



## Schlussbericht des Vorhabens „EFFEKT – Effiziente Kabine durch digitale Vernetzung von Technologien und Systeme“

<b>Zuwendungsempfänger</b>	
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Linder Höhe, 51147 Köln	FKZ 20D1927J
<b>Autoren</b>	
Dr.-Ing. Malte Misol* (für Teilprojekt 1) Dr.-Ing. Alexander Pototzky* (für Teilprojekt 2) Dipl. Vw. Klaus Lütjens**, M. Sc. Maurice Timmer** (für Teilprojekt 3)	
*Institut für Systemleichtbau, DLR Braunschweig **Institut für Luftverkehr, DLR Hamburg	
Laufzeit des Vorhabens	01.01.2020–30.09.2023
Datum	30.11.2023

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 20D1927J 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.



## Inhalt

1	Abkürzungsverzeichnis.....	3
2	Kurzdarstellung .....	4
2.1	Aufgabenstellung .....	4
2.2	Voraussetzungen des Vorhabens .....	5
2.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
2.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn .....	8
2.4.1	Teilprojekt 1 – Aktive Geräuschunterdrückung .....	8
2.4.2	Teilprojekt 2 – Integrierte elektrische Bauteile .....	10
2.4.3	Teilprojekt 3 – Anwendungsfälle, Nutzerziele, Anforderungen und Bewertung ....	11
2.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	12
3	Eingehende Darstellung .....	13
3.1	Erzielte Ergebnisse .....	13
3.1.1	Teilprojekt 1 – Aktive Geräuschunterdrückung .....	13
3.1.2	Teilprojekt 2 – Integrierte elektrische Bauteile .....	30
3.1.3	Teilprojekt 3 – Anwendungsfälle, Nutzerziele, Anforderungen und Bewertung ....	41
3.2	Voraussichtlicher Nutzen .....	52
3.3	Fortschritte bei anderen Stellen .....	53
3.4	Veröffentlichungen und Vorträge .....	53
3.5	Erfindungsmeldungen .....	54
3.6	Abschlussarbeiten .....	54
4	Literaturverzeichnis .....	54



## 1 Abkürzungsverzeichnis

ARU	Air Refrigeration Unit (Galley Kühlmodul für Trolleys)
ANVC	Active Noise Vibration Control
AP	Arbeitspaket
CLD	Constrained Layer Damping
DAG	Diehl Aviation Gilching GmbH
DAH	Diehl Aviation Hamburg GmbH
DAL	Diehl Aviation Laupheim GmbH
DAs	Diehl Aerospace GmbH
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
FRF	Frequency Response Function (Frequenzgang)
SPL	Schalldruckpegel
TAP	Teilarbeitspaket
TP	Teilprojekt
TC	Test Condition

## 2 Kurzdarstellung

Das DLR-Verbundprojekt DLR4EFFEKT liefert einen Beitrag zum von Diehl Aviation geführten Verbundvorhaben EFFEKT. In DLR4EFFEKT werden die Themen aktive Schalldämpfung von Klimageräten, Applikation von Leiterbahnen in Faserverbundwerkstoffe und Bewertung von neuen Kabinenkonzepten erforscht.

### 2.1 Aufgabenstellung

Die Struktur und der Arbeitsplan des Teilvorhabens DLR4EFFEKT sind in Abbildung 1 dargestellt.

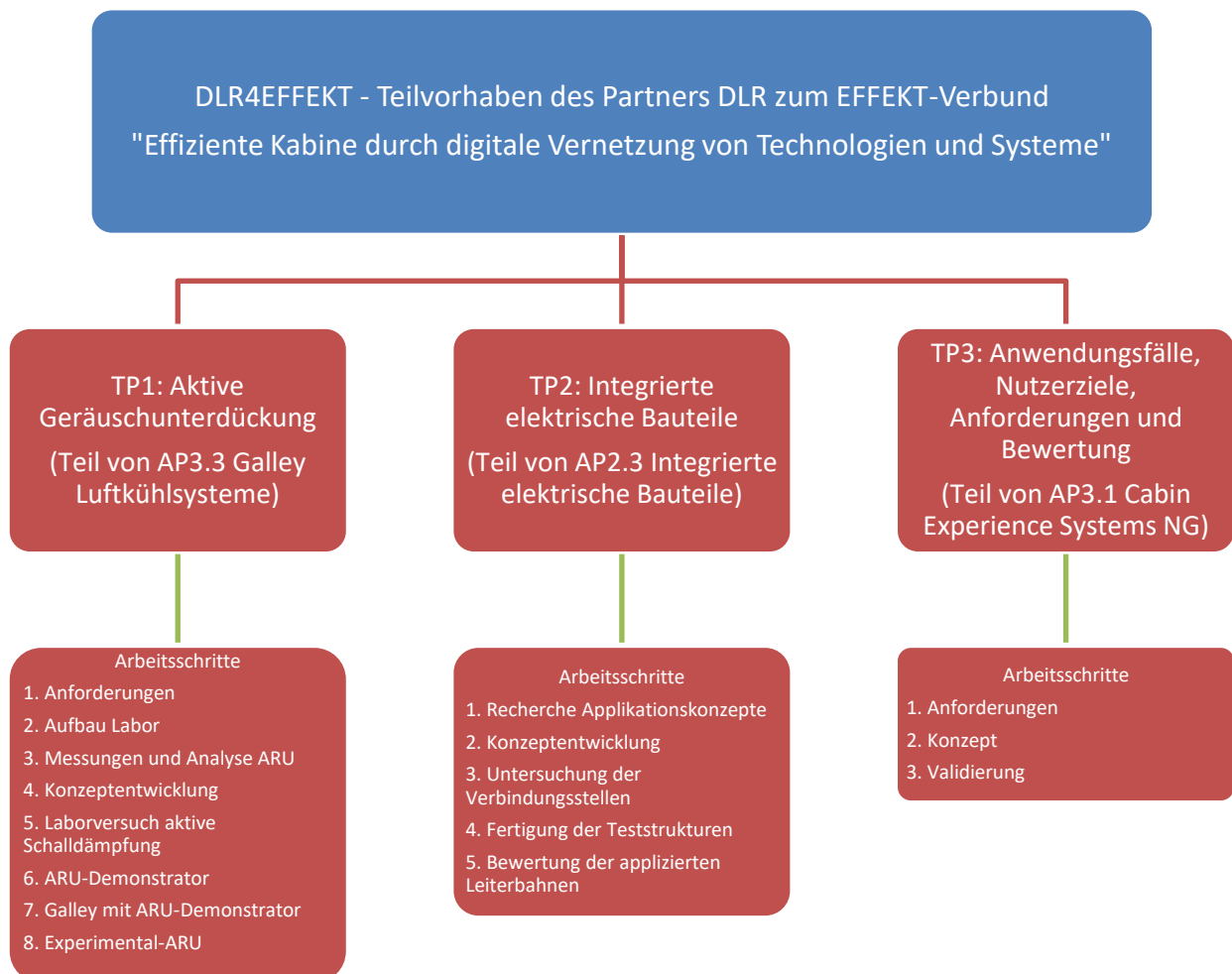


Abbildung 1: Struktur und Arbeitsplan des Teilvorhabens DLR4EFFEKT.

In TP1 werden massen- und volumeneffiziente aktive Schallreduktionsmaßnahmen für hochintegrierte Bauteile am Beispiel der Air Refrigeration Unit (ARU) erforscht, welche eine Kosten- und Gewichtsreduktion der ARU bei reduzierter Schallemission zum Ziel haben. In TP2 werden die Potenziale von Faserverbundwerkstoffen unter dem Aspekt Leiterbahnapplikation identifiziert und

untersucht. Die Funktionserweiterung von Strukturen soll eine Gewichtsreduktion ermöglichen und die erhöhte Integrationsdichte den Montageaufwand reduzieren. In TP3 wird die Wertigkeit von Kabinensystemen für Airlines und Passagiere untersucht. Es werden Systeme und Funktionen für jeweils angemessene betriebliche Einsatzszenarien Anforderungen, Präferenzen und Zahlungsbereitschaften ermittelt. Damit soll einerseits der Innovationsprozess im Projekt nutzerzentriert erfolgen und andererseits das Innovationsmodell für die Kabinenforschung verfeinert werden.

## **2.2 Voraussetzungen des Vorhabens**

Das Vorhaben war Teil des LuFo-Verbundprojektes EFFEKT unter der Verbundführerschaft von DAL. Es baute auf einer erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen DAL und dem DLR im Rahmen der LuFo-Projekte SYLVIA (Dehne et al. 2018), DIANA (Bosbach und Misol 2014) und SINTEG (Bosbach 2013) auf. In das Projekt EFFEKT brachte das DLR seine Kompetenzen im Bereich der aktiven Lärmreduktion, der Verbindung von elektrischen Leiterbahnen mit Faserverbundstrukturen sowie der Technologiebewertung und nutzerzentrierten Produktentwicklung ein. Mit der Expertise und Marktcompetenz von DAL und DAG bei der Herstellung moderner Kabinensysteme und den im Rahmen der vorangegangenen Projekte gewonnenen Erfahrungen waren optimale Voraussetzungen für die Erforschung und Entwicklung neuer Kabinentechnologien gegeben.

Die in TP1 betrachtete Thematik der aktiven Geräuscherdrückung für hochintegrierte Kabinensysteme am Beispiel einer ARU war eine neue Problemstellung verglichen mit den im Rahmen der Vorgängerprojekte durchgeführten Arbeiten an aktiven lärmreduzierten Seitenwandpaneelen. Im Unterschied zu einem Seitenwandpaneel handelt es sich bei der ARU um eine aktive Komponente mit eigener Aktorik, Sensorik und Regelungstechnik. Die ARU ist somit ein deutlich komplexeres System und die Entwicklung von aktiven Maßnahmen zur Lärmreduktion der ARU stellte eine große Herausforderung für das DLR dar. Das Vibrationsverhalten und die Schallabstrahlung der ARU lässt sich nur experimentell ermitteln, weshalb dem DLR von DAG eine ARU zur Verfügung gestellt wurde. Der für die Leistungsversorgung der ARU benötigte Inverter wurde aus Beständen des DLR beigestellt. Die ARU wurde in einem Stand-Alone-Prüfstand im Akustiklabor des DLR gemäß den Spezifikationen von Diehl Aviation getestet. Die Integration der ARU in eine einsatznahe Umgebung (Galley) wurde zu Projektende gemeinsam mit DAL durchgeführt.

Das Teilarbeitspaket 2 untersucht die Potenziale von applizierten Leiterbahnen auf Faserverbundwerkstoffe. Die Verkabelungen auf der Rückseite von Kabinenbauteilen ist ein nicht zu vernachlässigender Arbeits- und Gewichtsanteil. Die Strom-, Kommunikations-, und Erdungskabel müssen alle einzeln auf der Rückseite der Kabinenmonumenten verlegt und befestigt werden.

Für diese Befestigungen müssen sogenannte Brackets auf der Oberfläche montiert und in einem Abstand von 20cm - 50cm verklebt werden. Auf diesen Brackets werden die einzelnen Kabel verlegt und fixiert.

An dieser Stelle hat der Stoff- und Materialleichtbau seine Grenzen erreicht. Um weiterhin Gewicht einsparen zu können, sollen Leiterbahnen direkt auf die Struktur appliziert werden. Auf diese Weise lassen sich durch eine geschickte Materialauswahl sowohl Befestigungs- als auch Isolationsmaterialien einsparen. Das DLR hat schwerpunktmäßig die Mechanik und elektrische Verbindungstechnik untersucht. DAL hat sich auf die elektrische Isolation und deren Eigenschaften konzentriert. Weiterhin wurden von der DAL die Testspezifikationen definiert sowie das entsprechende Grundsubstrat für die Applikationsversuche geliefert.

Nach einer Konzeptentwicklung zur Leiterbahnapplikation wurden vom DLR Untersuchungen durchgeführt, Kreuzungs-, Verteiler- und Anschlussbereiche von applizierten Leiterbahnen zu realisieren. Anschließend erfolgte eine mechanische Untersuchung der Verbindungen in Form von Zugtests.

Im Rahmen des grundfinanzierten Projekts Next Generation Car (NGC), hat das DLR Lösungen zu strukturintegrierten elektrischen Leitern und deren Kontaktierung erarbeitet. Die Integration von flachen metallischen Leitern in das Verbundbauteil wurde dabei für die Leistungsversorgung von verschiedensten Verbrauchern genutzt. Der Leiter ist dabei vollständig in die umgebende Verbundstruktur integriert (Pototzky et al. 14.11.2017). Für das Projekt EFFEKT werden diese Erkenntnisse auf eine Sandwichstruktur übertragen. Statt die Leiterbahnen vollständig zu integrieren, sollen diese in TP2 auf die Struktur appliziert werden. Hierbei muss sich neben den herkömmlichen Verlege-Techniken auch mit der Anhaftung der Leiterbahnen sowie der Oberflächenbehandlung der Sandwichstrukturen auseinandergesetzt werden.

Untersuchungsgegenstand im TP3 des DLR ist im AP3.1 das Cabin Experience System Next Generation. Hierzu wurden im LUFO-Projekt iCabin unter anderem vom Projektpartner Diehl Aviation wesentliche Vorarbeiten geleistet (Trunk 2019). Gegenstand der Forschung im Projekt iCabin war die standardisierte, drahtlose Verbindung verschiedener Kabinensysteme und -anwendungen, unter anderem Sitze, Galleys und Lavatories sowie weitere Sensoren und Oberflächen. Das Ziel einer solchen Infrastruktur sind die Sammlung und der Austausch von Informationen über die Kabine, um deren Status in Echtzeit ermitteln zu können. Dies ist die Grundlage, um eine Vielzahl von Anwendungen für die Kabinencrew und die Passagiere zu ermöglichen.

Das DLR Institut für Luftverkehr hat umfangreiche Kompetenzen in der Luftfahrtbetrieblichen Forschung mit direkter Schnittstelle zum Flugzeug. Im Fokus steht die Nutzung von Flugzeugen und Infrastrukturen durch Fluggesellschaften und Passagiere, u.a.: Bewertung flexibler Sitze im

Kontext des Revenue-Managements (Lütjens 2017), Demonstration eines neuen Gate-Designs am Flughafen Hamburg (Kefalidou 2016) oder KI-basierte Optimierung von Flugplänen (Radde 2017).

## 2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In DLR4EFFEKT wird die Fragestellung der effizienten Kabine im Rahmen von drei Teilprojekten adressiert. Die in DLR4EFFEKT geplanten Arbeiten tragen zu den Teilarbeitspaketen des EFFEKT Gesamtverbundvorhabens von Diehl Aviation bei. In Abbildung 2 ist der Balkenplan für die Teilarbeitspakete und die zugehörigen Meilensteine des DLR im EFFEKT-Verbund dargestellt. Die Teilprojekte des DLR-Verbunds DLR4EFFEKT sind entsprechend der Projektstruktur des Gesamtverbunds bezeichnet. Das TP2 von DLR4EFFEKT entspricht TAP2.3.4, TP3 von DLR4EFFEKT entspricht TAP3.1.3 und TP1 von DLR4EFFEKT entspricht TAP3.3.2 in EFFEKT.

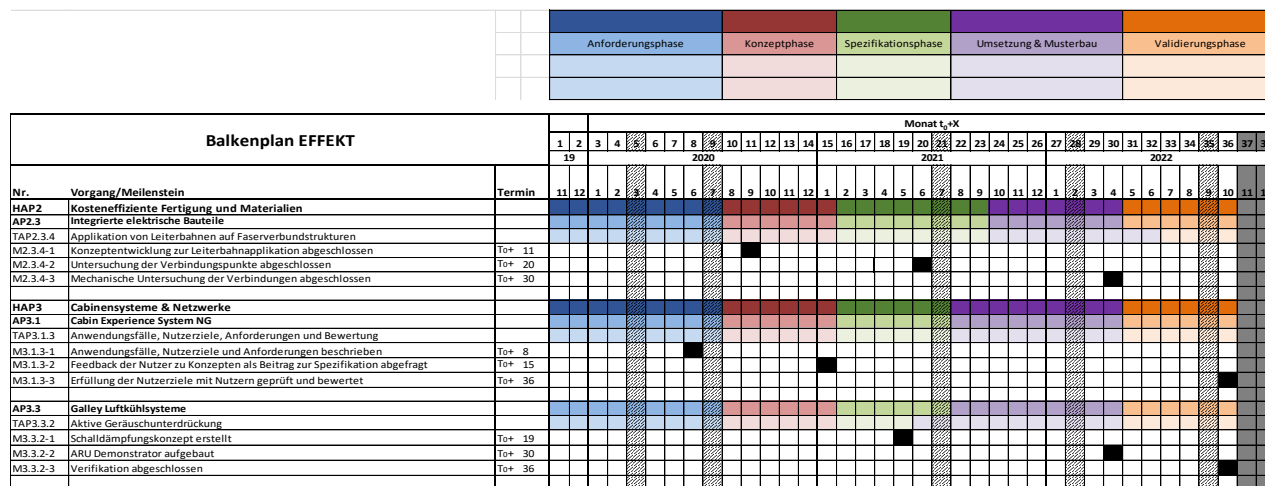


Abbildung 2: Arbeitsplan des Vorhabens.

Die ursprüngliche Planung des Vorhabens ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Arbeiten in den TP sind gemäß dem vom Verbundführer DAL vorgeschlagenen Phasenmodell in eine Anforderungsphase, eine Konzeptphase, eine Spezifikationsphase, eine Umsetzungsphase und eine Validierungsphase gegliedert.

Die zugehörigen Meilensteine zu Projektbeginn (Plan) und zu Projektende nach bewilligter budgetneutraler Laufzeitverlängerung (Ist) sind in Tabelle 1 erläutert. Alle Meilensteine wurden erreicht. Der Antrag sah eine Laufzeit vom 01.10.2019 bis 31.12.2022 vor. Die Projektlaufzeit wurde budgetneutral bis zum 30.09.2023 verlängert, um die Verzögerungen infolge der Corona-Pandemie (Lieferengpässe, Lockdown) zu kompensieren.

Tabelle 1: Meilensteine aus Abbildung 2 nach ursprünglicher Planung (Plan) und zu Projektende nach budgetneutraler Laufzeitverlängerung (Ist).

MS	Bezeichnung	Plan	Ist
TAP2.3.4	Applikation von Leiterbahnen auf Faserverbundstrukturen (TP2 in DLR4EFFEKT)		
M2.3.4-1	Konzeptentwicklung zur Leiterbahnapplikation abgeschlossen	09/2020	04/2021
M2.3.4-2	Untersuchung der Verbindungspunkte abgeschlossen	06/2021	07/2023
M2.3.4-3	Mechanische Untersuchung der Verbindungen abgeschlossen	04/2022	03/2022
TAP3.1.3	Anwendungsfälle, Nutzerziele, Anforderungen und Bewertung (TP3 in DLR4EFFEKT)		
M3.1.3-1	Anwendungsfälle, Nutzerziele und Anforderungen beschrieben	06/2020	10/2020
M3.1.3-2	Feedback der Nutzer zu Konzepten als Beitrag zur Spezifikation abgefragt	01/2021	03/2021
M3.1.3-3	Erfüllung der Nutzerziele mit Nutzern geprüft und bewertet	10/2022	09/2023
TAP3.3.2	Aktive Geräuschunterdrückung (TP1 in DLR4EFFEKT)		
M3.3.2-1	Schalldämpfungskonzept erstellt	05/2021	09/2022
M3.3.2-2	ARU-Demonstrator aufgebaut	04/2022	06/2023
M3.3.2-3	Verifikation abgeschlossen	10/2022	09/2023

## 2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

### 2.4.1 Teilprojekt 1 – Aktive Geräuschunterdrückung

Zur Kühlung von verderblichen Waren (Speisen, Medikamente etc.) während eines Fluges werden Kompressionskältemaschinen mit großen Lüftern und Kompressoren eingesetzt. Diese sind leise und damit aus akustischer Sicht unproblematisch, benötigen aber viel Bauraum und Masse. Alternativ kommen dezentrale Kühlsysteme zum Einsatz, bei denen die kalte Luft über ein Rohrleitungssystem zu den Trolleys gelangt. Diese Systeme sind ebenfalls voluminös, schwer und zudem unflexibel. Aus diesen Gründen hat die Diehl Aviation die sogenannte Air Refrigeration Unit entwickelt. Die ARU ist eine kompakte, hochgradig integrierte Komponente, welche mit ihrer



Kühlleistung bis zu sechs Trolleys kühlen kann. Die ARU kann flexibel und effizient in der Galley untergebracht werden. Um das Volumen und die Masse der ARU gering zu halten, wurden kleinere Lüfter und ein kleinerer Kompressor verbaut. Diese schnell drehenden Teile führen jedoch zu einer erhöhten Schallabstrahlung. Zugleich sind die Möglichkeiten passiver Schallreduktionsmaßnahmen aufgrund der Massen- und Volumenrestriktionen begrenzt. Aus diesem Grund wurden in TP1 die Möglichkeiten einer aktiven Geräuschkürzung für die ARU erforscht. Da es sich bei der ARU um eine neuartige, hochintegrierte Komponente handelte, existierten zu Projektbeginn keine akustisch wirksamen und zugleich volumen- und masseneffizienten Maßnahmen zur Lärmreduzierung. Die in TP1 durchgeführten Arbeiten gingen folglich über den Stand der Wissenschaft und Technik hinaus.

Bei der Bearbeitung von TP1 wurde auf Methoden der Adaptronik zurückgegriffen, weil diese das Potenzial besitzen, den Zielkonflikt zwischen möglichst hoher Schallreduktion und möglichst geringer Masse bzw. geringem Volumen aufzulösen. Die grundlegenden Wirkprinzipien der Adaptronik sind seit Jahrzehnten bekannt und wurden bereits auf thematisch angrenzende Problemstellungen (Schallausbreitung in Klimarohren, Schallabstrahlung schwingender Paneele etc.) angewendet. Im Folgenden soll kurz auf die Methoden der Adaptronik und auf thematisch angrenzende Problemstellungen eingegangen werden.

Die Adaptronik beschäftigt sich mit adaptiven Strukturen (Englisch: Adaptive Structures oder Smart Structures) und Systemen. Solche Strukturen und Systeme können ihr Schwingungs- und Schallabstrahlungsverhalten mithilfe von Aktoren, Sensoren und Signalverarbeitung gezielt verändern und sich an veränderliche Umgebungs- und Betriebsbedingungen anpassen (Clark 1998). Für die Problemstellung der ARU wurde eine adaptronische Lösung gesucht, welche die Schallabstrahlung der ARU für alle relevanten Betriebszustände (adaptiv) effektiv und effizient reduziert. Es werden Aktoren benötigt, die gezielt in den Körper- und/oder Luftschallpfad eingreifen. Sensoren werden benötigt, um der Signalverarbeitungseinheit Informationen für die Berechnung der Aktor-Stellsignale zu geben. Die unterschiedlichen Wirkprinzipien der Adaptronik (AVC, ANVC, ASAC und ANC) sind in (Sinapius 2018) beschrieben. Nachfolgend wird auf bekannte technische Problemstellungen eingegangen, die mithilfe der Adaptronik gelöst wurden. Die Darstellung umreißt insofern den gegenwärtigen Stand der Wissenschaft und Technik thematisch angrenzender Problemstellungen, die eine Schnittmenge zur hier betrachteten ARU-Problematik aufweisen könnten.

Die aktive Schallreduktion mithilfe von Gegenschall (Englisch: Active Noise Cancellation) kommt bei Klimatisierungs- und Belüftungsrohren erfolgreich zum Einsatz. Die Technik eignet sich besonders gut bei tiefen Frequenzen, bei denen die Wellenausbreitung eindimensional erfolgt, d. h. das Rohr als eindimensionaler akustischer Wellenleiter wirkt. Ein kommerzielles Produkt, welches

mit dieser Technik arbeitet, wurde zu Projektbeginn von der Firma TechnoFirst (Produktname: Active Absorber ActA) angeboten. Der Hersteller verspricht eine Reduzierung der niederfrequenten Geräusche, die durch Luftströmungssysteme in Gebäuden und durch Absaug- und/oder Lüftungssysteme in der Industrie erzeugt werden. Das System ist für den Einsatz im Flugzeug und insbesondere für die in TP1 betrachtete Problemstellung jedoch ungeeignet, weil es schwer und voluminös ist. Die Firma Eberspächer bietet kommerzielle Lösungen zur aktiven Geräuschminderung im Abgasstrang von Kraftfahrzeugen an (Produktname: Active-Silencer Schalldämpfer / Patent: DE102004040421A1). Auch hier wird die ANC-Technik eingesetzt, ebenso wie bei Kopfhörern mit aktiver Geräuschunterdrückung (z.B. Noise-Cancelling-Kopfhörer von Bose). Auch war eine direkte Übertragbarkeit der Technologie auf den Flugzeugbereich und auf die Fragestellung der ARU nicht gegeben. Während die Schallübertragung im Auspuff und im (äußeren) Gehörgang eindimensional und hauptsächlich über Luftschall erfolgt, liegt bei der ARU ein deutlich komplexeres Übertragungsverhalten mit einer Kombination aus Luft- und Körperschallwegen vor. Die Beispiele zeigen, dass eine Anwendung bestehender Produkte und Techniken mit ANC nicht zur Lösung der in TP1 betrachteten Problematik führt.

Schwingende Strukturen, wie z. B. vibrierende Gehäuse- oder Verkleidungsteile, können eine Luftschallemission hervorrufen, die mithilfe von Gegenkräften oder -momenten reduziert werden kann, die in diese Strukturen eingeleitet werden. Diese Methoden werden – in Abhängigkeit von der verwendeten Sensorik und damit verbunden der sensierten physikalischen Größen – als Active Vibration Control (AVC), Active Noise Vibration Control (ANVC) oder Active Structural Acoustic Control (ASAC) bezeichnet. Die genannten Methoden sind seit Jahrzehnten in der Wissenschaft und Technik bekannt; eine produktmäßige Realisierung und Verbreitung vergleichbar der ANC-Technik liegt jedoch nicht vor. Bezogen auf die in TP1 betrachtete Problemstellung sind diese körperschallbasierten Methoden von Relevanz, weil die Schallabstrahlung der ARU durch schwingende flächige Bauteile (Gehäuse oder angrenzende Galleystrukturen) hervorgerufen wird. Ein Lösungsweg existierte zu Projektbeginn jedoch nicht, da die Problemstellung höherdimensional ist (Wellenausbreitung in zwei oder drei Dimensionen) und vom Schwing- und Körperschallübertragungsverhalten der jeweiligen Komponente abhängt.

#### **2.4.2 Teilprojekt 2 – Integrierte elektrische Bauteile**

Im Rahmen von TP2 wurde ein umfassendes Konzept erarbeitet, wie die Leiterbahnen auf die Struktur appliziert, Anschlusselemente realisiert und Verzweigungspunkte umgesetzt werden können.

Ein zentraler Schwerpunkt lag auf der Anwendung von Abschalttests gemäß den Vorgaben der DIN EN ISO 8510-2. Hierbei wurden die einzelnen Klebebänder sowie die kompletten

Lagenpakete von insgesamt drei verschiedenen Sandwichoberflächen im 180° Winkel abgezogen. Dieser standardisierte Test ermöglichten eine detaillierte Analyse der Haftfestigkeit der verwendeten Materialien und trugen maßgeblich dazu bei, die Anhaftung der Klebebänder zu charakterisieren und die Klebkraft der Tapes untereinander zu vergleichen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der durchgeführten Arbeit war der Rollenschältest nach DIN ISO 4578. Dieser Abzugtest erfolgte unter einem Winkel von 90°. Die Rollenordnung des Prüfaufbaus sorgt dafür, dass die Tapes unter einem Umlenkwinkel von 90°, senkrecht von der Sandwichoberfläche abgeschält wurden. Diese spezifische Testmethode ermöglicht eine präzise Beurteilung der Haftfestigkeit der einzelnen Klebebänder, wenn sie von der Oberfläche abgezogen werden. Auch diese Werte wurden untereinander verglichen um eine Bewertung der Klebebänder und deren Haftkraft vorzunehmen.

Um die Anbindung der Anschlüsselemente an die Struktur detailliert zu untersuchen, wurden mechanische Zugtests durchgeführt. Diese Tests dienten dazu, die Belastbarkeit und Zuverlässigkeit der Verbindungselemente zu bewerten. Durch die Zugtests konnten Schwachstellen identifiziert und eine robuste und widerstandsfähige Gesamtkonstruktion realisiert werden.

Insgesamt spiegelt die zurückliegende Arbeit den systematischen Entwicklungsprozess wider, beginnend mit der Konzeptualisierung bis hin zur detaillierten Prüfung der untersuchten Klebebänder durch standardisierte Tests und mechanische Analysen, unter anderem gemäß den Vorgaben der DIN EN ISO 8510-2 und DIN ISO 4578.

### **2.4.3 Teilprojekt 3 – Anwendungsfälle, Nutzerziele, Anforderungen und Bewertung**

Für Technologieentwicklung, Innovation und Design ist die Berücksichtigung aller relevanten Akteure von großer Bedeutung. Zu diesem Zweck sind verschiedene Prozesse bekannt, insbesondere das menschenzentrierte Design und, als neueres Vorgehensmodell, das Design Thinking. Die Norm DIN EN ISO 9241-210, „Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme“, teilt das menschenzentrierte Design in vier Phasen ein: Verstehen des Nutzungskontextes, Festlegung der Nutzungsanforderungen, Entwurf von Gestaltungslösungen und Evaluation der Gestaltungslösungen. Diese Phasen werden iterativ durchlaufen, bis ein bestmögliches Ergebnis erzielt wird. Das an der Universität Stanford entwickelte Design Thinking (Camacho 2016) enthält demgegenüber die sechs Phasen Verstehen, Beobachten, Sichtweise definieren, Ideenfindung, Prototypen entwickeln und Testen.

Sowohl beim menschenzentrierten Design als auch beim Design Thinking werden alle relevanten Akteure in einem iterativen Prozess in alle Phasen der Entwicklung einbezogen (Burmeister 2019). Dies beinhaltet die Analyse spezifischer Anwendungsfälle, die Eigenschaften der Nutzer,

die Analyse der Nutzungsumgebung, die Entwicklung von Konzepten und Prototypen sowie die Überprüfung der Ergebnisse unter Einbeziehung von Nutzern. Die beiden Methoden unterscheiden sich jedoch in der Zielsetzung. Das Ziel des Menschenzentrierten Designs sind eine hohe Benutzerfreundlichkeit und ein möglichst positives Nutzer-Erlebnis für eine schon weitgehend definierte technische Lösung. Design Thinking ist dagegen auch ein kreativer Prozess zur Entwicklung innovativer Lösungen für komplexe Probleme.

Angewandt auf Technologieentwicklungen in der Luftfahrt ergibt sich, wie bei anderen Industrien für Investitionsgüter, dass Käufer und Nutzer zum Teil unterschiedliche Anforderungen haben. Fluggesellschaften sind die Käufer von Flugzeugen und Kabinen-ausstattungen, wohingegen die Passagiere als Kunden der Fluggesellschaften sowie die Kabinen- und Cockpitcrew die eigentlichen Nutzer sind. Flugzeuge und Flugzeugkabinen sind zudem technisch komplexe und sicherheitskritische Produkte. Vor diesem Hintergrund besteht die Herausforderung darin, eine gute Balance zwischen Passagiererlebnis, Sicherheit und Kosten zu finden und damit eine Akzeptanz aller Akteure zu erreichen. Um in diesem Spannungsfeld gute Ergebnisse zu erzielen, könnte die Kombination aus multidisziplinärer Optimierung technischer Parameter mit einer nutzergetriebenen Entwicklung ein zielführendes Vorgehen sein (Hall et al. 2013).

Untersuchungsgegenstand im TP3 des DLR ist im AP3.1 das Cabin Experience System Next Generation. Hierzu wurden im LUFO-Projekt iCabin unter anderem vom Projektpartner Diehl Aviation wesentliche Vorarbeiten geleistet (Trunk 2019). Gegenstand der Forschung im Projekt iCabin war die standardisierte, drahtlose Verbindung verschiedener Kabinensysteme und -anwendungen, unter anderem Sitze, Galleys und Lavatories sowie weitere Sensoren und Oberflächen. Das Ziel einer solchen Infrastruktur sind die Sammlung und der Austausch von Informationen über die Kabine, um deren Status in Echtzeit ermitteln zu können. Dies ist die Grundlage, um eine Vielzahl von Anwendungen für die Kabinencrew und die Passagiere zu ermöglichen.

## **2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Arbeitsinhalte von TP1 werden eng mit DAG abgestimmt. Es finden Besprechungen in einem zweiwöchigen Turnus statt. Das DLR steht außerdem in Kontakt mit Akustik-Experten von DAL, um gegenseitig Erfahrungen auszutauschen und Messergebnisse verschiedener ARUs und Labore zu vergleichen. In Zusammenarbeit mit den Akustik-Experten von DAL wurde zu Projektende eine modifizierte ARU mit aktiver Geräuschunterdrückung in einer Galley im Akustiklabor von DAL realisiert.

Im TP2 werden die Arbeitsinhalte in einem dreiwöchigen Rhythmus mit DAL abgestimmt und besprochen. Hierbei wird versucht, Synergien zu identifizieren und abzustimmen. TESA unterstützt bei Bedarf unkompliziert mit Materiallieferungen.

Im TP3 erfolgt die Zusammenarbeit mit DAH und DAs zu den Anwendungsfällen in der Kabine. Darüber hinaus wurden Privat-Personen und Airline-Personal im Rahmen der Passagier- und Crewbefragungen einbezogen.

## **3 Eingehende Darstellung**

### **3.1 Erzielte Ergebnisse**

#### **3.1.1 Teilprojekt 1 – Aktive Geräuschunterdrückung**

In TP1 werden Maßnahmen zur aktiven Geräuschunterdrückung für hochintegrierte Kabinensysteme am Beispiel einer Air Refrigeration Unit (ARU) entwickelt und an einem ARU-Serienbauteil erprobt. Es wird dadurch ein Beitrag zur Kabinensystementwicklung in AP3.3 „Galley Luftsysteme“ des EFFEKT-Verbunds geleistet.

Nach Inbetriebnahme der ARU gemeinsam mit DAG, wurde die Schallemission der ARU hinsichtlich der Spezifikationen von DIEHL Aviation in einem ARU-Stand-Alone Versuch vermessen. In dem Versuchsaufbau wurden zwei Prüfscenarien realisiert. Im ersten Szenario, welches in Abbildung 3 dargestellt ist, wird die abgestrahlte Schalleistung der ARU mittels einer Schallintensitäts-Messsonde ermittelt. Im zweiten Szenario, welches in Abbildung 4 zu sehen ist, erfolgt die Messung der Schallabstrahlung der ARU durch Messung des Schalldrucks im Nahfeld an vier definierten Positionen.

Im folgenden Abschnitt Vermessung und Analyse wird auf die vibroakustische Vermessung sowie die Analyse des Beitrags der Systemkomponenten zur Schallemission eingegangen. Im darauffolgenden Abschnitt Passive Lärmreduktion werden Maßnahmen zur passiven Lärmreduktion dargestellt. Die Arbeiten zur aktiven Lärmreduktion, welche im Fokus von TP1 stehen, werden in den Abschnitten Dimensionierung der Aktuatorik, Systemidentifikation und Aktive Lärmreduktion behandelt.

#### **Vermessung und Analyse**

Es werden fünf unterschiedliche Test Cases der ARU definiert, bei denen die Kompressor-Drehzahl und die Fan-Drehzahlen variiert werden (TC1 bis TC5). Die Kühlleistung der ARU ist in TC1 am größten und in TC5 am kleinsten.



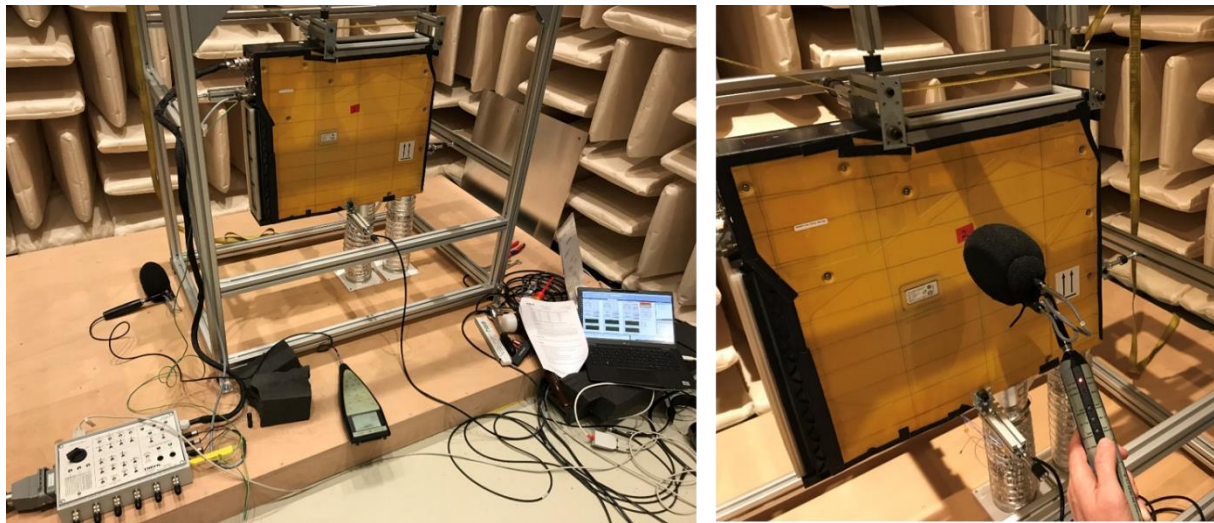


Abbildung 3: Setup für Baseline-Messung mit Intensitätsmesssonde. Schalleistungsmessung nach (DIN EN ISO 9614-2:1996-12).



Abbildung 4: Setup für Baseline-Messung mit Mikrofonen. Schalldruckmessung an vier definierten Stellen um die ARU herum.

Mit Hilfe der Baseline-Messungen wurden tonale Anteile im Geräuschspektrum identifiziert die in einem Frequenzband zwischen 50 und 2500 Hz liegen. Diese Frequenzanteile der ARU sollen mit Hilfe von passiven oder aktiven Maßnahmen reduziert werden. Dazu erfolgt im nächsten Schritt eine Beitragsanalyse der ARU Systemkomponenten anhand eines Hochlauf-Spektrogramms.

Um die tonalen Anteile im Spektrum den Systemkomponenten der ARU systematisch zuzuordnen wird ein Spektrogramm bei laufenden Lüftern (Fans) berechnet (siehe Abbildung 5 li.) und

anschließend der Kompressor von Null auf die maximale Drehzahl hochgefahren (siehe Abbildung 5 re.). Einzelne horizontale Linien sind mit den tonalen Anteilen assoziiert. Deutlich erkennbar werden die Spektrallinien des Kompressors im rechten unteren Teil von Abbildung 5. Besonders dominant ist die zweite Harmonische des Kompressors. Insgesamt wird deutlich, dass die Schallabstrahlung der ARU bei tiefen Frequenzen vom Kompressor dominiert wird und die Fans den Hauptbeitrag bei hohen Frequenzen liefern. Da sich aktive Lärmreduktionssysteme im Allgemeinen nicht für Frequenzen im Kilohertzbereich eignen, werden im nachfolgenden Abschnitt zunächst passive Maßnahmen zur Reduktion der Schallabstrahlung untersucht.

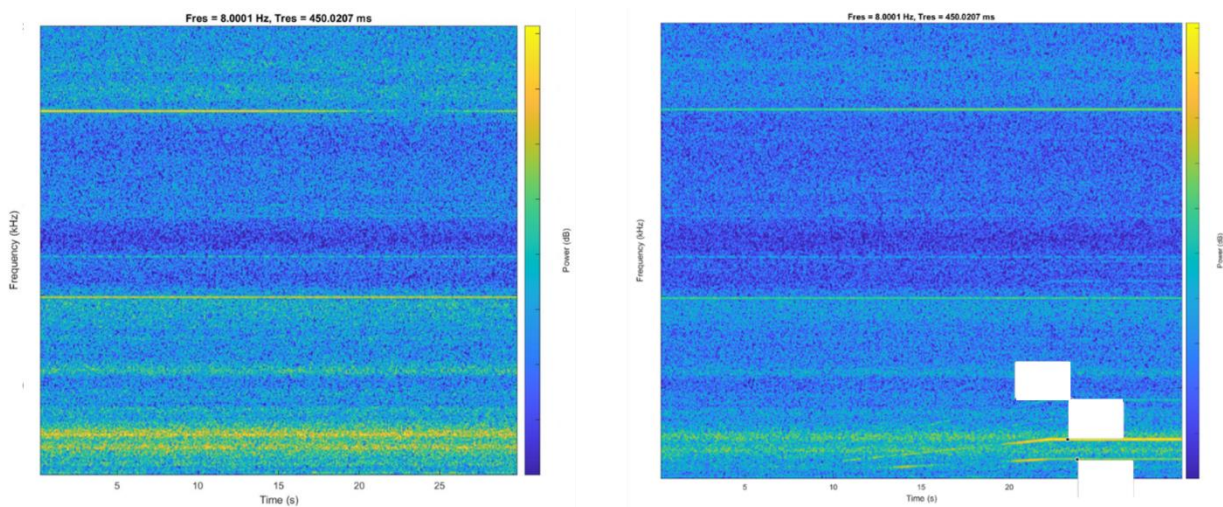


Abbildung 5: Spektrogramm bei laufenden Fans (li.) und Hochfahren des Kompressors bis zur Maximaldrehzahl (re.).

### Passive Lärmreduktion

Als passive Lärmreduktionsmaßnahme wurde die Applikation von Constrained Layer Damping (CLD) auf den Alu-Rippen des ARU-Gehäuses (siehe Abbildung 6) und auf den seitlichen Verschaltungen der ARU (siehe Abbildung 7) untersucht.





Abbildung 6: Applikation von CLD auf den Alu-Rippen des ARU Gehäuses. Die seitliche Verschalung wurde mit dem CLD mit Hilfe von doppelseitigem Klebeband verbunden (weiße Streifen auf darunter liegendem CLD).

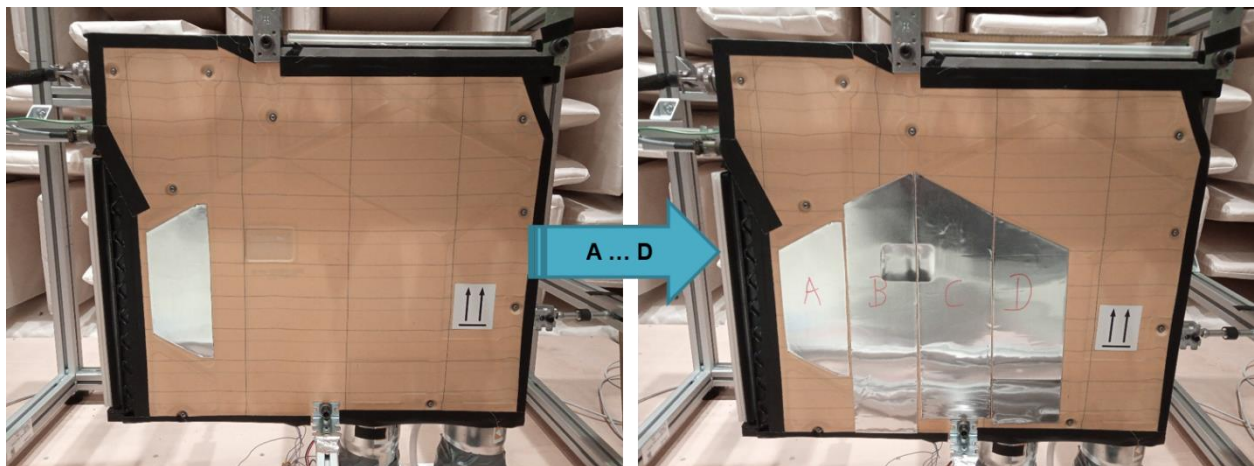


Abbildung 7: Applikation von CLD auf der seitlichen Verschalung der ARU mit ansteigender Flächenbelegung (A bis D).



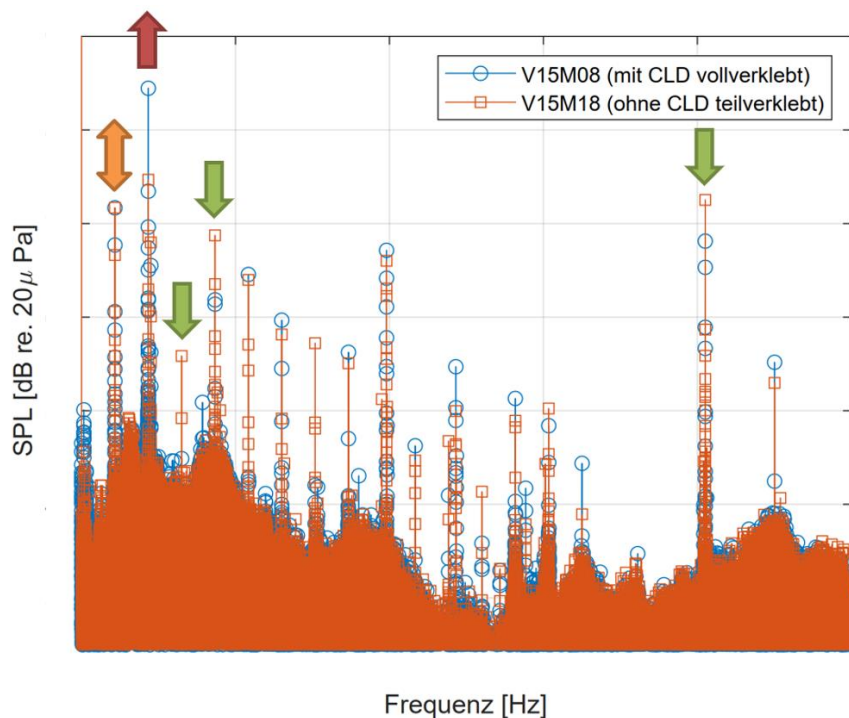


Abbildung 8: Auswirkungen der Applikation von CLD auf den Alu-Rippen auf den SPL von Mikrofon 2 bei hoher Kühlleistung (TC1).

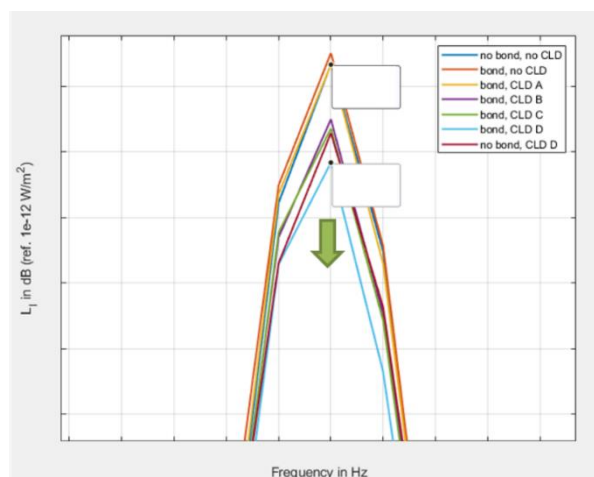
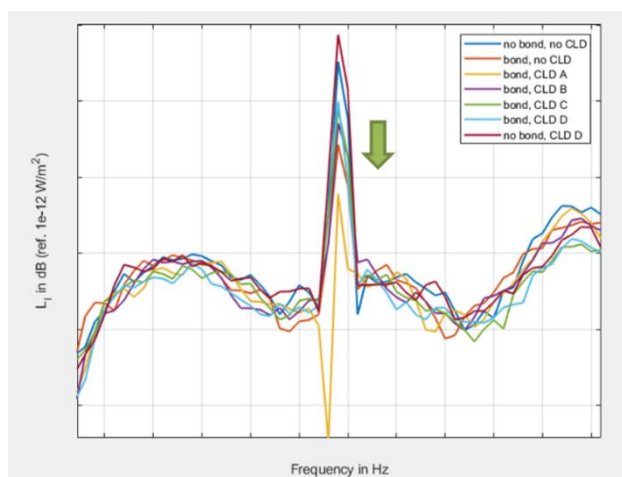


Abbildung 9: Auswirkungen der Applikation von CLD auf der seitlichen Verschaltung der ARU bei hoher Kühlleistung (TC1) auf die abgestrahlte Schalleistung der ARU.

Wie Abbildung 8 zeigt, ist der Einfluss von CLD auf den Rippen auf den SPL im TC1 uneinheitlich. Bei höheren Frequenzen kann eine leichte Verbesserung erzielt werden, allerdings wird der besonders kritische zweite Ton des Kompressors verstärkt. Bei einer Applikation von CLD auf die seitliche Verschaltung der ARU kann die abgestrahlte Schalleistung bei Lüfterton und beim ersten Ton des Kompressors reduziert werden. Interessanterweise wird das Wirkungsmaximum bei der

Beklebung A (siehe Abbildung 7 li.) erreicht. Dies lässt auf eine Verringerung des Abstrahlgrads in Beklebung A schließen. Die Veränderung der operationalen Schwingungen hat offenbar einen stärkeren Effekt auf die abgestrahlte Schalleistung als die Dämpfung der Vibrationsamplitude (die bei maximaler Beklebung höher ist).

Insgesamt ist ein uneinheitlicher Effekt der passiven Maßnahmen festzustellen. Es kann aber eine Sensitivität auf den SPL und die abgestrahlte Schalleistung beobachtet werden. Die systematische Analyse der Effekte und eine optimierte Auslegung von passiven Dämpfungsmaßnahmen ist jedoch im Rahmen von TP1, welches auf die aktive Lärmreduktion fokussiert, nicht möglich. Die nachfolgenden Abschnitte gehen auf die Arbeiten zur aktiven Lärmreduktion ein

### Dimensionierung der Aktuatorik

Für die Untersuchungen wird ein Aktuator vom Typ Dayton Audio DAEX19CT-4 verwendet (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Spezifikationen des Aktuators.

MODEL NUMBER	DAEX19CT-4
POWER (CONT.)	5 W
IMPEDANCE	4 Ohm
MASS	20 g
SIZE	41 x 33 mm



Wie in Abbildung 10 dargestellt, wird der Aktuator an drei verschiedene Stellen auf dem seitlichen Verschalungsteil befestigt. Mit Hilfe der anschließenden Systemidentifikation wird der Effekt des Aktuators auf den Schall anhand von Frequenzgängen (FRF) bewertet. Der Vergleich mit den gemessenen Störpegeln, die die ARU im laufenden Betrieb erzeugt, erlaubt eine Vordimensionierung der Aktuatorik. Die FRF und die Störpegel sind in Abbildung 11 zu sehen. Es wird deutlich, dass die FRF sehr sensitiv in Bezug auf die gewählte Aktuatorposition ist. Bei geeigneter Positionierung ist aufgrund der FRF Magnitude und den SPL davon auszugehen, dass zwei Exciter pro seitlichem Verschalungsteil ausreichend Stellautorität für haben. Bei dieser Betrachtung wurde der Versteifungseffekt außer Acht gelassen, der sich im laufenden Betrieb der ARU einstellt und der die FRF verändert. Auf diesen Aspekt wird im nachfolgenden Abschnitt Systemidentifikation näher eingegangen. Die durchgeführte Analyse erlaubt aber dennoch eine grobe Dimensionierung der Aktuatorik.

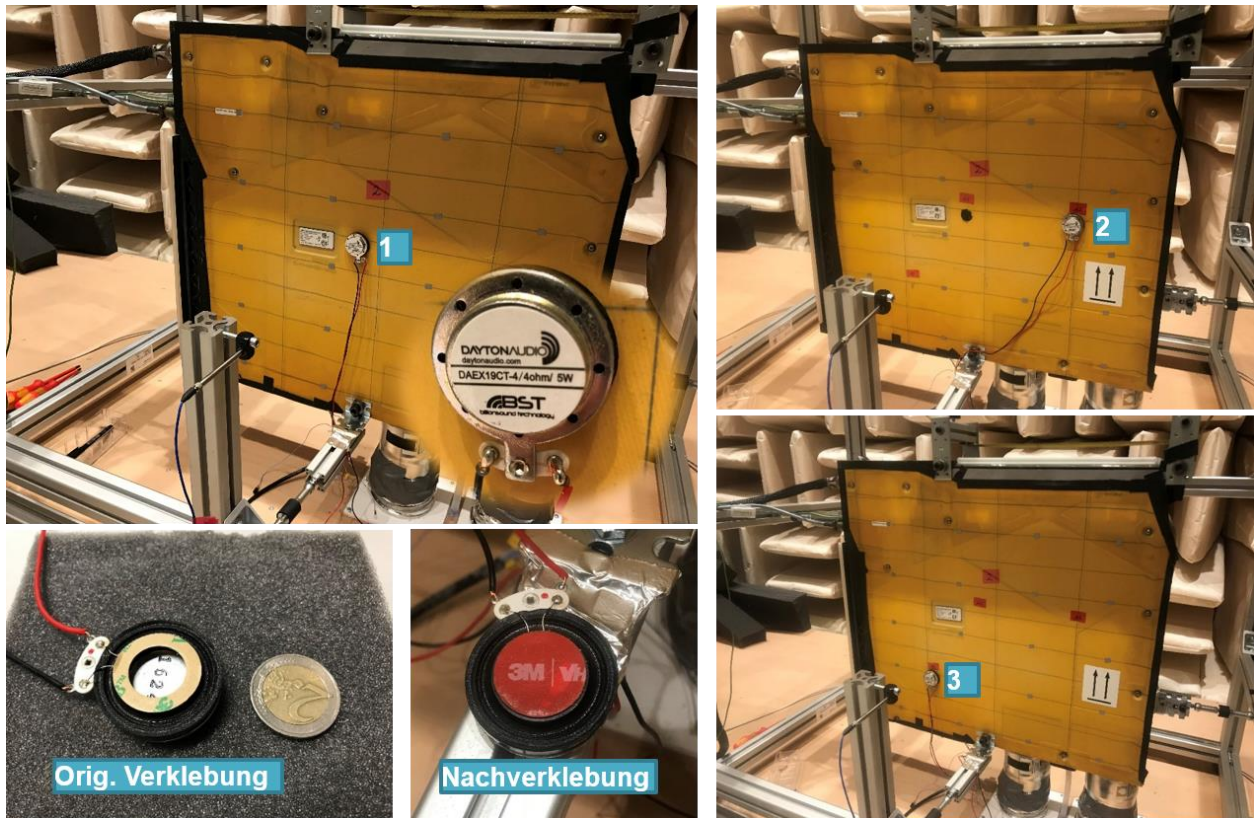


Abbildung 10: Vermessung der Aktuatorik an drei verschiedenen Stellen zur Ermittlung der Einkopplung und der Sensitivität.

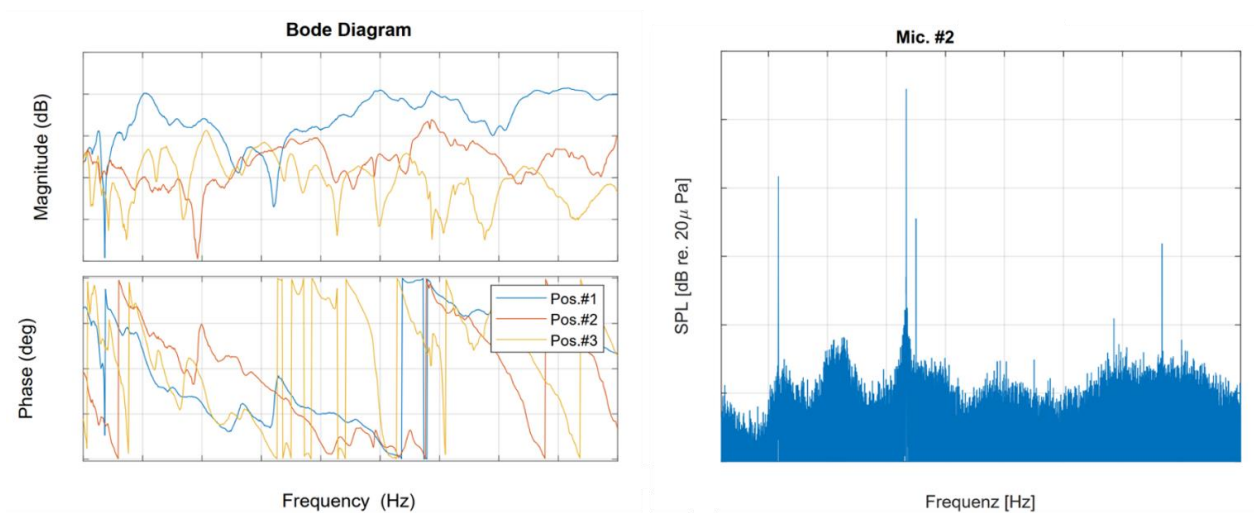


Abbildung 11: FRF des Aktuators in SPL pro Volt Ansteuerspannung (dB/V) an den drei Positionen auf Mikrofon 2 (vgl. Abbildung 4) (li.) und Störpegel der ARU gemessen von Mikrofon 2.

## Systemidentifikation

Es wurde eine Systemidentifikation bei ausgeschalteter ARU und im laufenden Betrieb nach einer Minute und nach fünf Minuten durchgeführt. Die Unterschiede im Frequenzgang bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen sind in Abbildung 12 zu sehen. Als Haupteinflussgrößen auf die FRF werden die Temperatur und der Unterdruck im Kompressor-Ansaugtrakt angesehen. Für jede TC stellen sich andere Werte ein, so dass die Systemidentifikation für jeden Arbeitspunkt wiederholt werden muss. Damit verbunden ist die Komplikation, dass sich ein sehr schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis einstellt, weil die Werte der FRF bei den abgestrahlten Störfrequenzen von Interesse sind. Der Exciter muss deshalb jeden Ton einzeln mit möglichst hoher Amplitude anregen, um bei ausreichend langer Mittelungszeit eine hinreichend korrekte Schätzung der FRF zu ermöglichen. Im Unterschied zu dem klassischerweise verwendeten Multi-Referenz-Test entsteht dadurch ein erheblicher zeitlicher Mehraufwand bei der Systemidentifikation. Außerdem begünstigen höhere Amplituden das Auftreten von Nichtlinearitäten. Insgesamt hat sich die Vorgehensweise trotz der beschriebenen Komplikationen als praktikabel erwiesen. Die ermittelten FRF führen zu stabilen adaptiven Steuerungen auf dem Echtzeitsystem dSPACE.

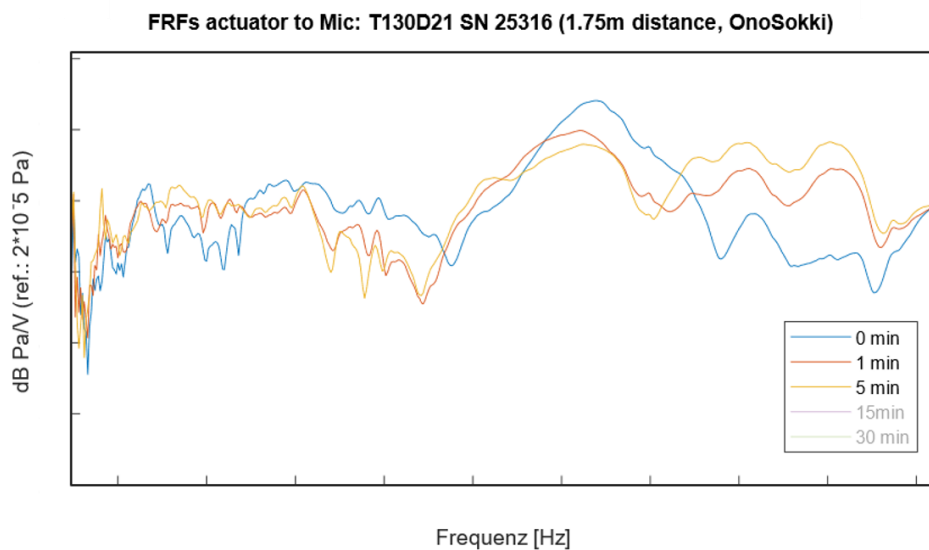


Abbildung 12: Veränderung der FRF nach dem Kaltstart innerhalb der ersten fünf Minuten.

## Aktive Lärmreduktion

Es wurde ein System mit zwei auf dem vorderen Seitenpaneel der ARU applizierten Aktuatoren realisiert. Die Positionen der beiden Aktuatoren sind in Abbildung 13 (li.) zu sehen. Aufgrund der festgestellten Temperaturabhängigkeit wurde ein Temperaturfühler auf das Paneel geklebt. Das ANVC System wurde aktiv geschaltet, sobald sich ein stationärer Zustand in der Temperatur eingestellt hat (nach max. 10 Minuten). Der Schalldruckpegel wurde mittig vor dem Seitenpaneel in



2,4 m Abstand mit einem Mikrofon ermittelt. Die Ergebnisse ohne (Exciter aus) und mit (Exciter an) aktiviertem ANVC System sind in Abbildung 14 dargestellt. Sowohl der SPL als auch die abgestrahlte Schalleistung (Messgröße: Schallintensität) konnten bei den vier dominanten Störtönen messbar und hörbar reduziert werden.

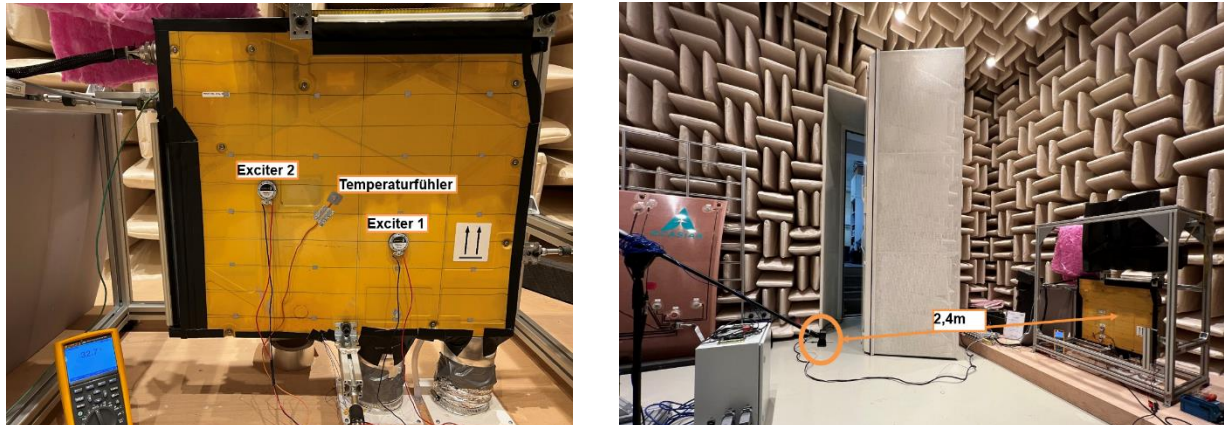


Abbildung 13: Setup des ANVC Systems mit zwei Aktuatoren (Exciter 1 und Exciter 2) auf der vorderen Seitenpaneel (li.) und einem Fehlermikrofon mittig vor dem Seitenpaneel im Abstand von 2,4 m (re.).

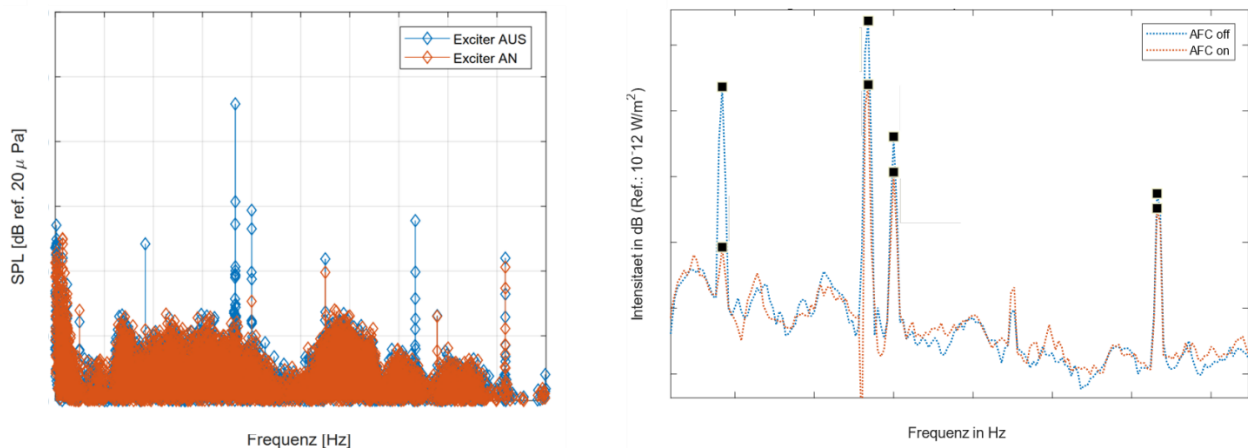


Abbildung 14: Mit dem Fehlermikrofon gemessene Reduktion des SPL (li.) und Reduktion der abgestrahlten Schalleistung (re.) bei den vier dominanten Störtönen bei hoher Kühlleistung in TC2.

Die Ergebnisse dieses Systems belegen die Wirksamkeit des ANVC Systems für das Laborsetup. Eine besondere Herausforderung sind die Zeitvarianzen des Systems, weil diese in den Streckenmodellen des Controllers berücksichtigt werden müssen. Hinsichtlich der Optimierung der Systeme in Bezug auf die beiden relevanten Spezifikationen musste ein Kompromiss gefunden

werden. Eine Reduktion der abgestrahlten Schalleistung (Prüfszenario 1) geht nicht zwingend mit einer Reduktion der SPL an den vier Positionen (Prüfszenario 2) einher. Umgekehrt ist eine Reduktion der SPL im Nahfeld nicht unbedingt mit einer Reduktion der aktiven Schalleistung verbunden, weil diese von den SPL im Fernfeld (typischerweise ein Abstand von dem 1,5-fachen der akustischen Wellenlänge) abhängt. Das realisierte Konzept sieht eine Reduktion des SPL im Fernfeld auf Basis von Beschleunigungs-Sensordaten der Vibrationen der ARU-Seitenwand vor. Durch eine Reduktion der strukturellen Vibrationslevel kann auch eine Reduktion der SPL im Nahfeld erreicht werden. Zudem benötigt das ANVC System mit strukturellen Fehlersensoren keine physischen Mikrofone im laufenden Betrieb. Dies erhöht den Integrationsgrad und die Modularität der modifizierten ARU.

Nachdem das Konzept erfolgreich im Akustiklabor demonstriert wurde, sollte das Konzept nun auf eine ARU in einsatznaher Umgebung angewendet werden. Dazu fanden Untersuchungen an einem Galleyaufbau im Akustiklabor von DAL statt. Die Untersuchungen waren in eine Auslegungs- und eine Validierungsphase unterteilt. In der Auslegungsphase wurde das Schwingungsverhalten und die Schallabstrahlung der in die Galley eingebauten ARU vermessen und analysiert. In der Validierungsphase sollte ein mit Hilfe der Messdaten ausgelegtes ANVC System experimentell umgesetzt werden. Im Zuge der Auswertung der in der Auslegungsphase gesammelten Messdaten stellte sich jedoch heraus, dass das für die Stand-Alone-ARU erarbeitete Konzept nur sehr eingeschränkt auf die in der Galley eingebaute ARU übertragbar ist. Der Hauptgrund dafür ist das Vorhandensein einer Vielzahl von Transmissionspfaden im Galleyaufbau, die bei der Stand-Alone-ARU nicht auftreten. In der Galley existieren sowohl Körper- als auch Luftschallpfade, deren Ausprägung zudem lastabhängig ist. Deshalb wurden zwei neue Konzepte entwickelt, die den geänderten Bedingungen Rechnung trugen. Die beiden Konzepte wurden im Rahmen der Validierungsphase im Galleyaufbau von DAL realisiert.

Im Folgenden wird auf die Arbeiten am Galleyaufbau im Akustiklabor von DAL eingegangen. Der grundsätzliche Aufbau ist in Abbildung 15 zu sehen. Die ARU befindet sich innerhalb der Galley hinter den Trolleys (roter Pfeil in Abbildung 15). Die eingebaute ARU wurde mit 28 Beschleunigungssensoren (B-Sensoren) und einem Inertialerreger (Exciter) instrumentiert. Mit Hilfe des an unterschiedlichen Positionen montierten Exciters wurde die Schwingungs- und Schallübertragung auf das ARU-Seitenwandpaneel und auf die 24 Mikrofone außerhalb der Galley gemessen. Jeweils 6 Mikrofone wurden an jeder Seite der Galley in einem regelmäßigen Gitter positioniert. Ferner wurden die Betriebsbeschleunigungen und die Schalldrücke bei unterschiedlichen Lastfällen der ARU ermittelt.

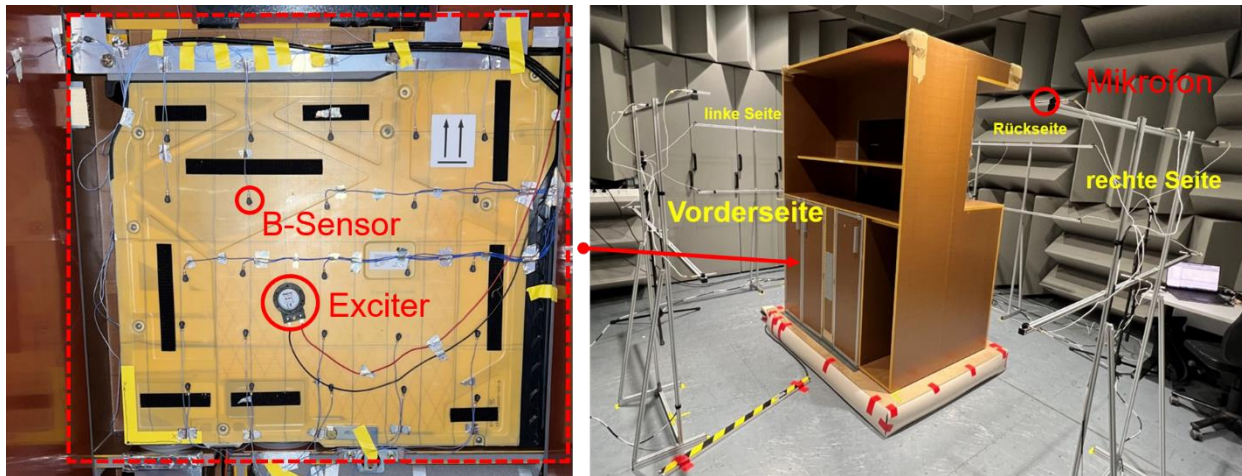


Abbildung 15: Galleyaufbau im Akustiklabor von DAL mit Mikrofonarrays vor jeder Seite (re.) und ARU eingebaut in der Galley mit Beschleunigungssensoren und einem Exciter (li.)

Mit Hilfe der Messdaten aus dem Galleyaufbau wurden numerische Rechnungen durchgeführt, um das Schallreduktionspotenzial a priori zu bewerten. Dabei wurden die ersten beiden Kompressor-Harmonischen der Test Cases TC1 und TC2 als akustisch relevant identifiziert. Die Beiträge der Lüfter zum SPL sind zu vernachlässigen. Für jeden Betriebszustand und jede Harmonische wurde eine separate Optimierung durchgeführt, um eine obere Abschätzung der Schallreduktion des ANVC-Systems zu erhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirksamkeit des ANVC bei einigen Frequenzen sehr gering ist. Deshalb wurde auf die Auslegung einer finalen Aktuator- / Sensorkonfiguration verzichtet.

Abbildung 16 zeigt das Ergebnis der Optimierung in TC1. Auf der linken Seite ist die Tonalität (d.h. die Wahrnehmbarkeit des Tons außerhalb der Galley) in vier Zeilen farblich codiert dargestellt. Jede Zeile stellt eine Abwicklung der 24 Mikrofonpositionen um die Galley herum dar. Die Abwicklung erfolgt im Uhrzeigersinn beginnend bei der Rückseite (Position 0). Auf der rechten Seite von Abbildung 16 ist die Aktuator- und Fehlersensorkonfiguration dargestellt. In diesem Fall würde das ANVC System drei Exciter (Positionen E1, E4 und E5) und zwei B-Sensoren (Positionen B10 und B25) benötigen. Die unterste Zeile zeigt, dass die geregelte Tonalität (mit Grenzkurve) bei jeder Mikrofonposition bei 0 dB liegt. Das ANVC System wäre also in der Lage, diesen Ton so zu reduzieren, dass er unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegt.



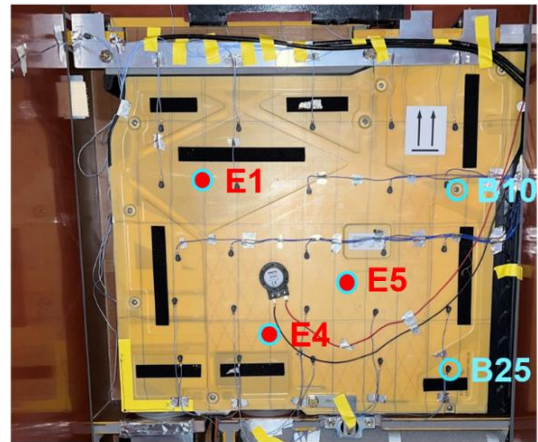
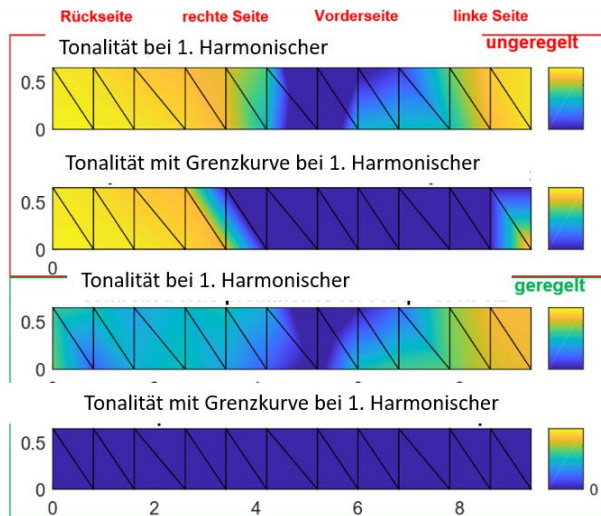


Abbildung 16: Synthese der Optimalsteuerung für TC1. Vorhersage der Schallverteilung bei der ersten Kompressor-Harmonischen an den 24 Mikrofonpositionen ohne ANVC (ungeregelt) und mit ANVC (geregelt).

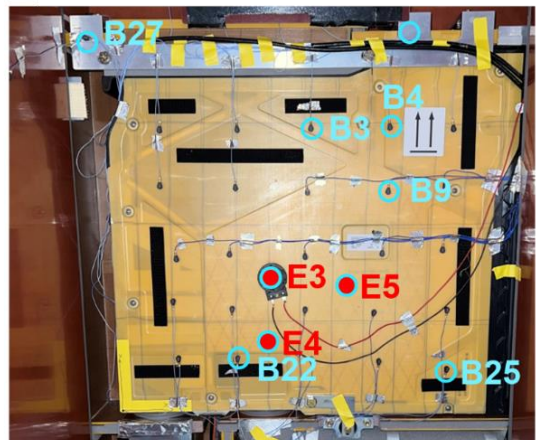
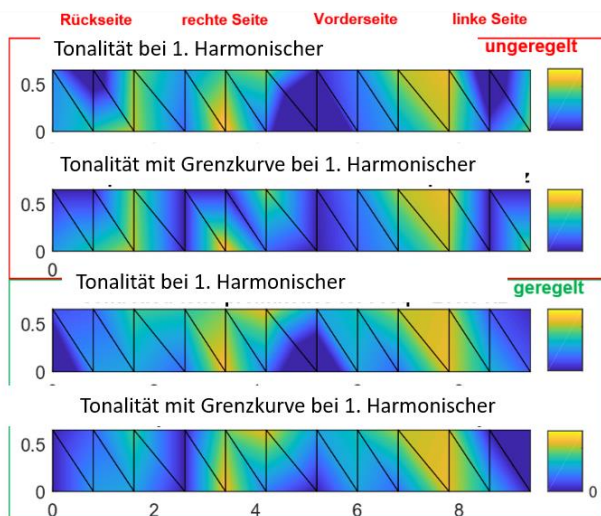


Abbildung 17: Synthese der Optimalsteuerung für TC1. Vorhersage der Schallverteilung bei der zweiten Kompressor-Harmonischen an den 24 Mikrofonpositionen ohne ANVC (ungeregelt) und mit ANVC (geregelt).

Aus Abbildung 17 geht hervor, dass die zweite Kompressor-Harmonische durch das ANVC System kaum beeinflusst werden kann. Bei dieser Frequenz liegt offenbar ein anderer Schalltransmissionspfad vor, welcher über die Seitenwand der ARU kaum zu beeinflussen ist. Abbildung 17 zeigt die optimierte Aktuator- / Sensorkonfiguration mit drei Excitern (Positionen E3, E4 und E5) und sechs B-Sensoren (Positionen B3, B4, B9, B22, B27 und B25).



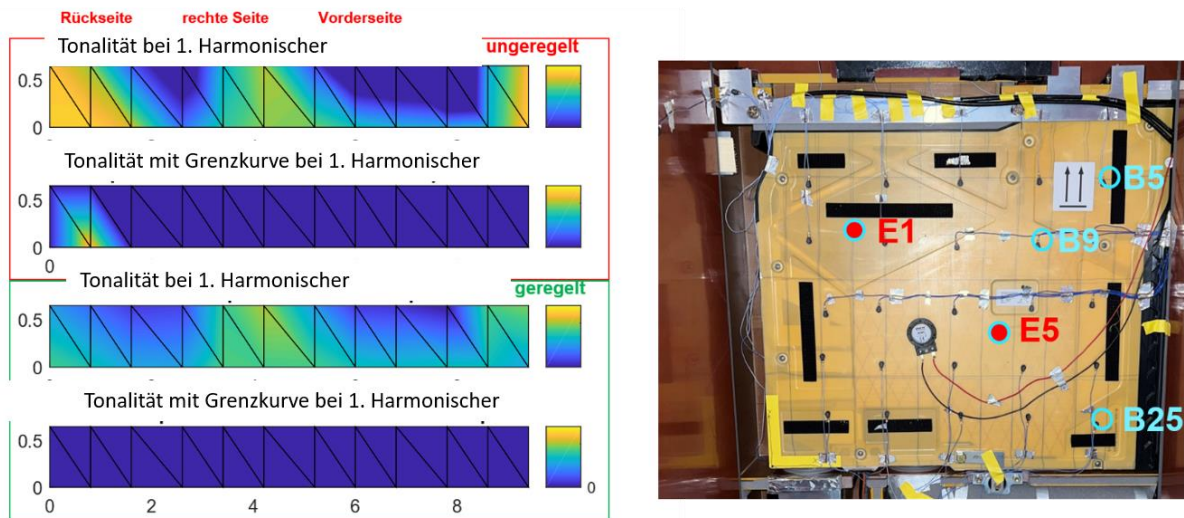


Abbildung 18: Synthese der Optimalsteuerung für TC2. Vorhersage der Schallverteilung bei der ersten Kompressor-Harmonischen an den 24 Mikrofonpositionen ohne ANVC (ungeregelt) und mit ANVC (geregelt).

Abbildung 18 zeigt das Ergebnis der Optimierung für die erste Kompressor-Harmonische in TC2. Es wird deutlich, dass bereits im unregelmäßigen Fall eine sehr geringe Wahrnehmbarkeit des Tons vorliegt. Durch das ANVC System kann die Wahrnehmbarkeit für alle Positionen auf Null reduziert werden. Abbildung 18 rechts zeigt die optimierte Aktuator- / Sensorkonfiguration mit zwei Excitern (Positionen E1 und E5) und drei B-Sensoren (Positionen TC1, B9 und B25).

Abbildung 19 zeigt das Ergebnis der Optimierung für die zweite Kompressor-Harmonische in TC2. Hier liegt eine deutliche Wahrnehmbarkeit des Tons an vielen Stellen außerhalb der Galley vor (Tonalität im unregelmäßigen Fall  $> 0$  dB). Durch das ANVC-System kann diese stark jedoch nicht vollständig reduziert werden. Abbildung 19 rechts zeigt die optimierte Aktuator- / Sensorkonfiguration mit zwei Excitern (Positionen E1 und E4) und zwei B-Sensoren (Positionen TC1 und B8).

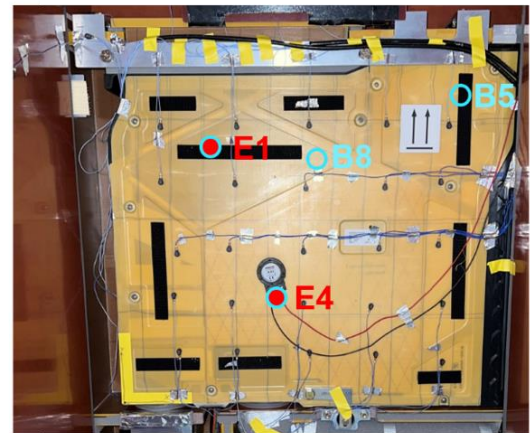
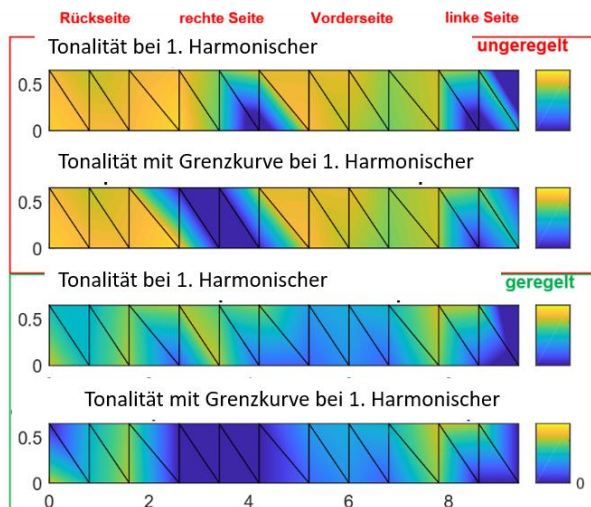


Abbildung 19: Synthese der Optimalsteuerung für TC2. Vorhersage der Schallverteilung bei der zweiten Kompressor-Harmonischen an den 24 Mikrofonpositionen ohne ANVC (ungeregelt) und mit ANVC (geregelt).

Zusammenfassend lässt sich aus den gezeigten Ergebnissen der Optimierung schlussfolgern, dass das für die Stand-Alone-ARU erarbeitete Konzept nur bedingt auf die Situation des Galleyaufbaus übertragbar ist. Der benötigte Hardwareaufwand steht in einem deutlichen Missverhältnis zur erwartbaren Schallreduktion. Aus diesem Grund wurden zwei alternative aktive Konzepte am Galleyaufbau getestet, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

Die beiden Konzepte sind in Abbildung 20 dargestellt. Das in Abbildung 20 (li.) dargestellte Konzept sieht zwei Miniatur-Exciter (siehe Tabelle 2) und vier Beschleunigungssensoren im Inneren der ARU vor, um die schallabstrahlenden Vibrationen der Seitenwand direkt in der Nähe des Kompressors zu reduzieren. Das in Abbildung 20 (re.) dargestellte Konzept sieht jeweils drei Miniatur-Exciter (siehe Tabelle 2) und drei Beschleunigungssensoren an jedem Lagerpunkt der ARU vor, um die Übertragung von Körperschall über die Shock-Mounts in drei Raumrichtungen zu reduzieren.

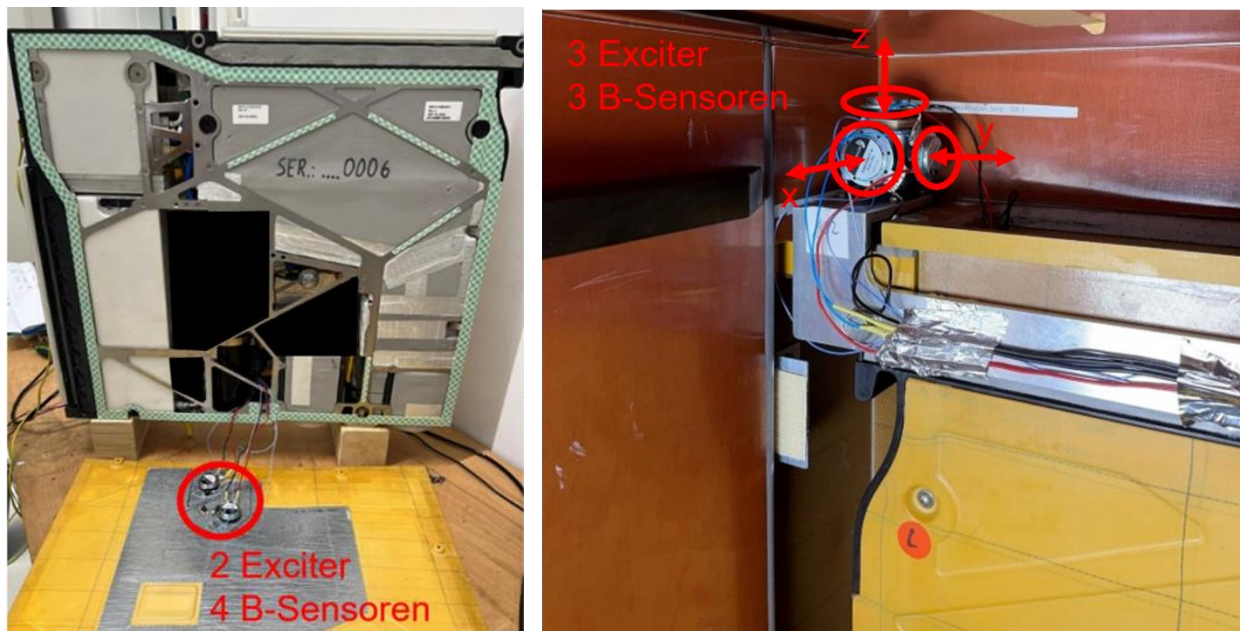


Abbildung 20: Konzept mit Excitern und Sensoren auf dem Seitenpaneel (li.) und Konzept mit Excitern und Sensoren an den Lagerpunkten (re.).

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Ergebnisse der aktiven Steuerung der Lagerpunkte der ARU gemäß Abbildung 20 (re.).

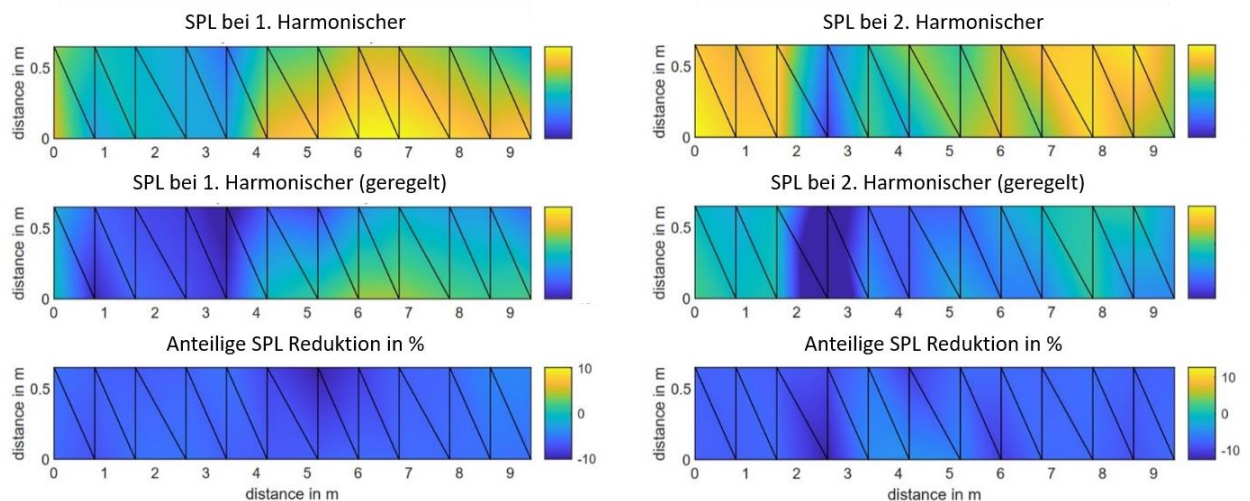


Abbildung 21: Störschallfeld (SPL) in TC1 an den 24 Mikrofonpositionen bei der ersten (li.) und zweiten (re.) Kompressor-Harmonischen (obere Zeile). Aktive Steuerung des Körperschalleintrags mit Excitern an den Lagerpunkten (mittlere Zeile).

Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für die erste Kompressor-Harmonische und auf der rechten Seite sind die Ergebnisse für die zweite Kompressor-Harmonische dargestellt. Die erste Zeile zeigt den SPL an den 24 Mikrofonpositionen um die ARU herum (siehe Abbildung 15). Während



in TC1 die erste Harmonische stärker nach vorne abgestrahlt wird (Ortskoordinate 5-8 m), ist die zweite Harmonische auf der Rückseite (Ortskoordinate 0-2 m) und auf der linken Seite (Ortskoordinate 7-9 m) dominant. Wie in der zweiten Zeile von Abbildung 21 zu sehen ist, ist das ANVC-System in der Lage, die Schalldruckpegel bei beiden Kompressor-Harmonischen deutlich zu reduzieren.

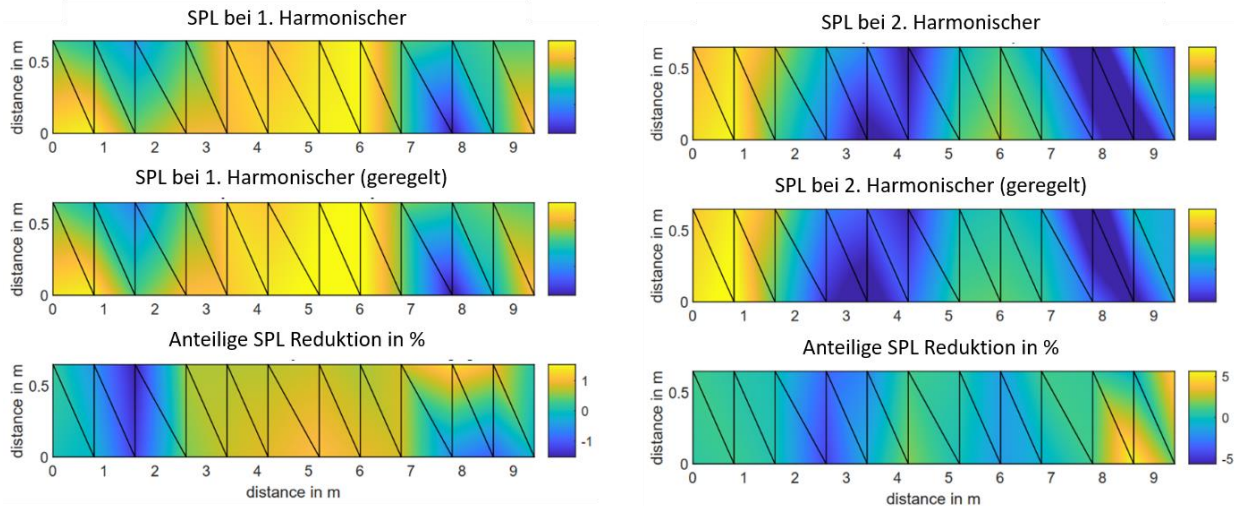


Abbildung 22: Störschallfeld (SPL) in TC2 an den 24 Mikrofonpositionen bei der ersten (li.) und zweiten (re.) Kompressor-Harmonischen (obere Zeile). Aktive Steuerung des Körperschalleintrags mit Excitern an den Lagerpunkten (mittlere Zeile).

Aus Abbildung 22 geht hervor, dass in TC2 ein anderer Transmissionspfad als in TC1 vorliegt. Bei der ersten Kompressor-Harmonischen erfolgt die Schallabstrahlung hauptsächlich nach vorne und bei der zweiten Kompressor-Harmonischen sind die SPL im hinteren Bereich der Galley erhöht. Da die Transmission in TC2 nicht über die Lagerpunkte erfolgt, ist das ANVC-System auch nicht in der Lage, den SPL außerhalb der Galley zu reduzieren. Das Konzept ist daher für TC1 prinzipiell geeignet, nicht jedoch für TC2.

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen die Ergebnisse der aktiven Steuerung des ARU-Seitenpanels gemäß Abbildung 20 (li.). Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für die erste Kompressor-Harmonische und auf der rechten Seite sind die Ergebnisse für die zweite Kompressor-Harmonische dargestellt. Die erste Zeile zeigt den SPL an den 24 Mikrofonpositionen um die ARU herum (siehe Abbildung 15). Die Schallabstrahlung erfolgt in TC1 hauptsächlich nach vorne. Wie in der zweiten Zeile von Abbildung 23 zu sehen ist, ist das ANVC-System kaum in der Lage, die Schalldruckpegel bei beiden Kompressor-Harmonischen zu reduzieren. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, weil bereits zuvor festgestellt wurde, dass die Transmission in TC1

hauptsächlich über die Lagerpunkte der ARU erfolgt. Es ist deshalb plausibel, dass das ANVC-System über das ARU-Seitenpaneel keinen nennenswerten Einfluss ausüben kann.

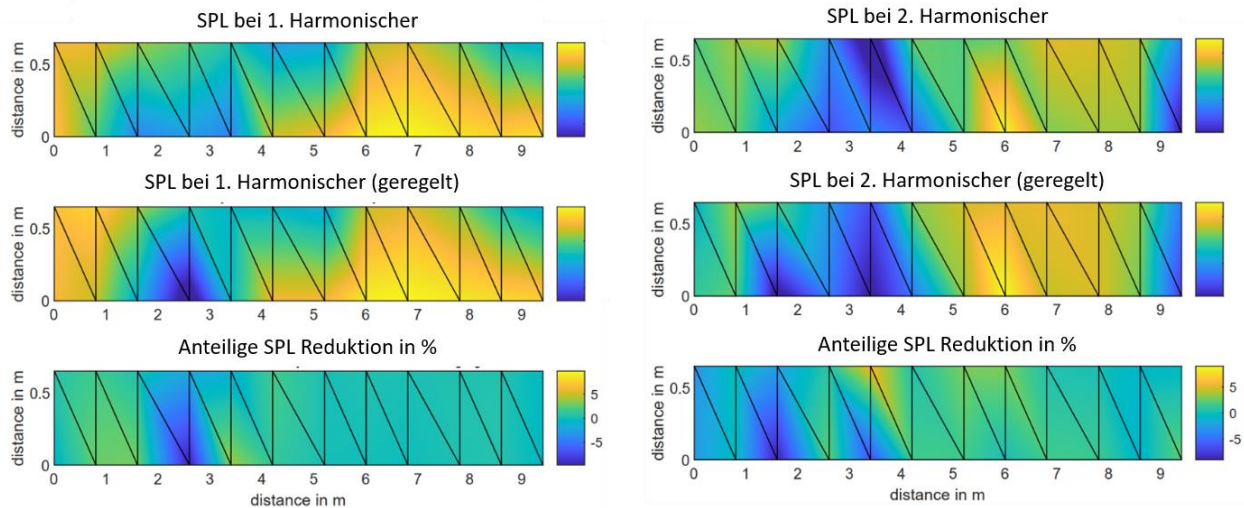


Abbildung 23: Störschallfeld (SPL) in TC1 an den 24 Mikrofonpositionen bei der ersten (li.) und zweiten (re.) Kompressor-Harmonischen (obere Zeile). Aktive Steuerung des Körperschalleintrags mit Excitern auf dem Seitenpaneel (mittlere Zeile).

Wie in Abbildung 24 zu sehen, kann das ANVC-System auf dem ARU-Seitenpaneel in TC2 eine Reduktion der SPL bewirken. Da die Reduktion der SPL jedoch nicht global um die gesamte Galley erfolgt, erfolgt die Schalltransmission zumindest nicht ausschließlich über das ARU-Seitenpaneel.

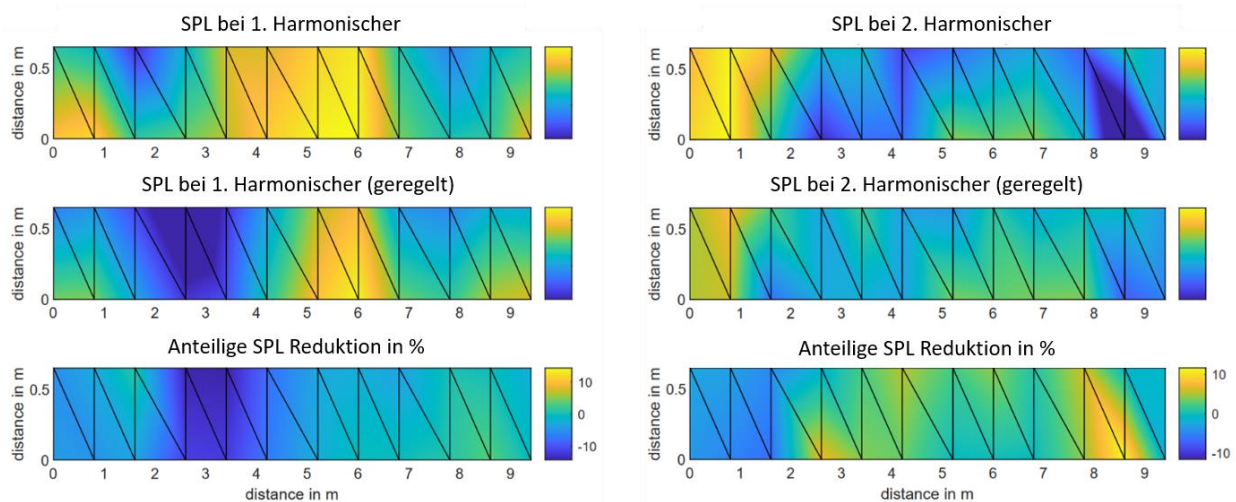


Abbildung 24: Störschallfeld (SPL) in TC2 an den 24 Mikrofonpositionen bei der ersten (li.) und zweiten (re.) Kompressor-Harmonischen (obere Zeile). Aktive Steuerung des Körperschalleintrags mit Excitern auf dem Seitenpaneel (mittlere Zeile).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass je nach Lastfall entweder das eine oder das andere Konzept wirksamer ist. Aufgrund der unterschiedlichen Transmissionspfade im Galleyaufbau erscheint es im Hinblick auf weiterführende Arbeiten zielführend, die Körperschallausbreitung direkt an oder nahe der dominanten Störquelle (Kompressor) zu reduzieren. Andernfalls breitet sich der Körperschall innerhalb der ARU aus und wird über das Gehäuse und die Lagerpunkte auf den Galleyaufbau übertragen. Eine detaillierte Untersuchung der Körperschallausbreitung innerhalb der ARU ist deshalb nötig, um wirksamere Maßnahmen abzuleiten. Diese könnten z. B. gezielte Veränderungen des ARU-Gehäuses (Verrippungen) oder Schwingungsdämpfer nah am Kompressor (passiv, semi-aktiv oder aktiv) sein.

### 3.1.2 Teilprojekt 2 – Integrierte elektrische Bauteile

In dem Arbeitspaket werden die Potenziale von applizierten Leiterbahnen auf Faserverbundstrukturen untersucht. Das Ziel besteht darin, Klebestreifen, die auf die Oberfläche aufgebracht werden, als elektrische Leiter zu verwenden.

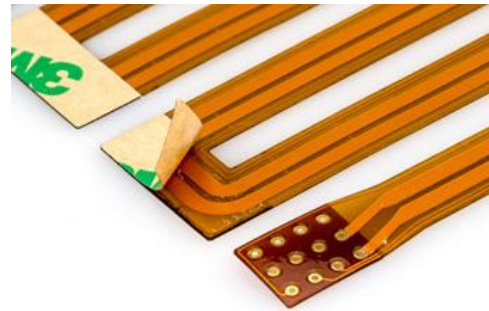
#### Konzeptentwicklung zur Leiterbahnapplikation

Zunächst soll eine allgemeine Konzeptentwicklung zur Leiterbahnapplikation durchgeführt werden. Um die Leiterbahnen zu realisieren, sollen verschiedene Klebebänder, sogenannte Tapes, übereinandergestapelt werden, um somit die elektrische Stromleitung und die elektrische Isolation zu realisieren. Abbildung 25 zeigt exemplarisch einige erste Applikationskonzepte.

Die Applikation von selbstklebenden Kupfer- und Aluminium-Tapes (Abbildung 25 (1)) gewährleistet nicht nur eine leitende Verbindung, sondern ermöglicht auch eine einfache und effiziente Befestigung auf der gewünschten Oberfläche. Als zusätzlicher Schutz für die elektrischen Leiter dient ein Covertape, das als Isolationsschicht fungiert und die Leiter vor äußeren Einflüssen abschirmt.

Eine Variation dieses Konzeptes ist in (Abbildung 25 (2)) dargestellt. Die Applikation nebeneinander angeordneter Leiterbahnen bietet sich insbesondere dann an, wenn zwei unterschiedliche Spannungspotenziale bereitgestellt werden sollen.

Eine alternative Technologie sind die Flexleiterbahnen (Abbildung 25 (3)). Diese flexiblen Leiterbahnen sind nicht nur elektrisch isolierend gegenüber ihrer Umgebung, sondern bieten auch den Vorteil, dass Umwelteinflüsse auf die elektrischen Leiterbahnen nicht gesondert untersucht werden müssen, da die Leiterbahnen in sich gekapselt sind. Die Flexleiter müssen lediglich mit einem entsprechenden Tape auf der Struktur appliziert werden. Die Flexleiterbahnen stellen somit eine zuverlässige und langlebige Alternative zu den konventionellen Leiterbahnen auf Tape-Basis dar.



- (1) Selbstklebende Metall-Tapes (tradeindia) (2) Applikation mehrerer elektrischer Leiter (3) Flexleiterbahnen (leiton)

Abbildung 25: Auswahl an verschiedenen Applikationskonzepten

Mit DAL wurde sich darauf geeinigt, die applizierte Leiterbahn dreischichtig aufzuführen. Die Abbildung 26 (links) skizziert den Aufbau einer einzelnen Leiterbahn, welche aus einem Bett- (blau), einem Leiter- (rot), und einem Covertape (gelb) besteht. Auf diese Weise ist die elektrische Isolation in alle Raumrichtungen sichergestellt. Abbildung 26 rechts zeigt den realen Aufbau einer Leiterbahn. Das schwarze, doppelseitige Klebeband, sorgt für die Anhaftung an der Sandwichstruktur und für den Schutz vor Umwelteinflüssen, welche durch das Sandwich hindurch erfolgen können. Der silberne, metallische Leiter unterscheidet sich optisch und geometrisch stark von der transparenten Klebefolie, welche den elektrischen Berührungsschutz und die Kapselung des elektrischen Leiters sicherstellt.

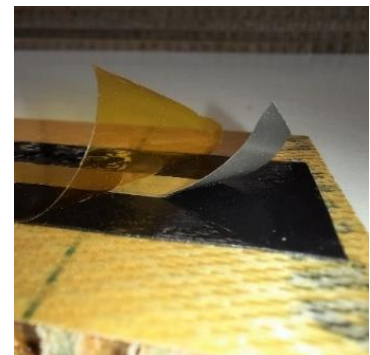
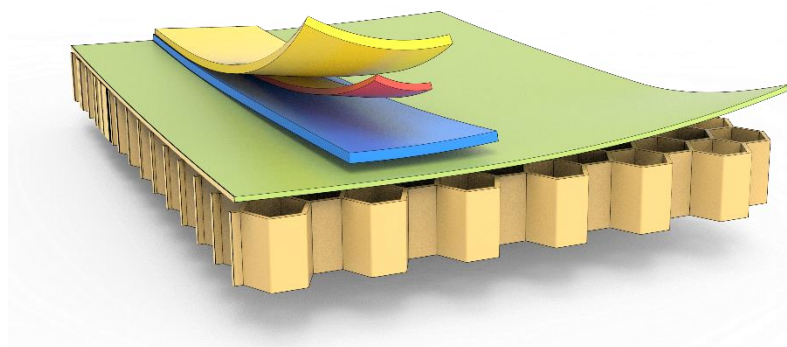


Abbildung 26: schematischer Aufbau der elektrischen Leiterbahnen

### Untersuchung der Anschlusspunkte

In dem TP 2.3.4. gibt es verschiedene Untersuchungen, den Anschluss einer externen Komponente an die Tapes zu realisieren. Das vielversprechendste Konzept sieht vor, den Anschluss über einen Stecker zu realisieren welcher auf einer Adapterplatine aufgelötet ist. Diese Adapterplatine wird direkt mit dem Tape auf der Sandwichstruktur fixiert. Mithilfe einer solchen Platine lassen sich sowohl Anschlusspunkte, als auch Kreuzungspunkte realisieren.



Abbildung 27 zeigt den Entwurf einer solchen Anschlussplatine und einer Kreuzungsplatine.

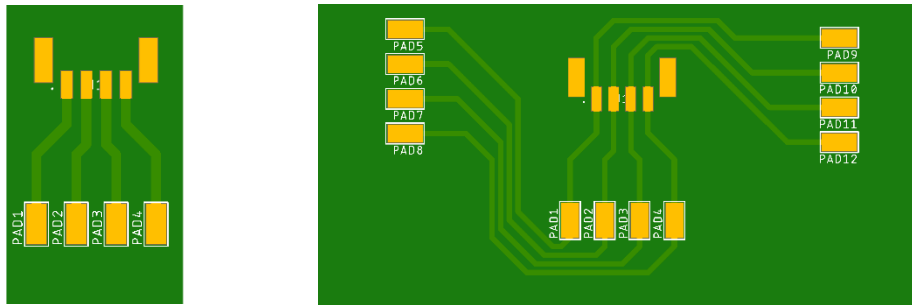


Abbildung 27: Platinen Layout von einer einfachen Anschlussplatine und einer dreifach verzweigten Platine mit Anschlusselement

Die nachfolgenden Abbildungen geben einen kleinen Überblick über die durchgeführten Abzugstests. Als Adapterplatinen wurden sowohl sogenannte Flexleiter, welche eine Dicke von ca. 0,1 mm aufweisen, als auch Standard-Platinenmaterial, mit einer Stärke von 1,5 mm, verwendet. Die entsprechenden Versagenslasten sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Alle Platinen sind mit dem Betttape TESA 45010 befestigt. Die Versagensbilder zeigen, dass die Anbindung zwischen Sandwich und Platine in allen Fällen hält. Für die Versuche mit dem Flexleiter versagen in allen Versuchen die Goldkontakte des Flexleiters. Diese werden von dem angelöteten Bauteil aus dem Flexleiter herausgerissen. Bei der Variante, bei der das Kabel direkt auf die Platine gelötet wurde (Abbildung 30) zerreißt die Litze des Kabels in der Nähe der Lötstelle. In Abbildung 31 ist zu erkennen, dass der komplette Stecker sich von der Platine löst. Hier versagt der Stecker selber. Die Kontakte für die mechanische Zugentlastung werden aus dem Gehäuse gerissen und verbleiben auf der Platine.

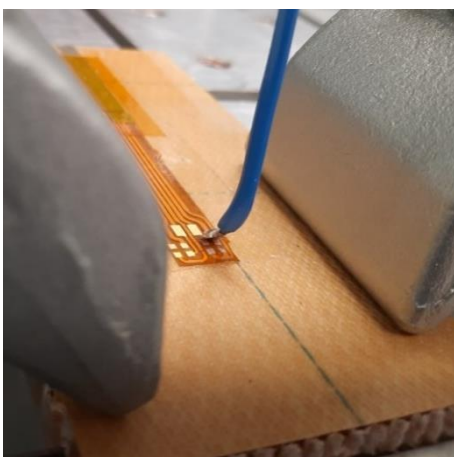


Abbildung 28: Flexleiter Kabel Interface

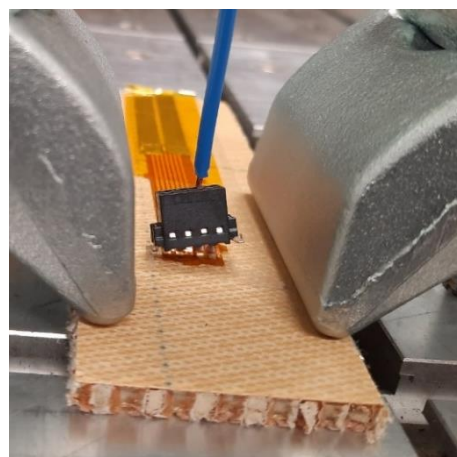


Abbildung 29: Flexleiter Stecker Interface



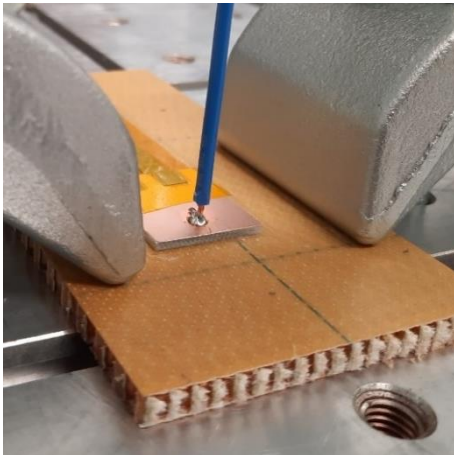


Abbildung 30: Platinen Kabel Interface

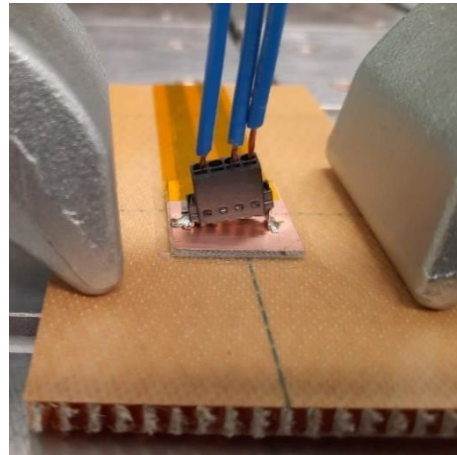


Abbildung 31: Platinen Stecker Interface

Tabelle 3 stellt die ermittelten Messwerte der vier verschiedenen Konzepte zusammen. Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass zu keinem Zeitpunkt das Interface zwischen Sandwich und der Platine bzw. dem Flexleiter versagt. Das bedeutet, dass die Anbindung mithilfe des Bett-Tapes ausreichend ist.

Tabelle 3 Übersicht der Versagenskräfte der unterschiedlichen Steckerkonzepte

Anschlusskonzept	Versagenskraft	Anmerkungen
<b>Flexleiter Kabel Interface</b>	5,1 N	Die Goldkontakte des Flexleiters werden zerstört.
<b>Flexleiter Stecker Interface</b>	16,63 N	Die Goldkontakte des Flexleiters werden zerstört.
<b>Platinen Kabel Interface</b>	38,3 N	Das Kabel versagt in der Lötstelle
<b>Platinen Stecker Interface</b>	35,47 N	Bei 17,25 N wird das Kabel aus dem Stecker gerissen Die Halterungen des Steckers versagen beim Einsatz von 3 Kabeln

Die Versuche zeigen, dass die mechanische Schwachstelle des Anschlussbereiches der Übergang von der Platine zum Stecker ist. Bei der Auslegung muss darauf geachtet werden, dass die angelöteten Komponenten an die Platinen nicht oder nur wenig belastet werden. Mithilfe eines entsprechend ausgelegten Steckers würde sich die maximale Belastung sicherlich auch noch weiter steigern lassen.

### **Mechanische Untersuchung der Anbindung**

Im Zuge des TPs wurden verschiedene mechanische Untersuchungen durchgeführt, um die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der applizierten Leiterbahnen zu untersuchen.

### **Abschäl- und Rollenschälversuche**

Um die Qualität und die Anhaftung der verschiedenen Tapes untereinander und auf das Sandwichsubstrat zu untersuchen, wurde sich darauf geeinigt, sowohl Abschäl- als auch Rollenschälversuchen im statischen Prüflabor durchzuführen. Es wurden sowohl die Bettapes alleine, als auch das komplette Lagenpakete von drei verschiedenen Sandwichoberflächen abgeschält. Auf diese Weise lässt sich der Substrateinfluss der verschiedenen Oberflächen abbilden. Weiterhin wurden auch alle Leiter- und Cover-Tapes von ihren entsprechenden Grundtapes abgezogen. Auf diese Weise sind insgesamt 56 Probensätze mit unterschiedlichen Konfigurationen entstanden. Abbildung 32 zeigt einen Teil des Probensatzes. Hier sind sowohl die unterschiedlichen Deckschichten der Sandwichstrukturen, als auch die verschiedenen Lagenstapel der Tapes zu erkennen.



Abbildung 32: Teilmenge der gefertigten Proben.

### **Abschältest**

Beim Abschältest werden die einzelnen Tapes in einem Winkel von  $180^\circ$  von der Oberfläche abgezogen. Die Sandwichprobe ist einseitig in der Prüfmaschine eingespannt. Das frei Ende des Tapes, beziehungsweise des Tape-Verbundes wird in der gegenüberliegenden Spannbacke fixiert. Beim Verfahren der Maschine werden auf diese Weise die Tapes von ihrem Untergrund abgelöst. (vgl hierzu Abbildung 33, links)

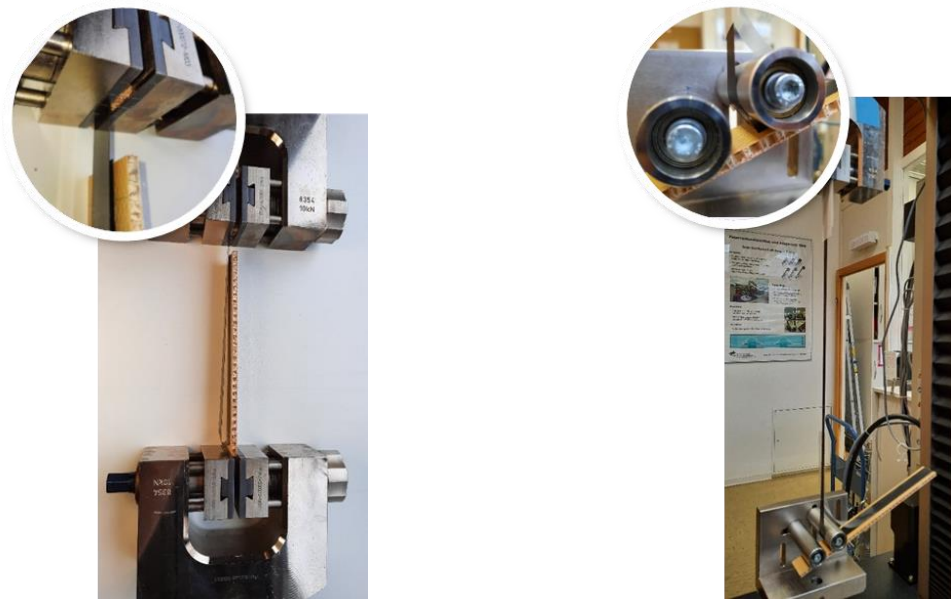


Abbildung 33: Aufbau des Abschältests (links) und des Rollenschälversuches (rechts)

Da bei vielen Proben ein Startanriss-Effekt zu erkennen ist, erfolgt die Auswertung der benötigten Abschälkraft im Bereich der letzten 100 mm des Prüfweges. Abbildung 34 zeigt einen solch typischen Anreißeffekt. Die Last steigt nach einer kurzen Startphase auf einen relativ hohen Wert und fällt im Anschluss auf ein mehr oder weniger konstantes Kraftniveau. In der vorliegenden Probe war es allerdings so, dass das Bett-Tape nicht eigenstabil genug ist um vollständig von der Oberfläche abgeschält zu werden. Das Tape ist in beiden Versuchen nach einer Strecke von ca. 45 mm zerrissen, da die Anhaftung an dem Grundsubstrat höher ist als die Festigkeit des Tape Materials.

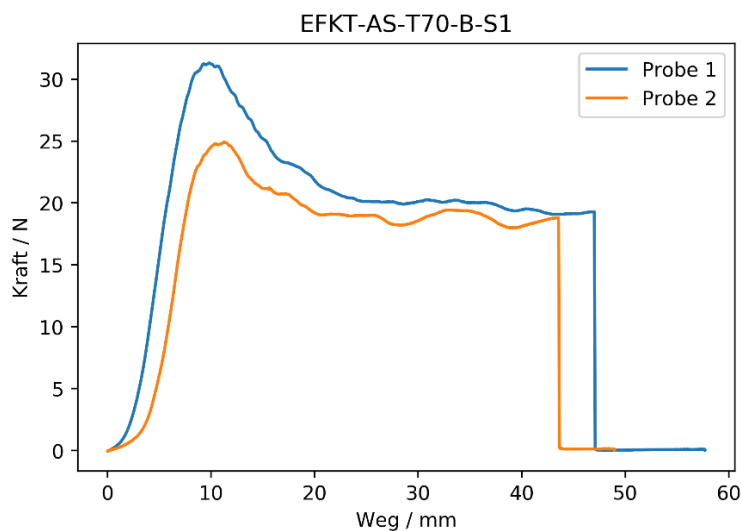


Abbildung 34: Darstellung des Kraft Weg Diagramms und der Detailansicht der Probe EFKT-AS-T70-B-S1

Abbildung 35 zeigt einen vollständig durchgeführten Versuch. Das gemessene Kraftniveau ist deutlich geringer als die Werte aus Abbildung 34. Dies liegt zum einen an dem Klebeband, welches eine geringere Klebkraft aufweist, aber auch an dem offenporigen Substrat, welches mehr mit einer Gitterstruktur als mit einer geschlossenen Oberfläche zu vergleichen ist. Die Gitterstruktur ist auch deutlich in den schwankenden Werten der Kraftmessung zu erkennen. Die Streuung der Messerwerte ist deutlich höher als bei den Werten anderer Substrate.

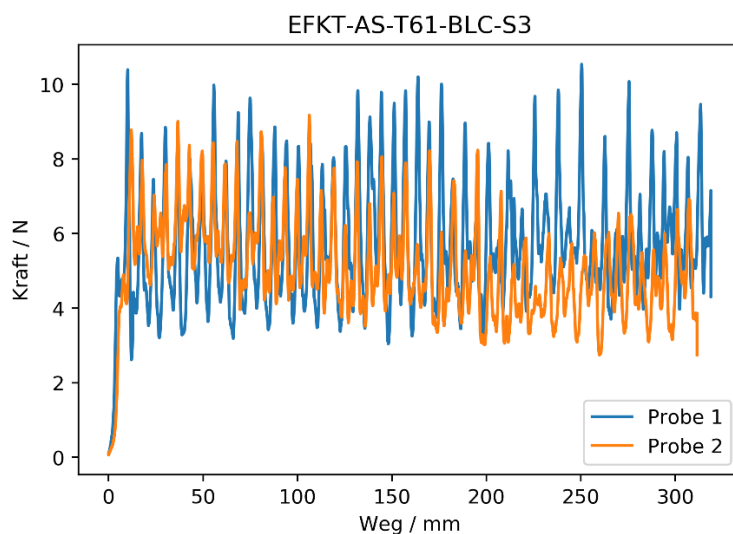


Abbildung 35: Darstellung des Kraft Weg Diagramms und der Detailansicht der Probe EFKT-T61-BLC-S3

Bei allen Proben hat sich gezeigt, dass das Leiterpaket aus Bett-Tape, Leitertape und Covertape im Verbund deutlich stabiler ausfällt als das Bett-Tape alleine. Gerade durch die sehr geringe Elastizität von Leiter- und Cover-Tape war es bei diesen Aufbauten möglich, die Versuche auf allen Substraten durchzuführen, ohne das applizierte Tape zu zerreißen. Eine Besonderheit stellt der Versuch in Abbildung 36 dar. Hier ist die Anbindung des Leitertapes an das Bett-Tape so gut und die Anbindung des Covertapes an das Bett-Tape so schlecht, dass das Bett-Tape der Länge nach zerrissen wurde. (vergleiche hierzu Abbildung 36 rechts)

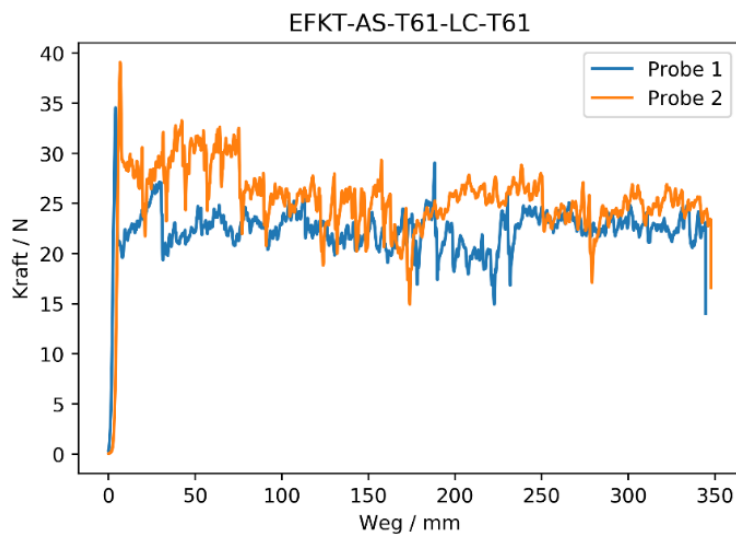


Abbildung 36: Darstellung des Kraft Weg Diagramms und der Detailansicht der Probe EFKT-AS-T61-LC-T61

### Rollenschälversuch

Durch die Rollenordnung im Rollenschälversuch erfolgt der Abzug unter einem Winkel von  $90^\circ$  zur Sandwichoberfläche. Das Rollenpaar in dem unteren Teil der Prüfkonstruktion führt die Sandwichprobe. Das Tape, welches in der oberen Spannbacke fixiert ist, sorgt beim Verfahren der Maschine dafür, dass die Sandwichstruktur immer so unter der Rolle positioniert, dass der Ablöse Winkel von  $90^\circ$  eingehalten wird. (vgl. hierzu Abbildung 33, rechts)

Abbildung 37 zeigt auf der rechten Seite eine Detailaufnahme des Rollenschälversuches. Deutlich zu erkennen ist der Abschälwinkel von  $90^\circ$  zu der Oberfläche. Auf der linken Seite von Abbildung 37 ist das dazugehörige Kraft-Weg Diagramm dargestellt. Aufgrund der gitterartigen Struktur und der daraus resultierenden, geringen Anhaftung ist auch hier das Rauschen deutlich zu erkennen.



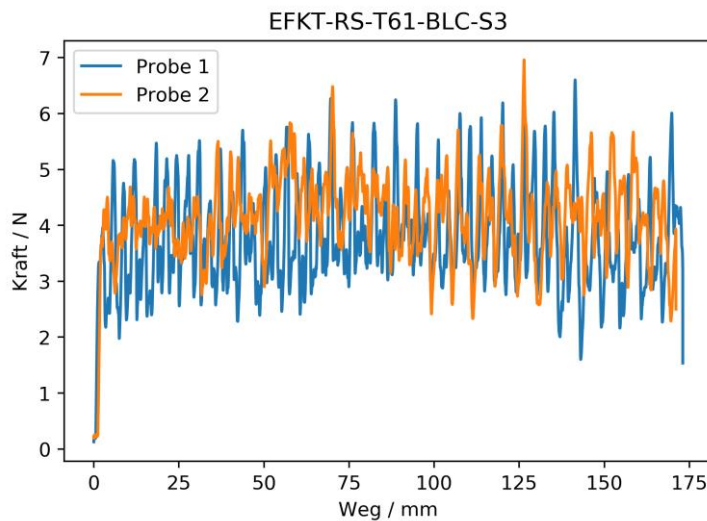


Abbildung 37: Darstellung des Kraft-Weg Diagramms und der Detailansicht der Probe EFKT-RS-T61-BLC-S3

Ein Beispiel für ein ungültigen Versuch zeigt Abbildung 38. Hier ist die Anhaftung des Bett-Tapes so gut, dass dieses sich nicht von der Oberfläche des Sandwichpanels abschälen lässt. Stattdessen gelangt das Tape unter die linke Rolle der Prüfvorrichtung und wird an dieser Stelle erneut auf das Substrat angepresst. Nach einem gewissen Verfahrweg zerreißt das Tape dann in der Vorrichtung.

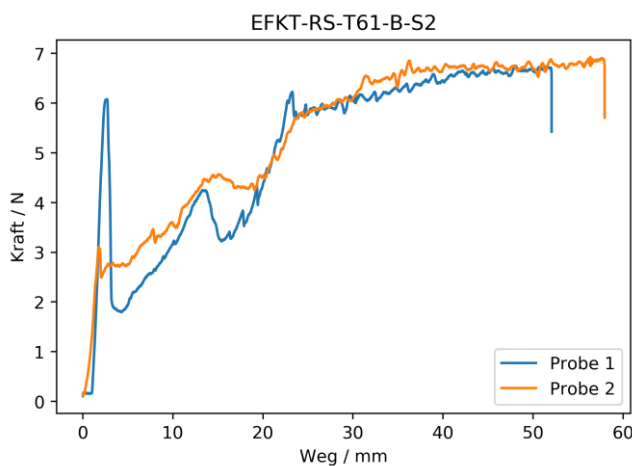


Abbildung 38: Darstellung des Kraft Weg Diagramms und der Detailansicht der Probe EFKT-RS-T61-B-S2

Die Abbildung 39 zeigt den Vergleich der verschiedenen, getesteten Bett-Tapes auf jeweils unterschiedlichen Substraten. Es ist deutlich zu erkennen, dass das TESA 45010, in schwarz dargestellt, sowohl auf dem Substrat 1 (linke Darstellung), als auch auf dem Substrat 2 (rechte Darstellung) eine deutlich robustere Anbindung aufweist.

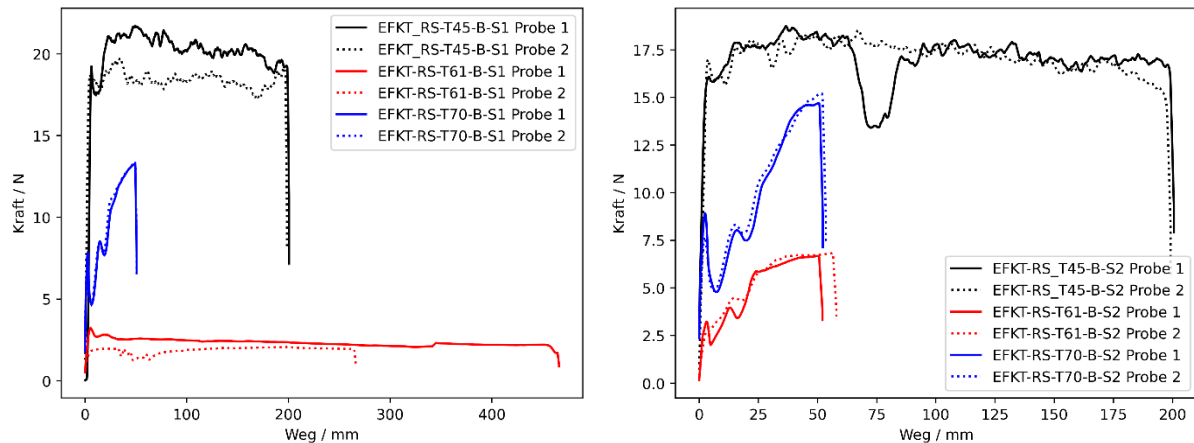


Abbildung 39: Vergleich der verschiedenen Grundtapes auf unterschiedlichen Substraten

Diese Erkenntnisse und die erfolgreich bestandenen Brandschutztests bei DAL haben dazu geführt, dass das TESA 45010 für die weiteren Untersuchungen ausgewählt wurde.

In Abbildung 40 sind die Messergebnisse aller durchgeführten Versuche dargestellt. In der Abbildung sind der Mittelwert der Abschälkraft, sowie der höchste und kleinste gemessene Kraftwert jeder Probekombination eingezeichnet.

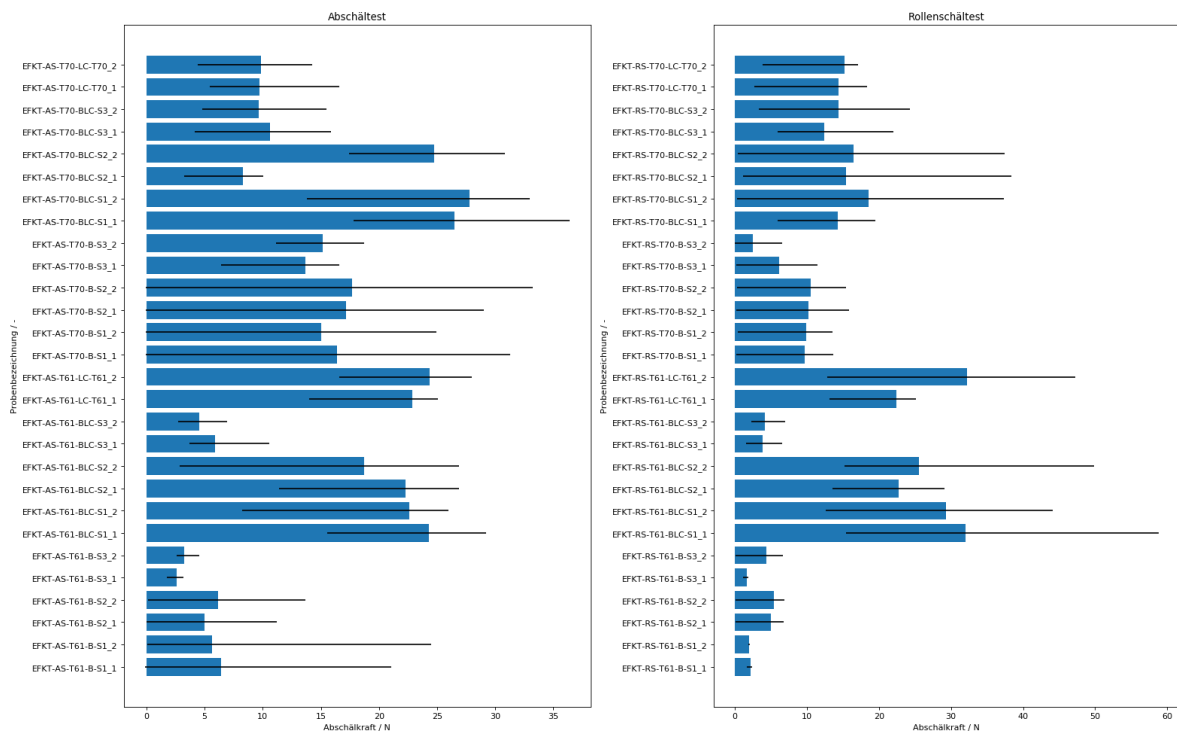


Abbildung 40: Übersicht aller getesteten Proben

#### 4-Punkt-Biegeuntersuchung

Ein weiterer Gegenstand der Untersuchungen besteht darin, das mechanische Verhalten der Leiterbahnen unter Last abzubilden und zu untersuchen. Um die mechanische Last auf die Struktur

und die Leiterbahn aufzubringen, wurden die Proben mit den applizierten Leiterbahnen mithilfe einer 4-Punkt-Biegung zu belasten. Die Herausforderung besteht darin, eine Korrelation zwischen dem Dehnungssignal und der Widerstandsänderung zu realisieren. Hierfür ist eine Synchronisation des Widerstandsmessgerätes mit der Prüfmaschine notwendig. Mithilfe eines Python-Scriptes können die Daten aus dem Milliohmometer und der Prüfmaschinen zusammengeführt werden. Durch die Positionierung der Tapes auf der Ober-, bzw. Unterseite lassen sich wahlweise Druck, beziehungsweise Zugkräfte in den Tapezustapel einleiten. Abbildung 41 zeigt den schematischen Aufbau exemplarisch. Durch eine Drucklast in dem Tapezustapel ist eine Reduzierung des Widerstandes zu erwarten. Die Zugbelastung, in Abbildung 41 rechts dargestellt, führt zu einer Längung der elektrischen Leiterbahn und somit zu einer Widerstandserhöhung

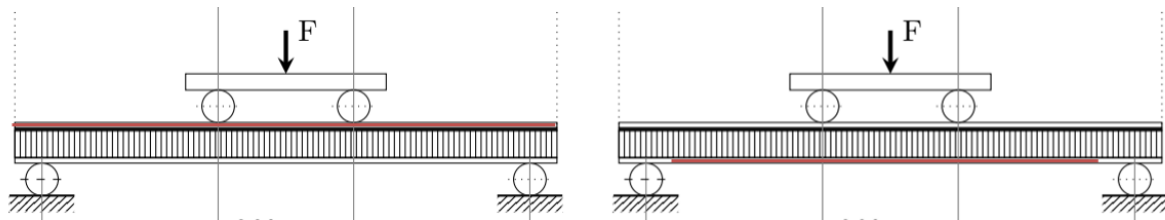


Abbildung 41: Schematische Darstellung der 4-Punkt-Biegebelastung um Zug- beziehungsweise Druckkräfte in das Tape einzuleiten

Für das Probenprogramm wurden die Leiterbahnen jeweils auf zwei verschiedenbreiten Proben auf Druck und auf Zug belastet. Abbildung 42 zeigt den exemplarischen Aufbau der Untersuchung. Hier ist die belastete, schmale Druck-Probe in der 4-Punkt-Biegeeinrichtung zu erkennen. Mithilfe der Messklammern wird der elektrische Widerstand aufgenommen.



Abbildung 42: exemplarischen Aufbau der 4-Punkt-Biegeuntersuchung

Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen exemplarisch die Kraft-Weg bzw. Widerstands-Weg Diagramme für die unterschiedlich breiten Proben, jeweils auf Druck, bzw. Zug belastet.



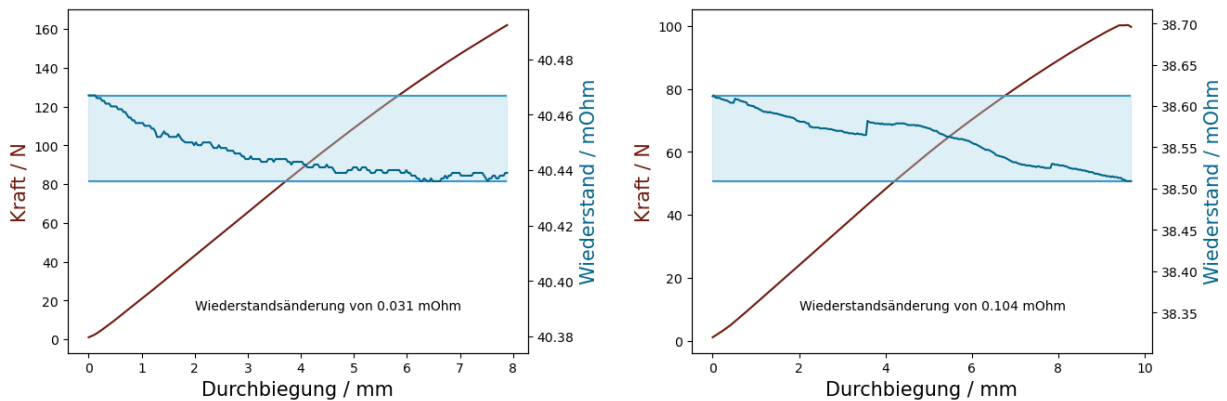


Abbildung 43: Probe auf der Druckseite belastet (links: breite Probe; rechts: schmale Probe)

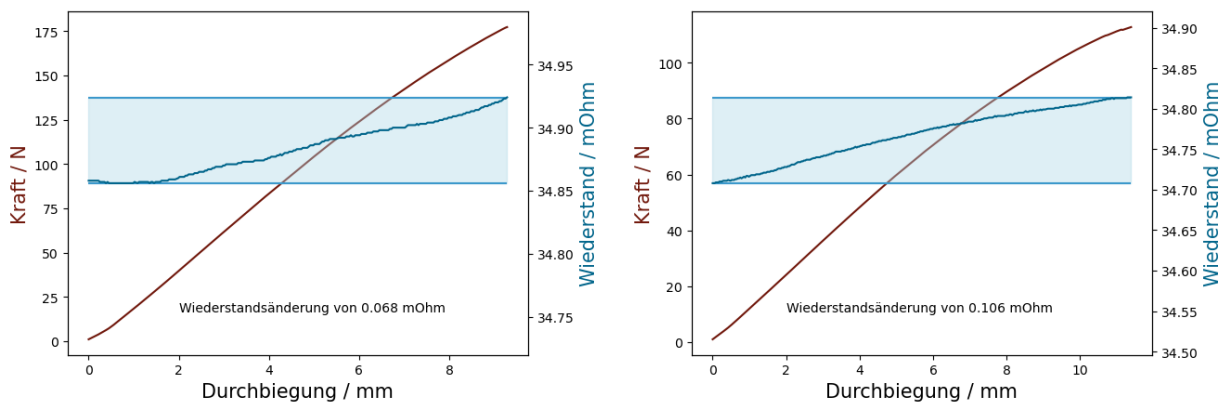


Abbildung 44: Probe auf der Zugseite belastet (links: breite Probe; rechts: schmale Probe)

In der Abbildung 43 ist zu erkennen, dass die Biegebelastung auf das Sandwich zu einer Reduzierung des elektrischen Widerstandes führt. Genau umgekehrt verhält es sich in Abbildung 44. Die Längung der Leiterbahn auf der Zugseite des biegebelasteten Sandwiches, führt zu einem Anstieg des Widerstandes. Die Biegebeanspruchungen des Sandwiches liegt deutlich über den in der Realität auftretenden Kräften und die gemessene Widerstandsänderung ist kleiner als 0,1 mΩ. Damit lässt sich festhalten, dass die gemessenen Änderungen für den Betrieb der elektrischen Leiterbahnen irrelevant sind und im Verlauf des Projektes nicht weiter betrachtet werden müssen.

### 3.1.3 Teilprojekt 3 – Anwendungsfälle, Nutzerziele, Anforderungen und Bewertung

In diesem Teilprojekt unterstützt das DLR die Kabinensystementwicklung des AP3.1 „Cabin Experience System NG“ des EFFEKT-Verbunds aus der Airline- und Passagierperspektive. Zudem entwickelt das DLR die eigenen Fähigkeiten zur Einbettung und Bewertung von Kabinensystemen

in Airline- und Passagierprozesse für die Verwertung in zukünftigen Forschungsprojekten weiter. Es wurde eine Masterarbeit mit dem Titel „Entwicklung von Anwendungsfällen, Nutzungszielen und Anforderungen für Flugzeugkabinensysteme mit Methoden des nutzerzentrierten Designs“ abgeschlossen. Außerdem wurde im zweiten Teil der Funktionsdemonstrator der ‚intelligent‘ Lavatory validiert.

## **Entwicklung von Anwendungsfällen, Nutzungszielen und Anforderungen für Flugzeugkabinensysteme mit Methoden des nutzerzentrierten Designs**

### **Übersicht über Anwendungsfälle und Befragungen**

Für die nachfolgenden vier Anwendungsfälle wurden zwei Befragungen durchgeführt, für Passagiere und für die Kabinencrew, um Feedback von den Nutzern einzuholen.

- Überwachung des Status von Verbrauchsmaterial
- Passagierspezifische Zugangskontrolle
- Ferngesteuerte Verschiebung der Lavatory-Türen
- Möglichkeit von Passagierfeedback zum Zustand der Lavatory

Es handelt sich bei beiden Befragungen um Querschnittstudien. Die Stichprobe besteht bei der Passagierbefragung aus insgesamt 387 Personen mit einer Abschlussquote des Fragebogens von 93%, bei der Befragung der Kabinencrew aus 196 Personen mit einer Abschlussquote von 47%. Die geringere Abschlussquote bei der Kabinencrew hängt nach unserer Einschätzung mit dem größeren Aufwand bei der Crew-Befragung zusammen, bei der vorher ein Clickdummy ausprobiert werden musste und der Fragebogen mit 24 Fragen auch länger war als bei der Passagierbefragung mit 18 Fragen.

### **Befragungsergebnisse zum Anwendungsfall „Passagierspezifische Zugangskontrolle“**

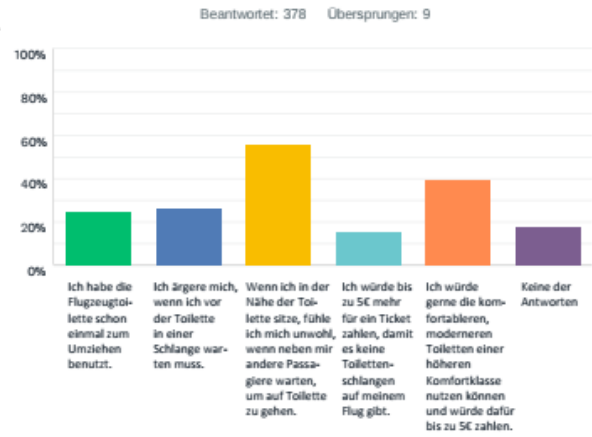
In Abbildung 45 werden zum Anwendungsfall „Passagierspezifische Zugangskontrolle“ durch die Anmeldung in einer virtuellen Warteschlange ausgewählte Fragen der Passagierumfrage dargestellt. Aus den Ergebnissen der Passagierbefragung lässt sich schlussfolgern, dass dieser Anwendungsfall als optionales Angebot für alle Airlines (Charterfluggesellschaften etwas mehr als Netzwerk- oder Billigfluggesellschaften) von Interesse sein kann. Die vollkommene Umsetzung dieses Services - also, dass jeder Fluggast der Airline, nur noch mittels Reservierung die Lavatory benutzen kann, ist dagegen, den Umfrageergebnissen entsprechend, nicht opportun.

**F10 Du möchtest einen Flug buchen.**  
Du hast die Möglichkeit mit der Airline zu fliegen,  
mit der du normalerweise fliegst oder mit einer Airline,  
die dir eine virtuelle Warteschlange für die Toilette anbietet.  
Du buchst...



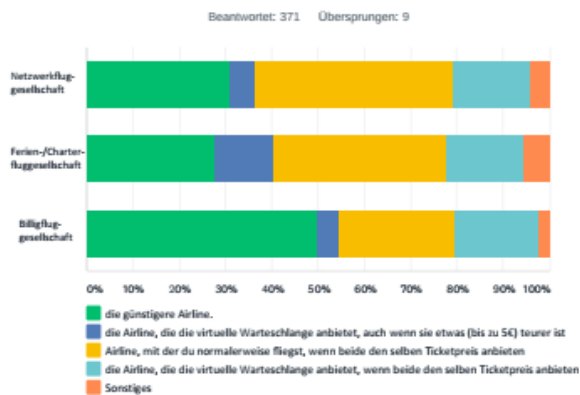
a) Frage 10 der PAX-Umfrage

**F11 Welche Aussagen treffen auf dich zu?**  
(Mehrfachauswahl möglich)



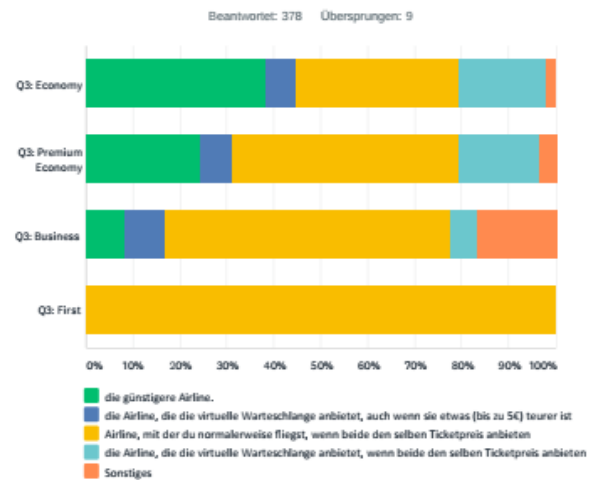
b) Frage 11 der PAX-Umfrage

**F10 Du möchtest einen Flug buchen.**  
Du hast die Möglichkeit mit der Airline zu fliegen,  
mit der du normalerweise fliegst oder mit einer Airline,  
die dir eine virtuelle Warteschlange für die Toilette anbietet.  
Du buchst...



c) Frage 10 der PAX-Umfrage beim Vergleich der Geschäftsmodelle

**F10 Du möchtest einen Flug buchen.**  
Du hast die Möglichkeit mit der Airline zu fliegen,  
mit der du normalerweise fliegst oder mit einer Airline,  
die dir eine virtuelle Warteschlange für die Toilette anbietet.  
Du buchst...



d) Frage 10 der PAX-Umfrage beim Vergleich der Komfortklassen

Abbildung 45: Ergebnisse zu Fragen der PAX-Umfrage zum Anwendungsfall passagierspezifische Zugangskontrolle

## Nutzungsziele und Anforderungen zum Anwendungsfall „Passagierspezifische Zugangskontrolle“

Auf Basis der Ergebnisse der Passagier- und Crewbefragung wurden Nutzungsziele und Anforderungen ermittelt, die in Abbildung 46 am Beispiel der passagierspezifischen Zugangskontrolle dargestellt werden.

Use Case	Passenger Specific Access Control
<b>Kurzbeschreibung</b>	PassagierIn, der/die das Lavatory über ein Reservierungssystem gebucht hat, wird der Zutritt in der Reihenfolge einer Warteschlange entsprechend in das Lavatory gewährt.
<b>Akteure</b>	PassagierIn, Kabinencrew
<b>System</b>	Smart Lavatory
<b>Nutzungsziele</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. KundInnenzufriedenheit verbessern               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Service effizienter gestalten (weniger/keine Gäste im Gang während des Service)</li> </ol> </li> <li>2. MitarbeiterInnenzufriedenheit verbessern               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Service effizienter gestalten (weniger/keine Gäste im Gang während des Service)</li> <li>b. Weniger Stress wegen PassagierInnen im Gang beim Service</li> </ol> </li> <li>3. Sicherheit verbessern               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. PassagierInnen stehen nicht im Gang (Luftlöcher, Aerosolübertragung)</li> </ol> </li> </ol>
<b>Anforderungen</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Zuverlässiger Betrieb</li> <li>2. Eingreifen der Crew in das Warteschlangensystem ermöglichen</li> <li>3. Anonyme Anmeldung</li> <li>4. Spezielle Lavatorys für spezielle Gründe buchen (Umziehen, Zähne putzen)</li> <li>5. Airline App nur optional</li> <li>6. Nicht alle Lavatories eines Flugzeugs (einer Komfortklasse) an das System anbinden → mind. Eine Lavatory sollte ohne Reservierung begehbar bleiben</li> <li>7. Möglichkeit der Buchung eines Lavatorys in andere Komfortklasse mit Bezahlsystem</li> </ol>

Abbildung 46: Nutzungsziele und Anforderungen für die passagierspezifische Zugangskontrolle

### Gesamtbewertung der Anwendungsfälle

Für die Gesamtbewertung der Anwendungsfälle fließen die Befragungsergebnisse und eigene Annahmen in eine Nutzwertanalyse und eine Kapitalmethode zur Berechnung der Amortisationszeit ein. Die Ergebnisse aus diesen beiden Methoden werden für drei der vier Anwendungsfälle in Abbildung 47 in einer Portfoliodarstellung eingeordnet und können damit leichter verglichen werden (für Anwendungsfall III konnte keine Amortisationszeit ermittelt werden, so dass dieser nicht dargestellt werden kann).



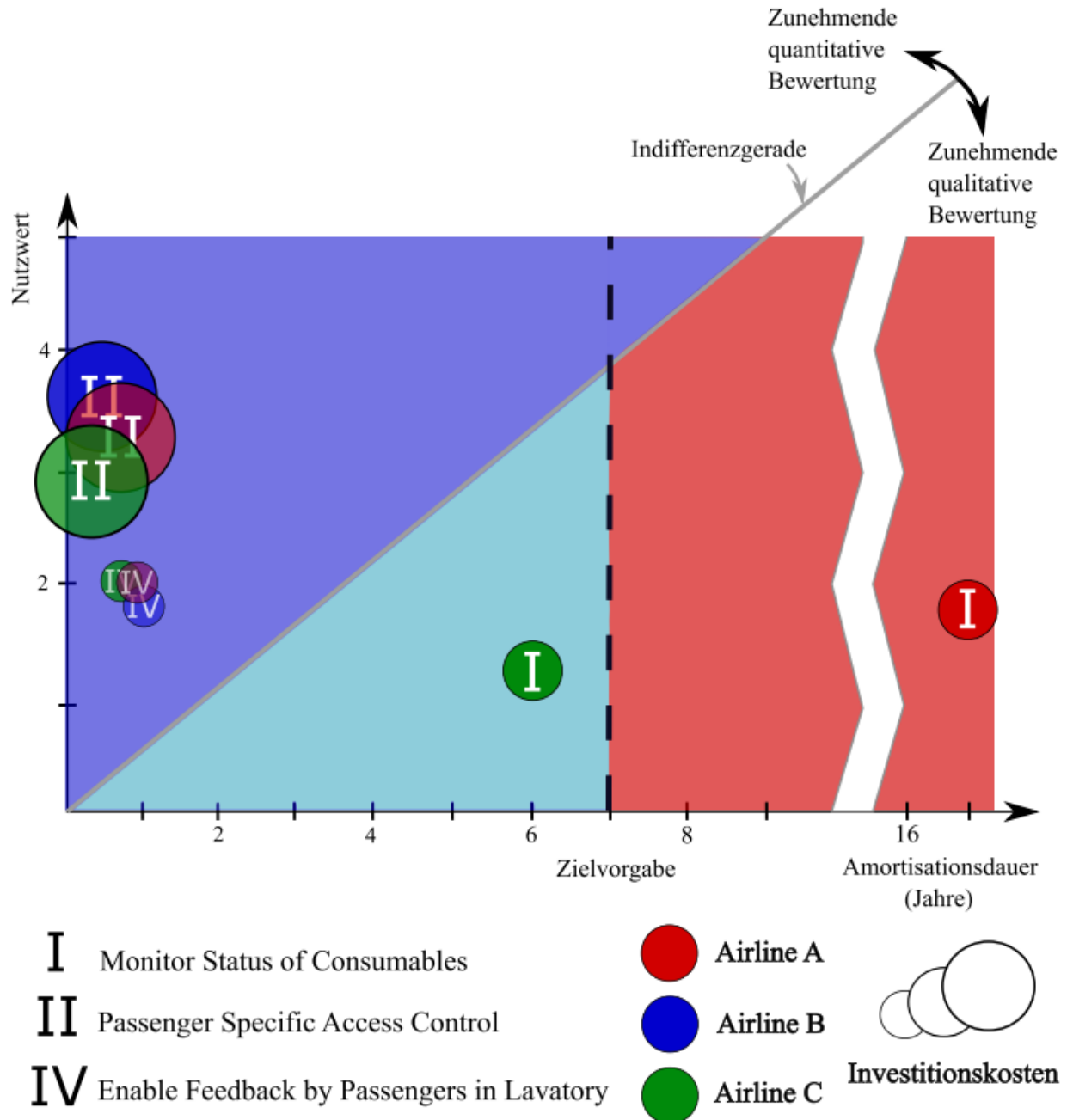


Abbildung 47: Portfoliodarstellung der Anwendungsfälle

Insgesamt haben sich insbesondere zwei der vier untersuchten Anwendungsfälle (II und IV) für Airlines - unabhängig von deren Geschäftsmodell - als interessant erwiesen.

Einen besonderen finanziellen Vorteil bringt der Anwendungsfall der **Passagierspezifischen Zugangskontrolle**, der eine virtuelle Warteschlange in der Flugzeugkabine vorsieht. Den Umfragen nach sollten - bei Integration dieser Funktion in die Kabine - allerdings nicht alle Lavatories mit

diesem System ausgestattet werden, um eine Mindestanzahl an Lavatories auch weiterhin ohne Reservierung nutzen zu können. Ein solches System bringt mehrere Vorteile und kann seinen finanziellen Mehrwert insbesondere auch durch Anbieten von Buchungen der Lavatories in höheren Komfortklassen schaffen.

Des Weiteren stellte sich auch der Anwendungsfall zur Ermöglichung von **Feedback in der Lavatory** als lohnend für alle betrachteten Airlinemodelle heraus. So könnte ein Smiley-System in Lavatories helfen, KundInnen zu binden.

Die **Überwachung des Füllstands von Verbrauchsmaterialien** ist zwar für die befragten FlugbegleiterInnen interessant, ergibt nach der Kapitalwertberechnung jedoch nur für Billigfluggesellschaften ein relativ interessantes Produkt.

Der Anwendungsfall **Ferngesteuerte Verschiebung der Lavatory-Türen**, durch den die Kabinencrew die Lavatorytüren per Knopfdruck (ent)sperren kann, wurde isoliert betrachtet für keine der Airlines als lohnend ermittelt, da aus den betrachteten qualitativen Faktoren keine Amortisation der Funktion resultieren würde. Die technische Funktionalität zur Sperrung der Lavatory-Türen ist allerdings auch für den Anwendungsfall der passagierspezifischen Zugangskontrolle erforderlich.

### **Validierung des Funktionsdemonstrators der ‚intelligent‘ Lavatory**

Die von Diehl Aviation entwickelten Funktionen wurden in einem Demonstrator (Mock-Up) verbaut. Das Mock-Up diente der Veranschaulichung der berührungslosen Funktionen. Die einzelnen Komponenten sollen eine berührungslose Bedienung durch Sensoren und intelligent gesteuerte Aktuatoren ermöglichen.

- Touchless Door Opener | Türöffner
- Liquid Soap Dispenser | Seifenspender
- Toilet Lid Opener | Toilettendeckelöffner
- Faucet | Wascharmatur
- Toilet Flush Button | Spülknopf
- Waste Flap | Mülleimerdeckel

Die **Validierung der ‚intelligent‘ Lavatory** fand in zwei Stufen statt. Zunächst wurde das Mock-Up auf der ‚Aircraft Interiors Expo 2023‘ (AIX) ausgestellt, um mündliches Feedback von potenziellen Nutzern und Kunden einzuholen. Im zweiten Schritt wurden Experten aus dem Airline Bereich und der verbundenen Forschung zu einer persönlichen Begehung des Mock-Up und einer anschließenden Expertenbefragung eingeladen. Die Validierung fand am 7. September 2023 bei

Diehl Aviation statt. Die anwesenden Experten kamen aus den Bereichen Produkt- & Kabinenmanagement und dem Engineering. Sie waren bei den Airlines Lufthansa und Condor tätig. Das Probandenfeld wurde durch Studenten und wissenschaftliche Mitarbeiter erweitert.

Für die Validierung war es essentiell, die Lavatory persönlich begutachtet und die Funktionen getestet zu haben. Das Teilnehmerfeld für die detaillierte Validierung wurde hierdurch stark eingegrenzt. Die Teilnehmenden waren ausschließlich männlich, aus dem deutschsprachigen Raum und hatten einen Luftfahrthintergrund. Eine Ausweitung der Validierung ist prinzipiell möglich, bedeutet aber einen erhöhten finanziellen Aufwand, um Teilnehmer aus verschiedenen Regionen und mit unterschiedlichem kulturellem Hintergrund zur persönlichen Besichtigung einzuladen. Ein erweitertes Teilnehmerfeld kann zu einer Verschiebung der Ergebnisse der Produktvalidierung führen, da zum Beispiel die Präferenzen für eine berührungslose Bedienung interkulturell oder demografisch unterschiedlich ausgeprägt sein können.

Die Produktvalidierung am 7. September 2023 hatte die folgende Agenda:

- Begrüßung und Einführung
- Begehung des Lavatory Mock-Up
- Ausfüllen des Fragebogens
- Feedback, Erfahrungsaustausch und Diskussion

Am Tag der Produktvalidierung fanden sich 9 Teilnehmer am Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung (ZAL) in Hamburg ein. Zunächst wurde der Hintergrund des Projekts, insbesondere der Ablauf der Validierung erläutert. Anschließend fand die Validierung in Form einer Begehung des Mock-Up statt, bei der die Teilnehmer den Funktionsdemonstrator einzeln betreten und die verschiedenen Funktionen eigenständig und unvoreingenommen ausprobieren konnten. Basierend auf den gesammelten Eindrücken wurden die Teilnehmer gebeten einzeln und ohne Abstimmung mit weiteren Teilnehmern einen Onlinefragebogen zu beantworten.

Der Fragebogen differenzierte zwischen den unterschiedlichen Teilnehmergruppen *Passagier* und *Airline-Mitarbeiter*. Den bei einer Airline beschäftigten Personen wurden zusätzlich zu den allgemeinen Fragen ein tiefergehender Fragenblock gestellt, welcher operative Aspekte der ‚intelligenten‘ Lavatory abfragte. Der Fragebogen wurde auf Englisch formuliert und gliedert sich in die folgenden Fragenblöcke:

- 1. Allgemeine, demographische Fragen**  
(Alter, Geschlecht, Fluggewohnheiten)
- 2. Fragen zum Einfluss der Lavatory auf die Kundenzufriedenheit**  
(Wichtigkeit bzgl. des Reiseerlebnisses)
- 3. Airline-Fragen**  
(Probleme von Lavatories, Ranking der gewünschten berührungslosen Funktionen)
- 4. Fokussierung auf die berührungslose Funktionalität**  
(Präferenz, Sichtbarkeit, Verständlichkeit und Bedienung der Funktionen)
- 5. Nachhaltigkeit**  
(Materialien, Einbau von aufgearbeiteten Komponenten, Recyclingfähigkeit)
- 6. Sicherheit**  
(Aufbau, Sichtbarkeit und Funktion, ‚intelligente‘ Überprüfungsmechanismen)
- 7. Personen mit eingeschränkter Mobilität / Sicht**  
(Funktionalität für PRM/V, Ergonomie)
- 8. Freies Feedback, Kommentarfeld**  
(Möglichkeit für erweitertes Feedback)

Zunächst wurde der kulturelle, demographische und berufliche Hintergrund der Teilnehmer abgefragt. Außerdem wurde auf die Reisegewohnheiten bei Flugreisen eingegangen. Der Einstieg in das Thema der ‚intelligenten‘ Lavatory bezog sich auf den Einfluss der Flugzeugtoilette auf das Reiseerlebnis im Allgemeinen.

**To what degree does a satisfactory in-flight lavatory contribute to your overall satisfaction with your flight experience?**



Abbildung 48: Einfluss der Lavatory bzgl. des Reiseerlebnisses

Aus den Antworten und aus den Diskussionen lässt sich ableiten, dass die Lavatory einen unterschiedlich starken Einfluss auf das Reiseerlebnis hat. Das Thema wurde durch die Frage nach den größten Problempunkten aus Sicht der Passagiere weiter eingegrenzt. Die Befragten konnten die Punkte in eine Reihenfolge bringen. Die folgende Wortwolke stellt das Ergebnis dar, wobei die am höchsten bewerteten Punkte am größten dargestellt sind.



**What are the top issues or concerns you have regarding aircraft lavatories?**

Sound Proof Security  
Touchlessness  
Aesthetic Design  
Narrow Space  
**User Friendliness**  
**Cleanliness**  
Smell

Abbildung 49: Größte Problempunkte bzgl. der Lavatories aus Passagiersicht

Wie in der Abbildung ersichtlich, wird von den Teilnehmenden die Sauberkeit und Benutzerfreundlichkeit als sehr wichtig bewertet. In diesem Zusammenhang ist eine berührungslose Bedienbarkeit der einzelnen Lavatory-Funktionen gewünscht. Weitere wichtige Punkte waren eine geringe Geruchsbelastung, das Platzangebot sowie die Ästhetik der Lavatory. Die in der Umfrage genannten Punkte spiegeln sich in der persönlichen Diskussion im Anschluss an die Befragung wieder.

Zusätzlich zu der Passagiersicht wurde die Sicht der Airlines durch die Befragung ihrer Mitarbeiter erhoben. Antworten konnten im Freitext formuliert werden und sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

**What are the top Issues you as an airline have regarding aircraft lavatories?**

- Cleanliness
- Personal Space
- Less flexibility regarding footprint to optimize overall layout configuration
- Less option for differentiation
- Lavatory Space
- Robustness
- Easy Maintenance
- User-friendliness for customer and crew
- Water dispensation

Abbildung 50 Größte Problempunkte bzgl. der Lavatories aus Airlinesicht

Die gegebenen Antworten überschneiden sich zu einem großen Teil mit den Problemfeldern, die aus der Passagiersicht genannt wurden. Es werden zusätzlich Problemfelder bzgl. der Robustheit, einer einfachen Instandhaltung sowie einer einfachen Bedienung durch Passagiere und Crew-Mitglieder angesprochen, welche für einen reibungslosen Airline-Betrieb wichtig sind.

Bei der Entwicklung der Lavatory lag der Fokus auf der berührungslosen Bedienbarkeit der einzelnen Funktionen. Die Umfrageteilnehmer wurden gebeten die in dem Mock-Up enthaltenen Funktion in eine Reihenfolge zu bringen. Die an den höchsten bewerteten Funktionen werden am größten dargestellt.



Abbildung 51: Gewichtung der berührungslosen Funktionen einer Lavatory

Die Umfrageteilnehmer erachten vor allem die Funktionen ab dem Öffnen des Toilettendeckels als wichtig. In der anschließenden Diskussion wurde weiter deutlich, dass das Öffnen der Tür bei dem Betreten der Lavatory nicht zwingend berührungslos erfolgen muss. Sobald die Hände gewaschen sind, wird eine berührungslose Bedienbarkeit der nachfolgenden Funktionen sowie dem Öffnen der Tür bei dem Verlassen der Lavatory gewünscht, um die Hände nicht wieder zu kontaminieren. Die Tendenz wurde durch eine detaillierte Bewertung der einzelnen Funktionen zur berührungslosen Bedienbarkeit bestätigt. Hierbei wurden die Umfrageteilnehmer gebeten, die Funktionen auf einer Skala von 1 bis 11 (unwichtig bis wichtig) zu bewerten.

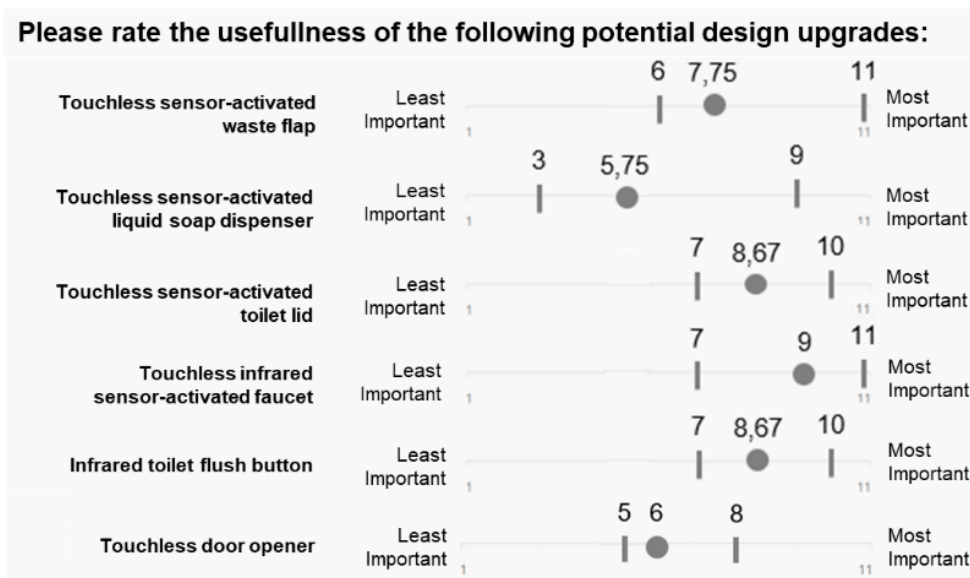


Abbildung 52: Bewertung der berührungslosen Funktionen einer Lavatory

In der Abbildung sind die minimalen, maximalen und Durchschnittswerte der Antworten veranschaulicht. Besonders bei der Auswertung dieser Frage ist zu beachten, dass durch die sehr geringe und einseitige Teilnehmerzahl die Ergebnisse nicht statistisch auswertbar sind und nur als Stichprobenergebnisse gesehen werden können.

Es bestätigt sich die Tendenz der Ergebnisse der vorangegangenen Frage. Die hoch bewerteten Funktionen wurden auch in dieser detaillierteren Frage überwiegend als wichtig gewertet. Bei einigen Funktionen war das Ergebnis nicht ganz eindeutig. Hierbei können Punkte aus der Diskussion bei der Einordnung der Antworten helfen.

Die **Funktion des berührungslosen Seifenspenders** wurde sehr unterschiedlich bewertet, welches auf unterschiedliche Präferenzen der Umfrageteilnehmer zurückzuführen sein kann.

Das **berührungslose Öffnen der Tür** wurde weder wichtig noch unwichtig bewertet. Die Frage unterscheidet allerdings nicht zwischen dem Öffnen der Tür bei Betreten oder Verlassen der Latory. Die Diskussion zeigte, dass das berührungslose Öffnen der Tür bei dem Verlassen wichtiger ist als bei dem Betreten. Es wurden ebenfalls Bedenken zu dem berührungslosen Sensor auf der Außenseite der Latory geäußert, da dieser bei dem (De-) Boardingprozess versehentlich durch vorbeigehende Passagiere bedient werden könnte. Diese Punkte sind als Feedback für die Entwicklung essentiell, um die Funktionen bestmöglich auf den Bedarf des Passagiers abzustimmen.

Bezüglich der berührungslosen Türöffnung wurde die Verständlichkeit der Piktogramme nach dem gleichen Verfahren wie bei der vorherigen Frage erhoben.

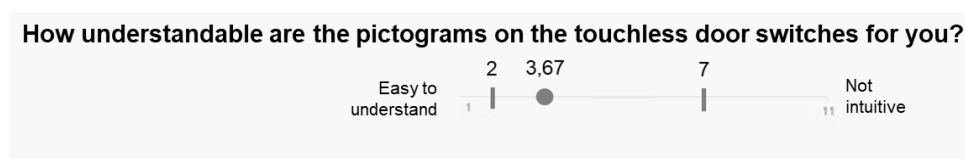


Abbildung 53: Eindeutigkeit der Piktogramme

Die Piktogramme der Tür wurden grundsätzlich als verständlich empfunden. In der Diskussion wurde allerdings erwähnt, dass die Piktogramme in dem Mock-Up nicht immer ganz eindeutig und an den Positionen abgebildet sind, die zu einer exakten Bedienung des Sensors notwendig sind. Das Ausbleiben der gewünschten Funktion kann zur Frustration des Bedieners führen. Bei dem Einsatz von Funktionen zur berührungslosen Bedienung ist es essentiell, dass diese die Bedienung vereinfachen und nicht zu einer erschwerten Bedienbarkeit führen.

Die Auswertung des Fragebogens und die Diskussion zeigen einen potenziellen Nutzen für die berührungslose Funktionalität der Lavatory. Dabei konnten die Wichtigkeit sowie Optimierungspotenziale einzelner Funktionen für die Kundenzufriedenheit differenziert ermittelt werden.

Eine weiterführende statistische Auswertung bedarf einem größeren interkulturellen Teilnehmerkreis, welche auch weitere demographische Teilnehmergruppen erfasst. Zusätzlich zu der Teilnehmerbefragung könnte auch eine visuelle Verhaltensstudie der Teilnehmer bei der Begehung des Mock-Up weitere Aufschlüsse zur Optimierung der Benutzerfreundlichkeit liefern.

### **3.2 Voraussichtlicher Nutzen**

Durch die erreichten Ziele konnten neue wissenschaftliche Impulse gegeben und die Kompetenz sowie das wissenschaftliche Renommee des DLR weiter ausgebaut werden. Die Arbeit des DLR an industrierelevanten und produktnahen wissenschaftlichen Themenstellungen unterstützt die nationale Luftfahrtindustrie im globalen Wettbewerb. Dem Industriepartner DAG und DAL eröffnen sich durch die Ergebnisse des Vorhabens neue Möglichkeiten, auf die Herausforderungen aktueller und zukünftiger Flugzeuggenerationen mit innovativen Technologien zu reagieren, seine Wettbewerbsposition im internationalen Markt zu stärken und die Beschäftigung von hoch qualifizierten Arbeitskräften in Deutschland zu sichern oder auszubauen.

In TP1 wurden Methoden zur Reduzierung der Schallabstrahlung von hochintegrierten Kabinensystemen am Beispiel einer ARU erarbeitet. Die Methoden sind grundsätzlich flexibel einsetzbar und übertragbar auf andere Problemstellungen. Beispielsweise ist eine Übertragung der Ergebnisse auf eine kompakte Kühleinheit für Kleinflugzeuge und Lufttaxis denkbar, die ebenfalls im Rahmen von EFFEKT untersucht wurde. In Bezug auf die ARU konnte das entwickelte ANVC-System die Schallabstrahlung im Stand-Alone-Betrieb signifikant reduzieren und dadurch eine Verbesserung hinsichtlich der geltenden Spezifikationen von Diehl Aviation erreichen. Obwohl für die in der Galley eingebaute ARU letztlich keine zufriedenstellende Lösung zur Reduzierung der Schallabstrahlung gefunden werden konnte, wurden durch die Versuche im Akustiklabor von DAL neue Erkenntnisse zum Transmissionsverhalten gewonnen, die für die zukünftige Verbesserung des vibroakustischen Verhaltens der Galley von Nutzen sind. Durch die enge Zusammenarbeit mit den Akustik-Experten von DAL fand ein Wissenstransfer zum gegenseitigen Nutzen statt. Das DLR konnte seine Vernetzung mit der nationalen Luftfahrtindustrie stärken und dadurch die Erfolgsaussichten für die zukünftige Akquisition von Drittmitteln erhöhen.



Zusammenfassend ergibt sich ein vielversprechender Nutzen aus den erlangten Erkenntnissen und der entwickelten Technologie im TP2. Nach Abschluss des Projekts können die gewonnenen Erkenntnisse in grund- und drittmittelfinanzierten Projekten weiterhin effektiv genutzt werden.

Die einzelnen Untersuchungsgegenstände aus diesem TP lassen sich als Bausteine eines Werkzeugkastens betrachten, welche anwendungsbezogen miteinander kombiniert werden können und somit eine flexible und anpassungsfähige Lösung liefern.

Insbesondere die Anwendung von Klebebändern zur nachträglichen Installation von elektrischen Leiterbahnen präsentiert sich als innovative Lösung, die nicht nur kosteneffektiv, sondern auch volumensparend ist. Diese Technologie eröffnet neue Möglichkeiten für die Implementierung elektrischer Verbindungen und Leitungen in bestehenden Strukturen und trägt somit zur Förderung von zukünftigen Projekten im Bereich der applizierten Elektronik bei.

In TP 3 wurden die Kompetenzen im Bereich der nutzerorientierten Produkt- und Technologieentwicklung erweitert. Sie trägt vor allem zur leistungsfähigen und effizienten Luftfahrt (Ziel 3) und zur passagierfreundlichen Luftfahrt (Ziel 2) bei. Die adressierten Fragestellungen sind in Teilen auf andere Verkehrsträger (Zug-/Autokabinen) übertragbar.

Es wurden Anwendungsfälle, Nutzerziele und Präferenzen von den Kabinennutzern erhoben. Nach Projektende können diese Erkenntnisse in grund- und drittmittelfinanzierten Projekten weiter genutzt und unabhängig von den in EFFEKT untersuchten Technologien in Softwaremodelle zur Bewertung von Kabinen integriert werden. Über die DLR-eigene Softwareintegrationsumgebung RCE wäre auch eine Kopplung der Kabinenbewertungsmodelle mit anderen Modulen aus dem DLR-Flugzeug- oder Kabinendesign möglich. Dies ermöglicht eine Vielzahl an Untersuchungen an der Schnittstelle von Flugzeugbetrieb, Kabinen- und Flugzeugentwurf in Zusammenarbeit mit den anderen DLR-Instituten und Industriepartnern

### **3.3 Fortschritte bei anderen Stellen**

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

### **3.4 Veröffentlichungen und Vorträge**

Aufgrund der Corona-Pandemie und der damit verbundenen Lockdowns und Reisebeschränkungen, konnten die Projektergebnisse nicht wie ursprünglich geplant auf nationalen und internationalen Konferenzen präsentiert werden. Aufgrund der Produktnähe von TP1 konnte eine geplante Publikation der Ergebnisse von TP1 noch nicht stattfinden. Im Rahmen von TP3 ist ein Konferenzbeitrag auf dem DLRK 2024 mit dem Titel „Ansatz für eine nutzerzentrierte Entwicklung von Kabinensystemen in der Luftfahrtindustrie am Beispiel der Lavatory“ geplant.

### 3.5 Erfindungsmeldungen

Es wurden keine Erfindungsmeldungen eingereicht.

### 3.6 Abschlussarbeiten

Schaupeter, E. (2021): Entwicklung von Anwendungsfällen, Nutzungszielen und Anforderungen für Flugzeugkabinensysteme mit Methoden des nutzerzentrierten Designs

## 4 Literaturverzeichnis

Bosbach, Johannes (2013): Auslegung und Verifikation neuer Verfahren der Kabinenbelüftung für Verkehrsflugzeuge. Förderkennzeichen 20K0806D (Report-Nr. 01067253).

Bosbach, Johannes; Misol, Malte (2014): Technologien für ein innovatives Luftsystem und ein aktives Lining im Rahmen einer Energie-autarken, intelligenten Kabine. Förderkennzeichen 20K1101E (Report-Nr. 01104945).

Burmeister, Michael (2019): Design Thinking - Die neue alte Kreativität. In: *UID*. Online verfügbar unter <https://www.uid.com/de/design-thinking-suchen-und-finden-von-innovationen>.

Camacho, Maria (2016): David Kelley: From Design to Design Thinking at Stanford and IDEO. In: *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation* 2 (1), S. 88–101. DOI: 10.1016/j.sheji.2016.01.009.

Clark, Robert L. (1998): Adaptive structures. Dynamics and control. New York, Weinheim: Wiley (A Wiley Interscience publication). Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/description/wiley034/97020308.html>.

Dehne, Tobias; Bosbach, Johannes; Misol, Malte (2018): Technologien zur Erhöhung des thermischen und akustischen Passagierkomforts bei Einsatz von aktiven Lining-Modulen. Förderkennzeichen 20K1301D. Online verfügbar unter <https://elib.dlr.de/122027/>.

DIN EN ISO 9614-2:1996-12. Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen - Teil 2: Messung mit kontinuierlicher Abtastung.

Hall, A.; Mayer, T.; Wuggetzer, I.; Childs, P.R.N. (2013): Future aircraft cabins and design thinking: optimisation vs. win-win scenarios. In: *Propulsion and Power Research* 2 (2), S. 85–95. DOI: 10.1016/j.jprr.2013.04.001.

Kefalidou, Genovefa (2016): Passengers' Requirements for developing a Passenger-Centred Infrastructure to Enhance Travel Experiences at Airports.

leiton. Online verfügbar unter <https://www.leiton.de/sondertechnologie-schlangen-flex.html>.



Lütjens, Klaus (2017): Projekt EFFKAB – DLR Effiziente Kabinenarchitekturen. Schlussbericht EFFKAB.

Pototzky, Alexander; Stefaniak, Daniel; Hühne, Christian (14.11.2017): Potentials of load carrying, structural integrated conductor tracks. Stuttgart. 47TH INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION, VOL 47, BOOKS 1 AND 2. SAMPE EUROPE. SAMPE Europe Conference 2017.

Radde, Marius (2017): KI-basierte Optimierung von Flugplänen.

Sinapius, Michael (2018): Adaptronik. Prinzipie - Funktionswerkstoffe - Funktionselemente - Zielfelder mit Forschungsbeispielen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

tradeindia. Online verfügbar unter <https://www.tradeindia.com/products/esd-anti-static-flooring-copper-tape-acrylic-adhesive-and-2-inch-size-8009508.html>.

Trunk, Lothar (2019): ICABIN: RESEARCH FOR A NETWORKED INTELLIGENT AIRCRAFT CABIN OF TOMORROW. In: *International Workshop on Aircraft System Technologies (AST)*.