Unterhaltungselektronik, mitgebrachte elektrische Geräte, Küchenbetrieb, etc.), asymmetrisch verteilte Wärmelasten (etwa durch Sonneneinstrahlung, inkomplett besetzter Kabine, sich bewegende Passagiere), Wechselwirkungen zwischen den Zuluftstrahlen oder zwischen Zuluftstrahlen und sich bewegenden Passagieren. Ein typischer Fall, bei dem beispielsweise das Verhältnis von Auftriebs- zu Trägheitskräften geändert wird, ist der sog. Kabinen „pull-down“ oder „pull-up“, bei dem eine warme Kabine in einer möglichst kurzen Zeit abgekühlt werden muss und umgekehrt. Für CDV und ein hybrides CDV / MV Verfahren wurde im Rahmen des SINTEG-Verbundvorhabens das Verhalten einer A320 Kabine während dieser Szenarien untersucht [8]. Es zeigte sich, dass beide Systeme in der Lage waren, die Kabinentemperatur innerhalb von 11 Minuten um 3 Grad zu ändern, und dies sogar unter Flugbedingungen. Hierbei war CDV bei den Lufttemperaturen am schnellsten, während das hybride System eine schnellere Änderung der Wandtemperaturen erlaubte.

Eine Fragestellung, die mit unserer Studie eng verwandt ist, ist der Abtransport von Verunreinigungen oder Gasen (Wasser, CO₂) durch die Luftströmung [14]. Im Unterschied zu der von uns studierten Ausbreitung von Wärme handelt es sich bei den Verunreinigungen typischerweise um sog. „passive Skalare“, d. h. skalaren Größen, die von der Strömung mitgeführt werden, ohne diese selber zu verändern. Der Transport von CO₂ in einer Flugzeugkabine bei Mischlüftung wurde z. B. von Yan et al. [19] untersucht. Als Testumgebung kam ein 1:1 Modell einer Boeing 767-300 Kabinensektion zum Einsatz. Mittels CFD-Simulationen und Spurengasmessungen unter isothermen Bedingungen in dieser Konfiguration konnten Iso-Konturen der Spurengaskonzentration sowie der zeitlichen Entwicklung der lokalen Konzentrationen ermittelt werden. Es zeigte sich eine sehr starke Abhängigkeit der Iso-Linien von der Stelle, an der das Spurengas in die Strömung gebracht wurde. Die Ausbreitung war auf etwa plus / minus ein bis zwei Sitzreihen begrenzt, umfasste jedoch teilweise die gesamte Sitzreihe, in der das Gas freigesetzt wurde.

Die Ausbreitung von Luftverunreinigungen wird unter operationellen Bedingungen noch komplexer, da diese auch stehende oder sich bewegende Personen im Gangbereich umfassen. Letztere erzeugen Kielwassergebiete, in denen Verunreinigungen möglicherweise noch weiter transportiert werden können als bei ungestörter Mischbelüftung. Entsprechende Studien wurden, wenn auch nur in einem verkleinerten Kabinenmodell und auch nur unter isothermen Bedingungen, von Mazdumar et al. durchgeführt [11]. Die experimentellen Ergebnisse wurden hierbei auch dazu eingesetzt, um CFD-Simulationen zu validieren, die für die Vorhersagen verwendet wurden. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass die sitzenden Passagiere eine Verteilung der Verunreinigungen in laterale Richtung tendenziell blockieren, während ein im Gang beweglicher Körper die Schadstoffe in seinem Kielwasser den kompletten Weg mit sich transportieren kann. Es zeigte sich auch, dass die Ergebnisse von der genauen Form des beweglichen Körpers abhängen, die daher möglichst menschenähnlich sein sollte, um genaue Vorhersagen zu erzielen.

Ebenfalls untersucht wurde bereits der Einfluss einer instationären, periodisch variablen Luftzufuhr auf die transienten Strömungsfelder in einer Flugzeugkabine von Wu et al. [14]. Die Autoren konnten mittels Strömungssimulationen zeigen, dass sich die mittleren Temperaturen und CO₂-Konzentrationen aufgrund der besseren Vermischung von frischer und rezirkulierter Luft im Vergleich zur konventionellen MV mit ihrem Verfahren reduzieren lassen. Dies wurde letztlich dadurch erzielt, dass die Pfade der Zuluftstrahlen durch die periodisch variierte Luftzufuhr dynamisch verändert wurden, wodurch die Bereiche mit hohem lokalen Luftaustausch vergrößert und die Totwassergebiete reduziert werden konnten. Im Unterschied zu den geplanten Untersuchungen in diesem Vorhaben wurde lediglich ein Kabinensegment, bestehend aus drei Sitzreihen, untersucht. Hierbei lag der Fokus auf der Veränderung der Mischung innerhalb dieses Segmentes. Über den Einfluss der geänderten Zuströmbedingungen in angrenzenden Bereichen der Kabine, die nicht mit simuliert wurden, können anhand dieser Studie keine Aussagen getroffen werden.

Aufgrund der erhöhten Lärmbelästigung in Propellerflugzeugen wurden bis zum heutigen Zeitpunkt verstärkt Untersuchungen mit aktiven Systemen zur Lärmreduktion auf diesem Gebiet unternommen und, wie in Monaco et al. [23] dargestellt, kann dort eine durchschnittliche Lärmreduktion von 10 dB bis 20 dB erreicht werden. Der Einsatz von flächigen Piezoaktuatoren wurde in Grewal et al. [24] anhand des Turboprop-Regionalflugzeugs deHavilland Dash-8 experimentell untersucht und im Mittel eine Senkung des Schalldruckpegels um ebenfalls 10 dB erzielt. Wang und Vaicaitis [25] haben den Einsatz von piezokeramischen Patchaktuatoren zur aktiven Lärmreduktion in Doppelschalenstrukturen theoretisch analysiert und dokumentieren Lärmreduktionen im Rahmen einer Parameterstudie von durchschnittlich 10 dB.

Zu den relevanten externen Lärmquellen in modernen Passagierflugzeugen zählen die turbulente Grenzschicht und die Triebwerke. Aufgrund der Breitbandigkeit und der schwach ausgeprägten räumlichen Kohärenz ist ihre Störquellencharakteristik äußerst komplex und stellt damit eine ebensolche Herausforderung für aktive wie für passive Systeme dar. Gibbs et al. [26] haben für diese Geräuschquellen die Wirkung aktiver Maßnahmen zur Lärmreduktion beschrie-

ben und stellen eine Reduktion des Schalldruckpegels von 5 dB bis 10 dB, integriert über den Frequenzbereich von 150 Hz bis 800 Hz, dar. Die Grundlage dafür bildet die Beschreibung der Schallabstrahlung mit der Methode der „Radiation Modes“ und deren aktive Regelung, wobei dieses Verfahren in seinen Grundzügen im Jahre 1993 von Elliott und Johnson [27] vorgestellt wurde. Ebenfalls unter Benutzung dieses Verfahrens zeigen Sors und Elliott [28] in theoretischen Untersuchungen, dass mit nur einem einzigen Piezoaktuator von 25 mm x 25 mm Größe auf einer Aluminiumplatte (280 mm x 250 mm x 1 mm) eine Reduktion der abgestrahlten Schallleistung im Frequenzbereich bis 1 kHz um etwa 11 dB möglich ist. Daraus lässt sich ableiten, dass die Methode der „Radiation Modes“ ein geeignetes Mittel zur Beschreibung der Schallabstrahlung der Struktur unter breitbandiger, stochastischer Anregung ist und für ASAC als probate Grundlage dienen kann.

Die Entwicklung und Erprobung von Konzepten zur aktiven Reduktion des Schalltransmissionsgrades von Linings zukünftiger Flugzeuggenerationen geht über den aktuellen Stand der Technik hinaus. Bislang wurden ASAC-Systeme hauptsächlich auf der Primärstruktur (Rumpf) eines Flugzeugs mit Fokus auf Breitbandlärm untersucht. Experimentelle Untersuchungen des Antragsstellers [29][30][31] mit aktiven CFK-Primärstrukturen in einem aeroakustischen Windkanal haben gezeigt, dass die maximale Wirksamkeit in Frequenzbereichen um die Strukturresonanzen erzielt werden kann (vgl. Abbildung 3).

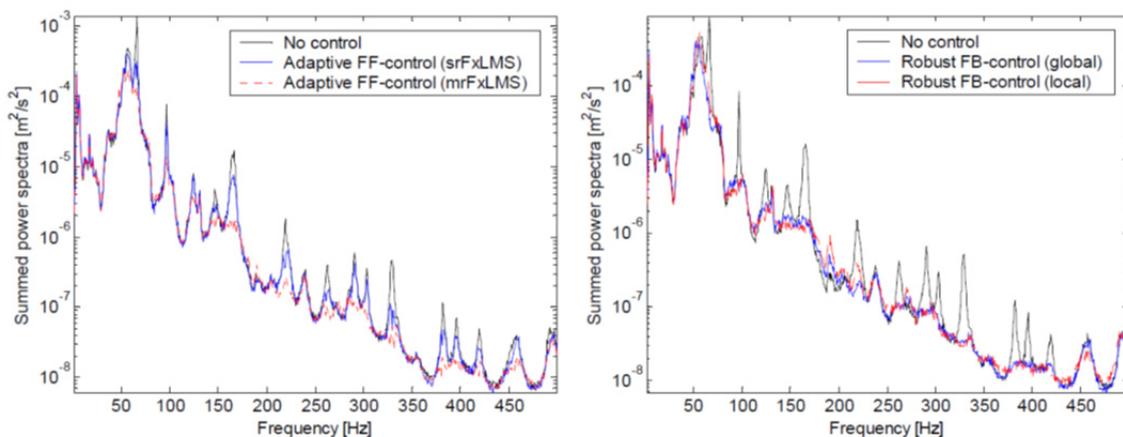


Abbildung 3: Summiertes Leistungsdichtespektrum (260 Messpunkte) der Schwinggeschwindigkeit eines CFK-Panels bei Anströmung durch eine turbulente Grenzschicht (No control), bei aktiver Steuerung (Adaptive FF-Control) und bei aktiver Regelung (Robust FB-Control) [30].

Außerhalb dieser Bereiche ist die Reduktion der Schalltransmission aufgrund der komplexen Störquellencharakteristik jedoch stark limitiert. Durch die hier vorgeschlagene Berücksichtigung der Doppelschaligkeit einer typischen Rumpfstruktur und den Übergang von einer aktiven Primär- (Haut) auf eine aktive Sekundärstruktur (Lining) ergeben sich neue Randbedingungen mit Vorteilen hinsichtlich der Realisierbarkeit (Sicherheit, Wartung, Modularität, Retrofitting) und der Leistungsfähigkeit des aktiven Systems (Robustheit, Wirksamkeit) im Vergleich zu ASAC-Systemen an Primärstrukturen. Diese Aspekte und die resultierenden Möglichkeiten wurden bisher nicht in ausreichendem Maße wissenschaftlich untersucht und ausgelotet.

1.5 Zusammenarbeit

Die Arbeiten wurden in enger Abstimmung und regelmäßigem Austausch mit dem Verbundpartner DAC durchgeführt. Für TP2 stellte DAC ein CAD-Modell sowie einen Prototyp des zu untersuchenden Lining-Bauteils zur Verfügung. Der Laboraufbau zur Vermessung des Schalldämmmaßes des Lining-Bauteils wurde mit DAC abgestimmt und erfolgte gemäß den Vorgaben der ebenfalls von DAC bereitgestellten Spezifikation. Ferner stellte DAC Messdaten aus einem externen Labor zum Schalldämmmaß eines baugleichen Linings von DAC zur Verfügung.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 TP1 – Technologien für ein innovatives Luftsystem

Ein großer Teil der Ergebnisse des TP1 wurde bereits auf dem Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2014 und dem STAB Symposium 2014 vorgestellt [1][2]. An den entsprechenden Stellen wird daher auf diese Publikationen zum weiteren Studium verwiesen. Alle Ziele des Teilprojektes 1 wurden erreicht. Die in diesem TP untersuchten Strömungsfälle und ihr Verhalten unter statischen Bedingungen sind in [8] und [22] im Detail dokumentiert.

2.1.1.1 AP1.1 Vorbereitung Versuchsträger

In diesem Arbeitspaket waren die zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen notwendigen Vorbereitungen zusammengefasst. Zunächst war die bestehende Kabinenmessanlage, die in [8] und [22] beschrieben ist, für die geplanten Untersuchungen zu erweitern. Die finale Messanlage ist in [1] beschrieben und erlaubt eine vielschichtige Auswertung und Analyse der Messdaten hinsichtlich im Projektverlauf oder auch in zukünftigen Projekten auftretenden Fragestellungen.

Der Ausbau erfolgte in zwei Schritten. Da sich nach der ersten Ausbaustufe gezeigt hat, dass zur Identifizierung der Transferpfade der eingebrachten Wärme weitere Sensoren höchst wünschenswert sind, wurde im Rahmen des Aufstockungsantrages der Umfang der Messanlage um weitere Temperatursensoren ergänzt. Im Ergebnis wurde auf jeder Sitzposition ein Temperatursensor auf Brusthöhe vor den Passagiermodellen positioniert, um die räumliche Temperaturverteilung auf dieser Ebene zu erfassen. Ferner wurden zwei horizontale Messbäume in Längsrichtung im Gangbereich in unmittelbarer Nähe der Wärmequelle positioniert, um die Wärmeausbreitung in Längsrichtung mit hoher räumlicher Auflösung erfassen zu können. Schließlich wurden weitere Temperatursensoren in den Luftauslässen angebracht. Insgesamt umfasste die Messanlage 70 thermische Passagiermodelle und mehr als 340 lokale Sensoren. Zusätzlich wurde die Temperaturverteilung der Strömung mittels im Fluid angebrachten Styroporkugelgittern visualisiert. Die Kugeln hatten einen Durchmesser von 20 mm und wurden während der Messreihen mit einer IR-Kamera bei einer Bildwiederholrate von 0,3 Hz abgebildet.

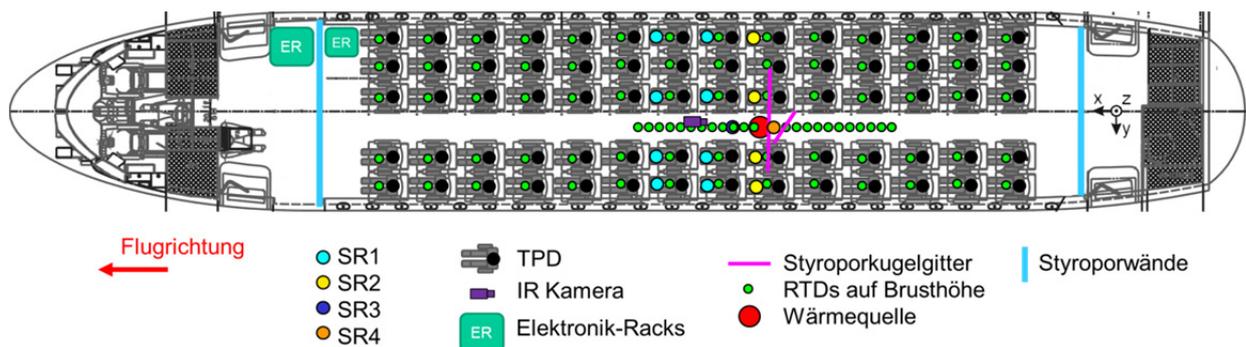
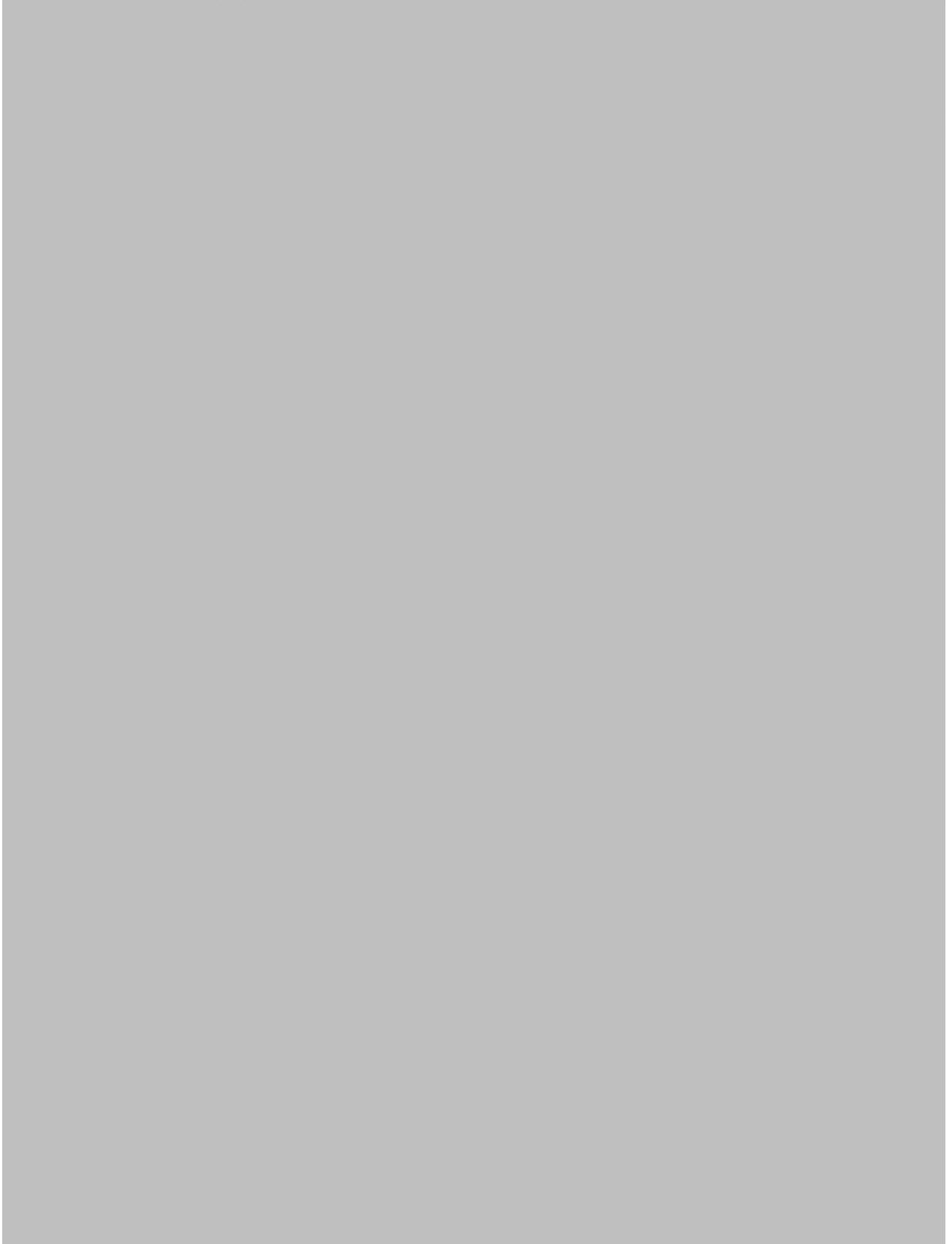


Abbildung 4: Kabinenlayout und Messanlage der Do 728 Kabine. SR1-4 bezeichnet die Positionen der entsprechenden Messbäume. Die Installation umfasst eine Infrarotkamera in Kombination mit Styroporkugeln, die in zwei Ebenen in der Kabine positioniert waren [1][2].

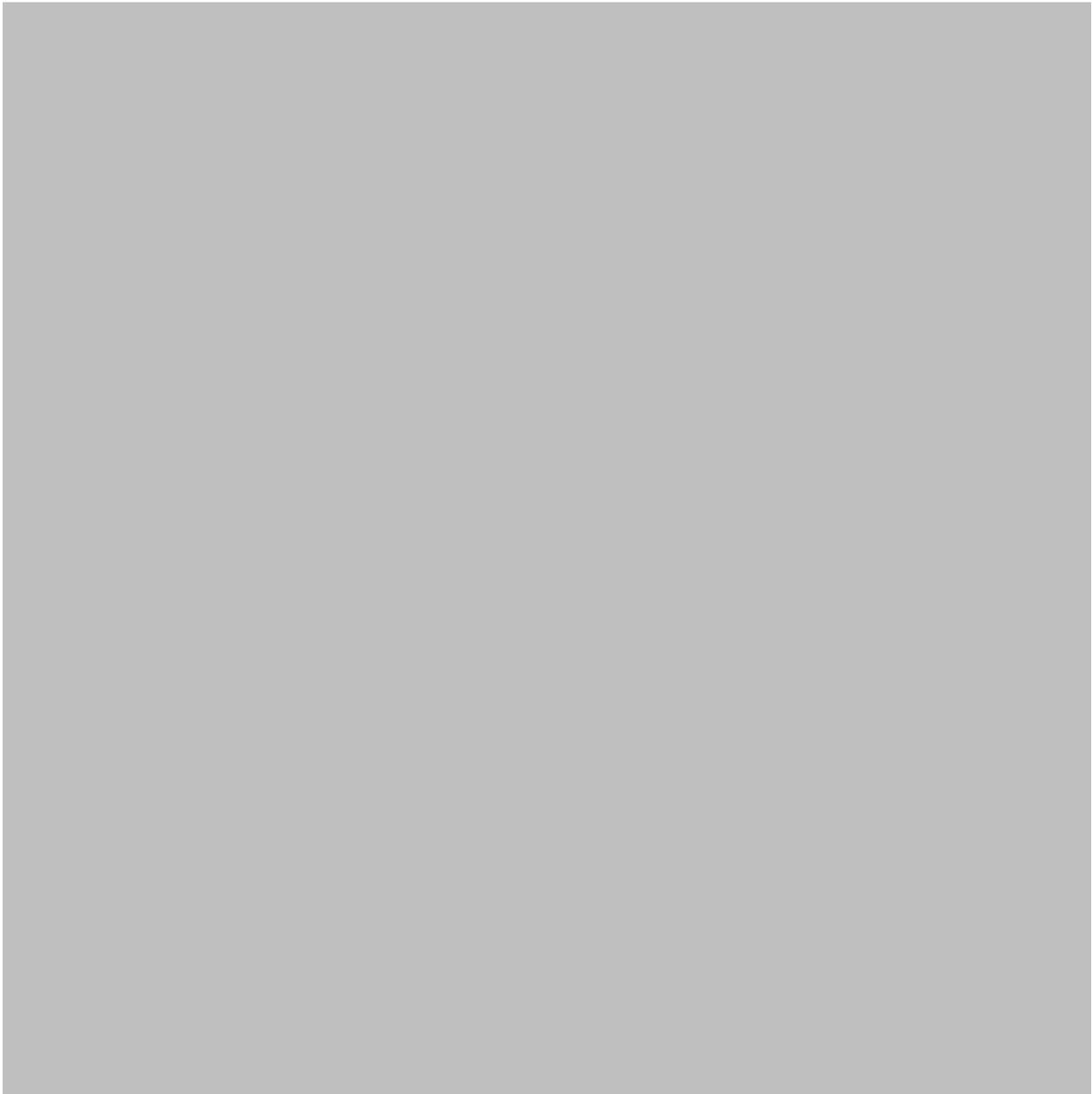
Zum Einbringen der lokalen Wärmelast war eine schnell ansprechende, lokale Wärmequelle zu entwickeln, aufzubauen und zu testen. Die finale Version dieser Wärmequelle hat eine aktive Oberfläche von rund 0.7 m² und ist in [1] im Detail beschrieben. Maßgeblich für die Untersuchungen der Wärmeausbreitung ist ihre Ansprechzeit, die an der steigenden Flanke bei weniger als 30 s und damit bei einem Bruchteil der inversen Luftwechselrate während der Experimente

liegt. Dies wurde erreicht durch Verwendung eines Mantelmaterials mit sehr geringer Wärmekapazität einerseits und der Entwicklung einer computergestützten Steuerung der Heizleistung, die es erlaubt, die verbleibende Wärmekapazität der Wärmequelle durch einen dynamischen Heizzyklus zu kompensieren [1].









2.1.1.3 AP1.3 Ausbreitung lokaler Wärmequellen

Es war der Einfluss einer lokal zeitlich veränderlichen Wärmequelle auf die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung in der Do 728-Kabine experimentell zu untersuchen. Gemäß der beantragten Aufstockung waren hierbei drei verschiedene Heizleistungen und vier verschiedene Belüftungsfälle (MV, CCDV und zwei hybride CDV / CCDV Varianten) zu berücksichtigen. Bei den im Folgenden dargestellten Strömungsfällen betrug der Volumenstrom jeweils 600 NI/s bzw. 8,6 NI/s/PAX. Die Wärmequelle wurde periodisch mit einer Periodendauer von 600 s und einem Arbeitszyklus von 300 s betrieben. Die Messungen wurden in Einzelfällen durch Messungen der Sprungantworten auf einmaliges Einschalten der nominellen Heizleistung flankiert.

Neben Messungen lokaler Strömungstemperaturen und -geschwindigkeiten wurden Oberflächentemperaturverteilungen per IR Thermografie zeitaufgelöst vermessen und Strömungsvisualisierungen durchgeführt. Durch Korrelation der lokalen Daten mit der aktuellen Oberflächentemperatur der Wärmequelle konnte das Übertragungsverhalten des jeweiligen Strömungsfalls charakterisiert werden. Der Einfluss der Wärmequelle auf die Temperaturen in der Kabine¹ wur-

¹ Der Einfluss auf die Luftgeschwindigkeiten in der Kabine wurden in analoger Weise untersucht.

de quantifiziert, indem das Maximum der Kreuzkorrelation $R_{S_n R}^{ex}$, der lokalen Temperaturen, $S_n(t)$, und der normierten, mittleren Oberflächentemperaturen der Wärmequelle, $R(t)$, bestimmt wurde, siehe [1]. Auf diese Weise wurde die Ausbreitung von Wärmelasten für MV, CCDV sowie zwei hybride CDV / CCDV-Fälle bei jeweils drei unterschiedlichen Leistungen der Wärmequelle (100 W, 200 W und 400 W) vermessen und analysiert. Ergebnisse für die Fälle MV und CCDV sind bereits in [1] und [2] veröffentlicht. Es wurden große Werte für $R_{S_n R}^{ex}$ bei beiden Belüftungssystemen im Gangbereich beobachtet, wo die Wärme freigesetzt wurde. Die Werte im Passagierbereich in der Umgebung der Wärmequelle sind dagegen sehr viel moderater, was auf eine effiziente Vermischung von warmer und frischer Luft bei beiden Systemen hinweist. Die Werte im Passagierbereich sind vergleichbar für MV und CCDV und skalieren in erster Näherung mit der Heizleistung. Bei den beiden niedrigeren Heizleistungen bleibt die freigesetzte Wärme im Passagierbereich sehr stark in der Nähe der Wärmequelle lokalisiert. Im Wesentlichen sind nur die Reihen vor und hinter der Reihe, in der die Wärmequelle positioniert ist, betroffen, und zwar sowohl bei MV als auch bei CCDV. Bei der höchsten Heizleistung breitet sich die Wärme im Passagierbereich bei MV wesentlich weiter aus, während sie bei CCDV noch immer sehr stark lokalisiert bleibt. Die Ergebnisse des vertikalen Messbaums im Gang zeigen, dass bei MV ab einer Heizleistung von 400 W die Auftriebskräfte die Trägheitskräfte übersteigen, sodass warme Luft bis zur Decke aufsteigen kann, während dies bei CCDV bereits ab 200 W der Fall ist. Bei MV führt dies dazu, dass die Ausbreitung im Passagierbereich, in den die Wärme dann letztlich über die Zuluftstrahlen gedrückt wird, zunimmt, während sie im Gangbereich in Flugzeuglängsrichtung lokalisiert bleibt. Bei CCDV sind die Verhältnisse genau umgekehrt: Die Ausbreitung in Längsrichtung im Gangbereich nimmt zu, während der Einfluss auf das Klima im Passagierbereich stärker lokalisiert bleibt. Es ist klar zu erkennen, dass die beiden Luftführungsprinzipien – die impulsgetriebene MV und die auftriebsgesteuerte CCDV – verschiedene Transferpfade und -dynamiken der lokal eingebrachten Wärmelasten implizieren. Die sich im Gangbereich bei CCDV ausbildenden großskaligen thermischen Strukturen führen offenbar zu einer effizienten Verdünnung der Wärmelasten und helfen auf diese Weise die Auswirkungen auf das passagiernahe Klima zu begrenzen.

Dieser Trend lässt sich bei den in Abbildung 12 dargestellten, hybriden CDV / CCDV-Fällen ebenfalls beobachten, die bei einer Heizleistung von 200 W aber verschiedenen Verteilungen der Zuluftmengen zwischen decken- und bodenseitigen Luftauslässen gemessen wurden. Die hybriden Fälle werden im Folgenden mit CCDV-X%-Y% abgekürzt, wobei X% den Prozentsatz der Frischluft, die über die CCDV-Auslässe zugeführt werden und Y% den entsprechenden Prozentsatz der CDV-Auslässe angibt [22]. Während bei der reinen CCDV noch eine starke Lokalisierung der eingetragenen Wärme zu beobachten ist, wird diese über immer größere Bereiche verteilt, sobald die deckenseitige Luftmenge reduziert und die bodenseitige Luftmenge erhöht wird. Teilweise sind auch hier gegenphasige Temperaturänderungen zu beobachten, die auf eine Beeinflussung der globalen Strömungsstrukturen durch die Wärmelast hinweisen.

Dies ist sehr deutlich an den Signalen der im Gangbereich positionierten Sensoren zu erkennen. Als Beispiel sind in Abbildung 13 die $R_{S_n R}^{ex}$ -Werte der horizontal auf Brusthöhe im Gang angeordneten Sensoren dargestellt (siehe grüne Markierungen im Gangbereich in Abbildung 4). Während bei Mischlüftung bei allen drei Heizleistungen eine Lokalisierung der Werte um den Bereich der Wärmequelle selber zu beobachten ist, die in erster Linie auf eine turbulente Mischung mit der Zuluft hinweist, finden sich bei den hybriden Fällen, hier am Beispiel des Falles CCDV-67-33, ausgeprägte Seitenextrema (positiv und negativ). Offenbar wird in diesem Bereich die über der Wärmelast zur Decke aufgestiegene Wärme nach Mischung mit der Zuluft in Flugrichtung seitlich von der Wärmequelle wieder nach unten getragen. Mit anderen Worten: Die Wärmelast induziert in Längsrichtung des Ganges Konvektionsrollen, deren Abmessungen erwartungsgemäß mit steigender Heizleistung der Wärmelast zunehmen, und die zu einer stärkeren Ausbreitung der Wärme in Längsrichtung der Kabine beitragen, vgl. Abbildung 12. Zu beachten sind auch die gegenphasigen $R_{S_n R}^{ex}$ -Extrema in Abbildung 13 (b), die auf eine teilweise

Verdrängung der Zuluft in die vorderen und hinteren Bereiche der Kabine aufgrund des zusätzlichen Impulseintrags durch die Wärmelast hinweisen.

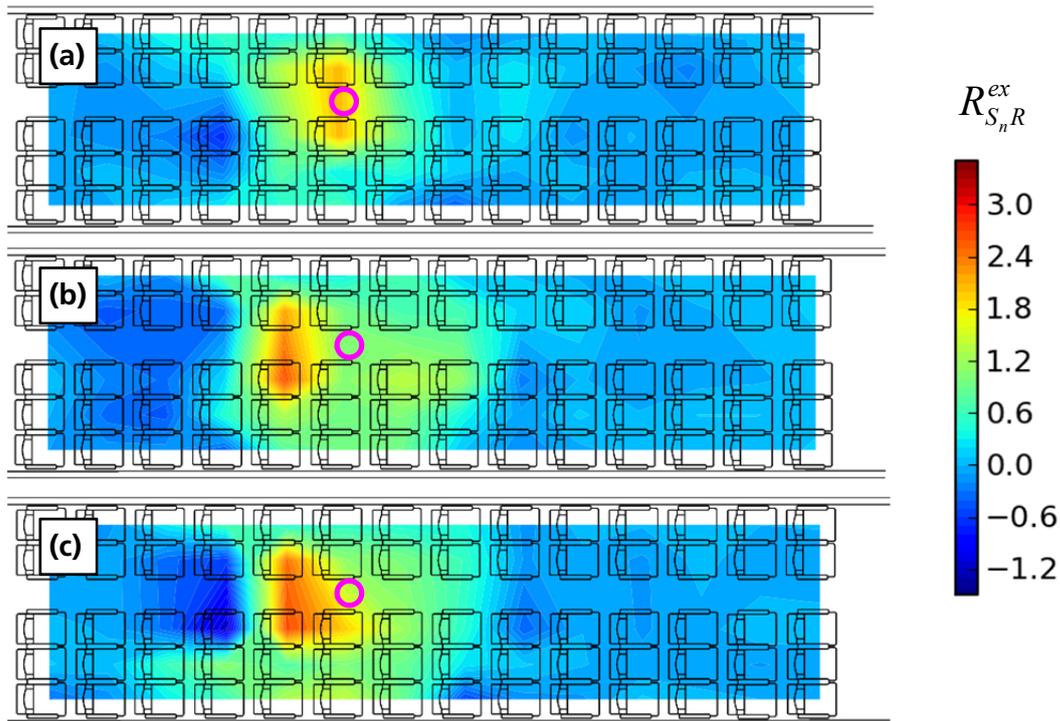


Abbildung 12: Extremum der Kreuzkorrelation, $R_{S_n R}^{ex}$, der Temperaturen auf Brusthöhe in Dummiesnähe bei einer Leistung der Wärmequelle von 200 W für (a) CCDV, (b) CCDV-67-33 und (c) CCDV-50-50.

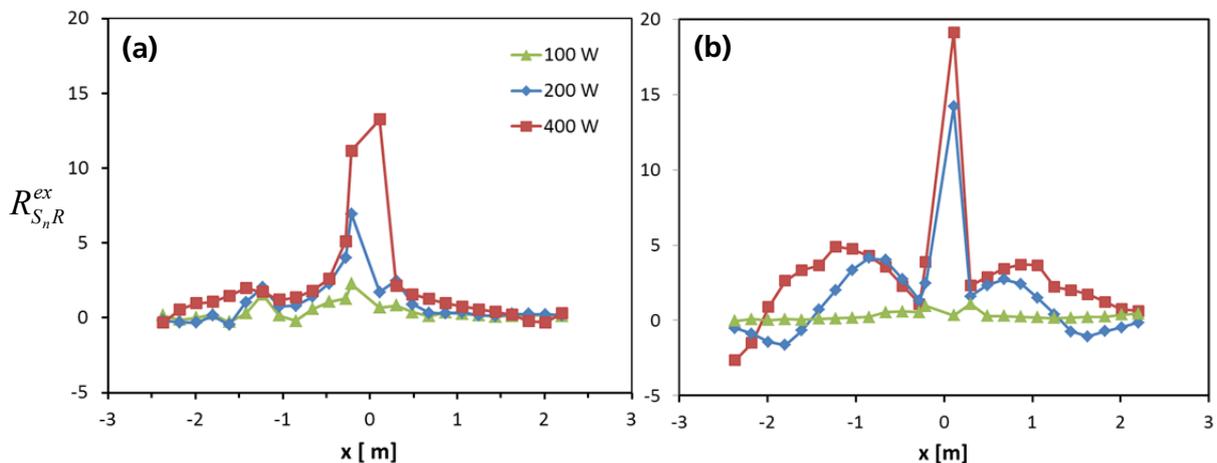


Abbildung 13: Extremum der Kreuzkorrelation, $R_{S_n R}^{ex}$, der Temperaturen auf Brusthöhe im Gangbereich für drei verschiedene Leistungen der Wärmequelle (grün: 100 W, blau: 200 W, rot: 400 W) bei (a) MV und (b) CCDV-67-33. Die Wärmequelle ist bei $x = 0$ positioniert.

Die Bedeutung der Zuluftmengen- und Impulsverteilung auf die Transferpfade der eingebrachten Wärme lassen sich sehr deutlich in den Signalen des vertikalen Messbaums SR4 hinter der Wärmequelle ablesen, siehe Abbildung 14. Für MV ist anhand des ausgeprägten Maximums bei $z = 0,65$ m deutlich zu erkennen, dass die durch die Wärmelast erwärmte Luft durch die Zuluftstrahlen lateral fortgespült wird. Im oberen Bereich, d. h. für $z > 1,25$ m finden sich hingegen negative Werte für $R_{S_n R}^{ex}$, was auf eine Verschiebung der Zuluftstrahlen durch die Wechselwirkung mit den durch die Wärmelast induzierten Auftriebskräften hinweist.

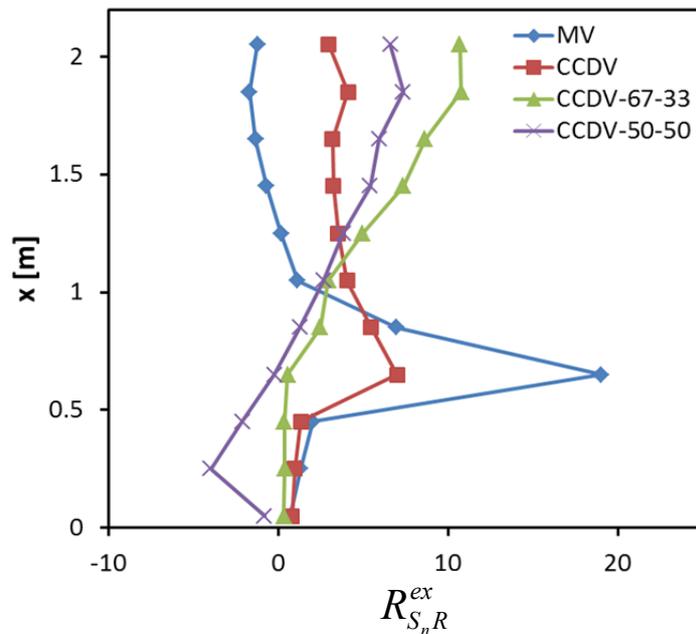


Abbildung 14: Extremum der Kreuzkorrelation, $R_{S_n R}^{ex}$, der Temperaturen gemessen mit dem vertikalen Temperaturmessbaum SR4 in der Nähe der Wärmequelle (siehe Abbildung 4) bei MV (blau), CCDV (rot), CCDV-67-33 (grün) und CCDV-50-50 (violett). Die Leistung der Wärmequelle betrug 200 W.

Die genaue Klärung des Mechanismus erfolgt weiter unten mit den Ergebnissen aus Abbildung 15. Bei CCDV wird ein Aufsteigen der durch die Wärmelast erwärmten Luft in den oberen Kabinenbereich in Gestalt positiver $R_{S_n R}^{ex}$ beobachtet. Dies ist möglich, da hierbei mit der Zuluft wesentlich weniger Impuls von außen in die Kabinenströmung gebracht wird. Dieser Effekt wird noch einmal stärker beim Wechsel zu CCDV-67-33, da hier der durch die Schwerkraft der eingebrachten Zuluft gegenüber der reinen CCDV nochmals reduziert ist. Ab diesem Strömungsfall wird auch kein laterales Abschwimmen der erwärmten Luft von der Wärmequelle mehr beobachtet. Bei einer nochmaligen Reduzierung der deckenseitigen Zuluftmenge setzt sich dieser Trend jedoch nicht weiter fort: Bei CCDV-50-50 sinkt $R_{S_n R}^{ex}$ im oberen Gangbereich wieder. Der Grund hierfür wird im unteren Gangbereich sichtbar, wo negative $R_{S_n R}^{ex}$ beobachtet werden, die auf ein verstärktes Ansaugen kühler Luft aus dem Frischluftsee hinweisen. Dies führt zu einer erhöhten Kühlleistung in der Nähe der Wärmequelle und damit zu einer geringeren Erhöhung der Temperaturen über der Wärmequelle.

Um die Transferpfade der Wärmelast genauer zu verstehen, wurden Temperaturfelder der Strömung mittels IR-Thermografie von Styroporkugeligittern erfasst. Details hierzu sind in [2] dokumentiert. Ergebnisse für eine Heizleistung von 200 W sind in Abbildung 15 dargestellt. Diese visualisiert nicht die $R_{S_n R}^{ex}$, sondern die mittlere Änderung der Temperaturen des Styroporkugeligitters aufgrund des Einschaltens der Wärmequelle am Ende der Heizzyklen, gemittelt über 9 Zyklen, $\langle \Delta T \rangle$. Bei MV ist deutlich zu erkennen, dass die lateral abtransportierte, warme Luft der Wärmequelle durch die Zuluftstrahlen zunächst unter die Gepäckfächer gedrückt wird, wo sie sich sammelt und schließlich nach oben steigt. Offenbar werden dabei die Zuluftstrahlen teilweise aus der Ebene der Wärmequelle bzw. der entsprechenden Sitzreihe verdrängt, was zu negativen $R_{S_n R}^{ex}$ im oberen Bereich von SR4 führt, siehe Abbildung 14. Bei CCDV, siehe Abbildung 15 (b), wird zwar offenbar ebenfalls ein Teil der Wärmelast lateral abtransportiert, ein großer Teil der erwärmten Luft steigt aber bis zur Decke auf, wo er sich durch Aufbrechen der instabilen thermischen Schichtung mit entsprechender Wirbelbildung (siehe hierzu auch die Erläuterungen in [22]), mit der Zuluft mischt.

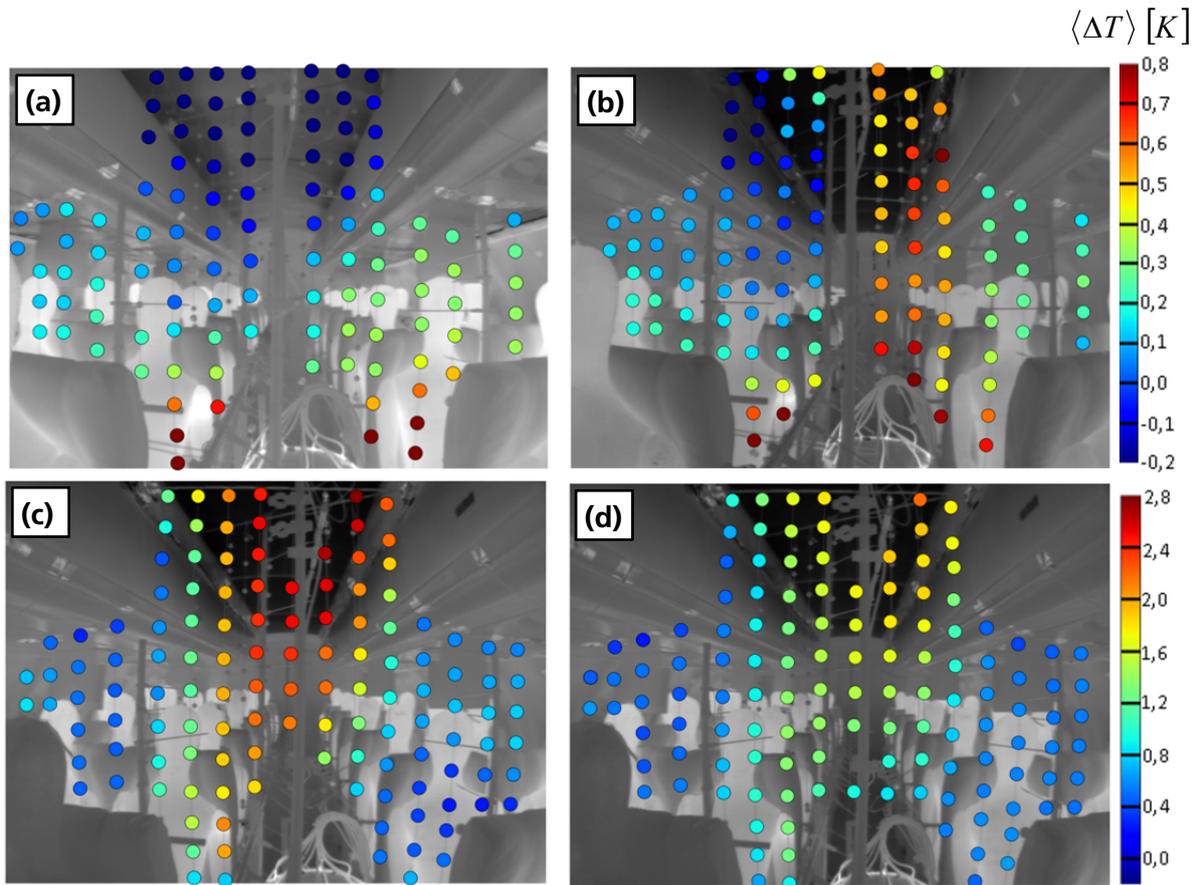


Abbildung 15: Mittlere Änderung der Lufttemperaturen aufgrund des Einschaltens der Wärmequelle (nach 300 s) bei einer Leistung der Wärmequelle von 200 W für **(a)** MV, **(b)** CCDV; **(c)** CCDV-67-33 und **(d)** CCDV-50-50, ermittelt mittels IR-Thermografie eines Styroporkugelgitters. Die Größe der Temperaturmarker in der Abbildung ist gegenüber den für die Messung verwendeten Styroporkugeln, die einen Durchmesser von 20 mm hatten, stark vergrößert.

Beim Wechsel zu CCDV-67-33 steigen die beobachteten Temperaturdifferenzen, in Übereinstimmung mit Abbildung 14 deutlich an. Hier überwiegt als Transferpfad das direkte Aufsteigen der erwärmten Luft im Gangbereich. Dabei sind die induzierten Auftriebsgeschwindigkeiten so groß, dass, wie in Abbildung 13 beobachtet, Rollenstrukturen im Gangbereich induziert werden.

Die Tatsache, dass die erhöhten mittleren Temperaturdifferenzen im oberen Gangbereich großflächig auftreten weist auf eine Durchmischung durch Wechselwirkung mit der deckenseitigen Zuluft hin.

Der Fall CCDV-50-50 schließlich ist qualitativ zwar vergleichbar mit CCDV-67-33, allerdings ist das Niveau der Temperaturerhöhungen hier insgesamt niedriger aufgrund der bereits diskutierten erhöhten Kühlleistung durch verstärktes Ansaugen von Kühlluft aus dem Frischluftsee.

2.1.1.4 AP1.4 Weiterentwicklung der lokalen Wärmequelle, Erweiterung der Messanlage

Die eingehende Darstellung erfolgte bereits in Abschnitt 2.1.1.1.

2.1.1.5 AP1.5 Ausbreitung lokaler Wärmelasten bei variabler Heizleistung

Die eingehende Darstellung erfolgte bereits in Abschnitt 2.1.1.3.

2.1.2 TP2 – Technologien für ein aktives Lining

Das Teilprojekt 2 begann mit der in Arbeitspaket AP2.1 vorgesehenen Definition des Lining-Systems. Dazu wurde gemeinsam mit dem Verbundpartner DAC der Typ des Seitenwandpaneels (Lining) definiert. Das ausgewählte Bauteil besitzt, im Unterschied zu dem im Rahmen des vorangegangenen LUFO IV.2-Projektes SINTEG untersuchten Spacer-Linings (vgl. [8]), eine komplexe Geometrie mit zwei Fenstern. Die ebenfalls im Rahmen von AP2.1 vorgesehene Definition der Primärstruktur musste aufgrund fehlender Informationen zur realen Rumpfstruktur zurückgestellt werden. Die Arbeiten in Arbeitspaket AP2.2 fokussierten daher zunächst auf die Modellierung des Lining-Bauteils.

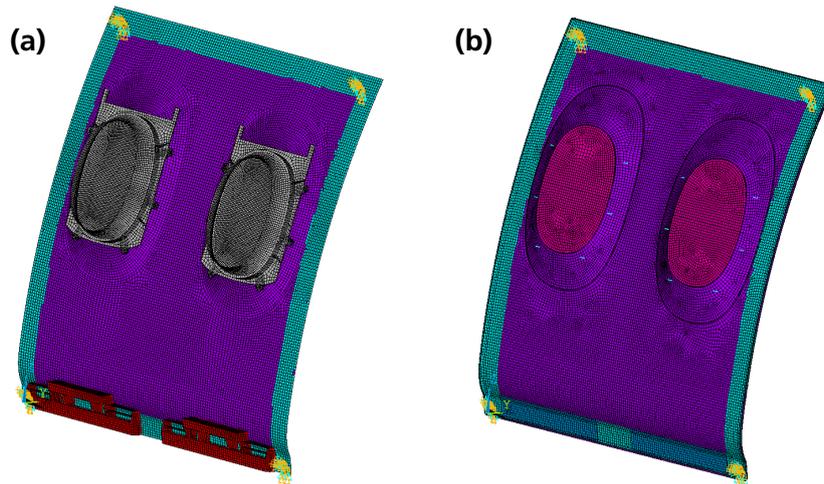


Abbildung 16: Lining-Referenzmodell (a) und Lining-Zielmodell (b).

Als Ausgangspunkt für die Erstellung eines dynamischen FE-Simulationsmodells des Linings stellte DAC dem DLR ein statisches FE-Modell des Linings zur Verfügung. Dieses Modell wurde zur weiteren Verwendung in Ansys® Parametric Design Language (APDL)-Code umgewandelt und für die dynamischen Simulationen aufbereitet. Dieses FE-Modell wird im Folgenden als Lining-Referenzmodell bezeichnet. Aufgrund der eingeschränkten Nutzbarkeit des Lining-Referenzmodells als Subkomponente in einem gekoppelten Doppelschalensystem (Gründe: festes Netz, keine Geometriedefinition) wurde ein weiteres FE-Modell (ANSYS® Flächenmodell) erstellt. Dieses FE-Modell wird im Folgenden als Lining-Zielmodell bezeichnet. Die beiden Modelle sind in Abbildung 16 dargestellt. Zur Modellierung des Linings wurde unter anderem auf folgende Fachliteratur zurückgegriffen [32][33][34][35].

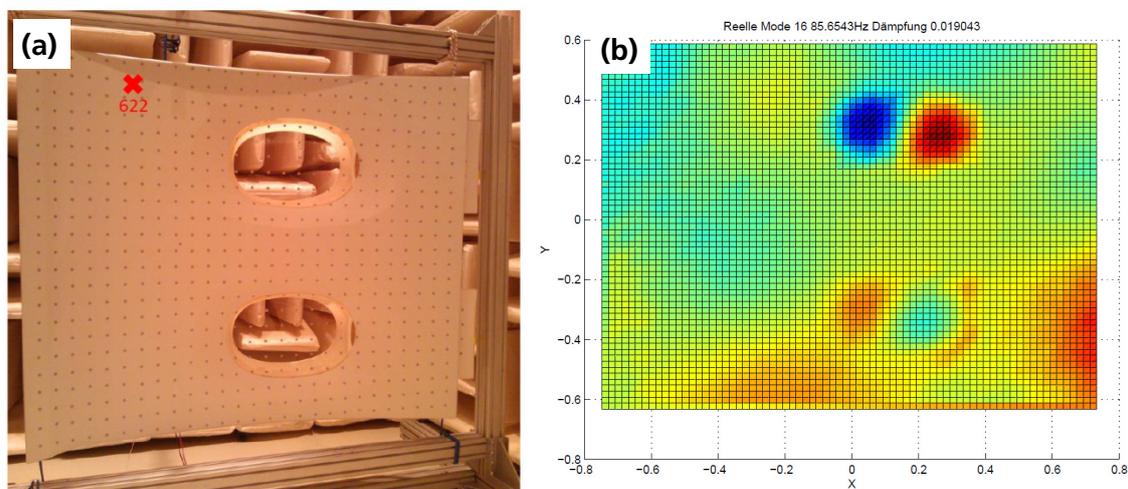


Abbildung 17: Messaufbau mit elastischer Lagerung des Linings und Reflektornetz (graue Punkte) für das SLDV (a) und Eigenform bei 86 Hz (b) ermittelt aus Messdaten.

Beim Lining-Zielmodell (siehe Abbildung 16 (b)) wurden Punktmassen verwendet um den Einfluss der Fensterrahmen und der Dado-Struktureinheit (rote Bereiche in Abbildung 16 (a)) abzubilden. Beide Modelle wurden einer numerischen Modalanalyse unterzogen. Die Resultate ergaben deutliche Unterschiede. Es zeigte sich, dass beim Lining-Referenzmodell viele Eigenformen von Fenster- und Rahmenstruktur geprägt sind und die modale Dichte (die Anzahl Eigenfrequenzen innerhalb einer Bandbreite) höher ist als beim Lining-Zielmodell.

Parallel zu den Modellierungsarbeiten wurde ein Prüfstand aufgebaut, welcher die dynamische Vermessung eines realen Lining-Bauteils unter Kraftanregung erlaubt (siehe Abbildung 17 (a)). Zur Gewinnung von Validierungsdaten wurden Messungen mit einem Scanning Laser-Doppler-Vibrometer (SLDV) bei Kraftanregung des Bauteils an Position 622 (siehe Abbildung 17 (a)) durchgeführt. In Abbildung 17 (b) ist exemplarisch eine aus den Daten der Testmessung abgeleitete Eigenform dargestellt. Die größten Schwingungsamplituden treten bei dieser Eigenform im Bereich des oberen Fensters auf (dunkelblaue und dunkelrote Bereiche).

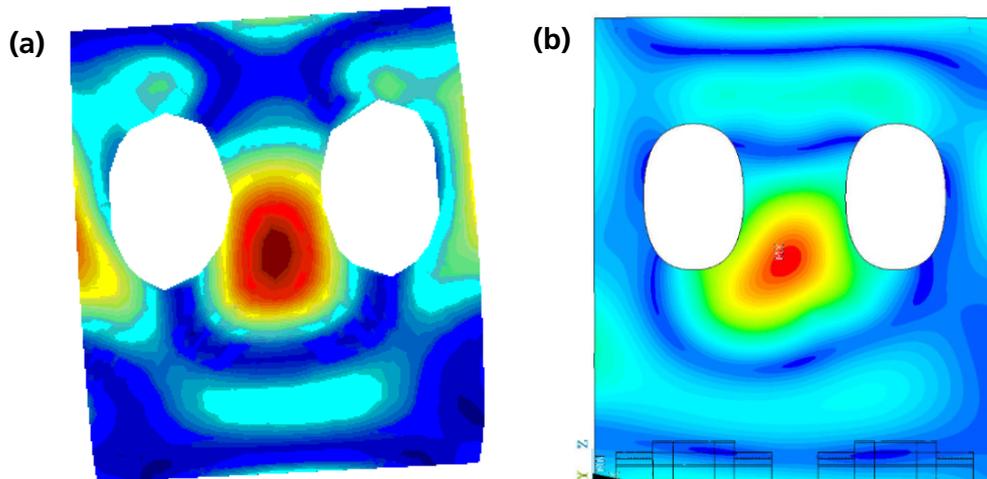


Abbildung 18: Vergleich einer aus Experimentaldaten berechneten Eigenform bei 66,9 Hz **(a)** und einer simulierten Eigenform des Lining-Referenzmodells bei 71,3 Hz **(b)**.

Die Erfassung der Oberflächenschwinggeschwindigkeit des Bauteils erfolgte mit dem SLDV an den 622 Messpunkten des regelmäßigen Messgitters (graue Punkte in Abbildung 17 (a)). Die Fenstereinheiten des Linings waren während der Messung demontiert. Die Messdaten wurden mit den Ergebnissen von Frequenzgangs- (ANSYS® harmonic analysis) und Modalanalysen der Lining-Modelle verglichen. Abbildung 18 zeigt exemplarisch einen Vergleich einer aus Messdaten abgeleiteten (a) und einer simulierten (b) Eigenform.

Während das Lining-Referenzmodell eine hinreichende Übereinstimmung der Strukturodynamik mit den Messdaten aufwies, ergaben sich für das vereinfachte Lining-Zielmodell größere Abweichungen. Ursächlich dafür ist die hohe Strukturkomplexität des Lining-Bauteils, welche in dem vereinfachten Lining-Zielmodell noch nicht korrekt abgebildet wurde. Flankierend zu den in Arbeitspaket AP2.2 vorgesehenen und durchgeführten Arbeiten wurde deshalb ein Laborversuch zur Vermessung des Schalldämmmaßes des Lining-Bauteils im ATB realisiert. Für diese Arbeiten wurden zusätzliche Mittel im Zuge einer Aufstockung bereitgestellt. Die Bearbeitung erfolgte gemäß den Teilarbeitspaketen AP2.2b und AP2.2c.

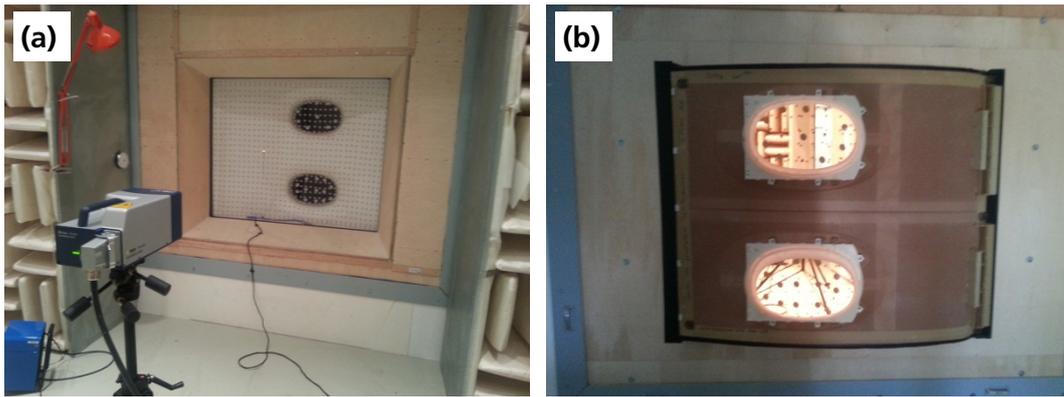


Abbildung 19: Seitenwandpaneel im ATB aus Sicht des reflexionsarmen Raums (a) und des Hallraums (b).

Zur Vermessung des Schalldämmmaßes wurde das Lining-Bauteil in die Prüföffnung des ATB montiert. Der Einbau der Seitenwand in die Prüföffnung des hoch schalldämmenden Einbau-rahmens erfolgte nach der von DAC bereitgestellten Spezifikation [36]. Der Spezifikation folgend, wird die Seitenwand auf einem umlaufenden Filzstreifen gelagert und mit Gewebeklebeband fixiert und abgedichtet. Die Einbausituation ist in Abbildung 19 dargestellt.

Abbildung 20 zeigt die Verläufe des gemessenen Schalldämmmaßes des Lining-Bauteils. Die Messungen im ATB wurden unter Verwendung einer Schallintensitätsmesssonde mit zwei unterschiedlichen Spacern (hochpräzise Abstandsstücke zwischen den beiden Druckmikrofonen siehe Gade [37]) mit 12 mm (geeignet für hohe Frequenzen) bzw. 50 mm (geeignet für tiefe Frequenzen) Länge durchgeführt. Die Messung mit dem 50-mm-Spacer weist bis zu einer Grenzfrequenz von 1500 Hz eine maximale Abweichung zur Referenzmessung von ca. 1 dB auf. Oberhalb von 1500 Hz korreliert die Messung mit dem 12-mm-Spacer besser mit der Referenz. Auch hier ergeben sich Maximalabweichungen von ca. 1 dB. Aufgrund der hohen Übereinstimmung der gemessenen Schalldämmmaße gelten die Messumgebung ATB und die verwendete Messkette für die vorliegende Problemstellung als validiert.

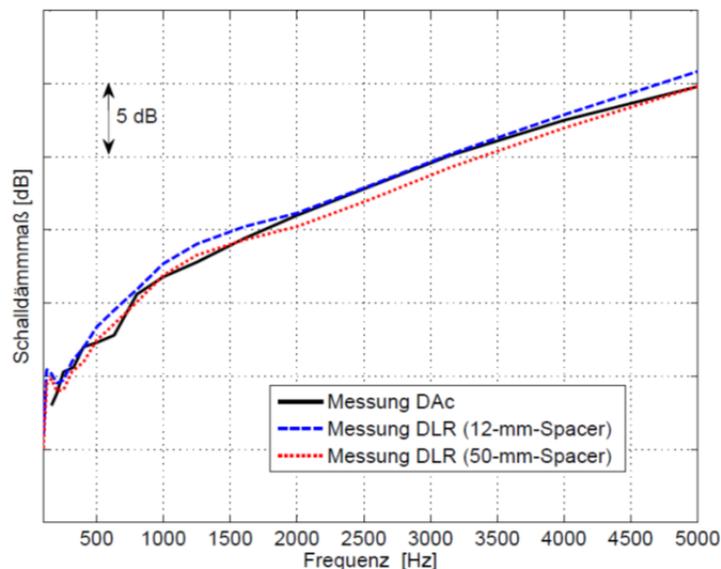


Abbildung 20: Vergleich des Schalldämmmaßes des Linings gemessen von DAC und gemessen im ATB des DLR mit unterschiedlichen Spacern.

Nach der Validierung von Messumgebung und Messkette wurde das Lining-Zielmodell mithilfe von Messdaten aus dem ATB überarbeitet und hinsichtlich des Schalldämmmaßes validiert. Es wurde ein Rayleigh-Dämpfungsmodell für das verwendete Material nach Cai et al. [38] angepasst.

Zur Simulation und Berechnung des Schalldämmmaßes wurden die Randbedingungen als einfache Auflager an den umlaufenden Kanten modelliert. Um die experimentelle Diffusfeldanregung im Hallraum in der Simulation nachzustellen, wurden die schalldruckinduzierten Erregerkräfte, wie in Heintze et al. [39] beschrieben, berechnet. Dafür wurden gleichmäßig verteilte Punktschallquellen auf einer Halbkugel in großer Entfernung zur Struktur positioniert und mit stochastischer Phase überlagert. Eine beispielhafte Kraftverteilung abgeleitet aus der berechneten Diffusfeldanregung ist in Abbildung 21 für eine Frequenz von 500 Hz aufgetragen.

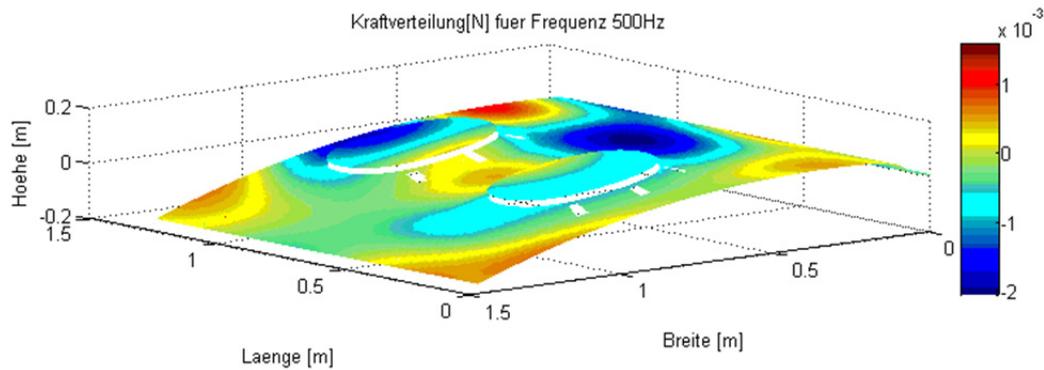


Abbildung 21: Induziertes Kraftfeld des Diffusfeld-Simulationsmodells auf der Strukturoberfläche des Lining-Zielmodells.

Die Berechnung der vom Lining abgestrahlten Schalleistung erfolgte gemäß Elliott und Johnson [27] unter Verwendung der Schallstrahlungsresistenzmatrix und den simulierten Knotenschnellen in Flächennormalenrichtung.

Abbildung 22 vergleicht das simulierte Schalldämmmaß des Lining-Zielmodells mit Messdaten aus dem ATB und einem externen Labor. Die maximale Abweichung zwischen Simulations- und Messdaten beträgt ca. 2 dB. Unterhalb von ca. 1500 Hz sind die Abweichungen sogar noch geringer. Aufgrund der sehr hohen Übereinstimmung des simulierten und des gemessenen Schalldämmmaßes gilt das Lining-Zielmodell zumindest für tiefere Frequenzen als validiert.

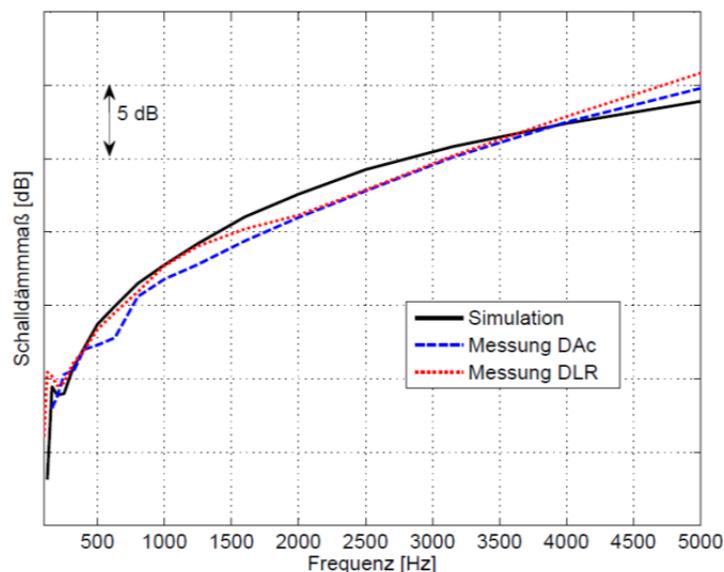


Abbildung 22: Vergleich des simulierten Schalldämmmaßes des Lining-Zielmodells mit Messdaten aus dem ATB (Messung DLR) und einem externen Labor (Messung DAC) für ein reales Lining-Bauteil.

Das validierte Lining-Zielmodell wurde planmäßig als Subkomponente des FE-Doppelschalenmodells verwendet. Der Aufbau der Primärschale (CFK-Rumpfschale in Abbildung 23 (a)) erfolgte

parametrisch, was spätere Sensitivitätsstudien verschiedener Parameter (Art der Anbindung, Abstand der beiden Strukturelemente usw.) ermöglicht. Die Zielsetzung für die Definition der Primärschale war es, die wesentlichen Vorgänge der Schalltransmission (Körper- und Luftschallpfade) mit möglichst generischen Strukturbauteilen (z. B. vereinfachte Geometrien der Versteifungselemente) abzubilden. Dadurch soll das Verständnis der physikalischen Vorgänge erleichtert werden und der Aufwand für die (im Rahmen des Nachfolgeprojekts SYLVIA geplante) Fertigung minimiert werden. Aufgrund des parametrischen Aufbaus des Primärschalenmodells konnte auf detaillierte Informationen zur Primärstruktur – welche weder DAC noch DLR vorlagen – zunächst verzichtet werden. Der parametrische Aufbau bietet ausreichend Flexibilität für eine spätere Anpassung des Modells an die realen Gegebenheiten. Die Fluid-Struktur-Kopplung wurde an allen relevanten, schalleintragenden Flächen wie Häute, Fensterscheiben und Spanten definiert. Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt exemplarisch die erzeugten FE-Modelle der Primärstruktur und der Doppelschale.

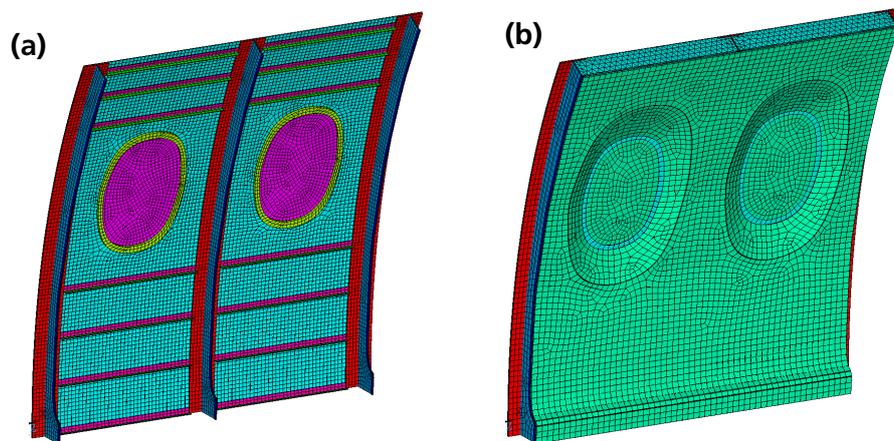


Abbildung 23: FE-Modelle der CFK-Rumpfschale **(a)** und des Doppelschalensystems mit angekoppeltem Lining **(b)**.

Um die Funktionalität des gekoppelten FE-Modells zu überprüfen, wurden Modalanalysen durchgeführt. Abbildung 24 zeigt eine der simulierten Eigenformen des Systems.

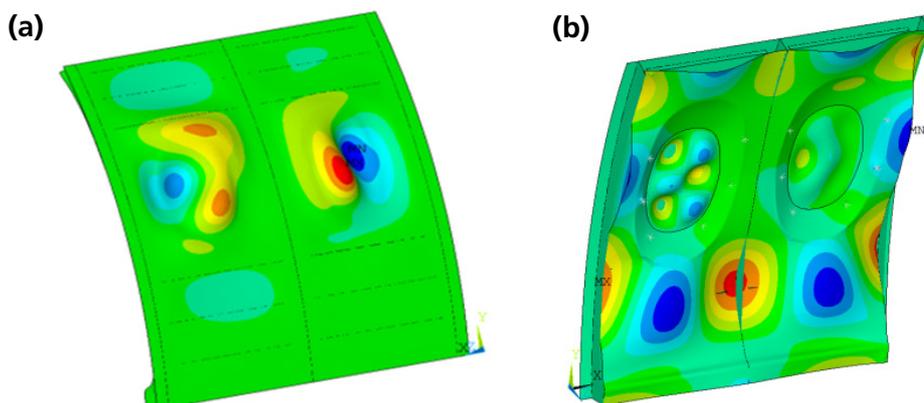


Abbildung 24: Eigenform des Doppelschalensystems bei 134 Hz berechnet mithilfe des FE-Modells in Ansys®. Eigenform aus Sicht des Rumpfes **(a)** und des Linings **(b)**.

Insgesamt wurde damit das Hauptziel von Arbeitspaket AP2.2, welches in der Erstellung eines dynamischen FE-Modells des Lining-Systems lag, erreicht. Die in Arbeitspaket AP2.1 geplante Definition der Primärschale konnte mangels genauerer Informationen nicht abgeschlossen werden. Aufgrund des parametrischen Aufbaus des FE-Modells der Primärschale resultieren daraus

jedoch keine Nachteile für die Erreichung der Projektziele von DIANA und des prospektiven Nachfolgeprojekts SYLVIA.

Ein weiterer Teil von Arbeitspaket AP2.2 sowie das Teilarbeitspaket AP2.2a betrifft die für das ASAC-System benötigte Aktuatorik. Wirksame und gleichzeitig leichte Aktuatoren mit geringer Baugröße sind eine notwendige Bedingung für aktive Schallstrukturbeeinflussung in Flugzeugen. Aus diesem Grund werden piezoelektrische Aktuatoren favorisiert, die die genannten Eigenschaften aufweisen. Bekanntermaßen weisen Piezokeramiken, wie das verwendete Blei-Zirconium-Titanat (PZT), jedoch Hystereseeffekte und damit Nichtlinearitäten auf, die die Verwendung im Rahmen der Akustik negativ beeinflussen [40]. Die Folge dieser Erscheinung sind störende Oberwellen, für die das menschliche Ohr sehr empfindlich ist. Um dieser Problematik zu begegnen, wurde im Rahmen von DIANA eine zweigleisige Strategie verfolgt. Zum einen wurden in AP2.2 alternative Aktuatoriken betrachtet (als sinnvolle Ergänzung oder als Rückfalloption) und zum anderen wurde in AP2.2a versucht, eine Lösung für das Problem der Nichtlinearitäten der Piezoaktuatoren zu finden.

Zunächst soll auf die in AP2.2 vorgesehene Modellierung alternativer Aktuatoriken genauer eingegangen werden. Die Auslegung von adaptronischen Systemen zur aktiven Schwingungsreduktion (AVC) oder zur Reduktion der abgestrahlten Schallleistung (ASAC) erfordert die Modellierung der mechanischen Gesamtstruktur einschließlich der verwendeten Aktuatoren und Sensoren. Nachdem ein Modell der mechanischen Grundstruktur – im Fall von DIANA das Lining-System – erstellt wurde, wird dieses um den Einfluss der Aktuatorik erweitert und in ein numerisches Auslegungswerkzeug, welches im DLR als ASAC-Prozesskette bezeichnet wird, integriert. Im Rahmen der ASAC-Prozesskette, die unter anderem für die strategische Auswahl von guten Aktuatorpositionen im Hinblick auf AVC bzw. ASAC verwendet wird, wurden bisher nur Aktuatoren berücksichtigt, die durch externe Shaker oder durch aufgeklebte flächige Piezokeramikmodule an vorgegebenen Positionen mit der Grundstruktur gekoppelt werden. Da in den Anwendungen zunehmend sogenannte Inertialshaker eingesetzt werden, aufgrund der Nichtlinearitäten von Piezokeramiken oder weil die eingebrachte Leistung nicht ausreicht und externe Shaker meistens aus Kosten- und Platzgründen nicht benutzt werden können, erschien es ratsam die ASAC-Prozesskette um diesen Aktuatortyp zu erweitern. Solche Inertialshaker, die unter anderem von der Firma Visaton (z. B. das Modell EX 45 S [41]) bezogen werden können, besitzen eine träge Masse nebst Feder und Dämpfung (siehe Abbildung 25).

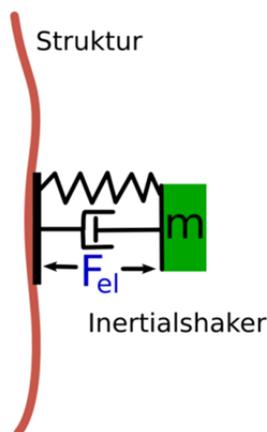


Abbildung 25: Prinzipskizze für einen als Einmassenschwinger modellierten Inertialshaker.

Durch elektromagnetische Kopplung werden Kräfte (F_{el}) erzeugt, die letztendlich in erster Näherung senkrecht zur Oberfläche auf die Struktur einwirken und sich dabei auf der trägen Masse m des Inertialshakers abstützen. Dies hat den Vorteil, dass keine weitere Lagerung nötig ist und der Inertialshaker nur mit der Struktur verklebt bzw. verschraubt werden muss. Durch experimentelle Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass im für ASAC-Systeme relevanten Frequenzbereich solche Inertialshaker hinreichend gut durch einen Einmassenschwinger dargestellt werden

können. In der ASAC-Prozesskette liegt die Achse des Inertialshakers stets in Normalenrichtung zur Oberfläche. Die Punktmasse erfordert pro appliziertem Aktuator einen zusätzlichen Freiheitsgrad im dynamischen Modell.

Konkret wurden zwei Shaker-Modelle der Firma Visaton (EX 45 S und EX 60 S [42]) experimentell über 7 Parameter identifiziert und in die ASAC-Prozesskette eingebunden. Die betrachteten Parameter sind das Produkt G aus magnetischer Flussdichte und effektiver Spulenlänge, die Federsteifigkeit k , die mechanische Dämpfung d , die Spuleninduktivität L , der elektrische Widerstand R , die schwingende Masse m , sowie die Fußpunktmasse m_0 . Letztere ergibt sich indirekt über die Gesamtmasse des betreffenden Inertialshakers. Zur Identifikation wurden zwei Frequenzgänge (Spannung/Strom und Spannung/Verschiebung) der Shakermodelle an die experimentell ermittelten Frequenzgänge bestmöglich angepasst. Die Implementation geschieht, wie in Abbildung 25 gezeigt, über zusätzliche schwingende Massen in Kombination mit diskreten Steifigkeiten und Dämpfungen, sowie der elektrischen Verschaltung. Neu hinzugekommen ist nun die Verwendung von Aktuatoren unterschiedlicher Größe und Typs (Punktkräfte, Inertialshaker, flächige Piezokeramikmodule) in einem Modell. Um bei der Optimierung zueinander passende Parameter nutzen zu können, wurden darüber hinaus nun alle Steuerungsparameter der verwendeten Aktuatoren (elektrische Spannungen bzw. mechanische Kräfte) durch dimensionslose Größen mit Maximalamplituden von eins ersetzt. Die Einbindung der Inertialshaker in das bestehende modale Modell der mechanischen Grundstruktur erfolgt im Frequenzbereich über Gleichungen der Form $F(s) = a(s) u(s) + b(s) U(s)$, in denen s die Abhängigkeit von der Frequenz repräsentiert. $F(s)$ ist die Kraft und $u(s)$ die Verschiebung im Fußpunkt des Inertialshakers; $U(s)$ gibt die angelegte elektrische Aktuatorspannung an. $a(s)$ und $b(s)$ sind frequenzabhängige Funktionen, die über die 7 Parameter des betreffenden Inertialshakers bestimmt werden. Die Fußpunktmasse m_0 geht als zusätzliche Masse direkt in das bestehende Modell ein. Dabei konnten die Routinen zur Berechnung der Übertragungsfrequenzgänge derart angepasst werden, dass die durch die modale Darstellung des Grundsystems bestehende numerische Effizienz nur unwesentlich verschlechtert wird. Dies garantiert die für genetische Optimierungen zwingend nötige Effizienz auch für die erfolgte Erweiterung der ASAC-Prozesskette.

Im Folgenden soll genauer auf die in AP2.2a vorgesehene Entwicklung eines Konzeptes zur Kompensation der Nichtlinearitäten der Piezoaktuatoren eingegangen werden. Im Rahmen des Aufstockungsanteils von DIANA wurde ein neuartiger Verstärker entwickelt, der die Piezokeramik nicht mit einer geregelten Spannung, wie es bisher üblich ist, sondern über eine geregelte Ladung ansteuert. Das Ziel ist die Ausgabe einer der Eingangsspannung proportionalen Ladung.

Abbildung 26 zeigt die Amplitude des Ladungsfrequenzgangs des betreffenden Verstärkers bis zu einer Frequenz von 1600 Hz. Es ist gut zu erkennen, dass der Amplitudengang über weite Teile des Frequenzbereichs nahezu konstant verläuft, womit festzustellen ist, dass das Ziel der ladungsproportionalen Verstärkung erreicht wurde. Das Abknicken der Ladungskennlinie im unteren Frequenzbereich ist beabsichtigt, da hier vom ladungs- in den spannungsgeregelten Betrieb übergegangen wird, um ein Driften zu vermeiden.

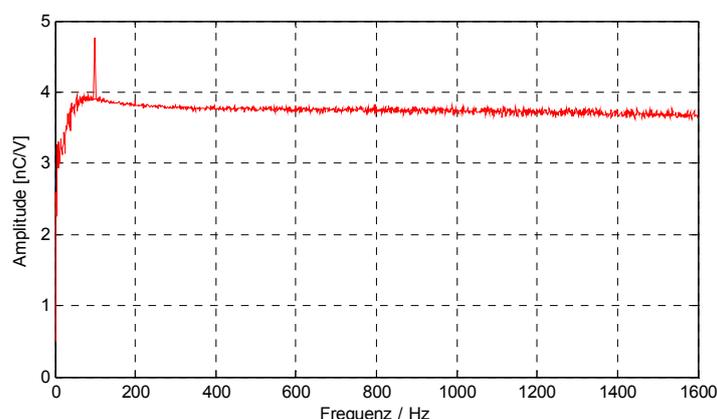


Abbildung 26: Amplitude des Ladungsfrequenzgangs des ladungsgeführten Verstärkers.

Weitere Messungen ergaben, dass der Verstärker selbst Oberwellen im Frequenzbereich oberhalb von 400 Hz erzeugt, sodass die Dehnungsmessergebnisse noch um diese Werte korrigiert wurden. Dazu wurden die Klirrfaktoren der jeweiligen Oberwellen, die im Ausgangssignal der Verstärker, d. h. dem Spannungs- oder Ladungssignal vorhanden sind, von den Klirrfaktoren der Dehnung subtrahiert, um die Verzerrungseigenschaften der Piezokeramik zu ermitteln. Dabei ist festzustellen, dass mit den bisher vorhandenen Messergebnissen die ladungsgeführte Ansteuerung von piezoelektrischen Aktuatoren der bisher üblichen spannungsgeführten überlegen ist. In Abbildung 27 ist dies daran zu erkennen, dass der wie beschrieben korrigierte Klirrfaktor der Dehnung bis zu einer Frequenz von 300 Hz bei ladungsgeführtem Betrieb (rote Säulen) kleiner ist, als bei spannungsgeführtem Betrieb (blaue Säulen). Gemessen wurden die Daten bei einer Betriebsspannung (U_{pp}) von ca. 100 V (Peak to Peak) an der Piezokeramik, sowohl für den ladungs- als auch für den spannungsgeführten Betrieb.

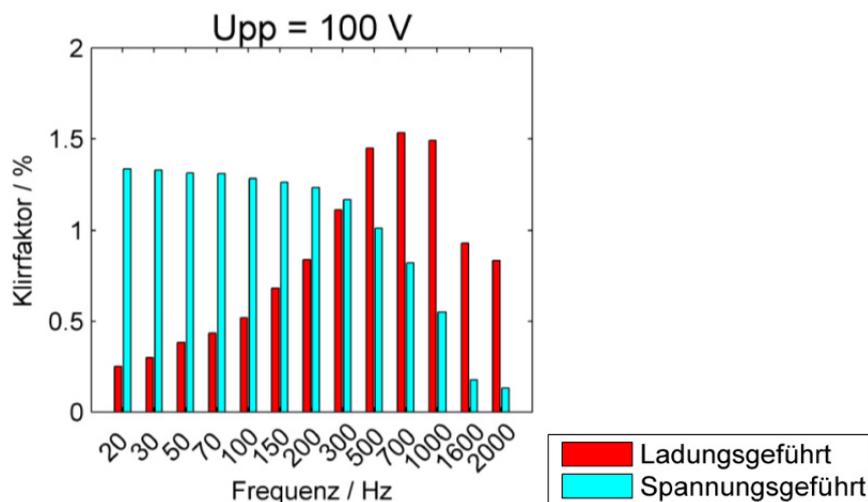


Abbildung 27: Korrigierte Oberwellengehalte im ladungs- und spannungsgeführten Betrieb.

Die Ursache für das Ansteigen der Klirrfaktoren im ladungsgeführten Betrieb liegt nach derzeitigen Erkenntnissen in Verzerrungen des ladungsgeführten Verstärkers bei höheren Frequenzen. Im Gegensatz zum idealen Verstärker steigen hier die Klirrfaktoren bereits in der dem Aktor zugeführten Ladung an, was sich entsprechend auf die Dehnung auswirkt. Daher wird eine Verbesserung des Verstärkers mit geringeren Verzerrungen in der Ladung angestrebt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Integration von Inertialshakern in die ASAC-Prozesskette erfolgreich durchgeführt und ein echtzeitfähiges Konzept zur Kompensation von Nichtlinearitäten der Piezoaktuatoren erarbeitet wurde. Weitere Arbeiten sind notwendig, um den Oberwellengehalt über die gesamte Bandbreite des aktiven Systems zu minimieren.

2.2 Voraussichtlicher Nutzen

Durch die erreichten Ziele konnten neue wissenschaftliche Impulse in Form von Konferenzbeiträgen und Veröffentlichungen gegeben, und damit die Kompetenz sowie das wissenschaftliche Renommee des DLR weiter ausgebaut werden [1][2][3]. Die Ausbildung von qualifizierten Nachwuchskräften im MINT-Bereich wurde im Rahmen des Projektes durch Betreuung von zwei Abschlussarbeiten unterstützt [4][5].

Dem Industriepartner DAC eröffnen sich durch die Ergebnisse des Vorhabens neue Möglichkeiten, auf die Herausforderungen aktueller und zukünftiger Flugzeuggenerationen mit zwei innovativen Produkten zu reagieren, seine Wettbewerbsposition im internationalen Markt zu stärken und die Beschäftigung von hoch qualifizierten Arbeitskräften in Deutschland zu sichern oder auszubauen. Die Fertigung und das Engineering der neuen innovativen Systeme würden im Falle einer Markteinführung voraussichtlich in Laupheim erfolgen. Die technisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse des Projektes dienen damit direkt, durch Akquirierung von Folgeaufträgen und Projekten, und indirekt, durch Wissenstransfer in die Industrie, dem Erhalt und der Sicherung von Arbeitsplätzen und Fachkompetenz in Deutschland. Um die Technologien zu kommerzialisieren, sind jedoch weitere Arbeiten in signifikantem Ausmaß erforderlich. Diese sollen im LUFO V.1-Projekt SYLVIA fortgeführt werden.

Erstmals wurden die verschiedenen Belüftungssysteme MV, CCDV und hybride CDV / CCDV unter dynamischen Bedingungen untersucht und charakterisiert. Die erzielten Testergebnisse erlauben wichtige und bislang nicht verfügbare Einblicke in die komplexe Dynamik der Transportprozesse der turbulenten Mischkonvektionsvorgänge von Innenraumströmungen. Ferner geben sie wichtige Hinweise für die Optimierung von Quelllüftungssystemen unter Flugbedingungen und damit die Auslegung derartiger Systeme in der Zukunft. Die resultierenden Messdaten stellen eine umfangreiche Datenbasis bislang nicht untersuchter Strömungsszenarien dar, die die Grundlage für Folgeprojekte darstellen kann.

Durch die Erweiterung der Kabinenmessanlage um weitere Sensoren, aber vor allem auch den erweiterten Zuluftstrang und die lokale, schnelle Wärmequelle konnte der Do 728 Versuchsträger weiter für fortgeschrittene Studien von Innenraumströmungen in Flugzeugkabinen im Rahmen von Industrienaufträgen und Folgeprojekten qualifiziert werden.

Als direkter Nutzen der Arbeiten von Teilprojekt 2 sind die Validierung der Messumgebung ATB und der Messkette sowie die Fähigkeit zur hochgenauen Simulation des Schalldämmmaßes anzusehen. Dank der Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner DAC konnte das DLR seine Messumgebung ATB sowie die zugehörige Messkette anhand von Daten aus einem externen Prüfstand erstmalig validieren. Dies erhöht die Attraktivität des ATB für zukünftige Messungen im Rahmen von Drittmittelprojekten oder Direktbeauftragungen. Die Kompetenzen im Bereich der Simulation der Schalldämmung von Leichtbaustrukturen sind sowohl für das DLR als auch für DAC von Nutzen. Das DLR kann die Erkenntnisse zur Auslegung aktiver Struktursysteme branchenübergreifend nutzen und DAC eröffnet sich eine Möglichkeit zur kosteneffizienten simulationsbasierten Bewertung unterschiedlicher Bauteilvarianten. Die kostspielige Fertigung und Vermessung von Bauteilvarianten kann somit reduziert werden.

Im Hinblick auf eine Fortführung der Forschungsaktivitäten im Rahmen des Nachfolgeprojekts SYLVIA steht nun ein parametrisches und teilvalidiertes dynamisches Simulationsmodell zur Verfügung, welches zur Auslegung des aktiven Lining-Bauteils herangezogen werden kann.

2.3 Fortschritte bei anderen Stellen

Neue Fortschritte bei anderen Stellen im Bereich der untersuchten Zielstellungen sind den Autoren nicht bekannt.

2.4 Veröffentlichungen und Erfindungsmeldungen

- [1] J. Bosbach, T. Dehne, Propagation of localized, unsteady heat loads in aircraft cabin air flows, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014, Augsburg, 16-18. September, 2014
- [2] T. Dehne, J. Bosbach, Transient temperature fields of turbulent mixed convection in an aircraft cabin caused by a local heat source, STAB-Symposium 2014, 4.-5. November, München, 2014
- [3] S. Algermissen, T. Haase, M. Misol, M. Pohl, M. Rose, O. Unruh, Schalldämmungssystem, DE 10 2013 102 612.5 (angemeldet)

2.5 Abschlussarbeiten

- [4] Pascal Lange, Auswirkung von lokalen und zeitlich veränderlichen Wärmelasten auf die turbulente Mischkonvektion in einer Flugzugkabine, Bachelorarbeit Nr. 167/12, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, 2013
- [5] Arne Robert Olszok, Leistungsverstärker mit erhöhten Linearitätseigenschaften zum Betrieb von Piezoflächenaktoren, Masterarbeit, TU Braunschweig, Institut für elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik, Braunschweig, 2014

Literaturverzeichnis

- [6] Airbus A320-232 D-ATRA, http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10203/339_read-277 (25.02.2013)
- [7] C. Wagner: Dornier Do 728 Ein Versuchsträger für die Kabinenforschung im DLR, http://www.dlr.de/media/Portaldata/1/Resources/portal_news/newsarchiv2007/broschuere_do728.pdf (25.02.2013)
- [8] J. Bosbach. Schlussbericht des Vorhabens "Auslegung und Verifikation neuer Verfahren der Kabinenbelüftung für Verkehrsflugzeuge", Förderkennzeichen 20K0806D, Report-Nr. 01067253, DLR, Göttingen, 2013
- [9] M. Kühn, J. Bosbach, C. Wagner. Experimental parametric study of forced and mixed convection in a passenger aircraft cabin mock-up, *Building and Environment*, vol. 44, no. 5, pp 961-970, 2009
- [10] M. Kühn, J. Bosbach, C. Wagner. Stability of the air flow in a two aisle cabin model, First CEAS European Air and Space Conference, Berlin, Germany, September 10-13, 2007
- [11] M. Schmid, D. Müller, I. Gores, M. Markwart. Numerical study of different air distribution systems for aircraft cabins, 11th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Copenhagen, Denmark, August 17-22, 2008
- [12] S. Yin, T. Zhang. A new under-aisle displacement air distribution system for wide-body aircraft cabins, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, pp 1030-1036, 2009
- [13] T. Zhang, Q. Chen. Novel air distribution systems for commercial aircraft cabins, *Building and Environment*, vol. 42, no. 4, pp 1675-1684, 2007
- [14] D. Müller, M. Schmidt, B. Müller (2011) Application of a displacement ventilation system for air distribution in aircraft cabins, AST 2011, March 31 – April 1, 2011, Hamburg, Germany
- [15] A. Mangili, M.A. Gendreau. Transmission of infectious diseases during commercial air travel, *The Lancet*, vol. 365, pp 989-996, 2005
- [16] S. Mazdumar, S.B. Poussou, C.H. Lin, S.S. Isukapalli, M.W. Plesniak, Q. Chen. Impact of scaling and body movement on contaminant transport in airliner cabins, *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp 6019-6028, 2011
- [17] V. Bianco, O. Manca, S. Nardini, M. Roma. Numerical investigation of transient thermal and fluiddynamic fields in an executive aircraft cabin, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp 3418-3425, 2009
- [18] C. Wu, N.A. Ahmend. Numerical study of transient aircraft cabin flowfield with unsteady air supply, *Journal of Aircraft*, vol. 48, pp1994-2000, 2011
- [19] W. Yan, Y. Zhang, Y. Sun, D. Li. Experimental and CFD study of unsteady airborne pollutant transport within an aircraft cabin mock-up, *Building and Environment*, vol. 44, pp 34-43, 2009
- [20] V. Bianco, O. Manca, S. Nardini, M. Roma. Numerical Investigation of transient thermal and fluid dynamic fields in an executive aircraft cabin. *Applied Thermal Engineering* 29, pp 3418-3425, 2009
- [21] J. Wang, T.T. Chow. Numerical investigation of influence of human walking on dispersion and deposition of expiratory droplets in airborne infection isolation room. *Building and Environment*, vol. 46, pp 1993-2002, 2011
- [22] J. Bosbach J, S. Lange, T. Dehne, G. Lauenroth, F. Hesselbach, M. Allzeit. Alternative ventilation concepts for aircraft cabins. *CEAS Aeronautical Journal*, vol. 4, pp 301-313, 2013
- [23] E. Monaco, F. Franco, C. Illibato. A structural-acoustic coupled model for designing an asac on a regional jet fuselage, in *Proc. of Active 2004 Conference-Williamsburg, Virginia*, Sep. 2004.

- [24] A. Grewal, D. G. Zimcik, L. Hurtubise, B. Leigh. Active cabin noise and vibration control for turboprop aircraft using multiple piezoelectric actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 11, no. 6, pp. 438–447, Jun. 2000.
- [25] C. Y. Wang, R. Vaicaitis. Active control of vibrations and noise of double wall cylindrical shells, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 216, no. 5, pp. 865–888, Oct. 1998.
- [26] G. P. Gibbs, K. W. Eure, J. W. Loyd. Active control of turbulent-boundary-layer-induced sound radiation from aircraft style panels, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, p. 2823, 2000.
- [27] S. J. Elliott, M. E. Johnson. Radiation modes and the active control of sound power, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 94, no. 4, pp. 2194–2204, 1993.
- [28] T. C. Sors, S. J. Elliott. Volume velocity estimation with accelerometer arrays for active structural acoustic control, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 258, no. 5, pp. 867–883, 2002.
- [29] S. Algermissen, M. Misol, O. Unruh. Reduction of turbulent boundary layer noise with actively controlled carbon fiber reinforced plastic panels, in *Adaptive, Tolerant and Efficient Composite Structures*, ser. Research Topics in Aerospace, M. Sinapius and M. Wiedemann, Eds. Berlin/Heidelberg: Springer, 2013, ch. 34, pp. 417–425.
- [30] M. Misol, S. Algermissen, O. Unruh. Adaptive feedforward control of smart cfrp-panels excited by a turbulent boundary layer, in *Proceedings of the Inter-noise 2010*. Lissabon: Sociedade Portuguesa de Acústica, 2010, CD-Rom. [Online]. Available: <http://elib.dlr.de/64846/>
- [31] S. Algermissen, M. Misol, O. Unruh, O. Heintze, H. P. Monner. Robust control of turbulent boundary layer noise transmission through a stiffened panel, in *Proceedings of the 17th International Congress on Sound and Vibration*. International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), 2010, CD-Rom.
- [32] M. Friswell, J. Mottershead. *Finite element model updating in structural dynamics*. Springer, 1995.
- [33] L. Cremer, M. Heckl. *Körperschall*. Springer, 1967.
- [34] F. Fahy, P. Gardonio. *Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response*, 2nd ed. Oxford/Burlington: Academic Press, 2007.
- [35] M. Möser. *Technische Akustik*, 7th ed. Berlin/Heidelberg: Springer, 2007.
- [36] Diehl Aircabin GmbH. *Acoustic Test Procedure Side Wall*, Nov. 2011, iD: TP-A-X25-4768.
- [37] S. Gade. "Sound intensity (theory)," Brüel&Kjaer, Technical Review 3, 1982.
- [38] C. Cai, H. Zheng, M. S. Khan, K. C. Hung. Modeling of material damping properties in ANSYS, in *Proceedings of CADFEM Users' Meeting & ANSYS Conference*, 2002.
- [39] O. Heintze, M. Rose, S. Algermissen, M. Misol. Development and experimental application of a pre-design tool for active noise and vibration reduction systems, in *Proceedings of the 38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE)*, J. S. Bolton, B. Gover, and C. Burroughs, Eds. Washington, DC.: The Institute of Noise Control Engineering of the USA, Inc., 2009.
- [40] K. Kuhnen. Inverse Steuerung piezoelektrischer Aktoren mit Hysterese-, Kriech- und Superpositionsoperatoren, Ph.D. dissertation, Universität Saarbrücken, 2001.
- [41] Visaton, 2014. [Online]. Available: http://www.visaton.de/de/industrie/koerperschall/-ex45s_8.html
- [42] —, 2014. [Online]. Available: http://www.visaton.de/de/industrie/koerperschall/-ex60s_8.html
- [43] A. R. Olszok. Leistungsverstärker mit erhöhten Linearitätseigenschaften zum Betrieb von Piezoflächenaktoren, Master's thesis, Technische Universität Braunschweig, Institut für elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik, 2014.