

Abschlussbericht für das LuFo VI-1 Vorhaben

MULTIKABIN

Förderkennzeichen: 20Q1908D

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2020 – 31.08.2023 +6 Monate (29.02.2024)

Zuwendungsempfänger: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Berliner Tor 5
20099 Hamburg

Teilvorhaben: **EIKABIN**
Entwurfs- und Integrationsaspekte eines multifunktionalen
Kabinenwandaufbaus für Flugzeugkabinen

Autoren	Datum	Unterschrift
M.Sc. Daniele Usai (wiss. Mitarbeiter)	29.07.2024	
M.Sc. Christian Wischmann (wiss. Mitarbeiter)	29.07.2024	
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gleine (Projektleitung)	29.07.2024	

Weiterer Projektmitarbeiter:

Dr. Felix Langfeldt

01.01.2021 – 31.08.2021

Berichtsdatum: 29.07.2024

Inhaltsverzeichnis

I. Abbildungsverzeichnis	4
II. Tabellenverzeichnis	16
III. Verzeichnis der verwendeten physikalischen Größen	18
IV. Danksagung	20
1. Kurzbericht	21
1.1 Aufgabenstellung.....	21
1.2 Stand der Wissenschaft und Technik	22
1.3 Voraussetzungen	23
1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens	28
1.5 Beschreibung der Arbeitspakete	29
1.6 Aufgaben- und Zeitplan	37
1.7 Zusammenarbeit mit Projektpartnern	38
1.8 Notwendigkeit der Zuwendung	38
1.9 Zusammenfassung Ergebnisse	38
2. Technische Ergebnisse	40
2.1 HAP 1: Definition und Auslegung einer neuartigen Kabinenwand	40
AP 1.1: Definition neuer Systemarchitekturen.....	40
AP 1.2: Definition Funktionsmuster / Prototypen.....	53
AP 1.3: Auslegung von Funktionsmuster und Prototyp und Realisierung zugehöriger Komponenten	105
AP 1.4: Definition ergänzender Halbzeug-Eigenschaften	117
AP 1.5: Definition von Komponentenoptimierungen.....	120
2.2 HAP 4: Aerogelmaterialien und Komponentenherstellung.....	122
AP 4.2: Charakterisierung der Halbzeuge und Funktionsmuster	122
2.3 HAP 5: Integration der Einzelkomponenten in eine Kabinenwand, Optimierung, Validation .	143
AP 5.1: Erweiterte Integrations-und Testtechnologien	143
AP 5.2: Integration Funktionsmuster bzw. Prototypen in Demonstratoren.....	167
AP 5.3: Durchführung von Messungen	174
2.4 Ausblick und Potentiale	189
3. Veröffentlichungen	190
4. Literaturverzeichnis	191

Anhang A.	Ergänzende Angaben zu angewandte Testverfahren aus AP5.1	194
Anhang B.	Anhang Materialdatenblätter	198

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Erdgeschoss des Akustiklabors der HAW Hamburg. Aus einem zentralen Hallraum können simultan Schalltransmissionsmessungen in verschiedene Freifeldräume hinein mit unterschiedlichen, in die Transmissionsfenster installierten Testaufbauten durchgeführt werden. Alternativ können bei geschlossenen Transmissionsfenstern unabhängige Versuchsaufbauten in die einzelnen Messräume installiert und lokale Messungen durchgeführt werden.	24
Abbildung 1.2: Klima-Akustikprüfkammer: Schematische Ansicht, sowie Foto der Prüfkammer mit Rumpfabschnitt einer A320 Sektion mit Kabinenausstattung im KKS-Labor der HAW Hamburg	27
Abbildung 1.3: Organisations- und Arbeitsstruktur des Verbundvorhabens MULTIKABIN	28
Abbildung 1.4: Vorschlag für ein neuartiges Kabinenwandaufbauprinzip	29
Abbildung 1.5: Skizze für eine mögliche Modifikation des Luftverteilungssystems der Klimaanlage, sowie das Einbauprinzip der Kabinenwandmodule in die Kabine.....	30
Abbildung 2.1: A320 Kabine (Montagezustand), Systemkomponenten im Kabinenwandbereich: zu erkennen sind Luftverteilung Klimaanlage (Steigrohre, Luftauslässe), Verkabelung und Elektronikboxen des CIDS-Systems (DEUA / DEUB). (Quelle Airbus).....	40
Abbildung 2.2: A380, Skizze für Systemkomponenten im Seitenwandbereich: Luftverteilung Klimaanlage (braun), Wasser/Abwasser (blau), Bleuchtungssystem (grün), (Quelle Airbus)	41
Abbildung 2.3: Skizze einer Klimaanlage für Passagierflugzeuge mit Darstellung luftführender Hauptkomponenten. Nicht dargestellt sind elektronische Controller.	44
Abbildung 2.4: Zur Systemanpassung der Klimaanlage: Modifizierte Architektur der Luftverteilung im Bereich der Lufteinspeisung in Luftführungskanäle zur Klimatisierung der Kabine	45
Abbildung 2.5: Das CIDS im prinzipiellen Aufbau mit wichtigsten Komponenten und Funktionen (Quelle Airbus)	48
Abbildung 2.6: A320 Kabine mit und ohne Verkleidungselemente. Zu erkennen sind die unteren Luftauslässe und die zugehörigen Steigrohre des Luftverteilungssystems der Klimaanlage sowie bereits installierte elektrische Leitungen mit DEU A –Boxen des CIDS. (Quelle Airbus)	48
Abbildung 2.7: Prinzip für eine Hybrid-Integration elektrischer Systemkomponenten auf einem Seitenwandpaneel, ggf. Hatrack. Gedruckte Leiterbahnen verbinden Systemkomponenten mit der Systemumgebung.	50
Abbildung 2.8: Prinzipbeispiel für eine Hybrid-Integration von Excitern in ein Seitenwandpaneel in Verbindung mit dem Kabinensystem CIDS.....	50
Abbildung 2.9: Prinzipbeispiel für eine Hybrid-Integration eines Livebild-Fenstermonitors in ein Seitenwandpaneel.	51
Abbildung 2.10: Schichtenweiser Aufbau experimentell untersuchter Kabinenwandkonfigurationen des Funktionsmusters, das ohne eine Flugzeugfensteröffnung vereinfacht aufgebaut ist.....	54
Abbildung 2.11: Schematische Darstellungen der einzelnen Komponenten im Funktionsmuster (links) sowie eines definierten Referenzwandaufbaus (rechts).....	54
Abbildung 2.12: Darstellungen des nachgebauten Halterungssystems zur Verbindung des Seitenwandpaneels mit der Rumpfstruktur. a) Komponenten aus HAW eigener Fertigung, b) Beispiel eines originalen A320-Halterungssystems.....	54

Abbildung 2.13: Schichtenweiser Aufbau experimentell untersuchter Kabinenwandkonfigurationen mit Flugzeugfensteröffnung des als Prototyp bezeichneten Kabinenseitenwandausschnitts	55
Abbildung 2.14: Schematische Darstellungen der einzelnen Komponenten im Kabinenwand-Prototyp: (a) Aufbau des Prototyps, (b) Luftkanal mit Schallminderungselementen, (c) Strömungsführung der Frischluft im Luftkanal	56
Abbildung 2.15: Versuchsaufbau eines Kabinenwand-Funktionsmusters im Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer mit vorgelagertem Kabinensimulationskasten und Klimaaggregaten	57
Abbildung 2.16: Querschnitt des Doppelwandaufbaus mit Lage und Dicke innerer Bereiche	58
Abbildung 2.17: a) T- und RH-Profil für Versuch 1; b) T- und RH-Profil für Versuch 2	60
Abbildung 2.18: Schematische Darstellungen der in einer Vorstudie untersuchten Schalldämmeigenschaften generischer Doppelwandaufbauten mit integriertem Luftkanal	61
Abbildung 2.19: Berechnete Ergebnisse einer Studie zur Abschätzung von Schalldämmeigenschaften eines generischen Doppelwandaufbaus mit variierender Positionierung des Luftkanals im Doppelwand Zwischenraum. In die Berechnung integrierte Modelle akustischer Metamaterialien und Helmholtz-Resonatoren werden zur Identifizierung deren Wirkung hervorgehoben (Annahme senkrechter Schalleinfall)	61
Abbildung 2.20: Darstellung der aus Schalltransmissionsmessungen ermittelten Einfügedämmmaße für Funktionsmuster 1 und Funktionsmuster 2 bezogen auf einen generischen, flugzeugmasseäquivalenten Referenzwandaufbau mit 10 cm Glaswollisolierung (basierend auf Messung bei diffusem Schalleinfall)	62
Abbildung 2.21: Verwendete Größen als Randbedingungen für hygrothermische Untersuchungen an Funktionsmuster- und Prototyp-Wandaufbauten sowie an deren Referenzwänden	63
Abbildung 2.22: Ergebnisse der analytischen Auswertung der Temperaturprofile und Wärmeströme für das Funktionsmuster und die Referenzwand (RS = Rumpfstruktur; GW = Glaswolle; LK = Luftkanal; SW = Seitenwand)	65
Abbildung 2.23: Darstellung des in COMSOL Multiphysics erstellten 2D-Modells des Funktionsmusters, das für hygrothermische Simulationen verwendet wird	66
Abbildung 2.24: Numerische Ergebnisse der Parameterstudie, bei der die Variation des Parameters S_d zu Unterschieden in der Feuchtemenge im Außenbereich beiträgt, für zwei unterschiedliche Feuchtwerte im Luftkanal: a) $rFKab = 45\%$ und b) $rFKab = 15\%$	67
Abbildung 2.25: Numerische Ergebnisse des Vergleichs zwischen neuartigem Funktionsmuster (Index: Fm) und Referenzwand (Index: Ref). a) Temperatur Profile b) relative Luftfeuchtigkeit Profile; c) Sättigungsdruck- und Dampfpartialdruck Profile.	68
Abbildung 2.26: Variable Profile von Temperatur a) und relativer Luftfeuchtigkeit b), die als Randbedingungen im numerischen Modell des Prototyps angewendet wurden.	69
Abbildung 2.27: a) Simulationsmodell in COMSOL zur Bewertung der Durchlässigkeit verschiedener Folien b) Perforationen auf der Terul 18-Hülle der Glaswollmatten (18)]	70
Abbildung 2.28: Feuchtigkeitsstrom im Laufe der Zeit, im Vergleich zwischen einer perforierten Terul 18-Folie und einer Reihe von nicht perforierten Folien mit unterschiedlichen s_d -Werten	71
Abbildung 2.29: Feuchtigkeitsstrom im Laufe der Zeit: Vergleich zwischen der neuen Folie für den Prototyp (50 μm und 75 μm PET) und der im Funktionsmuster verwendeten Folie (Terul 18 und S1300)	72

Abbildung 2.30: Numerische Ergebnisse des Vergleichs zwischen Prototyp und Referenzwand. a) Temperatur Profile b) relative Luftfeuchtigkeit Profile ; c) Sättigungsdruck- und Dampfpartialdruck Profile.....	73
Abbildung 2.31: Vergleich der pd Profile während der verschiedenen Bodenphasen für Prototyp a) und Referenzwand b).....	74
<i>Abbildung 2.32: Zeitliche Veränderung der Feuchtigkeit im Außenbereich für den Prototyp a) und die Referenzwand b)</i>	74
<i>Abbildung 2.33: Numerische Ergebnisse der Temperaturverläufe innerhalb der Kabinenwand bei Prototyp mit Glaswolle (braune Kurve) und dem Prototyp mit Aerogel (blaue Kurve).</i>	75
Abbildung 2.34: Darstellung einer Einheitszelle eines akustischen Metamaterials	76
Abbildung 2.35: Darstellung des Ausschnitts einer in 2D modellierten Einheitszelle in Comsol Multiphysics (links) sowie dessen Diskretisierung (rechts).....	77
Abbildung 2.36: Analytisch bzw. numerisch abgeschätzte Schalldämmmaßeigenschaften von akustischem Metamaterial (PAM1) dargestellt gegenüber Schalldämmmaßeigenschaften einer massenäquivalenten Platte	78
Abbildung 2.37: Analytisch bzw. numerisch abgeschätzte Schalldämmmaßeigenschaften von akustischem Metamaterial (PAM2) dargestellt gegenüber Schalldämmmaßeigenschaften einer massenäquivalenten Platte	78
Abbildung 2.38: Darstellung der geometrischen Nomenklatur eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken (a,b) sowie eines gefertigten Helmholtz-Resonators mit Biegebalken (c).....	79
Abbildung 2.39: Darstellung des in Comsol Multiphysics aufgebauten 3D-Modells von eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken (a) sowie dessen Diskretisierung (b)	80
Abbildung 2.40: Darstellungen eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken, sowie in einer Studie untersuchte Modifikationen zur Abschätzung deren Einflusses auf die Schallabsorptionscharakteristik des Resonators	81
<i>Abbildung 2.41: Numerische Ergebnisse der Studie über Parametersensitivitäten unterschiedlicher Modifikationen auf die Absorptionscharakteristik eines Helmholtz-Biegebalken-Resonators</i>	82
Abbildung 2.42: Numerische Ergebnisse der Bewegungsamplitude der Resonatorwände des Helmholtz-Biegebalken-Resonators bei Schallanregung unter Berücksichtigung von Materialeigenschaften. a) ohne Versteifungssteg, b) mit Versteifungssteg	82
Abbildung 2.43: Darstellung der positionierten akustischen Metamaterialien im Kabinenwand-Zwischenraum in Relation zu deren kritischen Wandabständen	84
Abbildung 2.44: Darstellung des in Comsol Multiphysics aufgebauten numerischen Modells für das Funktionsmuster mit Bezeichnung integrierter Funktionsbausteine	85
Abbildung 2.45: Numerische Simulationsergebnisse zur Abschätzung der zu erwartenden Schalldämmmaßeigenschaften des Funktionsmuster im Vergleich zu einem Referenzwandaufbau (Darstellung in 1/6-Oktavspektren).....	86
Abbildung 2.46: Maßstab zur Darstellung eines 12 cm tiefen Zwischenraums einer Kabinenwand und Kennzeichnung simulierter Luftkanalpositionen in Funktionsmuster sowie deren Abstände zu kritischen Wandabständen ausgelegt akustischer Metamaterialien.....	86

Abbildung 2.47: Mit numerischem Modell unterschiedlich parametrierter Funktionsmuster berechnete Schalldämmmaßprofile für zwei unterschiedlich nahe zur Seitenwand positionierten Luftkanäle (Darstellung in 1/12-Oktavspektren).....	87
Abbildung 2.48: Darstellung von MPA-Proben für Impedanzrohrmessungen. In a) Darstellung der Geschwindigkeitsamplitudenverteilung über der MPA-Oberfläche, sowie MPA-Probe in b) ohne und c) mit Versteifungsstegen.	88
Abbildung 2.49: Darstellung der MPA- Integrationsmöglichkeiten in den neuartigen Wandaufbau mit Luftkanal	88
Abbildung 2.50: Darstellung der Potentiale von MPAs mit berechneten Einfügedämmmaßen, in 1/12-Oktavspektren, im neuartigen Kabinenwandkonzept am Fallbeispiel leichtgewichtiger MPA-Flächenmasse $m''=0,25\text{kg/m}^2$ (grün) gegenüber einem idealisiertem Fallbeispiel MPA unbeweglich (blau). Parameter MPA: Lochdurchmesser 0,1 mm, Porosität 1 %, Dicke 0,5 mm an Positionen a) Pos. 5 und b) Pos. 2 (vgl. Abb. 5). Die Nulllinie wird definiert durch den beschriebenen neuartigen Wandaufbau ohne MPA.	89
Abbildung 2.51: Analytische Abschätzungen mit gemäß (27) ausgelegter Impedanzrohrproben von mikroperforierten Absorbern aus den Materialien Polyamid bzw. Aluminium.....	90
Abbildung 2.52: Definition einer Einheitszelle eines akustischen Metamaterials mit streifenförmigen Massen sowie Ergebnisse einer Studie zur Verringerung der Flächenmasse zuvor ausgelegte akustischer Metamaterialien.	91
Abbildung 2.53: Darstellung einer Einheitszelle eines Metamaterials und Ergebnisse der Reduzierung der Flächenmasse einer Einheitszelle durch Veränderung der Einheitszellengröße (oben), sowie Auswirkungen auf die jeweiligen analytisch berechneten Schalldämmmaßeigenschaften.....	91
Abbildung 2.54: Schalldämmmaß eines analytisch neu ausgelegten akustischen Metamaterials für eine Anti-Resonanzfrequenz bei ca. 400 Hz im Vergleich mit entsprechenden numerischen Ergebnissen, sowie Gegenüberstellung des Schalldämmmaßes einer masseäquivalenten homogenen Platte.....	92
Abbildung 2.55: Analytisch berechnete Schalldämmmaßeigenschaften eines neu ausgelegten akustischen Metamaterials mit kleinerer Einheitszelle im Vergleich mit einer massenäquivalenten homogenen Platte sowie numerisch ermittelten Werten – Anti-Resonanzfrequenz ca. 670 Hz.....	93
Abbildung 2.56: Foto des im Prototyp verwendeten Seitenwandpaneels und Darstellung des Einflusses der speziellen Form des Seitenwandpaneels auf die geometrische Auslegung des Luftkanals im Fensterbereich.	94
Abbildung 2.57: Skizze zur Untersuchung kritischer Wandabstände akustischer Metamaterialien des in einer Kabinenwand montierten Luftkanals im Fensterbereich sowie oberhalb- bzw. unterhalb des Fensterbereichs	95
Abbildung 2.58: (a) Schematische Darstellung des Luftkanals im Fensterbereich, (b) Integration des Luftkanals im Fensterbereich der Rumpfstruktur dargestellt mit CAD-Modell	95
Abbildung 2.59: Foto von mittels additiver Fertigung hergestellter Gehäuse der Helmholtz-Resonatoren für den Luftkanal im Fensterbereich. Öffnungen für Helmholtz-Resonator Wirkung nachträglich gefertigt.	96
Abbildung 2.60: Darstellung des in Comsol Multiphysics vereinfacht aufgebauten Modells für numerische Schalldämmmaß-Berechnungen des Kabinenwand-Prototyps mit einer Übersicht der in der Modellierung verwendeten Teilmodelle für einzelne Wandkomponenten	97
Abbildung 2.61: Numerisch abgeschätzte Schalldämmmaßeergebnisse des Kabinenwand-Prototyps gegenüber einem Referenzwandaufbau bzw. einem massenäquivalenten Referenzwandaufbau	98

Abbildung 2.62: Konzeptskizze zur Integration von Schallabsorbern im Flugzeugfenster zur Dämpfung des bisher ungedämpften Schalltransmissionspfads	99
Abbildung 2.63: Darstellung zur Bilanzierung angenommener Schallleistungsströme durch ein Flugzeugfenster	99
Abbildung 2.64: Beispielauslegung für ein Flugzeugfenster als Helmholtz-Resonator (oben) sowie einer zusätzlich eingefügten mit Helmholtz-Resonatoren bestückten Ringkomponente. Die Beispielauslegung berücksichtigt die geometrischen Abmessungen eines A320 Flugzeugfensters	100
Abbildung 2.65: Darstellung von messtechnisch ermittelten Schalldämmmaßkurven einer A320 Flugzeugkabinenwand (rot) gegenüber Schalldämmmaßabschätzungen durch analytisch eingebundene Absorptionseffekte (blau) in a) für das Fallbeispiel in vorhandene Fenstergeometrie vorgeschlagene und integrierbare Absorberelemente und in b) geometrisch stark vergrößerte Absorberelemente.....	101
Abbildung 2.66: Gegenüberstellung ermittelter Massen von Kabinenwandkomponenten, die aus dem Referenzwandaufbau (linkes Bild) ausgebaut wurden, damit ein aus mehreren Teilkomponenten bestehender Luftkanal zur Realisierung des Kabinenwand-Prototyps (rechtes Bild) in die Seitenwand einer A320-Kabine eingebaut werden konnte.	104
Abbildung 2.67: Vergleich der aus einer Standardseitenwand ausgebauten Komponenten mit denen, die zum Einbau des zusammengesetzten Luftkanals gehören (vgl. Abbildung 2.66).....	104
Abbildung 2.68: Ausschnitt einer originalen A320-Rumpfstruktur, welche im Funktionsmuster eingebaut wurde.....	105
Abbildung 2.69: Für Funktionsmustertests verwendetes Seitenwandpaneel.....	105
Abbildung 2.70: Im Funktionsmuster eingesetzte Glaswollisierpakete.....	106
Abbildung 2.71: Gefertigte Komponente eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken wie im Funktionsmuster bzw. Prototyp eingebaut.....	107
Abbildung 2.72: Fertigung von Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken Arrays für Funktionsmuster a) Darstellung Teilkomponenten nach Fräsvorgang und b) Endprodukt	108
Abbildung 2.73: a) Abstandsleiste für ein positionsgetreues Aufbringen von Streifenmassen auf eine Trägerfolie bei der Fertigung eines akustischen Metamaterials, b) Beispiel eines gefertigten akustischen Metamaterials	108
Abbildung 2.74: Parameter für die Fertigung des ersten industriell gefertigten akustischen Metamaterials mit streifenförmigen Massen.....	109
Abbildung 2.75: Erstes industriell gefertigtes akustisches Metamaterial mit streifenförmigen Massen (31)	109
Abbildung 2.76: a) Foto vom Luftkanal für das akustisch untersuchte Funktionsmuster, b) Ansicht der Helmholtz-Resonatoren innerhalb des Luftkanals (zur Darstellung wurde das obere akustische Metamaterial entfernt), c) Foto vom Luftkanal für das hygrothermisch untersuchte Funktionsmuster	110
Abbildung 2.77: Für Impedanzrohrmessungen gefertigte mikroperforierte Absorberproben a) aus Polyamid b) aus Aluminium.....	110
Abbildung 2.78: Darstellung des im Funktionsmuster eingesetzten Zu- und Abluftadapters zur Speisung des Luftkanals mit Frischluft a) CAD-Abbildung b) numerische Luftströmungsergebnisse innerhalb der Komponente (Ergebnisse vom Projektpartner Novicos) c) gefertigte Komponente	111
Abbildung 2.79: Exemplarische Ansicht des Aufbaus eines Funktionsmusters.....	111

Abbildung 2.80: Darstellung des schichtenweisen Aufbaus des Funktionsmusters im Akustikprüfstand a) Rumpfstruktur, b) integrierte Glaswollisolierung, c) Luftkanal und d) Seitenwandpaneel	112
Abbildung 2.81: Darstellung des schichtenweisen Aufbaus des Funktionsmusters in der Klima-Akustikkammer a) Rumpfstruktur, b) integrierte Glaswollisolierung, c) Luftkanal und d) Seitenwandpaneel	112
Abbildung 2.82: Für den Kabinenwand-Prototyp verwendete Rumpfstruktur: a), b) A320-Rumpfstrukturausschnitt, eingebaut in einem Transmissionsfenster des Akustiklabors, c) Teilbereich des A320 Rumpfabchnitts, der in der Klima-Akustikkammer aufgestellt ist, d) Ansicht des in der Klima-Akustikkammer aufgestellten A320-Rumpfabchnitts.....	112
Abbildung 2.83: Für den Prototyp verwendetes Seitenwandpanel mit am Seitenwandpanel angebrachter Glaswollisolierung.....	113
Abbildung 2.84: In Terul18 Folie eingewickelte Glaswollisolierungsmaterialien für den Messaufbau des Prototyps und der Referenzwand.....	113
Abbildung 2.85: Herstellungsprozess der akustischen Metamaterialien für den Luftkanal des Kabinenwand-Prototyps a) Vorrichtung mit vormontierten Streifenmassen in abstandsdefinierenden Nutbereichen, b) Benetzung der Streifenmassen mit Epoxidharz Klebstoff sowie c) Beispiel eines für den Luftkanal gefertigten akustischen Metamaterials.....	114
Abbildung 2.86: a) Teilkomponenten gefertigter Helmholtz-Resonatoren mit mehreren Löchern, b) zu einer Baugruppe des Luftkanals zusammengesetzte Helmholtz-Resonatoren für den Fensterbereich.....	114
Abbildung 2.87: a) Fertigung des Luftkanals für einen Einbau unterhalb der Fenster des Kabinenwand-Prototyps, b) Momentaufnahme beim Zusammenfügen des Luftkanals unterhalb und oberhalb der Fenster als auch im Fensterbereich, c) Ansicht der Luftkanalbaugruppe für den Prototyp um das Flugzeugfenster herum	115
Abbildung 2.88: a) Eingeschränkter Bauraum zwischen Kabinenboden und Rumpfstruktur zum Einbau der Frischluftzuführung aus dem Frachtraum in die Luftkanäle der Kabinenseitenwand, b) CAD Abbildung des Bauraum angepassten Zu- und Abluftadapters, c) Beispiel eines gefertigten Zu- und Abluftadapters.....	115
Abbildung 2.89: Kabinenwand-Prototyp, eingebaut in der A320-Kabine der Klima-Akustikkammer, dargestellt in einzelnen Wand-Ebenen: a) Rumpfstruktur, b) integrierte Glaswollisolierung, c) Luftkanal und d) Seitenwandpaneel.....	116
Abbildung 2.90: Kabinenwand-Prototyp, eingebaut in ein Transmissionsfenster des Akustiklabors, dargestellt in einzelnen Wand-Ebenen: a) Rumpfstruktur, b) integrierte Glaswollisolierung, c) Luftkanal und d) Seitenwandpaneel.....	116
Abbildung 2.91 Experimentell ermitteltes Schalldämmmaß des für das Funktionsmuster verwendeten Ausschnitts einer originalen Rumpfstruktur ohne Flugzeugfenster eines A320 Flugzeugs (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)	122
Abbildung 2.92: Versuchsaufbau zur Modalanalyse an der Außenseite eines Rumpfstruktur-Ausschnitts ohne Fenster, welche im Funktionsmuster verwendet wurde	123
Abbildung 2.93: Gemessene Moden an der Rumpfstruktur-Außenseite. (Die Rumpfstruktur wurde für das Funktionsmuster verwendet).	123
Abbildung 2.94: Versuchsaufbau zur Modalanalyse an der Innenseite eines Rumpfstruktur-Ausschnitts ohne Fenster, welche im Funktionsmuster eingebaut worden ist.....	124
Abbildung 2.95: Gemessene Moden an der Rumpfstruktur-Innenseite. (Die Rumpfstruktur wurde für das Funktionsmuster verwendet).	125

Abbildung 2.96 a) Infrarotbild einer A320-Rumpfstruktur mit Eis auf der Oberfläche b) Foto einer A320-Rumpfstruktur mit Eis auf der Oberfläche	127
Abbildung 2.97 a) Infrarotbild einer A320-Rumpfstruktur nach der Eisentfernung b) Foto einer A320-Rumpfstruktur nach der Eisentfernung	127
Abbildung 2.98 a) Infrarotbild einer A320-Rumpfstruktur nach dem Einbau einer Glaswolledecke b) Foto einer A320-Rumpfstruktur nach dem Einbau einer Glaswolledecke	128
Abbildung 2.99: Messergebnisse der frequenzabhängigen Schalldämmmaße des für den Prototyp verwendeten Rumpfstruktur-Ausschnitts (Breite über 3 Spante) aus einem A320-Rumpf (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)	129
Abbildung 2.100: Vergleich numerisch abgeschätzter Schalldämmmaßeigenschaften mit experimentell bestimmten Daten des akustischen Metamaterials mit Streifenmassen für das Funktionsmuster – Anti-Resonanzfrequenz ca. 210 Hz (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)	130
Abbildung 2.101: Vergleich numerisch abgeschätzter Schalldämmmaßeigenschaften mit experimentell bestimmten Daten des akustischen Metamaterials mit Streifenmassen für das Funktionsmuster – Anti-Resonanzfrequenz ca. 400 Hz (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)	130
Abbildung 2.102: Vergleich numerisch abgeschätzter Schalldämmmaßeigenschaften mit experimentell bestimmten Daten des akustischen Metamaterials mit Streifenmassen für den Luftkanal des Kabinenwand-Prototyps – Anti-Resonanzfrequenz ca. 670 Hz (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)	131
Abbildung 2.103: Vergleich numerisch abgeschätzter Schalldämmmaßeigenschaften ($E_f = 2300 \text{ MPa}$) mit experimentell bestimmten Daten eines akustischen Metamaterials mit Streifenmassen für den Luftkanal des Kabinenwand- Prototyps – theoretische Anti-Resonanzfrequenz ca. 400 Hz.	131
Abbildung 2.104: Vergleich numerisch abgeschätzter Schalldämmmaßeigenschaften mit experimentell bestimmten Daten des akustischen Metamaterials mit Streifenmassen für den Luftkanal des Kabinenwand-Prototyps – mit ausgelegter Anti-Resonanzfrequenz ca. 400 Hz (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)	132
Abbildung 2.105: Experimentell ermittelte Schalldämmmaßeergebnisse des von dem Unternehmen Biolink GmbH (31) industriell gefertigten akustischen Metamaterials mit streifenförmigen Massen (Darstellung Messdaten in 1/12-Oktavspektren)	132
Abbildung 2.106: Gegenüberstellung numerisch abgeschätzter sowie experimentell gemessener frequenzabhängiger Absorptionskoeffizienten eines einzelnen Helmholtz-Resonators mit Biegebalken wie im Funktionsmuster bzw. Prototyp eingebaut	133
Abbildung 2.107: a)-d) Mit einem Impedanzrohr gemessene Absorptionskoeffizienten hergestellter Einzelresonatoren der Helmholtz-Resonator-Arrays mit Biegebalken für die oberen Luftkanäle; e) Foto von Helmholtz-Resonator Arrays mit Biegebalken	134
Abbildung 2.108: a)-b): Berechnung der ersten beiden Eigenfrequenzen des Biegebalkens mit einem FEM 3D-Modell; c) Isometrische Ansicht Geometrie aus FEM 3D-Modell	134
Abbildung 2.109: Ausschnitt aus Abbildung 2.107 und Gegenüberstellung weiterer möglicher Resonanzeffekte im Absorptionsspektrum von den gefertigten Helmholtz-Resonator Arrays	134
Abbildung 2.110: a)-d) Mit einem Impedanzrohr gemessene Absorptionskoeffizienten hergestellter Helmholtz-Resonator-Array- Komponenten mit Biegebalken zum Aufbau der Luftkanäle unterhalb des Fensterbereichs; e) CAD-Abbild eines Helmholtz-Resonator Arrays mit Biegebalken	135

Abbildung 2.111: a)-d) Mit einem Impedanzrohr gemessene Absorptionskoeffizienten hergestellter einzelner Helmholtz-Resonator Komponenten mit Löchern zum Aufbau der Luftkanäle im Fensterbereich; e) CAD-Abbild von Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich	136
Abbildung 2.112: Gemessene Absorptionskoeffizienten eines in AP1.2 ausgelegten mikroperforierten Absorbers aus Kunststoff (Impedanzrohrmessung).....	137
Abbildung 2.113: Nahaufnahme einer Mündung einer mit Lasersintern gefertigten mikroperforierten Absorberprobe aus Kunststoff.....	137
Abbildung 2.114: Gemessene Absorptionskoeffizienten eines in AP1.2 ausgelegten mikroperforierten Absorbers aus Aluminium (Impedanzrohrmessung).	137
Abbildung 2.115: Experimentelle Ergebnisse zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von drei verschiedenen Folienmustern zur Verwendung im Kabinenwand-Prototyp.....	138
Abbildung 2.116: Experimentell nach DIN EN ISO 10534 ermittelte Absorptionskennlinien des im Funktionsmuster bzw. Prototyp eingebauten Glaswollisolierungsmaterials.....	138
Abbildung 2.117: Experimentell nach DIN EN ISO 10534 ermittelte Schalldämmmaßkennlinien des im Funktionsmuster bzw. Prototyp eingebauten Glaswollisolierungsmaterials.....	139
Abbildung 2.118: Versuchsanordnungen im Impedanzrohr für die akustische Charakterisierung von Aerogelproben in mehrlagigen Aufbauten (ausgearbeitet vom Projektpartner DLR).....	139
Abbildung 2.119: Nach DIN EN ISO 10534 experimentell ermittelte Absorptionskennlinien von Glaswolle bzw. Aerogelproben KS-121 bzw. KS-123.....	140
Abbildung 2.120: Nach DIN EN ISO 10534 experimentell ermittelte Schalldämmmaßkennlinien von Glaswolle bzw. Aerogelprobe KS-121.....	140
Abbildung 2.121: Nach DIN EN ISO 10534 experimentell ermittelte Schalldämmmaßkennlinien von Glaswolle bzw. Aerogelproben KS-123.....	140
Abbildung 2.122: Gemessene Strömungswiderstände von Aerogelproben KS-121 bzw. KS-123	141
Abbildung 2.123: Ergebnisse aus Impedanzrohrmessungen von a) Aerogelprobe 1 von mehreren Messdurchgängen, b) Aerogelproben 1 bis 3 jeweils einzeln gemessen, sowie als Probe mit drei Lagen 1+2+3 gemessen und c) Fotos der Impedanzrohrproben aus Aerogelmaterial.....	141
Abbildung 2.124: Gemessene Strömungswiderstände von Aerogelproben für den Prototyp mit der Bezeichnung 2123FHE-001-022.....	142
Abbildung 2.125: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung der Temperaturverteilung im Inneren der Klimakammer.....	144
Abbildung 2.126: Zeitlicher Temperaturverlauf für die drei Sensoren während des Abkühlvorgangs in der Klima-Akustikkammer und der Messphase (blauer Kasten und vergrößerte Darstellung). Der Temperaturunterschied zwischen den 3 Temperatursensoren beträgt weniger als 1° C.....	144
Abbildung 2.127: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften des Klima-Akustikkammerraums (Hallraum) mit A320-Rumpfabschnitt	145
Abbildung 2.128: Fotos von unterschiedlich aufgestellten Kugellautsprecher in der Klima-Akustikkammer mit A320-Rumpfabschnitt.....	145
Abbildung 2.129: Gemessene Schallpegel an unterschiedlichen Positionen M1-M6 in der Klima-Akustikkammer mit A320-Rumpfabschnitt.....	146

Abbildung 2.130: Messaufbau 1 zur Charakterisierung von Schallnebenwegen im Prüffenster für den Prototyp	146
Abbildung 2.131: Messergebnisse erreichter Schalldämmung von Schallnebenwegen an den Rändern des im Transmissionsfenster eingebauten Kabinenwand-Prototyps	147
Abbildung 2.132: Messaufbau 2 zur Charakterisierung von Schallnebenwegen an den Rändern des im Transmissionsfenster eingebauten Kabinenwand-Prototyps sowie Messergebnisse erreichter Schalldämmung	147
Abbildung 2.133: Schematische Darstellung des Prototyp-Kabinenwandaufbaus zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften	149
Abbildung 2.134: Schematische Darstellung des Referenz-Kabinenwandaufbaus zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften	150
Abbildung 2.135: Schematische Darstellung des Prototyp- Kabinenwandaufbaus und der Lage der Messstellen zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften.....	152
Abbildung 2.136: Schematische Darstellung des Referenz-Kabinenwandaufbaus und der Lage der Messstellen zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften.....	153
Abbildung 2.137: Schematische Darstellung des Kabinenwandaufbaus mit Aerogel als Glaswollersatz für die Primärisolierung	153
Abbildung 2.138: Schematische Darstellung des Kabinenwandaufbaus des Funktionsmusters zur Bestimmung der Schalldämmeigenschaften	158
Abbildung 2.139: Schematische Darstellung des Kabinenwandaufbaus des Funktionsmusters zur Bestimmung von Schalldämmeigenschaften bei im Zwischenraum unterschiedlich positionierten Luftkanälen, hier im Vergleich zu Abbildung 2.138 ein in Richtung der Rumpfstruktur verschobener Luftkanal.....	158
Abbildung 2.140: Schematische Darstellung des Referenz-Kabinenwandaufbaus für das Funktionsmuster zur Bestimmung von Schalldämmeigenschaften	159
Abbildung 2.141: Schematische Darstellung des Prototyp- Kabinenwandaufbaus zur Bestimmung der Schalldämmeigenschaften.....	161
Abbildung 2.142: Schematische Darstellung des Referenz-Kabinenwandaufbaus zur Bestimmung von Schalldämmeigenschaften.....	162
Abbildung 2.143: Schematische Darstellung des Referenz-Kabinenwandaufbaus mit zusätzlich auf dem Seitenwandpaneel fixierten Massen zur Bestimmung von Schalldämmeigenschaften.....	162
Abbildung 2.144: Darstellung Seitenwandpaneel mit mit Steinwolle und Schwergummi abgedeckten Fenstern	163
Abbildung 2.145: Schematische Darstellung des Kabinewandaufbaus mit Aerogel als Glaswollersatz für die Primärisolierung	164
Abbildung 2.146: a) Prüffensteradapter zur Aufnahme des Funktionsmusters in das 1,0m x 1,2m große Transmissionsfenster im Akustikprüfstand aus der Sicht des Hallraums, b) ... aus Sicht des Freifeldraums, c) aufgebaute Dämmmaßnahmen zur Reduzierung von Schallnebenwegen	167
Abbildung 2.147: Ansicht eines Funktionsmusters in einem Transmissionsfenster: eingebauter Luftkanal (links) und vollständiges Funktionsmuster (Sicht auf Seitenwandpaneel - rechtes Bild)	167
Abbildung 2.148: Prüffensteradapter zur Aufnahme von akustischen Metamaterialien zwecks individueller Charakterisierung ihrer Schalldämmeigenschaften.....	168

Abbildung 2.149: Ansicht Prüfadapter zur Aufnahme des Prototyps in großem Transmissionsfenster im Akustikprüfstand aus der Sicht des Hallraums a), des Freifeldraums b) sowie Darstellung von Dämmmaßnahmen zur Reduzierung von Schallnebenwegen c).....	168
Abbildung 2.150: Fertiggestellter Kabinenwand-Prototyp: a) Ansicht der eingebauten Luftkanäle, b) Ansicht eingebauter Luftkanäle hinter eingebautem Seitenwandpaneel, c) bestmögliche homogene Verteilung von Schwergummimassen auf dem Seitenwandpaneel, d) Aerogelisolierpakete als Primärisolierung	168
Abbildung 2.151: Integrierter Kabinenwand-Prototyp in die Kabine des A320-Rumpfabschnitts der Klima-Akustikkammer für akustische Charakterisierung. Ansicht der Prüfumgebung a), Dämmmaßnahmen in der Kabine zur Reduzierung von Schallnebenwegen b) und c).....	169
Abbildung 2.152: Darstellung des integrierten Kabinenwand- Prototyps, hier ohne Dado-Paneel zwecks Ansicht der integrierten Luftkanälen (links), Ansicht eines Teilaufbaus einer-Kabinenwand mit Aerogelisolierpaketen als Primärisolierung (rechts).....	169
Abbildung 2.153: Foto des Messaufbaus im Inneren der A320 Kabine in der Klima-Akustikkammer	170
Abbildung 2.154: Darstellung der Integration des Prototyps mit dem Kabinenbelüftungssystem der Klima-Akustikkammer: Skizze des Systems zwischen Zuleitung und Luftkanäle (links); Foto zur Luftführung im Frachtraum (rechts).	170
Abbildung 2.155: Fotos der im Wandaufbau des Prototyps installierten Sensoren, beginnend von links im Uhrzeigersinn: WLAN-Sensor, Thermoelement und FHAD36-Sensor installiert an der Rumpfstruktur am Messpunkt unterhalb des linken Fensters; WLAN-Sensor im Steigrohr; WLAN-Sensoren installiert an der Seitenwand.	171
<i>Abbildung 2.156: a) Darstellung des Versuchsaufbaus für hygrothermische Messungen. b) Rumpfstruktur c) Primärisolierung d) Luftkanal e) Seitenwand.....</i>	<i>172</i>
Abbildung 2.157: Darstellung unterschiedlicher Einbaumethoden für Proben zur Charakterisierung im Impedanzrohr: a) ein Helmholtz-Resonator wurde mit einer gummiartigen, weichen Klebmasse befestigt, b) ein mikroperforierter Absorber aus Aluminium mit einem Halterring sowie c) Glaswollisolierung ohne Hilfsmittel zur Befestigung.....	172
Abbildung 2.158: Messaufbau im Innenraum einer Klimakammer für Wasserdampfpermeabilitätsmessungen an Folien.	173
Abbildung 2.159: Messergebnisse zum Vergleich der Wandverläufe vom Temperatur- und relativer Luftfeuchtigkeit bei Funktionsmuster (Index: Fm) und Referenz (Index: Ref).	174
Abbildung 2.160: Messergebnisse zum Vergleich der Wandverläufe von Sättigungsdruck und Dampfpartialdruck bei Funktionsmuster (Index: Fm) und Referenz (Index: Ref).	175
Abbildung 2.161: Experimentelle Ergebnisse der im Laufe der Zeit gemessenen zeitlichen Entwicklung der relativen Luftfeuchtigkeit an der Innenseite des Glaswollpakets GW _b , im Vergleich von Funktionsmuster (Index: Fm) und Referenz (Index: Ref).	175
Abbildung 2.162: Infrarotbilder der Seitenwand a) für das Funktionsmuster b) und für die Referenzwand c).	176
Abbildung 2.163: Vergleich zwischen experimentellen (Exp) und numerischen (Num) Profilen für Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit innerhalb der Wand des vermessenen Funktionsmusters	176
Abbildung 2.164: Messergebnisse zum Vergleich der Wandprofile von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit zwischen Kabinenwand-Prototyp (Index: Prot) und Referenz (Index: Ref).	177

Abbildung 2.165: Messergebnisse zum Vergleich der Wandprofile von Sättigungsdruck und Dampfpartialdruck zwischen Kabinenwand- Prototyp (Index: Proto) und Referenz (Index: Ref).	177
Abbildung 2.166: a) Schematisierung der Wärmeströme innerhalb des Kabinenwand-Prototyps (Indizes: K=Kabine, KW=Kabinenwand R=Rumpfstruktur, 1=Einlass , 2=Auslass); b) Temperaturprofile innerhalb des Prototyps für zwei Messpositionen, unterhalb des Fensters und oberhalb des Fensters; c) an der Seitenwand gemessene Temperaturströme für den Kabinenwand-Prototyp (Index: Proto) und für die Referenzwand (Index: Ref).	178
Abbildung 2.167: a) Infrarotbild des Messaufbaus in der Konfiguration Referenzwand; b) Infrarotbild des Messaufbaus in der Konfiguration Kabinenwand-Prototyp.	179
Abbildung 2.168: Messergebnisse zum Vergleich der Temperatur Profile zwischen Referenzwand mit Aerogel als Primärisolierung (Index: Aer) und und konventionelle Referenzwand (Index: Ref). a) Foto des Messaufbaus ohne Seitenwandpaneel mit der Aerogel Primärisolierung im Blick; b) Temperaturprofile gemessen über dem Fenster; c) Temperaturprofile gemessen unter dem Fenster	180
Abbildung 2.169: Messergebnisse aus Schalldämmmaßmessungen am Funktionsmuster (AP5.1 – Testplan Funktionsmuster Versuch Nr.1), sowie am Funktionsmuster mit deaktivierten Helmholtz-Resonatoren und Referenz Wandaufbau (AP5.1 – Testplan Funktionsmuster Versuch Nr.4) (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)	182
Abbildung 2.170: Messergebnisse aus Schalldämmmaßmessungen am Funktionsmuster bei unterschiedlichen Einbaupositionen des Luftkanals zur Darstellung des Einflusses kritischer Wandabstände der verwendeten Metamaterialien auf das Gesamtschalldämmmaß des Funktionsmusters (AP5.1 – Testplan Funktionsmuster).....	183
Abbildung 2.171: Vergleich der mit dem numerischen Modell für das Funktionsmusters berechneten Schalldämmmaße mit entsprechenden Messdaten, die als Einfügeschalldämmmaße umgerechnet und dargestellt sind. Darstellung in 1/12-Oktavspektren.....	184
Abbildung 2.172: Schalldämmmaße der originalen Kabinenwand des A320-Rumpfabschnitts in der Klima-Akustikkammer mit und ohne Schalltransmission durch die Kabinenfenster. (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)	184
Abbildung 2.173: Gemessene Schalldämmmaße des Kabinenwand-Prototyps im Vergleich zum A320-Referenzwandaufbau der A320-Kabine in der Klima-Akustikkammer (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)	185
Abbildung 2.174: Schalldämmmaße des im Akustiklabor vermessenen Kabinenwand-Prototyps (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)	186
Abbildung 2.175: Messergebnisse zur Untersuchung des Einflusses der Fenster auf das Gesamtschalldämmmaß bei einer, dem Stand der Technik entsprechenden, im Akustiklabor aufbauten Flugzeugwand (Referenz) (Darstellung in 1/12-Oktavspektren).....	187
Abbildung 2.176: Messergebnisse zur Abschätzung des Schalldämmpotentials eines Kabinenwandaufbaus mit Luftkanal (Prototyp) mit bzw. ohne Fenster	187
Abbildung 2.177: Eperimentell ermittelte Schalldämmmaße verschiedener Kabinenwandkonfigurationen zum Vergleich der akustischen Isolierfähigkeit von Aerogel als Primärisoliermaterial:	188
Abbildung 4.1: Prinzipsskizze zur Schalldämmmaßmessung.....	194
Abbildung 4.2: Versuchsaufbau für Impedanzrohrmessungen	194
Abbildung 4.3: Darstellung des verwendeten Messegeräts zur Bestimmung von Luftströmungswiderständen durch poröse Materialien	195

Abbildung 4.4: Schema des Versuchsaufbaus zur Messung von detaillierten Oberflächentemperaturen an der Innenseite einer Rumpfstruktur	195
Abbildung 4.5: Messaufbau zur hygrothermischen Charakterisierung des Kabinenwand-Funktionsmusters	196
Abbildung 4.6: Messaufbau zur hygrothermischen und akustischen Charakterisierung des Kabinenwand-Prototyps.	197

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Eigenschaften der doppelwandigen Komponenten	58
Tabelle 2.2 Merkmale der Messgeräte	59
Tabelle 2.3: Messversuche	59
Tabelle 2.4: Randbedingungen für Funktionsmuster	64
Tabelle 2.5: Randbedingungen für Prototyp.....	69
Tabelle 2.6: Parameter der PET-Folie	71
Tabelle 2.7: Materialparameter von Glaswolle und Aerogel	74
Tabelle 2.8: Wärmestromwerte berechnet auf der Rumpfstruktur im numerischen Modell des Prototyps mit Glaswolle als Primärisolierung und des Prototyps mit Aerogel als Primärisolierung.....	75
Tabelle 2.9: Parameter für akustische Metamaterialien des Funktionsmusters	77
Tabelle 2.10: Parameter eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken für das Funktionsmuster.....	79
Tabelle 2.11: Akustische Parameter eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken für das Funktionsmuster	83
Tabelle 2.12: Kritische Wandabstände von akustischen Metamaterialien im Funktionsmuster	84
Tabelle 2.13: Parameter für zu fertigende mikroperforierte Absorber Proben.....	90
Tabelle 2.14: Parameter zweier akustisch gleich ausgelegter aber geometrisch verschiedener akustischer Metamaterialien mit Streifenmassen	92
Tabelle 2.15: Parameter des für eine Anti-Resonanzfrequenz von ca. 670 Hz ausgelegten akustischen Metamaterials	93
Tabelle 2.16: Kritische Wandabstände von akustischen Metamaterialien im Funktionsmuster	94
Tabelle 2.17: Auflistung geometrisch und akustisch ausgelegter Parameter für die Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich	96
Tabelle 2.18: Verwendete Parameter der Glaswollisolierung in der analytischen bzw. numerischen Auslegung	101
Tabelle 2.19: Parameter theoretisch ausgelegter Helmholtz-Resonatoren oberhalb bzw. unterhalb des Flugzeugfensterbereichs.....	101
Tabelle 2.20: Parameter der für das Funktionsmuster ausgelegten akustischen Metamaterialien mit Streifenmassen	102
Tabelle 2.21: Parameter der für das Funktionsmuster ausgelegten Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken	102
Tabelle 2.22: Parameter der für den Prototyp eingesetzten Metamaterialien mit reduzierter Masse.....	102
Tabelle 2.23: Parameter für die im Fensterbereich positionierten Helmholtz-Resonatoren mit mehreren Löchern pro Resonatorkammer	103
Tabelle 2.24: Geometrische Abmaße der einzelnen Luftkanalabschnitte ober- bzw. unterhalb der Flugzeugfenster als auch im Flugzeugfensterbereich	103
Tabelle 2.25: Gemessene Größen für das Aerogelmaterial (Quelle: Projektpartner DLR)	104
Tabelle 2.26: Gewählte Einstellungen für die Modalanalyse einer Rumpfstuktur ohne Fenster	122

Tabelle 2.27: Ermittelte Moden in der Modalanalyse für die Außenseite der Rumpfstruktur, welche für das Funktionsmuster eingesetzt wurde.	124
Tabelle 2.28: Ermittelte Moden in der Modalanalyse für die Innenseite der Rumpfstruktur, welche für das Funktionsmuster eingesetzt wurde	125
Tabelle 2.29: Gemessene Werte aus Infrarotbildern und Thermoelementen mit Eis auf der Oberfläche....	127
Tabelle 2.30: Gemessene Werte aus Infrarotbildern und Thermoelementen nach der Eisentfernung	128
Tabelle 2.31: Gemessene Werte aus Infrarotbildern und Thermoelementen nach dem Einbau einer Glaswolledecke	128
Tabelle 2.32: Gemessene Parameter von Aerogelproben KS-121 bzw. KS-123	140
Tabelle 2.33: Testplan zur experimentellen Charakterisierung der Einzelkomponenten für das Funktionsmuster	148
Tabelle 2.34: Testplan zur experimentellen Charakterisierung des Funktionsmusters	149
Tabelle 2.35: Testplan zur experimentellen Charakterisierung der Einzelkomponenten für den Kabinenwand-Prototyp	150
Tabelle 2.36: Testplan zur experimentellen Charakterisierung der Einzelkomponenten für den Kabinenwand-Prototyp	151
Tabelle 2.37: Messtechnik für die hygrothermische Messung der Funktionsmuster.....	154
Tabelle 2.38: Messtechnik für die thermische Messung an der Rumpfstruktur.....	154
Tabelle 2.39: Messtechnik für die hygrothermische Messung am Kabinenwand- Prototyp	154
Tabelle 2.40: Messtechnik zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit einer Folie	155
Tabelle 2.41: Testplan zur experimentellen Charakterisierung der Einzelkomponenten für das Funktionsmuster.....	157
Tabelle 2.42: Testplan zur experimentellen Charakterisierung des Funktionsmusters	157
Tabelle 2.43: Testplan zur experimentellen Charakterisierung der Einzelkomponenten für die Prototypen	160
Tabelle 2.44: Testplan zur experimentellen Charakterisierung des Kabinenwand- Prototyps	160
Tabelle 2.45: Verwendete Messgeräte für Schalldämmmaßmessungen	165
Tabelle 2.46: Verwendete Messgeräte für Impedanzrohrmessungen	165
Tabelle 2.47: Verwendete Messgeräte zur Bestimmung von Strömungswiderständen	165

III. Verzeichnis der verwendeten physikalischen Größen

$Au\beta$	Außen	η_{Iso}	Isotropischer Dämpfungsfaktor
b_{CL}	Breite des Biegebalken	λ	Wärmeleitfähigkeit
B_{HR}	Breite des HR (Hohlkammer)	μ	Wasserdampfdurchlässigkeitsfaktor
b_M	Breite des PAM-Massen	ρ_f	Dichte PAM-Folien
$d_{abstand}$	Abstand der Löcher zueinander	ρ_M	Dichte PAM-Massen
$d_{HR,Spalt}$	Spaltbreite U-Schlitz	ϕ_{in}	Interner Füllgrad Doppelwand
d_{Loch}	Durchmesser des Lochs	ϕ_{ext}	Externer Füllgrad Doppelwand
d_{krit}	Kritische Wandabstand	ω	Resonanzfrequenz
E	E-Modul		
E_f	Elastizitätsmodul PAM-Folie		
e_{zelle}	Dimension der Einheitszelle		
f_1	Erste Resonanzfrequenz d. Systems		
f_2	Zweite Resonanzfrequenz d. Systems		
f_{CL}	Resonanzfrequenz Biegebalken		
$f_{CL,V}$	Resonanzfrequenz Biegebalken im Vakuum		
f_{HR}	Resonanzfrequenz HR		
f_p	Anti-Resonanzfrequenz		
f_R	Erste Resonanzfrequenz		
H_{HR}	Höhe des HR (Hohlkammer)		
h_{CL}	Höhe des Biegebalken		
h_f	Dicke des PAM-Folie		
h_M	Höhe des PAM-Massen		
I	Schallintensität		
Kab	Kabine		
l_{CL}	Länge des Biegebalken		
L_{HR}	Länge des HR (Hohlkammer)		
l_{Loch}	Länge des Lochs (= Wandstärke)		
l_{Spalt}	Abstand zwischen den Massen in PAMs		
LK	Luftkanal		
m''	Flächenmasse Einheitszelle		
n	Anzahl der Löcher		
P	Dichte		
p_d	Partialdampfdruck		
p_s	Sättigungsdrucks		
Q_{Luft}	Luftstrom		
$\dot{Q}$	Wärmestrom		
R	Wärmewiderstand		
rF	Relative Feuchtigkeit		
S_d	Äquivalente Luft Schichtdicke		
SW	Seitenwand		
t_{HR}	Materialdicke		
T	Temperatur		
V	Volumen Hohlkammer)		
v	Luftgeschwindigkeit		

Indizes und Abkürzungen

<i>Auß</i>	Außen
<i>HR</i>	Helmholtz-Resonator
<i>Kab</i>	Kabine
<i>LK</i>	Luftkanal
<i>MPA</i>	Mikroperforierter Absorber
<i>PAM</i>	Akustisches Metamaterial mit Streifenmassen
<i>SW</i>	Seitenwand

IV. Danksagung

An dieser Stelle möchten die Bearbeiter des Projekts EIKABN sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Projekts ganz herzlich bedanken. Die Förderung hat es möglich gemacht, einen wissenschaftlich nachgewiesenen, praxisnahen Beitrag für eine deutliche Erhöhung der akustischen und hygrothermischen Isolation zukünftiger Flugzeugkabinenwände zu erarbeiten.

Darüber hinaus bedanken wir uns bei den Kollegen des Labors für Kabinen und Kabinensysteme der HAW Hamburg. Insbesondere bedanken wir uns bei Herrn Bernd Schröder, der die Betriebsfähigkeit der Klima-Akustikkammer sichergestellt sowie uns in labortechnischen und handwerklichen Fragestellungen unterstützt hat. Besonderen Dank gilt auch Herrn Mihai Bodolea, der uns mit seinen Kompetenzen in der additiven Fertigung von Kabinenwandelementen unterstützt hat.

Darüber hinaus gilt unser Dank den Akustik-Mitarbeitern von Airbus in Hamburg, die originale Flugzeugrumpfstrukturen und Kabinenwandelemente für die im Projekt EIKABIN durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen an der HAW Hamburg zur Verfügung gestellt haben.

1. Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung

Fluggesellschaften erwarten, dass zukünftige Flugzeuge, gemessen am Stand der Technik noch wirtschaftlicher, d.h. weniger Treibstoff verbrauchen, einen höheren Nutzwert der Kabine aufweisen und geringere Wartungskosten verursachen sowie einen umweltfreundlicheren Betrieb gewährleisten. Flugzeughersteller wollen ihre Entwicklungs- und Fertigungseffizienz steigern sowie im Wettbewerb die höchsten Kaufanreize durch eine attraktive Kabine entfachen. Aufgrund neuer Triebwerkstechnologien und zusätzlicher Wünsche der Airlines ändert sich das Anforderungsprofil für zukünftige Flugzeugkabinen wesentlich. In der heutigen Form haben insbesondere Kabinenwände jedoch kaum noch ein Optimierungspotenzial mit Blick auf eine leistungsfähigere Schallisolation unter 1000 Hz als auch für eine deutlich trockenere innere Kabinenwand. Daher ist es notwendig, gänzlich neuartige Konzepte, welche auf einer integralen Betrachtung bestehender und verschiedener neuer Anforderungen, z.B. hinsichtlich Akustik, Kabinenluftfeuchtigkeit und Effizienz, beruhen, zu entwickeln und zu erproben.

Das Teilvorhaben der HAW Hamburg zielt darauf ab, auf Basis neuer Isolationskonzepte für Flugzeugkabinen einen bestmöglichen Entwurf für eine multifunktionale Kabinenwand auch mit neuen Materialien wie z.B. Aerogelen zu erreichen. Angestrebt wird ein Technologiereifegrad von 5. Dabei sollen sowohl akustische, thermische und feuchtetolerante Eigenschaften den gegenwärtigen Stand der Technik deutlich übertreffen. Weitere für die Luftfahrt wichtige Eigenschaften wie ein geringes spezifisches Gewicht, leichte Ein- und Ausbaubarkeit, Feuerfestigkeit etc. werden bei den Kabinenwandentwürfen soweit wie möglich berücksichtigt.

Die wissenschaftliche und technische Zielsetzung der HAW Hamburg fokussiert sich daher darauf, eine neue Bauweise einer Flugzeugkabinenwand, die insbesondere für akustische und feuchteisolierende Anforderungen angepasst werden müssen, zu definieren und ihre Eigenschaften für eine prinzipielle Verwendbarkeit experimentell nachzuweisen.

Ein besonderes Augenmerk für die Kabinenisolation soll bei den akustischen Eigenschaften auf eine Verbesserung im tieferen Frequenzbereich unter 1000 Hz gerichtet sein, um damit neuen Entwicklungen im Triebwerksbereich, die aufgrund von Vergrößerungen ihrer Nebenstromverhältnisse vermehrt tieffrequente, ggf. auch tonale Schallwellen abstrahlen können, etwas entgegenzusetzen und so den gewohnten Komfortstandard mindestens aufrecht erhalten zu können.

Ebenso wichtig ist eine geeignete Architektur des Wandaufbaus, die im Einklang mit einem zu definierenden Entwurf für das Luftverteilungssystem der Klimaanlage eine Feuchtigkeitskondensation / Eisbildung innerhalb der Kabinenwandisolation vermeidet, um so die Grundlage für eine zusätzliche Befeuchtung der i.A. sehr trockenen Kabinenluft zu schaffen. Im Entwurf sind selbstverständlich akustische Lärminderungsmaßnahmen und andere Kabinensysteme zu berücksichtigen, die im Bereich der Flugzeugkabinenwand untergebracht werden müssen.

Für eine experimentelle Erprobung werden prototypennahe Funktionsmuster definiert, hergestellt und in hochschuleigene Labore und Prüfstände wie z.B. in einer Klima-Akustikkammer mit einem A320 – Rumpfsegment eingebaut. Als Ergebnis wird eine eingehende Charakterisierung der Eigenschaften der entworfenen Flugzeugkabinenwand sowie der Nachweis eines „TRL 5“- Reifegrades erwartet.

1.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Bisherige Kabinenwandisolationen bei Verkehrsflugzeugen werden durch unterschiedlich dichte Glaswollpakete, die in speziellen Folien eingehüllt sind, realisiert. Diese Isolierpakete sind in den Zwischenräumen zwischen Flugzeugrumpfstruktur (Kabinenaußenwand) und Kabinenauskleidungselementen (Kabineninnenwand) eingebaut und erfüllen sehr viele unverzichtbare Anforderungen im Flugzeugbau. Die wichtigsten davon sind:

- sehr geringes zusätzliches Gewicht
- geringe Feuchtigkeitsspeicherung
- gute thermische Isolation
- Feuerfestigkeit
- einfache Installierbarkeit
- sehr gute akustische Absorption (erfüllt für den mittleren und höheren Frequenzbereich)

Nachteilig ist allerdings die deutlich geringer werdende Schallabsorption der Glaswolle im unteren Frequenzbereich, etwa unterhalb von 1000 Hz, wodurch in Verbindung mit der in diesem Frequenzbereich ebenfalls sehr geringen Schalldämmung der Kabinenwände Triebwerksschall besonders stark in die Flugzeugkabine eindringen kann. Gerade bei künftigen Triebwerken mit deutlich größeren Fan-Durchmessern bis hin zum Gegenlaufpropellerantrieb ist im Vergleich zum heutigen Stand der Technik zu befürchten, dass der bisher nur in der Steigflugphase wahrnehmbare tonhaltige, kreissägenartige Schall (buzz saw noise) mit noch größeren Pegeln auch im Reiseflug zu starken Beeinträchtigungen des gewohnten Passagierkomforts führen könnte, wenn eine Kabinenisolation mit heutigem Technikstand verwendet werden würde. Die im Rahmen des LuFo IV-4 Vorhabens COCLEA entwickelten Membranmetamaterialien (1), (2), (3), (4), (5), (6) und auch andere Metamaterialprinzipien, wie z.B. in (7), (8), (9), (10), (11) dargestellt, weisen ein Potenzial für eine Nutzung bei neuen Kabinenwand-Isolationen auf.

Im vorangegangenen Lufo V-2 Vorhaben FlightLab wurden u.a. Optimierungspotenziale der akustischen Glaswollisolationseigenschaften im tieferen Frequenzbereich analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen aber eine eher begrenzte Option zu einer verbesserten gesamtheitlichen Kabinenschallreduktion auf. Hinzu kommt, dass auch ein Mindestmaß an thermischer Isolation für die Passagierkabine einzuhalten ist, so dass bei gegebener spezifischer Wärmeleitfähigkeit der Glaswolle der Raum zwischen Kabinenverkleidung und Rumpfstruktur vor allem im Seitenwandbereich weitgehend ausgefüllt ist und daher nur wenig Platz für zusätzliche schallreduzierende Elemente verfügbar ist. Mit dem für dieses Vorhaben vorgeschlagenen Luftkanalkonzept mit integrierten Schallminderungselementen und dessen zusätzlichen Wärmeisolationseigenschaften könnte sicherlich die Glaswollschichtdicke etwas reduziert werden. Andererseits könnten Aerogelmaterialien, die potenziell eine im Vergleich zur Glaswolle höhere thermische Isolationsfähigkeit aufweisen und sich damit der Platzbedarf zur thermischen Kabinenisolation verkleinern würde, zusätzliche Vorteile bringen. Bei den akustischen Eigenschaften von Aerogelmaterialien wurden im LuFo V.3 Vorhaben GELIKA bereits sehr viel höhere Schallabsorptionsgrade mit Aerogelgranulaten im Vergleich zu einer Standardglaswollisolation für Flugzeugkabinen nachgewiesen. Allerdings muss die für diese Materialien vergleichsweise recht hohe Dichte noch deutlich reduziert werden, um die für Glaswolle typischen Werte zu erreichen, was entscheidend wichtig für eine Akzeptanz im Flugzeugbau ist.

Ebenfalls nachteilig in Bezug auf eine wünschenswerte höhere Luftfeuchtigkeit in der Passagierkabine, etwa durch eine zusätzliche Befeuchtung zu erreichen, ist der gegenwärtige Aufbau der Kabinenwandisolation, innerhalb derer sich aufgrund von Diffusionsvorgängen feuchter Luft beim Erreichen des Taupunktes Wasserkondensation und bei Unterschreitung des Gefrierpunktes Eisbildung entstehen kann, verbunden mit vielen negativen Folgen wie Gewichtszunahme, Korrosion und Schimmelbildung.

Mit den bekannten sehr guten hydrophoben Eigenschaften von Aerogelmaterialien im Zusammenhang mit der hervorragenden thermischen Isolierfähigkeit und möglichen hohen Durchbrandfestigkeit eröffnen sich für den Kabinenwandaufbau im Einklang mit neuen Konzeptideen für eine deutlich verbesserte akustische Isolation potenziell viele neue Ansätze, nicht zuletzt auch, um damit insgesamt eine höhere Kabinenluftfeuchtigkeit zulassen zu können.

Weitere Potenziale für eine akustisch wirksamere Schallisolation im tieferen Frequenzbereich auch noch unter 500 Hz zeigen modifizierte Helmholtz-Resonatoren, die im Halsbereich einen schwingfähigen Biegebalken aufweisen (10). Diese im LuFo V.2 erzielten Ergebnisse, werden im geplanten Vorhaben EIKABIN weiter verwendet werden. Eine Integration dieser Schallminderungselemente z.B. im vorgeschlagenen Luftkanal oder auch in Kabinenseitenwandpaneelen würde sehr wahrscheinlich vorteilhaft sein und so den gegenwärtigen Stand der Technik deutlich voran bringen.

1.3 Voraussetzungen

Eine erfolgreiche Bearbeitung des beschriebenen hochgradig komplexen Themas zur Erreichung der gesetzten Ziele, für die Lösungen im Einklang zu den im Flugzeugbau üblichen vielseitigen und im einzelnen auch sehr hohen Anforderungen gefunden werden mussten, war an eine Reihe von Voraussetzungen gebunden:

Fachkompetenzen: Umfangreiches Fachwissen und Entwurfs-Kompetenzen in Flugzeugbau mit Schwerpunkt Kabine und Kabinensysteme, technischer Akustik, Thermodynamik mit Schwerpunkt Wärmeübertragung und Stofftransport, sowie Kompetenzen in Mathematik, Modellbildung/Simulation und Messtechnik, erworben durch Studium und berufliche Praxis, war entscheidend für die Bearbeitung der gestellten Aufgaben. Hinzu kamen handwerkliches Geschick und Materialkenntnisse.

Vorarbeiten: Grundlegende Erkenntnisse über die Eigenschaften und Potenziale einzelner Schallminderungselemente sowie Know-How zu deren Auslegung mittels Modellbildung, Berechnung und Simulation und auch Wissen über Einflussfaktoren auf deren Eigenschaften bei der Fertigung und eingesetzten Materialien waren ausschlaggebend für dieses Vorhaben. Hinzu kommen die Erkenntnisse über die Wirksamkeiten dieser Elemente, wenn sie in einer kabinenwandähnlichen Doppelwand eingebaut sind. Dieses Wissen hat der Antragsteller mit seinen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen in vorangegangenen Vorhaben wie COCLEA, FlightLab, NAIMMTA und GELIKA erarbeitet.

Originalbauteile Passagierflugzeug: Für eine Erarbeitung von Forschungsergebnissen mit einem hohen Technologiereifegrad, wie es im Vorhaben angestrebt wurde, sind Originalbauteile, die in direkter Wechselwirkung mit dem Forschungsgegenstand stehen, unabdingbar. Dankenswerter Weise hat Airbus dem Antragsteller u.a. entsprechende originale A320-Flugzeugrumpfstrukturen mit zugehörigen Kabinenwandverkleidungselementen und Glaswollisolerpaketen zur Verfügung gestellt.

Infrastruktur/Prüfstände: Eine Forschung für praxistaugliche Anwendungen gelingt nur, wenn eine für die Aufgaben entsprechende Infrastruktur zur Verfügung steht. Der Antragsteller hat u.a. für dieses Vorhaben ein Akustiklabor mit speziellen Messeinrichtungen und Probenpräparationswerkstatt sowie eine Klima-Akustikkammer, die einen originalen A320-Flugzeugrumpfabschnitt mit ausgestatteter Kabineneinrichtung enthält, in der HAW Hamburg entworfen und aufgebaut, sowie entsprechende Messgeräte und Simulationssoftware beschafft.

a. Akustiklabor

Der Kern des Labors besteht aus einem Hallraum mit vier angrenzenden Freifeldräumen. Im Hallraum, der gemäß DIN EN ISO 354 für eine gesteigerte Schallfelddiffusität mit Schallreflektoren (Diffusoren) ausgestattet

wurde, lassen sich u.a. nahezu normgerechte Schallabsorptionsmessungen durchführen. Die benötigten langen Nachhallzeiten ergeben sich, wenn alle Transmissionsfenster zu den Freifeldräumen durch massive Stahltore, die eine entsprechend hohe Schallreflektivität aufweisen, verschlossen sind. Ray tracing Simulationen von Schallwegen eines durch Lautsprecher angeregten Schallfeldes im Hallraum und raumakustische Messungen zeigen übereinstimmend, dass ein sehr gleichmäßiges diffuses Schallfeld erzeugt werden kann. Bei geöffneten Stahltoren können in die einzelnen Transmissionsfenster nahezu beliebige Leichtbauwandaufbauten unterschiedlicher Größe und Konfiguration installiert werden, so dass Schalltransmissionen aus dem Diffusfeld des Hallraums in benachbarte Freifeldräume hinein bis zu einer unteren Grenzfrequenz von etwa 200 Hz vermessen und damit individuelle Schalldämmmaße z.B. von Leichtbauwänden bestimmt werden können. Die durch die abschaltbare Belüftung entstehenden max. Schallpegel eindringender Umgebungsgeräusche sind mit 25 dB spezifiziert und sind deshalb für die meisten Messaufgaben hinreichend niedrig. Für strömungsakustische Messungen wird sowohl der Hallraum (für emittierte Schallleistung) als auch Freifeldraum 4 (für Richtcharakteristik abgestrahlter Schallwellen) mit einer leisen Luftversorgung ausgestattet, mit der Luft mit bis zu 300 l/s in jeweils einen der Räume hineingeblasen und auch abgeführt werden kann.

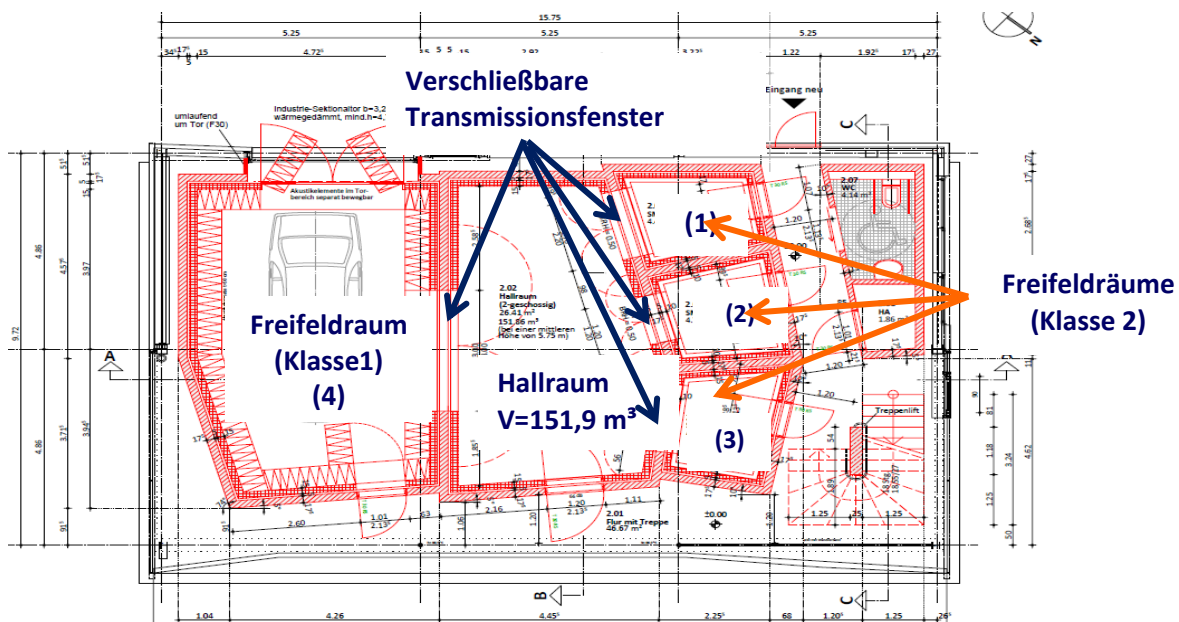


Abbildung 1.1: Erdgeschoss des Akustiklabors der HAW Hamburg. Aus einem zentralen Hallraum können simultan Schalltransmissionsmessungen in verschiedene Freifeldräume hinein mit unterschiedlichen, in die Transmissionsfenster installierten Testaufbauten durchgeführt werden. Alternativ können bei geschlossenen Transmissionsfenstern unabhängige Versuchsaufbauten in die einzelnen Messräume installiert und lokale Messungen durchgeführt werden.

Drei der angrenzenden Freifeldräume (Räume 1 – 3, Abbildung 1.1) sind als sogenannte Halbräume mit einem schallharten Fußboden und mit Absorbern verkleideten Wänden sowie Decke ausgestattet und eignen sich u.a. für Messungen transmittierter Schallintensität gemäß ISO 3744. Freifeldraum 4 als sog. Vollraum mit sehr hochwertigen Absorbern an Wänden und Decke und zusätzlicher Absorberbelegung des Raumbodens hingegen eignet sich darüber hinaus u.a. zu Schallleistungsmessungen mit Mikrofonen auf einer Hüllfläche bis zu einer Grenzfrequenz $f_u \geq 100$ Hz gemäß ISO 3745.

Zusammenfassend sind die wichtigsten im Labor durchführbaren Messaufgaben dargestellt:

- *Schallpfadanalysen* → z.B. Flugzeugrumpfsegmente, Automobilstrukturen, komplexe Einbaumodule, ...
- *Schalldämmmaßmessungen* → z.B. Kabinenwandelemente verschiedener Bauweisen
- *Schallintensitätsmessungen* → z.B. abgestrahlter Lärm aus einer Kabinenwand
- *Raumakustische Messungen* → z.B. Nachhallzeitmessungen bei eingebauten Absorbern

- *Absorptionsmessungen* → Bauteile und Materialien
- *Messung der abgestrahlten Schallleistung mit verschiedenen Verfahren*
→ Bauteile, Systemkomponenten
- *Bestimmung von akustischen Richtcharakteristiken*
- *Schallquellenortung mit Mikrophon Arrays*
- *Vermessung von Körperschallübertragungen*
- *Strömungsakustische Messungen*
- *Elektroakustische Messungen*

b. Klima-Akustikprüfkammer für eine Flugzeugkabine

Klimatische und akustische Eigenschaften in einer Flugzeugkabine bestimmen neben dem Raumangebot in erheblicher Weise den Komfort in einer Flugzeugkabine. Um eine experimentell gestützte Bodensimulation thermischer und akustischer Kabinenbedingungen eines Passagierflugzeugs durchführen zu können, wurde eine ausreichend große Klimakammer aufgebaut und ein A320 Flugzeugrumpfabschnitt mit einer Kabinenausstattung eingebracht, dessen Innenraum weitgehend unabhängig von einstellbaren Außenbedingungen flugzeugtypisch klimatisiert werden kann. Das kombinierte Klima- und Akustik-Messfeld in einem Standardrumpf ist damit eine wesentliche Plattform die komplexen Vorgänge beim Wärme- und Schalldurchgang durch eine Flugzeugkabinenwand, bei der Kabinenluftströmung und der Kabinenakustik studieren zu können.

Mit der Klima-Akustikprüfkammer lassen sich folgende Fragestellungen untersuchen:

- **Klimatisierung einer Kabinensektion**
 - Temperaturverteilung in der Kabine
 - Raumluftrömungen bei verschiedenen Kabinenausstattungen
 - Feuchtigkeitsverteilung in der Kabine und in den Isolationsbereichen in Abhängigkeit von verschiedenen Kabinenkonfigurationen
 - Befeuchtung und lokale Trocknung
- **Isolation der Kabine**
 - Thermische Kabinenisolationseigenschaften verschiedener Isolationsmaterialien
 - Bestimmung der Luftfeuchtigkeitskondensationsbereiche und zugehörige Auswirkungen
 - Akustische Kabinenisolationseigenschaften
 - Raumakustische Eigenschaften
 - Schallpfadanalysen
- **Systemintegration bezüglich Flugzeugebene**
 - Untersuchung von optimalen Einbaupositionen von Luftbefeuchtungs- und Lufttrocknungsgeräten für verschiedene Kabinenkonfigurationen
 - Demonstration von Installationsweisen
- **Entwicklung / Weiterentwicklung und Erprobung neuer Messverfahren und –systeme sowie neuer Kabinenausstattungs- und Kabinensystem-komponenten**
 - 3D PST Messtechnik
 - Neue Sensoren
 - Komfort-Parameter
 - Be- und Entfeuchtungssysteme
 - Multifunktionale Kabinenausstattungs-elemente, Multifunktionspaneele
 - ...
- **Weitere Mess- und Testaufgaben:**
 - Elektrostatische Aufladungen in der Kabine (z.B. Teppich)
 - Erprobung neuer Messverfahren
 - Erprobung/Charakterisierung neuer Kabinenausstattungskomponenten
 - Neue Integrationstechnologien in der Endmontage

Die Prüfkammer dieser Anlage enthält einen A320-Flugzeugrumpf-Abschnitt der Rumpfsektion 18, welcher eine Länge von etwa 4,7 m aufweist und mit einer originalen Kabineneinrichtung ausgestattet ist. Sie ist durch folgende Eckdaten charakterisiert:

Innenabmessungen Klimakammer

- L x B x H : 4,80 x 7,60 x 5,80 m

Klima außerhalb des Rumpfes

- Temperatur: - 30 ... +50 °C
- zeitl. Konstanz: $\leq 1^\circ\text{C}$
- Temperaturänderung: 5°C/h

Klima in der Kabine

- Temperatur: +10 ... + 35 °C
- Feuchtigkeit: 10 ... 95% rF
(2 ... 20 g/kg)
- zeitl. Konstanz $\pm 5\%$ rF
- Luftaustauschrate: 20/h

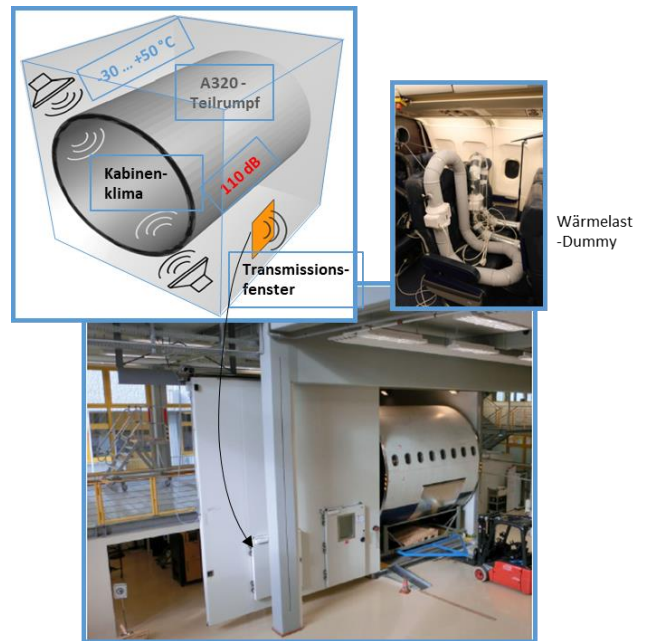


Abbildung 1.2: Klima-Akustikprüfkammer: Schematische Ansicht, sowie Foto der Prüfkammer mit Rumpfabschnitt einer A320 Sektion mit Kabinenausstattung im KKS-Labor der HAW Hamburg

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Teilvorhaben der HAW Hamburg EIKABIN wurde zusammen mit den Partnern Novicos, DLR und Uni zu Köln im Verbund MULTIKABIN durchgeführt. Dieses Verbundvorhaben wurde mit Blick auf die spezifischen Kompetenzen der Partner in fünf wesentliche Disziplinfelder aufgeteilt:

- Definition und Auslegung einer neuartigen Kabinenwand (**HAW Hamburg**)
- Modelle und Berechnungen (Novicos)
- Entwicklung geeigneter Aerogel-Materialien und Herstellung von Komponenten zur thermischen und akustischen Isolation (DLR)
- Entwicklung von hybriden Aerogelen im Labormaßstab (Uni zu Köln)
- Integration und Tests (**HAW Hamburg**)

Daraus wurde für das Vorhaben die folgende Arbeitspaketstruktur geplant:

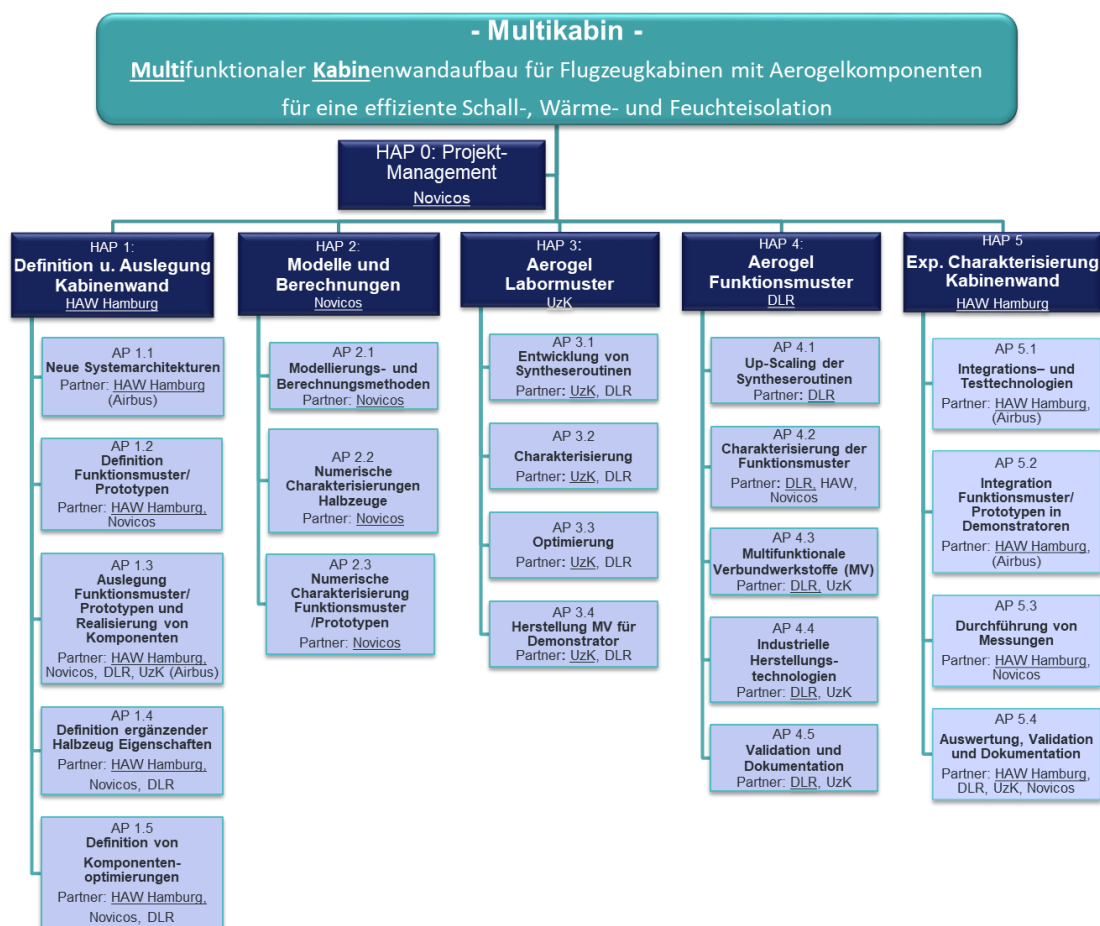


Abbildung 1.3: Organisations- und Arbeitsstruktur des Verbundvorhabens MULTIKABIN

Die Projektpartner ergänzten sich mit ihren Kompetenzbereichen in idealer Weise. Airbus, als wichtigster Interessent an den Ergebnissen, war stets gerne bereit, im Rahmen von Besprechungen hilfreiche Informationen, Beratungen und Rückmeldungen zu geben und so fanden regelmäßigen Abständen Präsentationen mit anschließenden Diskussionen statt.

1.5 Beschreibung der Arbeitspakete

HAP 1

Definition und Auslegung einer neuartigen Kabinenwand

Eine neuartige Kabinenwand soll sich von der heutigen Bauweise in folgenden Eigenschaften unterscheiden:

- Gewichts- und Bauraumeinsparung
- Schallisolation im Frequenzbereich < 1000 Hz um 5 dB verbessert
- Keine Feuchte Kondensation innerhalb der Kabinenwand
- Einfache Montage

Bisherige Vorüberlegungen

Nach bisherigen Vorüberlegungen könnte folgendes Aufbauprinzip einer Flugzeugkabinenwand Ausgangspunkt für weitere Betrachtungen sein.

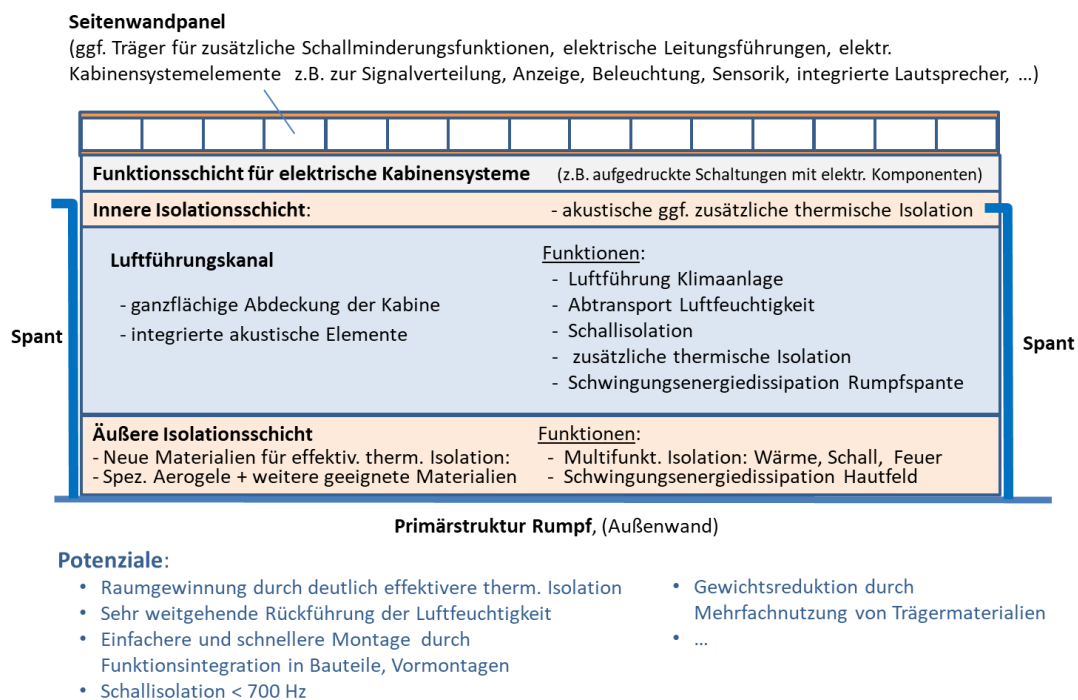


Abbildung 1.4: Vorschlag für ein neuartiges Kabinenwandaufbauprinzip

Die hier dargestellte elektrische Funktionsschicht (s. Abbildung 1.4) wird in diesem Vorhaben in Bezug auf Anforderungen und Realisierbarkeit theoretisch untersucht (vgl. AP1.1), allerdings übersteigen die zeitlichen und finanziellen Möglichkeiten einer Realisierung dieser Funktionalität den möglichen Projektumfang deutlich.

Um die Potenziale hinsichtlich akustische, thermische und feuchteisolierende Eigenschaften für dieses Aufbauprinzip nutzen zu können, ist eine flächendeckende Installation der hier vorgeschlagenen Seitenwand im Kabinenbereich des Flugzeugrumpfes erforderlich, so wie es in der folgenden Abbildung 1.5 ersichtlich ist. Darin ist auch eine Betrachtung über eine mögliche Systemarchitektur des Luftverteilungssystems der Klimaanlage dargestellt.

Luftverteilung konventionelle Belüftung
(Verteilung im Unterflurbereich)

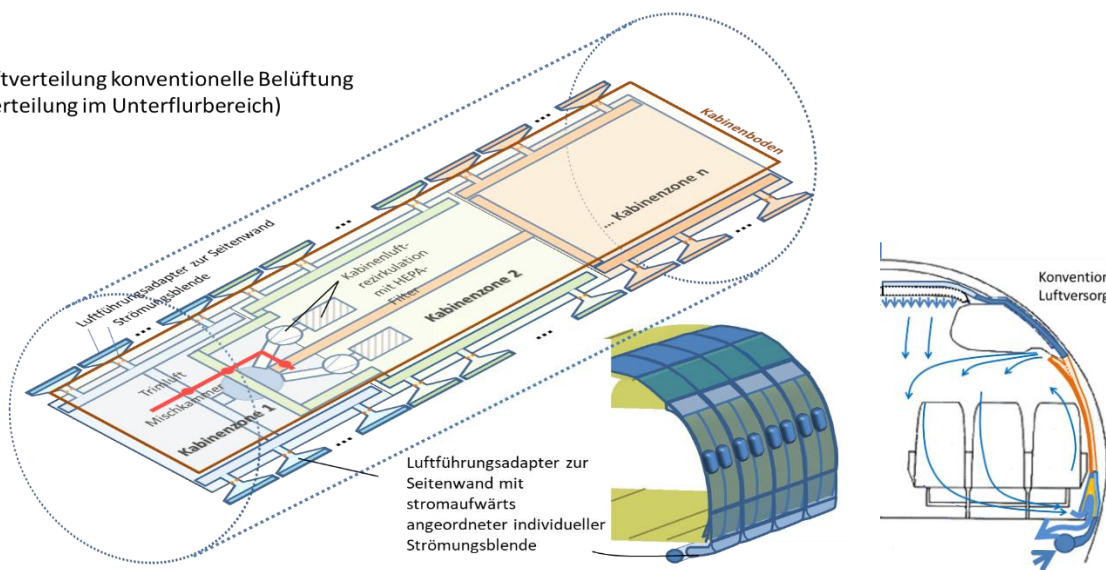


Abbildung 1.5: Skizze für eine mögliche Modifikation des Luftverteilungssystems der Klimaanlage, sowie das Einbauprinzip der Kabinenwandmodule in die Kabine.

AP 1.1 Definition neuer Systemarchitekturen

In diesem Arbeitspaket werden auf der Basis von Ergebnissen aus Vorarbeiten und in Abstimmung mit Experten von Airbus und Diehl zunächst mögliche Randbedingungen und Design-Parameter für eine Systemanpassung an neue Kabinenwandaufbau-Konzepte analysiert. Beispielsweise soll untersucht werden, mit welchen Vor- und Nachteilen zu rechnen ist, wenn man Systemkomponenten und Subsysteme, die bisher im Kabinenwandzwischenraum verbaut werden, in anderen Rumpfbereichen wie z.B. oberhalb der Kabinendecke oder unterhalb des Kabinenfußbodens installiert oder in Kabinenverkleidungselemente integriert. Dabei sind Fragestellungen in Bezug auf einen Einfluss auf Systemeigenschaften und Fertigungsaufwand zu beantworten.

Systemkomponenten, die unbedingt im Bereich der Kabinenwand eingebaut werden müssen, sollen mit Blick auf eine optimale Integrierbarkeit in bestehende oder neu zu definierende Wandelemente analysiert und bewertet werden.

Dabei steht im Vordergrund, eingesetzte Materialien/Bauteile von System- und Kabinenwandkomponenten als Träger für mehrere Funktionen/Eigenschaften zu nutzen. Es ist beispielsweise zu untersuchen, ob Materialien und Bauweise eines Rohres für das Luftverteilungssystem der Klimaanlage so modifiziert werden kann, dass neben der Luftführungsfunktion gleichzeitig z.B. auch akustisch wirksame Objekte ausgebildet werden könnten, die besonders im tiefen Frequenzbereich akustisch wirksam sind und darüber hinaus neben einer thermischen Isolation auch noch zur Verhinderung einer Feuchtekondensation beitragen könnten. Ebenso könnte möglicherweise eine Kabinenwandverkleidung so gebaut werden, dass auf deren Rückseite das eingesetzte Material eine Integration von Schallabsorbern gestattet, z.B. wie es in [16] prinzipiell gezeigt wurde. Weiterhin soll untersucht werden, ob weitere Systemkomponenten in die Strukturen vorhandener Ausstattungselemente integrierbar wären. Man würde hierdurch eingesetzte Strukturen und Materialien mehrfach nutzen und damit ggf. Gewicht und Bauraum einsparen können.

Teilaufgaben:

1. Zusammenstellung von Systemeinsatz-Anforderungen in Verkehrsflugzeuge in Bezug zu Systemen, die gegenwärtig in die Kabinenwand integriert werden.
2. Analyse möglicher Systemmodifikationen für eine Anpassung an neue Kabinenwandaufbau-Konzepte und Darstellung von Vor- und Nachteilen.
3. Potenzialanalyse einer Integration von Teilsystemen/Systemkomponenten in Kabinenwandbauteile und Bewertung der Vor- und Nachteile.

Arbeitsergebnis:

1. Dokumentation von Systemeinsatz-Anforderungen in Verkehrsflugzeuge
2. Darstellung der Systemmodifikationsanalyse mit Vor- und Nachteilen
3. Dokumentation der auf der Potenzialanalyse beruhenden Integrationskonzepte von Teilsystemen/Systemkomponenten in Kabinenwandbauteilen.

AP 1.2 Definition Funktionsmuster / Prototypen

Die Arbeitsergebnisse aus dem vorangehenden Arbeitspaket AP 1.1 werden genutzt, um zunächst ein Funktionsmuster einer vollständigen Flugzeugkabinenwand mit den Abmessungen 1m x 1,20m mit bestmöglich geeigneten Materialien und Bauweisen zu definieren. Besonderes Augenmerk soll dabei auf eine geeignete Integrierbarkeit in vorhandene Prüffenster im Akustiklabor und auch bei der Klima-Akustikkammer der Hochschule gelegt werden. Ziel der Tests ist es die thermischen und akustischen Isoliereigenschaften zu vermessen und nachzuweisen, dass höchstens extrem geringfügige Feuchtkondensationen im Inneren der Kabinenwand auftreten können. Die Funktionsmuster sollen so definiert werden, dass die in AP 5.1 geplanten Tests durchführbar sind. Die Funktionsmuster sollen dabei flugzeugnahe geometrische Verhältnisse (z.B. Abstand des Seitenwandpaneels von der Rumpfstruktur) aufweisen und mit Blick auf die einzusetzenden Materialien möglichst dicht an realitätsnahe Verhältnisse angepasst sein. Informelle Gespräche mit Airbus und Diehl werden die Zielsetzung unterstützen.

Im zweiten Teil dieses Arbeitspaketes werden nach durchgeführten Tests und daraus gewonnenen Ergebnissen Modifikationen zur weiteren Optimierung definiert. Am Ende wird daraus ein bestmöglicher Prototyp einer neuen Kabinenwand definiert, der als Teil einer Kabinenwand in einen vorhandenen A320 Rumpfabschnitt eingebaut und getestet werden soll.

Teilaufgaben:

1. Auswahl der für ein Funktionsmuster zu verwendenden Materialien, Schallminderungselemente und Teilkomponentenbauweisen.
2. Vordefinition geeigneter Funktionsmustertypen
3. Theoretische Untersuchungen der zu erwartenden Eigenschaften.
4. Auswahl und finale Definition / Spezifikation eines bestmöglich geeigneten Funktionsmuster-Konzeptes
5. Definition von Modifikationen für eine weitere Optimierung.
6. Definition eines Prototyps.

Arbeitsergebnis:

1. Dokumentation der Funktionsmusterdefinition und zugehörigen theoretischen Analyse
2. Dokumentation der Prototypdefinition mit theoretischer Analyse der optimierten Eigenschaften.

AP 1.3 Auslegung von Funktionsmuster und Prototyp und Realisierung von Komponenten

Die vordefinierten Funktionsmuster werden in diesem Arbeitspaket mit Blick auf ihre Herstellung final ausgelegt. Dabei ist auch zu klären mit welchen heute verfügbaren Verfahren eine aufwandsminimale Herstellung in der Industrie gelingen kann, um so auch eine Grundlage für spätere Massenfertigungen zu legen. Mögliche fertigungsbedingte Abweichungen der Bauweise von der Funktionsmusterdefinition werden dann bewertet und ggf. für eine Änderung der Funktionsmusterdefinition herangezogen.

Nach Herstellung von Bauunterlagen für die Realisierung der Funktionsmuster und des Prototypen für die neue Kabinenwand werden in Eigenarbeit in der laboreigenen Werkstatt und ggf. durch Unterstützung handwerklicher Fachbetriebe oder auch durch Airbus Funktionsmuster und ein Prototyp gefertigt.

Für den Fall das neue günstige Fertigungsverfahren erst noch entwickelt werden müssen, wird eine bestmögliche Herstellungsweise des Funktionsmusters festgelegt.

Teilaufgaben:

1. Analyse möglicher Fertigungsverfahren von Teilkomponenten für die definierte Kabinenwand.
2. Festlegung einer geeigneten Herstellungsweise und Erstellung von Bauunterlagen.
3. Erarbeitung einer Herstellspezifikation für das definierte Funktionsmuster.
4. Anfertigung der Funktionsmusterkomponenten ggf. mit Hilfe auszuwählender Fachbetriebe.

Arbeitsergebnis:

1. Dokumentation über ein für die Fertigung ausgelegtes Funktionsmusters, das zur Charakterisierung in ein Transmissionsfenster im Akustiklabor und bei der Klima-Akustikkammer eingebaut werden kann. Die Dokumentation enthält alle damit im Zusammenhang stehenden theoretischen Überlegungen.
2. Dokumentation über ein für die Fertigung ausgelegten Prototypen, der zur Charakterisierung in einen vorhandenen A320-Rumpfabschnitt eingebaut werden kann. Die Dokumentation enthält alle damit im Zusammenhang stehenden theoretischen Überlegungen, sowie eine Beschreibung günstiger Fertigungsverfahren.
3. Bauunterlagen definierter Funktionsmuster und des Prototyps.
4. Hergestellte Funktionsmuster und realisierter Prototyp.

AP 1.4 Definition ergänzender Halbzeug-Eigenschaften

Zur weiteren Optimierung neuer Kabinenwandkonzepte / Funktionsmuster, bei denen gemessene Halbzeug-Eigenschaften Grund für eine Modifikation geben, werden in diesem Arbeitspaket ergänzende Halbzeug-Eigenschaften definiert. Dabei können u. U. weitere geeignete Materialien z.B. als ergänzende Schichtenfolge oder Substitutionen bisher eingesetzter Materialien herangezogen werden, um gewünschte Zieleigenschaften für eine bestmögliche Kabinenwand zu erreichen.

Teilaufgaben:

1. Analyse des getesteten Funktionsmodells bezüglich der Wirkung von Teilkomponenten auf die gemessenen Kabinenwand-Eigenschaften unter Zurückführung auf eingesetzte Halbzeug-Eigenschaften.
2. Identifikation möglicher Schwachstellen.
3. Definition ergänzender Halbzeug-Eigenschaften zur Realisierung verbesserter Teilkomponente des Kabinenwandaufbaus zur Erreichung der definierten Zielsetzung.

Arbeitsergebnis:

1. Dokumentation der Teilkomponenten-Analyse in Bezug auf verwendete Halbzeug-Eigenschaften.
2. Bericht über mögliche Schwachstellen.
3. Definition ergänzender Halbzeug-Eigenschaften für ein finales Optimum aller Komponenten
4. Für den Fall einer Nichterreichung der Projektziele (vgl. Abbruchkriterium Kap 1.2): Analyse der kritischen Materialeigenschaften sowie weiterer Hinderungsgründe.

AP 1.5 Definition von Komponentenoptimierungen

Dieses AP zielt darauf ab, für ein finales Optimum eines Kabinenwandaufbaus identifizierte Schwachstellen zu analysieren, die durch zuvor durchgeführte Tests und/oder weitere theoretische Betrachtungen erkennbar wurden. Daraus sollen Empfehlungen für eine weitere Verbesserung der Kabinenwandeigenschaften definiert werden. Identifizierte Optimierungsbedarfe für eine Verbesserung von einzelnen Halbzeug-Eigenschaften werden in AP 1.4 weiter bearbeitet. Hier liegt der Fokus auf einer Optimierung von Materialanordnungen und/oder Bauweisen von Kabinenwandkomponenten, was z.B. auch eine Technik zur Hybridintegration von z.B. Schallminderungselementen oder Systembauteilen ausmachen kann. Ebenso könnten Fragestellungen für eine aufwandsminimierte Einbauweise der Kabinenwandkomponenten zu bearbeitet werden. Die Ergebnisse werden dann in AP 1.1, AP 1.2 und AP 1.3 aufgenommen und weiterverwendet.

Teilaufgaben:

1. Schwachstellen-Analyse getesteter Funktionsmuster bezüglich der Wirkung von Teilkomponenten auf die gemessenen Kabinenwand-Eigenschaften.
2. Identifikation von Maßnahmen zur weiteren Optimierung der Kabinenwand.

Arbeitsergebnis:

1. Dokumentation der Schwachstellen-Analyse von Kabinenwandkomponenten
2. Bericht über definierte Optimierungsmaßnahmen.
3. Definition eines bestmöglichen Kabinenisolationskonzeptes zur Erfüllung der Zielsetzung
4. Für den Fall einer Nichterreichung der Projektziele (vgl. Abbruchkriterium Kap 1.2): Analyse der kritischen Komponenteneigenschaften sowie weiterer Hinderungsgründe.

HAP 4

Aerogelmaterialien und Komponentenherstellung

AP 4.2 Charakterisierung der Halbzeuge und Funktionsmuster

Hergestellte Halbzeuge und Funktionsmuster werden im Akustiklabor und in Klima-Akustikkammer der HAW Hamburg mit Blick auf akustische und thermische Eigenschaften experimentell untersucht. Gemessene Parameter werden mit theoretischen Daten verglichen, Abweichungen werden analysiert und beschrieben.

Teilaufgaben:

1. Messung akustischer Eigenschaften im Impedanzrohr und im Transmissionsprüfstand.
2. Messung thermischer Isolationseigenschaften im Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer.
3. Intensive Beratungen mit den Projektpartnern.

Arbeitsergebnis:

1. Bericht über analysierte akustische Messdaten mit Empfehlungen für mögliche Modifikationen
2. Bericht über analysierte thermische Isolationseigenschaften mit Empfehlungen für mögliche Modifikationen

HAP 5

Integration der Einzelkomponenten in eine Kabinenwand, Optimierung, Validation

AP 5.1 Erweiterte Integrations- und Testtechnologien

In diesem Arbeitspaket werden auch im Dialog mit Airbus durchzuführende Testaufgaben wie Messungen von Kabinenwandeigenschaften während simulierter Flüge und Funktionstests integrierter Systemkomponenten festgelegt. Für die erforderlichen Messungen werden z.B. geeignete Integrations- und Testverfahren für einen Funktionsnachweis eines Kabinenwandausschnitts in Transmissionsfenstern für die Schall-, Wärme- und Feuchteisolation definiert. Dabei sind Messgeräte und Verfahren auszuwählen, die lokale Eigenschaften wie Schallpegel, Temperatur, Luftfeuchte, Wassergehalt und Eisbildung innerhalb des Kabinenwandausschnitts sowie Parameter auf dessen Kabinenseite (Kabinensimulationskasten) und dessen Flugzeugaußenseite während eines simulierten Fluges zeitaufgelöst bei definierten Testbedingungen aufnehmen.

Im zweiten Abschnitt der hier durchzuführenden Arbeiten werden Messgeräte und Verfahren für Messungen im A320-Rumpfabschnitt mit eingebautem Kabinenwandprototyp im Vergleich zum gegenwärtigen Kabinenwandstandard bei festgelegtem Testprogramm (Testbedingungen, Testdurchführung) definiert.

Teilaufgaben:

1. Definition der Testprogramme für Funktionsmodell und Prototyp einer Kabinenwand
2. Definition von Integrations- und Testverfahren sowie zugehörige Sensoren und Messgeräte
3. Intensive Beratungen mit den Projektpartnern und Airbus

Arbeitsergebnis:

1. Dokument über Testpläne für Funktionsmuster und Prototyp
2. Dokument über definierte Integrations- und Testtechnologien.

AP 5.2 Integration Funktionsmuster / Prototyp in Demonstratoren

Nach Erhalt von Kabinenwandkomponenten wie Isolierpakete, Kabinenwandpaneele, Luftführungskanäle, Schallminderungselemente, Kabinenwandhalterungen, Schwingungsentkopplungselemente etc. werden Funktionsmuster und analog der Prototyp zusammengebaut und in vorhandene Prüfstände eingesetzt. Ebenso werden an vordefinierten Stellen der Testaufbauten ausgewählte Sensoren und zugehörige Messketten installiert. Anschließend wird die eingebaute Messtechnik in Betrieb genommen und mit Blick auf Funktionalität überprüft. Gegebenenfalls werden Korrekturen durchgeführt.

Teilaufgaben:

1. Integrationsarbeiten an Funktionsmustern und des Prototyps.
2. Installation der vorgesehenen Messtechnik in Funktionsmuster und Prototyp.
3. Überprüfung der installierten Messtechnik.
4. Definition und Fertigung spezieller Adapter (ggf. über Unterauftragnehmer), die für den Einbau der Funktionsmuster und des Prototyps in die Prüfeinrichtungen erforderlich sind.

Arbeitsergebnis:

1. Für die Testdurchführung fertiggestellte Funktionsmuster und Prototyp.
2. Fertiggestellte Adapter für die Testdurchführung.
3. Bericht über die durchgeführten Integrationsarbeiten.
4. Dokument über die Messaufbauten mit Darstellung der eingesetzten Messtechnik.

AP 5.3 Durchführung von Messungen

In diesem Arbeitspaket werden die zuvor definierten Funktionsmustertests und Prototypentests durchgeführt. Die erhaltenen Messdaten werden ausgewertet und in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern analysiert. Optimierungspotenziale werden herausgearbeitet und in einer weiteren Vermessung verbesserter Funktionsmuster nachgewiesen.

Teilaufgaben:

1. Durchführung der geplanten Messungen an vorbereiteten Messaufbauten mit installierten Funktionsmustern.
2. Auswertung und Analyse der durchgeführten Messungen.
3. Optimierungsarbeiten mit erneuter Charakterisierung und Auswertung.

Arbeitsergebnis:

1. Dokumentationen der durchgeführten Messungen und Auswertungen sowie Darstellung der Optimierungsarbeiten bei Funktionsmustern
2. Dokumentation der durchgeführten Messungen am Prototyp und zugehörige Auswertungen

AP5.4 Auswertung, Validation und Dokumentation

Zum Abschluss der Arbeiten werden die erzielten Messergebnisse mit Vertretern von Airbus und Diehl diskutiert und final bewertet. Weiterführende Entwicklungsarbeiten werden dabei definiert und vorgeschlagen.

Alle Ergebnisse im Zusammenhang mit Definition, Auslegung und theoretischen Beschreibungen der Funktionsmuster und des Prototyps werden in einem Abschlussbericht zusammengefasst und dokumentiert.

Teilaufgaben:

1. Dokumentation über die Besprechungsergebnisse mit Airbus und Diehl
2. Erarbeitung und Darstellung vorgeschlagener weiterführender Entwicklungsarbeiten
3. Verfassen des Abschlussberichts

Arbeitsergebnis:

1. Abschlussbericht mit allen Dokumentationen der Ergebnisse durchgeführter Arbeiten.

1.6 Aufgaben- und Zeitplan

Aufgaben	Kooperation/ Infoaustausch	Ergebnisse	Zeitraum, Meilensteine, Kosten											
			2020				2021				2022			
			I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
AP 1.1 Definition neuer Systemarchitekturen	DLR, Novicos, Airbus, Diehl	Parameterraum, Eigenschaften verfügbarer Aerogelmaterialien, Literaturrecherche, Bericht (B)				B								
AP 1.2 Definition Funktionsmuster / Prototypen	DLR, Novicos, Airbus, Diehl	Kabinenwandkonzepte, theor. Analysen Wirkpotenziale, Definition Materialeigenschaften, Auswahl beste Konzepte, Berichte				B		B			B			
AP 1.3 Auslegung Funktionsmuster / Prototyp	DLR, Novicos, UzK, Airbus, Diehl	Potenzialanalysen Aerogelmaterialoptimierung, Definition Halbzeugeigenschaften, Kabinenwandkonzepte ausgewählt. M1: Funktionsmuster für Fertigung ausgelegt				B			B		B			
AP 1.4 Definition ergänzender Halbzeugeigenschaften	DLR, Novicos	Messplan, Dokumentation Messaufbauten, Durchführung der Messungen und Ergebnisse.				B			B					
AP 1.5 Definition von Komponentenoptimierungen	Novicos, DLR	Dokumentation def. Funktionsmuster, Messplan, Messaufbauten M2: Eigenschaften Funktionsmuster erfüllt Zielsetzung				B				B			B	
AP 4.2 Charakterisierung Halbzeuge	DLR, Novicos	Dokumentation Messdurchführung, Ergebnisse und Optimierungsarbeiten, Abschlussbericht				B			B		B			
AP 5.1 Erweiterte Integrations- und Testtechnologien		Messplan, Dokumentation Messaufbauten, Durchführung der Messungen und Ergebnisse.				B		B						
AP 5.2 Ingration Funktionsmuster in Demonstratoren		Dokumentation def. Funktionsmuster, Messplan, Messaufbauten				B			B		B			
AP 5.3 Durchführung von Messungen	DLR, Novicos	Dokumentation Messdurchführung, Ergebnisse und Optimierungsarbeiten, Abschlussbericht							B				B	
AP 5.4 Auswertung, Validation und Dokumentation	DLR, Novicos, UzK, Airbus, Diehl	Dokumentation Messdurchführung, Ergebnisse und Optimierungsarbeiten, M3: Abschlussbericht							B				B	
														M3

Die im Projektantrag dargestellte Aufgaben- und Zeitplanung (s.o.) war für einen Projektstart am 01.01.2020 ausgelegt worden. Da erst nach Vorliegen des Zuwendungsbescheids am 27.10.2020 die im Vorhaben benötigten wissenschaftlichen Mitarbeiter eingestellt werden durften, konnte das Vorhaben erst am 01.01.2021 begonnen werden. Gemäß Zuwendungsbescheid startete das Vorhaben bezogen auf dessen Eingangsdatum rückwirkend offiziell am 01.09.2020. Weitere Verzögerungen im Fortschritt des Vorhabens ergaben sich durch die COVID-19 Pandemie sowie durch die Folgen eines Hacker-Angriffs auf das IT-System der Hochschule und durch einen Personalwechsel eines wiss. Mitarbeiters und einer 4 Monate späteren Nachbesetzung der WiMi-Stelle. Der Arbeits- und Zeitplan wurde zwischendurch gemäß den realen Situationen mehrfach angepasst. Mit Bezug zum 01.09.2021 ergab sich insgesamt ein zeitlicher Verzug der Projektarbeiten von etwa 6 Monaten, der aber durch Genehmigung einer kostenneutralen Projektverlängerung um diese Zeitdauer ausgeglichen werden konnte. Hierdurch konnten alle im Projektantrag dargestellten Ziele in vollem Umfang erreicht werden.

1.7 Zusammenarbeit mit Projektpartnern

Die geplanten Arbeiten wurden, wie in den Arbeitspaketen ersichtlich, teilweise in Zusammenarbeit mit dem DLR, der Universität zu Köln und Fa. Novicos durchgeführt. Ein informeller Kontakt zu Airbus wurde zur Orientierung für eine Auswahl erstellter Konzepte und Nachweisführung genutzt.

1.8 Notwendigkeit der Zuwendung

Die Zuwendung war notwendig, um das hohe wissenschaftlich-technische Risiko abzumildern, die Projektreichweite zu vergrößern und um Innovation und Technologietransfer durch die Hochschule zu fördern. Im Allgemeinen ist es sehr schwierig, effiziente niederfrequente Schallisolierungen unter der Erfüllung der im Flugzeugbau genannten unumgänglichen Randbedingungen und hohen Anforderungen zu realisieren. Die von der HAW Hamburg in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse sind grundlegend und unverzichtbar, um zu innovativen Lösungen in Bezug auf akustisch günstige Bauweisen für eine Kabinenisolation zu gelangen (Innovation), die nun in praktische Anwendungen umgesetzt werden sollen (Technologietransfer). Ohne Förderung konnten die Arbeiten nicht wie geplant umgesetzt werden. Eine alternative Durchführung der Arbeiten im Direktauftrag ist für ein Unternehmen zu risikobehaftet und somit für das Unternehmen nicht darstellbar. Mit dem Projekt konnte das zukunftssträchtige Technologiefeld Flugzeugbau weiter ausgebaut, Nachwuchsforscher und –entwickler ausgebildet und die Kompetenz der HAW Hamburg weiter gesteigert werden.

1.9 Zusammenfassung Ergebnisse

In diesem Vorhaben wurden spezielle Helmholtz-Biegebalken-Resonatoren und Streifenlast-Metamaterialien, die zur Gruppe der plattenähnlichen akustischen Metamaterialien (PAM) gehören, zum Aufbau eines Luftkanals verwendet. Die genannten Schallminderungselemente wurden bereits in vorangegangenen Forschungsvorhaben jeweils einzeln konzipiert, als Funktionsmuster realisiert und sowohl theoretisch als auch experimentell charakterisiert. Schwerpunkt dieses Vorhabens war eine Integration dieser Schallminderungselemente in einen Luftkanal, der als ein multifunktionales Element ausgelegt, realisiert, in seinen Eigenschaften optimiert und in eine originalgetreue A320-Flugzeugseitenwand eingebaut wurde. Dieser neuartige Wandaufbau wurde in Prüfständen der HAW Hamburg akustisch und hygrothermisch unter realistisch nachgestellten Reiseflugbedingungen charakterisiert. Dazu wurden ein Akustiklabor und ein mit einer Kabineneinrichtung ausgestatteter A320-Teilrumpf in einer Klima-Akustikkammer verwendet.

Ziel 1: Erhöhung der Schallisolation um 5dB für $f < 1000\text{Hz}$.

Messdaten ergaben im Frequenzbereich zwischen 500 und 1000 Hz eine breitbandige Erhöhung der Schallisolation eines hergestellten Kabinenwand-Prototyps von etwa 5 dB.

Ziel 2 & Ziel 3: Hinreichende Wärmeisolation und erheblich verbesserte Feuchteisolation zur Vermeidung von Feuchte Kondensation in der thermischen Isolierung bzw. Eisbildung an der Innenwand der Rumpfstruktur.

Für diese Zielsetzungen wurden die hygrothermischen Eigenschaften der mit dem Luftkanal aufgebauten neuen Kabinenwand theoretisch und experimentell analysiert und optimiert. Mit Hilfe einer wasserdampfundurchlässigen Luftkanalwand (kabinenseitig orientiertes Metamaterial 1) und einer wasserdampfdurchlässigen Luftkanalwand (zur Rumpfaußenseite orientiertes Metamaterial 2) konnte eine deutliche Reduktion der Luftfeuchtigkeit im äußeren Kabinenwandbereich nachgewiesen

werden. Durch Einstellung der zugeführten Kabinenlufttemperatur am Einströmbereich der Luft in die Luftkanäle konnte eine aufgrund des Luftkanalplatzbedarfs verminderte Glasswollpaketdicke thermisch vollständig ausgeglichen werden.

Ziel 4: Architektur des neuen Wandaufbaus im Einklang mit den Bauraumverhältnissen eines realen Passagierflugzeugs und mit einer einfachen Integrationsweise zum vorhandenen Luftverteilungssystem der Klimaanlage

Die geometrischen Eigenschaften des neuen Kabinenwandaufbaus sind vollständig kompatibel mit den z.B. in einer A320 Flugzeugseitenwand verfügbaren Platzverhältnissen. Auch die kritischen Wandabstände der an den Luftkanälen angebrachten Metamaterialen zu Rumpf und Seitenwandpaneel, bei denen deren akustische Wirksamkeit einbrechen würde, sind durch eine einfache Einbautechnik leicht vermeidbar. Am Beispiel eines originalen, mit einer Kabineneinrichtung ausgestatteten A320-Teilrumpfes konnte gezeigt werden, dass der neue Kabinenwandaufbau mit seiner gewählten Architektur in die Seitenwand eines Passagierflugzeuges eingebaut werden kann. Ebenso lassen sich mittels einfacher Lufteinspeiseadapter die Luftkanäle an das Luftverteilungssystem anschließen. Die Architektur der Kabinenluftauslässe ist im Vergleich zum heutigen Stand der Technik deutlich einfacher, weil eine Querschnittswandlung der Luftführung überflüssig wird. Der Einbau von Strömungsblenden für eine abgestimmte Luftzufuhr in die Kabine, um Längsströmungen im Kabinenbereich zu vermeiden, lässt sich sowohl im Bereich der Luftauslässe oder akustisch noch vorteilhafter am Lufteinspeiseadapter realisieren. Damit werden die Anforderungen der gewünschten Kabinenbelüftung erfüllt.

Ziel 5: Angestrebter Technologiereifegrad 5

Gemäß J.C. Mankins, Technology Readiness Levels: A White Paper. NASA (1995) müssen zum Nachweis des Technologiereifegrades 5 „experimentelle Studien in *realistischer Umgebung*“ erfolgreich durchgeführt worden sein. Dieses ist durch Verwendung von originalen Rumpfstrukturelementen sowie eines Teilrumpfes eines A320 Flugzeugs in der Klima-Akustikkammer mit jeweils zugehörigen originalgetreuen Kabinenwandkomponenten (Glaswollpakete, Seitenwandpaneel) und den erzielten Ergebnissen unter akustischer Anregung und den in einem realen Flug herrschenden Temperatur und Feuchtebedingungen vollständig nachgewiesen.

Ziel 6: Aerogelmaterialien mit verbesserten akustischen und thermischen Eigenschaften als Ersatz der Glaswollisolation in heutigen Flugzeugen

Die von DLR und Uni zu Köln entwickelten Aerogel-Isoliermatten zeigten im Vergleich mit herkömmlichen Isoliermatten aus Glasswolle bei gleicher Dicke und Frequenzen unterhalb von 1000 Hz eine deutlich höhere Schallabsorption und wiesen zugleich eine höhere thermische Isolation auf. Allerdings konnte die Dichte der Aerogelmatten, die trotz vieler Bemühungen im Vergleich mit Glaswollmatten etwa 12 mal höher ausfällt, nicht weiter reduziert werden. Ein großflächiger Einsatz dieser Aerogele im Flugzeugbau wird daher von der Luftfahrt nicht akzeptiert werden. Dennoch bietet dieses Material aufgrund seiner guten akustischen und thermischen Eigenschaften für spezielle kleinvolumige Bereiche in einer Flugzeugkabinenwand ein Verbesserungspotenzial an. Näheres s. Abschlussberichte von DLR und Uni zu Köln.

Die im HAW-Teilvorhaben EIKABIN angestrebten Ergebnisse konnten aber durch ausschließliche Verwendung von Glaswollmatten erarbeitet und vollständig erreicht werden.

2. Technische Ergebnisse

2.1 HAP 1: Definition und Auslegung einer neuartigen Kabinenwand

AP 1.1: Definition neuer Systemarchitekturen

A. Anforderungen und Randbedingungen für den Einbau von Systemkomponenten im Kabinenwandbereich

In gegenwärtigen Verkehrsflugzeugen sind im Bereich der Kabinenseitenwand verschiedene Systemkomponenten eingebaut. Diese sind im Wesentlichen

Steigrohre des Luftverteilungssystems der Klimaanlage und Kabinenluftauslässe,

- Leitungen für den Notsauerstoff bei einem Druckgassauerstoffsystem (für ein chem. Notsauerstoffsystem keine Sauerstoffleitungen)
- Leitungen für Frisch- und Abwasser im Bereich von Bordküchen (Galleys) oder Toilettenmodulen bei Passagierflugzeugen mit zwei Kabinenetagen wie bei A380
- elektrische Leitungen für das Beleuchtungssystem

sowie

- elektrische Leitungen und elektronische Komponenten des CIDS-Systems.



Abbildung 2.1: A320 Kabine (Montagezustand), Systemkomponenten im Kabinenwandbereich: zu erkennen sind Luftverteilung Klimaanlage (Steigrohre, Luftauslässe), Verkabelung und Elektronikboxen des CIDS-Systems (DEUA / DEUB). (Quelle Airbus)

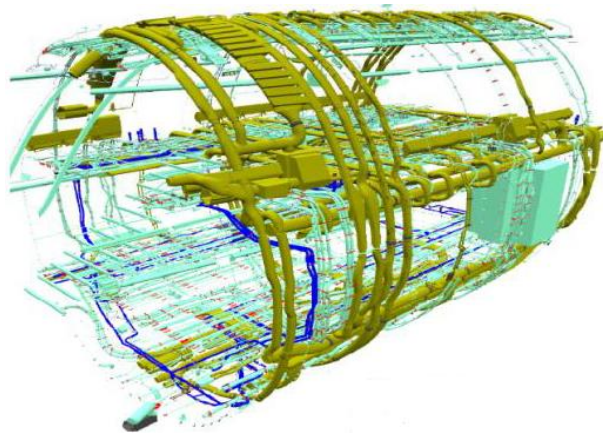


Abbildung 2.2: A380, Skizze für Systemkomponenten im Seitenwandbereich: Luftverteilung Klimaanlage (braun), Wasser/Abwasser (blau), Beleuchtungssystem (grün), (Quelle Airbus)

Für die Systeme selbst und deren Integration in den Kabinenwandbereich müssen eine Reihe physikalisch/technische als auch ökonomische Gesichtspunkte in Betracht gezogen werden. Nachfolgend sind nur diejenigen Randbedingungen dargestellt, die durch die spezifischen Eigenschaften des Einbauraums einer Flugzeugseitenwand vorgegeben werden:

- **Verfügbares Einbauvolumen**

Der verfügbare Einbauraum für Systemkomponenten zwischen Flugzeugrumpf und Kabinenseitenwandpaneel sowie jeweils zwischen den Rumpfspanten richtet sich nach deren geometrischen Dimensionen. Der Abstand der Doppelwand ist insbesondere im Fensterbereich deutlich geringer (typisch etwa 5 - 6 cm) als im Spantbereich (je nach Flugzeugtyp etwa 12 – 25 cm). Als Beispiel sind für ausgewählte Airbus-Flugzeuge folgende Maße für den Einbauraum maßgeblich: A320 – (Spanthöhe 9,5 cm, Stringerhöhe 3 cm), A340 – (Spanthöhe 11,5 cm, Stringerhöhe 3 cm), A380 (Spanthöhe 23,5 cm, Stringerhöhe 4 cm). Die Montageelemente zur Befestigung der Seitenwandverkleidungen an den Spanten bedingen, dass der Abstand zur Rumpfschale um ca. 2,5 cm größer ist als die Höhe der Rumpfspante. Die in die Seitenwand eingebaute Glaswollisolierschicht zur thermischen Isolation schränkt den verfügbaren Einbauraum für Systemkomponenten zusätzlich ein.

- **Thermische und feuchtebezogene Eigenschaften im Doppelwandvolumen**

- Innerhalb der Doppelwand werden im Reiseflug in großen Flughöhen der Taupunkt sowie auch der Gefrierpunkt von Wasser deutlich unterschritten. Im Durchschnitt werden an der Flugzeugrumpfhaut -30°C und an dem Seitenwandpaneel der Kabine $+20$ bis $+24^{\circ}\text{C}$ gemessen. Die Luftfeuchtigkeit in einer Flugzeugkabine stellt sich im Reiseflug auf Werte zwischen 5% und 15% ein, je nachdem wie viele Passagiere in den entsprechenden Kabinenabschnitten Platz genommen haben. Die in den Wandbereichen herrschende Luftfeuchtigkeit kann dort, wo der Taupunkt unterschritten wird, kondensieren bzw. es kann sich im äußeren Wandbereich unterhalb von 0°C Eis bilden. Die Lage der kritischen Temperaturpunkte hängt bei geg. hygrothermischen Bedingungen von den Eigenschaften des verwendeten Isoliermaterials und von den lokalen geometrischen/strukturellen Verhältnissen in der Doppelwand ab. Dabei sind insbesondere die Abstände zu Rumpfstrukturelementen wie Spant, Hautfeld oder Stringer sowie deren lokale Temperaturverhältnisse von Bedeutung.

- Bei elektrischen Leitungen ist eine gute Isolation gefordert, um eine Gefahr von Kurzschlüssen durch Feuchtigkeit zu vermeiden. Wasserleitungen müssen so ausgelegt (thermische Isolation der Rohre, ggf. zusätzlich Beheizung der Leitungen) und installiert werden, dass ein Einfrieren des Leitungswassers ausgeschlossen werden kann.

- **Vermeidung möglicher Beeinflussungen der akustischen Wandeigenschaften durch Einbauten**

Beim Einbau von Systemkomponenten in eine Flugzeugseitenwand kann es dort zu unerwünschten Beeinträchtigungen der akustischen Eigenschaften kommen. Beispielsweise müssen Schallbrücken zwischen Rumpfstruktur und Kabinenwandverkleidung vermieden werden sowie auch durch Vibrationsanregung entstehende Klappergeräusche. Weiterhin ist es erforderlich, dass Strömungsgeräusche strömungsmechanischer Systemkomponenten, bei denen es schlimmstenfalls auch zu Tonanregungen kommen kann, vermieden werden.

- **Brandschutz**

Systemkomponenten, die in eine Seitenwand eingebaut werden sollen, müssen geltende Brandschutzvorschriften erfüllen. Das heißt, dass die Bauteile nicht entzündbar bzw. selbstverlöschend sein müssen und bei Feuer auch keine giftigen Gase emittieren dürfen.

- **Geringstmögliche Arbeitsaufwände bei Ein- und Ausbau**

Bei Fertigungs- und Wartungsarbeiten soll der damit verbundene Zeit- und Arbeitsaufwand so gering wie möglich bemessen sein, um die resultierenden Kosten auf ein Mindestmaß zu begrenzen. Vorzugsweise soll zukünftig zunehmend eine weitgehend automatisierbare Montage der Systemkomponenten durch Roboter möglich sein.

- **Vibrationspegel und Schocklasten**

Die Befestigung von Systemkomponenten in einer Seitenwand muss die in den spezifischen Anforderungen festgelegten Schwingungspegel und Schocklasten erfüllen. Hierzu müssen genügend starke Halterungen verwendet und geeignet feste Montagepunkte ausgewählt sein, deren Abstände voneinander bezüglich der zu erwartenden Vibrationen für die betreffenden Systemkomponenten unterschiedlicher Massen und Steifigkeiten ausgelegt sein müssen.

Prüfvorschriften (RTCA DO 160, ABD 100)

In der Luftfahrtindustrie gelten spezielle Vorschriften für die Zuverlässigkeit von Komponenten und Bauteilen. Geräte und Systeme müssen z.B. gemäß des Standards RTCA DO-160 geprüft werden. Alle Luft- und Raumfahrtshersteller müssen die Anforderungen dieser Norm erfüllen, um sicherzustellen, dass ihre Ausrüstung in der Luft ordnungsgemäß funktioniert. Dabei spielt der Einbauort bei der Kategorie der Testbedingungen eine entscheidende Rolle. Zusätzlich gilt bei Airbus die Vorschrift ABD 100.

Die Prüfanforderungen in der Vorschrift DO-160 sind in verschiedene Sektionen gegliedert, in denen für jeweils einen physikalischen Parameterraum einer Systemumgebung Testanforderungen für

Systemkomponenten definiert sind. Dabei werden in Abhängigkeit vom Einbauort im Flugzeug, wo jeweils unterschiedlich starke Einwirkbedingungen eines betreffenden physikalischen Parameters auf eine Systemkomponente herrschen, differenzierte Testbedingungen dargestellt. Folgende Sektionen werden in der Prüfvorschrift DO-160 aufgeführt:

- Section 4.0 – Temperature and Altitude
- Section 5.0 – Temperature Variation
- Section 6.0 – Humidity
- Section 7.0 – Operational Shocks and Crash Safety
- Section 8.0 – Vibration
- Section 9.0 – Explosive Atmosphere
- Section 10.0 – Waterproofness
- Section 11.0 – Fluids Susceptibility
- Section 12.0 – Sand and Dust
- Section 13.0 – Fungus Resistance
- Section 14.0 – Salt Fog
- Section 15.0 – Magnetic Effect
- Section 16.0 – Power Input
- Section 17.0 – Voltage Spike
- Section 18.0 – Audio Frequency Conducted Susceptibility – Power Inputs
- Section 19.0 – Induced Signal Susceptibility
- Section 20.0 – Radio Frequency Susceptibility (Radiated and Conducted)
- Section 21.0 – Emission of Radio Frequency Energy
- Section 22.0 – Lightning Induced Transient Susceptibility
- Section 23.0 – Lightning Direct Effects
- Section 24.0 – Icing
- Section 25.0 – Electrostatic Discharge
- Section 26.0 – Fire and Flammability

Für Komponenten, die in eine Kabinenwand eingebaut werden sollen, müssen für mechanische und elektrische Systeme jeweils spezifische Tests aus dem vorstehenden Katalog erfolgreich durchgeführt werden.

Systeme mit Komponenten im Seitenwandbereich: Funktionsbeschreibung, erforderliche Systemmodifikationen bei Einführung der vorgeschlagenen neuen Seitenwand und Potenziale für eine Integration von Systemkomponenten

Eine Integration des in diesem Vorhaben untersuchten neuen Kabinenwandkonzepts erfordert Modifikationen an verschiedenen Systemen. Konkret werden in diesem Forschungsvorhaben Untersuchungen an einem Single Aisle Verkehrsflugzeug des Typs A320 vorgenommen, da auch Einbauten und Tests von prototypennahen Funktionsmustern in A320- Rumpfstrukturelemente bzw. in eine A320-Originalrumpfstruktur durchgeführt wurden. Folgende Systeme wurden betrachtet:

Klimaanlage

Die Klimaanlage hat als ein unverzichtbares Kabinensystem im Wesentlichen folgende Hauptaufgaben zu erfüllen: Temperaturregelung, Druckregelung, Belüftung mit definierten Komforteigenschaften unter Berücksichtigung von Hygienestandards, Partikelfilterung und Ozonkonvertierung eingeblasener Außenluft (Triebwerkszapfluft), Kühlung von Avionikgeräten im Fluge sowie Sauerstoffversorgung nach Notabstieg auf hinreichend niedrige Flughöhen. Die wesentlichen luftführenden Untersysteme/Komponenten sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Die dort dargestellten Klimapacks reduzieren Druck und Temperatur der von den Triebwerken einströmenden Zapfluft, die dann konditioniert in eine Mischkammer weitergeleitet wird, um

dort mit rezirkulierter Luft vermischt und anschließend über ein Luftverteilungssystem, das in der Flugzeugkabinenwand eingebaut ist, in die Kabine eingeleitet zu werden.

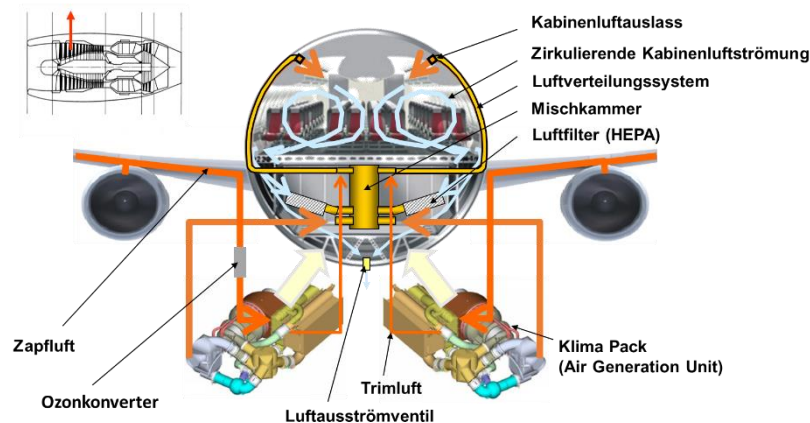


Abbildung 2.3: Skizze einer Klimaanlage für Passagierflugzeuge mit Darstellung luftführender Hauptkomponenten. Nicht dargestellt sind elektronische Controller.

Dabei ist der insgesamt in die Kabine einströmende Luftvolumenstrom über die Anzahl der Passagiere $\times 5,7 \text{ l/s}$ (gesetzlich festgelegter Luftvolumenstrom bei Normalbetrieb) bestimmt. Grundsätzlich muss eine mit vielen Passagieren besetzte Flugzeugkabine während eines Fluges gekühlt werden, um die dort emittierten Wärmeströme von Systemen und Passagieren über die durch die Kabine fließende Luftströmung abzuführen. Die einströmende Kabinenluft ist daher kühler als die mittlere Lufttemperatur in der Kabine.

Eine gewünschte Kabinenlufttemperatur lässt sich über Einstellungen im Klimapack und über heiße Trimmluft, die am Ausgang der Mischkammer dem Luftverteilungssystem geregelt zugeführt wird, erreichen. Um eine gewünschte Kabinenlufttemperatur auch in unterschiedlich dicht besetzten Kabinenzonen (First / Business / Economy Class) einstellen zu können, wird ausgehend von einer eingestellten Lufttemperatur am Mischerausgang für jede individuelle Kabinenzone eine unterschiedliche Menge Trimmluft in den entsprechenden Zweig des Luftverteilungssystems eingespeist. Die Kabinenluft strömt abluftseitig über Dado-Paneele am Fußbodenbereich der Kabinenseitenwand zurück in die untere Rumpfhälfte, wo ein Anteil (ca. 40%) über Luftfilter gereinigt, mittels Rezirkulationsgebläse in die Mischkammer gedrückt und dort unter Vermischung mit gekühlter Triebwerkszapfluft (Außenluft), deren Anteil etwa 60% ausmacht, in die Frischluftzufuhr zurückgeführt wird. Der nichtrezirkulierte Anteil (etwa 60%) der in den Frachtraum zurückfließenden Kabinenabluft strömt kontrolliert über zwei Luftausströmventile aus dem Flugzeug heraus, so dass damit ein gewünschter Kabinendruck eingestellt und konstant gehalten werden kann.

Für einen Einbau des neuen Kabinenwandkonzepts in ein Passagierflugzeug muss bei der Klimaanlage ausschließlich das Luftverteilungssystem angepasst werden. Dabei werden die serienmäßig vorhandenen Steigrohre durch Luftkanäle ersetzt, die in ihrer Breite so bemessen sind, dass sie die Fläche zwischen aufeinander folgenden Rumpfspanten und somit die Oberfläche der Kabinenwand nahezu vollständig abdecken. Im Bereich der Fenster teilt sich der Luftkanal in zwei Teilkanäle, die um die Fenster seitlich rechts und links herumgeführt sind, um diese anschließend wieder zu einem Luftkanal zusammenzuführen (Abbildung 2.4).

Als eine weitere Modifikation muss ein entsprechend geformtes Luftführungsteil eine Querschnittsgeometrieangepassung zwischen einem runden Luftführungsrohr (von der Mischkammer kommend) und dem rechteckigen Querschnitt des Luftführungskanals in der Flugzeugseitenwand gewährleisten (Abbildung 2.4). Vorzugsweise sind innerhalb dieses Adapters mehrere luftleitende Wandstrukturen eingebracht, die eine möglichst verwirbelungsarme und damit strömungsverlustarme Luftführung in den rechteckigen Querschnitt des Luftkanals möglich machen.

Für den Anschluss eines oberen Kabinenluftauslasses an die Luftzufuhr zum seitlich angebrachten Luftluftauslass wird eine Kanalverzweigung benötigt, die als Formteil in ähnlicher Weise wie die im gegenwärtig ausgeführten Steigrohr hergestellt und eingebaut sein kann.

Die Kabinenluftauslässe, die am Ende der rechteckförmigen Luftkanäle die Luftzufuhr in die Kabine in eine gewünschte Ausblasrichtung lenken, können eine deutlich einfachere innere und äußere Formgebung aufweisen, da dort keine Querschnittsanpassung der Luftführung wie beim Stand der Technik von einem Rohr auf einen rechteckförmigen Schlitz erforderlich ist. Diese ist bereits in dem oben beschriebenen Adapter bei der Lufteinspeisung in den Rechteckkanal stromaufwärtsseitig erfolgt. Entsprechend rechteckig geformte Mehrlochströmungsblenden, die in ihrer Lochanzahl individuell abgestimmt die lokal in die Kabine zuzuführenden Luftmengen begrenzen müssen, könnten wie üblich am Eintrittsbereich der Luftauslässe oder auch am Lufteinspeise-Adapter montiert werden. Eine gut abgestimmte Zu- und Abfuhr der Kabinenluft entlang der Kabinenwände ist erforderlich, um die Raumluftströmung in der Kabine nur über den Kabinenquerschnitt zu führen und Luftströmungen längs der Kabine zu vermeiden.

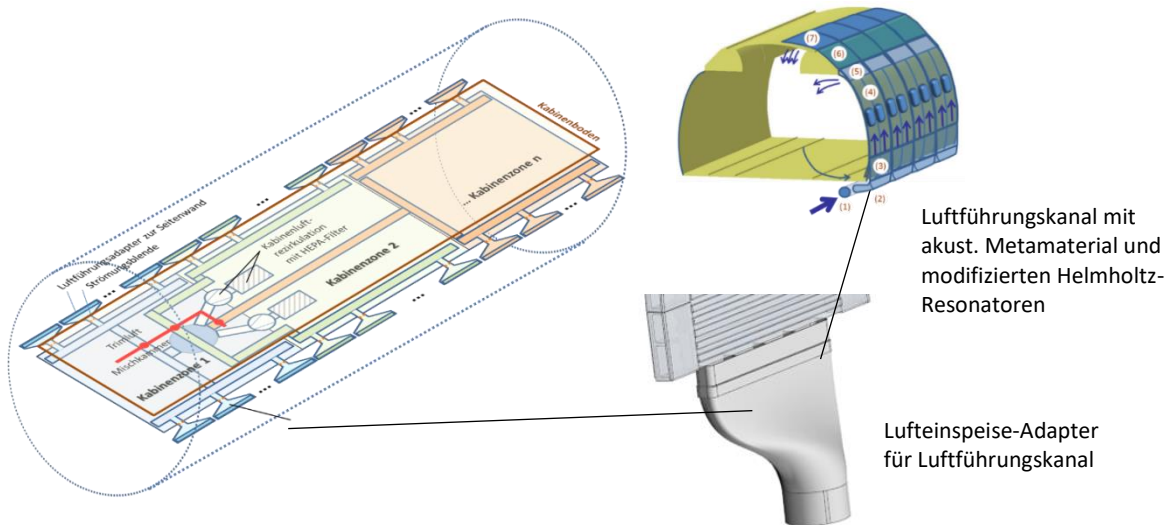


Abbildung 2.4: Zur Systemanpassung der Klimaanlage: Modifizierte Architektur der Luftverteilung im Bereich der Lufteinspeisung in Luftführungs Kanäle zur Klimatisierung der Kabine

Vorteile und Potenziale: Gegenüber dem Stand der Technik entstehen durch Verwendung des beschriebenen Luftkanals als Teil des Luftverteilungssystems in Flugzeugen eine Reihe von Vorteilen und Möglichkeiten:

- Einbaumöglichkeit von Schallminderungselementen, z.B. Metamaterialien, Helmholtz Resonatoren, mikroperforierte Absorber für eine effiziente, passive Schallreduktion in der Kabine
- Rückführung von in die Kabinenseitenwand eingedrungener Luftfeuchtigkeit in die Kabine
- Kühlung der in die Kabine einströmenden Frischluft durch deren kontinuierliche Wärmeabgabe über die außenseitige, breitflächige Luftkanalwand in Richtung Flugzeugumpfstuktur mit dem Potenzial einer Einsparung von Energie und damit verbunden eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs bzw. der CO₂-Emission.

Erklärung: Wie bereits beschrieben muss eine mit vielen Passagieren besetzte Flugzeugkabine durch einen einfließenden Luftstrom gekühlt werden. Die am Ausgang der Mischkammer einzustellende Temperatur der dort ausströmenden Luft richtet sich nach der Kabinenzone mit dem höchsten Kühlbedarf. Alle anderen Kabinenzonen werden durch Hinzufügen von heißer Trimmflucht weniger stark gekühlt, so dass dort eine gewünschte Kabinenlufttemperatur eingestellt werden kann. Die beschriebene Luftaustrittstemperatur am Ausgang der Mischkammer hängt von der Kühlleistung des

Klimapacks und dem Anteil der rezirkulierten Luftmenge ab. Wie bereits beschrieben beträgt standardmäßig der Anteil des rezirkulierten Luftvolumenstroms 40% der insgesamt in die Kabine einströmenden Luftmenge. Dieser rezirkulierte Luftstrom wurde zuvor durch die Kabine erwärmt und wird in der Mischkammer durch die kalte Packluft wieder abgekühlt. Erhöhte man den Anteil des rezirkulierten Luftstroms, müsste bei gleichen Temperaturanforderungen in der Kabine die Kühlleistung des Packs erhöht werden.

Beim hier untersuchten neuen Kabinenwandkonzept hingegen könnte infolge der Luftstromkühlung in der Kabinenwand durch die Wärmeabgabe über den breitflächigen Luftkanal nach außen nun entsprechend die Packleistung über einen reduzierten Zapfluftstrom gesenkt werden. Der eingesparte Zapfluftstrom käme der Schubleistung des Triebwerks zugute, wodurch sich Kraftstoff einsparen ließe. Heute lässt sich bereits bei einem rezirkulierten Anteil von 40% des der Kabine zugeführten Luftstroms etwa 2% des für eine Flugstrecke benötigten Kraftstoffs einsparen, den man sonst ohne Rezirkulation der Kabinenluft zusätzlich benötigen würde. Nebeneffekt: Durch einen erhöhten Rezirkulationstrom der Kabinenluft würden sich in den Kabinenzonen entsprechend höhere rel. Luftfeuchtigkeiten einstellen, die den Reisekomfort für die Passagiere erhöhen würden.

Nachteile:

- Eventuell erhöhter Aufwand bei der Fertigung einer Flugzeugkabinenwand durch zusätzlich zu fertigende Komponenten. Der Einbauaufwand ins Flugzeug hängt ab von der Integrationstiefe der einzubauenden Komponenten.
- Ggf. könnte sich je nach Verwendung geeigneter Materialien die Gesamtmasse der Flugzeugkabine geringfügig erhöhen.
- Bei der Konditionierung der Kabine nach einem längeren Aufenthalt am Boden bei extrem niedrigen und sehr hohen Außentemperaturen muss die Kabinentemperatur innerhalb einer halben Stunde entsprechend aufgeheizt oder abgekühlt werden, um eine beim Boarding übliche passagierfreundliche Kabinentemperatur zu erreichen (Auslegungsbedingung für die Klimapacks). Hier würde eine höhere Systemleistung mit einem höheren Energiebedarf erforderlich werden, der aber ggf. über bodengebundene Systeme der Flughafeninfrastuktur umweltfreundlich bereitgestellt werden müsste, wenn kein zusätzliches Kerosin genutzt werden soll.

B. CIDS – Cabin Intercommunication Data System

Das CIDS ist das zentrale digitale Datenübertragungs- und Datenmanagementsystem für die Kabinenbesatzung, um alle Kabinenfunktionen zu steuern. Es ist unverzichtbar, um die Passagiere mit Informationen zu versorgen und einen Beitrag für ihren Komfort und Sicherheit zu gewährleisten. Mit dem CIDS wird die Beleuchtung (Notbeleuchtung, Kabinenbeleuchtung, individuelle Leselampen) gesteuert, es dient der Kommunikation mittels „Service Interphone“ und beleuchteter Anzeigen, es zeigt EVAC Signale für eine eventuelle Evakuierung an und gewährleistet alle Funktionen für die Passagiere. Zudem wird über das CIDS Boarding Musik abgespielt, es produziert automatische Ansagen für die Passagiere und dient der Besatzung mittels eines interaktiven Anzeige- und Bediengerätes (Flight Attendance Panel – FAP) zur zentralen Steuerung und Überwachung der Kabinensysteme.

Das CIDS wurde bereits 1988 eingeführt und verband zum ersten Mal alle Kabinensysteme und deren Funktionen über ein rechnergestütztes Kommunikationsnetz, das wegen seines modularen Aufbaus auch für eine Erweiterung neuer Funktionen geeignet war. So konnte z.B. das Smoke Detection System nachträglich integriert werden. Über dieses Kommunikationsnetz können Informationen an die Passagiere direkt vom Cockpit aus, z.B. beleuchtete Anzeigen für „no smoking“ oder „fasten seat belts“, geschaltet werden, während passagierbezogene Dienst- und Komfort Funktionen von der Kabinen Crew bedient werden. Zusätzlich können aber auch vom Cockpit aus Kabinenfunktionen wie z.B. die Temperatur in den verschiedenen Kabinenzonen gesteuert werden. Obwohl das CIDS zu den nicht sicherheitskritischen Systemen eines Flugzeuges zählt, trägt es doch erheblich zur Passagiersicherheit bei.

Das System (vgl. Abbildung 2.5) wird durch zwei zentrale Computer (Director 1 und 2) gesteuert, von denen einer im aktiven Modus arbeitet und der andere im Stand-by Modus darauf wartet, im unwahrscheinlichen Fall eines Systemversagens von Director 1 die Steuerung der Systeme zu übernehmen. Die Kommunikation zwischen Director und der Kabine - den Passagier und Crew Systemen - wird über eine Anzahl in das Übertragungsnetz eingebauter, elektronischer Systemkomponenten, den Decoder-Encoder Units (DEUs) realisiert. Diese empfangen die in der Kabine erzeugten Informationen und konvertieren sie in einen binären Code für den Director und übersetzen den Signalfloss auch in umgekehrter Richtung. Die sog. DEU A sind in verteilter Weise entlang der oberen Kabinenseitenwand (cabin top lines) eingebaut (vgl. Abbildung 2.6) und die DEU B entlang der Kabinenmittellinie. Die Systemarchitektur ist für alle Airbus Flugzeuge sehr ähnlich.

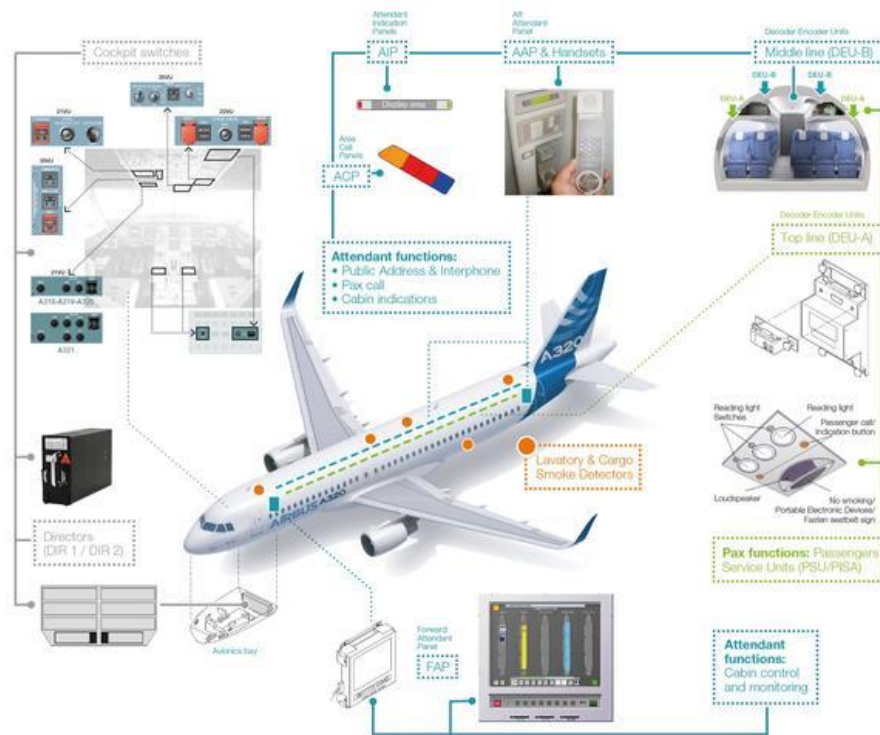


Abbildung 2.5: Das CIDS im prinzipiellen Aufbau mit wichtigsten Komponenten und Funktionen (Quelle Airbus)

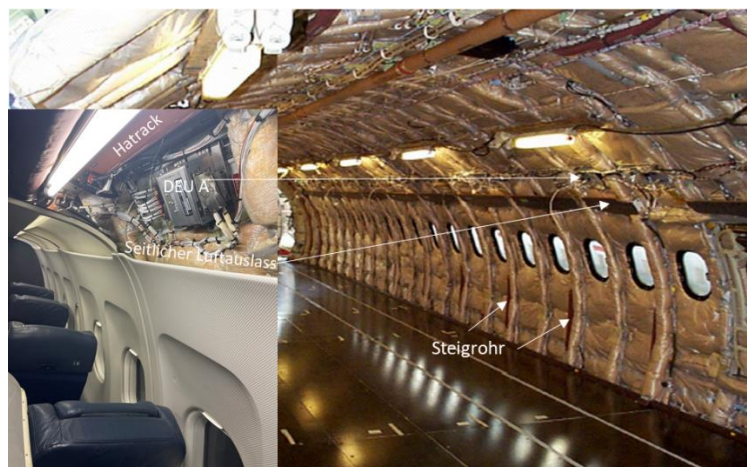


Abbildung 2.6: A320 Kabine mit und ohne Verkleidungselemente. Zu erkennen sind die unteren Luftauslässe und die zugehörigen Steigrohre des Luftverteilungssystems der Klimaanlage sowie bereits installierte elektrische Leitungen mit DEU A –Boxen des CIDS. (Quelle Airbus)

Systemmodifikation

Für eine Integration der in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Luftkanäle und zugehörigen akustischen Schallminderungselementen sollten für die im oberen Seitenwandbereich standardmäßig installierten Verkabelungen und DEU A-Boxen geänderte Einbauorte gefunden werden. Hintergrund ist der Platzbedarf des Luftkanals in der Kabinenseitenwand, der einen Einbau der gegenwärtigen CIDS-Komponenten schwierig gestalten könnte.

Hierzu wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht. Dabei ist grundsätzlich eine Miniaturisierung der DEU A Boxen von großem Vorteil mit Blick auf das erforderliche Einbauvolumen. Grundsätzlich gilt dabei: Je kleiner das Volumen, desto flexibler gestaltet sich eine Ortswahl für den Einbau.

a) Verlegung der CIDS-Komponenten in einen Kanal unter die Hatracks

Unter den Hatracks sind Bedieneinheiten für Passagiere wie die Ruftaste des Kabinenpersonals („Pax Call“), Leselampen ein-/ausschalten etc. sowie Lautsprecher und beleuchtete Info- und Gebotszeichen, Monitore etc. in einem Kanal, der als PSU – Passenger Service Unit bezeichnet wird, eingebaut. Diese Elemente müssen mit den DEU A Modulen verbunden werden. Würden nun die im oberen Seitenwandbereich standardmäßig installierten CIDS-Elemente (cabin top lines) dort integriert werden, wäre das Raumproblem in der Seitenwand gelöst.

Vorteil/Potenzial: räumliche Nähe aller Bedien- und Anzeige-Komponenten und der CIDS-Verbindungsleitungen. Damit verbunden kann ein kleiner Anteil der Verbindungskabel eingespart werden.

Nachteil: höherer Aufwand bei Änderungen des Kabinen Layouts. Hierbei müsste dann ggf. die Verkabelung der CIDS top line geändert werden.

b) Bauraumgenerierung im kabinenwandseitigen Hatrack-Bereich

Gegenwärtig werden die CIDS-Kommunikationsstränge mit den DEU A Boxen in einen Bauraum zwischen unterem Hatrack-Bereich und Rumpfstruktur eingebaut, wobei die DEU A Boxen zwischen den Rumpfspanten tief in der Kabinenwand eingebaut sind. Die Kabelstränge selbst sind auf den Rumpfspanten befestigt und beanspruchen keinen Bauraum zwischen ihnen. Würden die DEU A Boxen wie auch die Kabelstränge außerhalb der Spante installiert werden, müsste ggf. die Hatrack-Geometrie entsprechend angepasst werden, so dass die Rückwand der Hatracks entsprechend nach innen geformt wird.

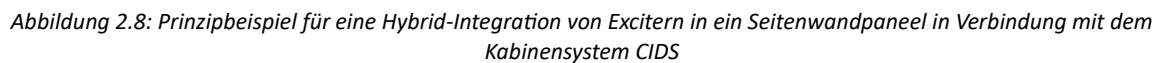
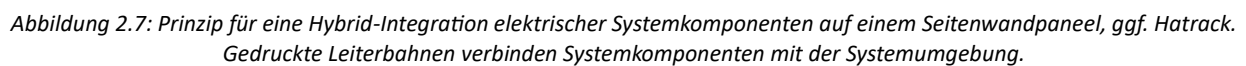
Vorteil/Potenzial: Die Installation der CIDS-Kommunikationsstränge kann mit einem geringen Änderungsaufwand nahezu identisch bleiben.

Nachteil: Das Volumen der Hatracks wird ggf. geringfügig kleiner.

c) Hybrid-Integration der CIDS-Komponenten auf die Rückseite der Seitenwandpaneele oder entsprechend bei den Hatracks

Die Grundidee für dieses Konzept besteht darin, elektrische Leiterbahnen auf die Rückseite von Seitenwandpaneelen oder auf den entsprechenden Rückseiten von Hatracks zu drucken, diese über deren Aufhängepunkte mit benachbarten, gleichermaßen bedruckter Kabinenbauteile zu verbinden, um an geeigneter Stelle die aufgedruckten Leitungen mit Systemkomponenten zu verbinden. Dabei sind Systemkomponenten wie z.B. eine DEU A auf einem Seitenwandpaneel oder Hatrack integriert und mit dem aufgedruckten Leitungsnetz verbunden. Die weitere Verbindung mit zentral im Flugzeug positionierten Avionik-Komponenten (z.B. Director) würde über eine definierte Übergangsstelle, bei denen aufgedruckte Leiterbahnen enden, mittels Kabelverbindungen hergestellt werden. Grundsätzlich wären auch andere Elemente anderer Systeme wie z.B. Lautsprecher oder auch Exciter für die Übertragung von Sprache und Musik und ggf. gleichzeitig für eine aktive Schallminderung auf der Rückseite von Seitenwandpaneelen oder Hatracks integrierbar (Abbildung 2.8). Ebenso könnten Bedienelemente, Anzeigen, Livebild-Fenstermonitore (Abbildung 2.9) zur Ermöglichung einer fensterlosen Kabine etc. in gleicher Weise auf die wie eine große „Platine“ wirkenden Kabinenstrukturen angebracht werden.

Abbildung 2.7 illustriert das beschriebene Konzept und zeigt Fotos über die damals aufgedruckten Leiterbahnen.



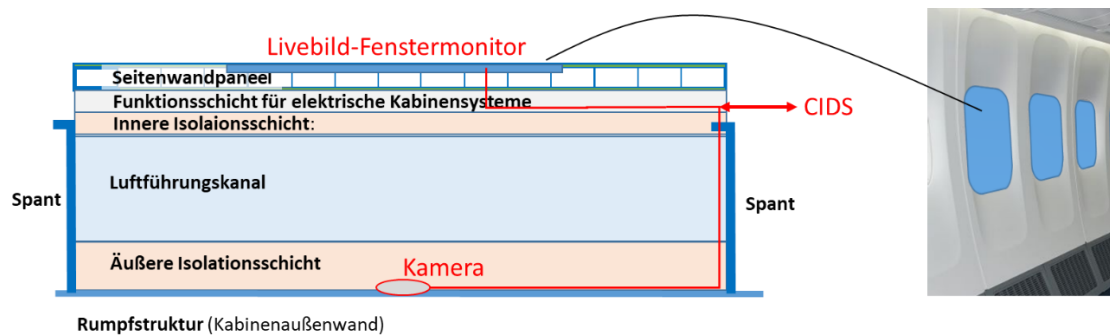


Abbildung 2.9: Prinzipbeispiel für eine Hybrid-Integration eines Livebild-Fenstermonitors in ein Seitenwandpaneel.

Vorteile / Potenziale: Eine Einsparung von Masse durch multifunktionale Nutzung von Kabinenstrukturkomponenten und eine einfachere und schnellere Installierbarkeit in der Endlinie im Flugzeugbau erscheint möglich.

Nachteile: Einzelne Komponenten werden komplexer und entsprechend teurer, was vor allem bei möglichen Reparaturen der Kabinenbauteile bzw. bei der erforderlichen Bevorratung von Ersatzteilen von Nachteil sein könnte. Die Realisierung dieses Konzeptes bedeutet einen vollkommen neuen Technologieansatz zu entwickeln, was auch gewisse Risiken beinhalten kann. Ein mögliches Risiko wird in der Sicherstellung einer funktionssicheren Verbindung bei der Übertragung elektrischer Signale über die Aufhängepunkte von Kabinenausstattungs-komponenten gesehen. Dieses Risiko könnte aber ggf. durch Systemkomponenten, die ihre Signale über Funkverbindungen übertragen, gelöst werden. Eine Stromversorgung über die Aufhängepunkte der Kabinenausstattungs-komponenten zu realisieren ist grundsätzlich deutlich robuster zu realisieren.

d) DEU A Boxen in die PSU integrieren, Verkabelung belassen

Eine Integration von DEU A Boxen in den PSU-Kanal würde das Raumproblem, das sonst bei Montage dieser Boxen in die Kabinenwand bei dort gleichzeitig zu integrierendem Luftkanal auftreten würde, prinzipiell lösen. Die Verkabelung könnte ggf. mit geringen Modifikationen wie bei der derzeitigen Installation belassen werden.

Vorteil / Potenzial: Ein relativ geringer Änderungsaufwand der Systemarchitektur erscheint realistisch.

Nachteil: Erhöhung des Komplexitätsgrades im PSU-Kanal, sowie ggf. Bedarf an entsprechend den dort räumlichen Verhältnissen anzupassenden, miniaturisierten DEU A Boxen, die noch entwickelt werden müssten.

Könnten die CIDS-Signale zwischen Director und DEU A über Funk übertragen werden, würde sich der Verkabelungsaufwand in der Kabine deutlich reduzieren. Es bräuchte dann lediglich eine Stromversorgung für die mit einem Sender und Empfänger auszustattende Elektronik der DEU A Boxen installiert zu werden.

Sauerstoff-System

Das Sauerstoff-System wird eingesetzt, um bei einem plötzlichen Druckabfall in der Kabine oder bei Rauchentwicklung eines Brandherdes die Passagiere mit Sauerstoff zu versorgen und diese somit vor dem Tod zu bewahren. In einer Notsituation fallen aus einer Box im PSU-Kanal oberhalb der Passagiere

Sauerstoffmasken herunter, die mit Schläuchen an eine Sauerstoffquelle angeschlossen sind, so dass Passagiere diese greifen und aufsetzen können. In Passagierflugzeugen werden häufig chemisch basierte oder mit Druckgas funktionierende Sauerstoff-Quellen eingebaut.

Die chemischen Systeme sind kompakte Einheiten, die in Form kleiner Kästen in dem PSU-Kanal integriert sind. Zur Aktivierung sind diese lediglich über eine elektrische Leitung an das Bordnetz angeschlossen. Diese Aktivierungsleitung hat keine Auswirkung auf eine Änderung des Seitenwandaufbaus für den Einbau des neuen Flachluftkanals.

Beim Druckgas Sauerstoffsystem sind Druckgasflaschen im vorderen Unterflurbereich untergebracht, von denen aus ein Sauerstoff-Leitungsnetz zu den einzelnen Sauerstoffmasken im Flugzeug verlegt ist. Dabei gibt es in einigen wenigen Seitenwandbereichen Steigleitungen, die den Sauerstoff vom Unterflurbereich nach oben zu den Maskenboxen im PSU-Kanal führen. Diese Leitung haben aber nur geringe Durchmesser (ca. 1 cm) und würden einen Einbau des in diesem Vorhaben untersuchten Luftkanals nicht beeinflussen.

Wasser-/Abwasser System

Das Wasser-/Abwasser System versorgt Bordtoiletten und Bordküchen mit Frischwasser bzw. entsorgt anfallendes Abwasser. Lediglich bei doppelstöckigen Passagierkabinen wie beim A380 oder der B747 sind wasserführende Leitungen in der Kabinenseitenwand des Kabinenbereichs installiert. Bei allen anderen Passagierflugzeugen sind derartige Leitungen nur im Unterflurbereich verlegt und haben daher keinen Einfluss auf eine Änderung des Kabinenseitenwandaufbaus. Bei den genannten sehr großen Flugzeugtypen sind im Kabinenseitenwandbereich des Hauptdecks Steigleitungen des Wasser-/Abwassersystems nur an sehr wenigen Wandabschnitten eingebaut. Nur für diese Sonderbereiche sind spezielle Anpassungen an die Elemente der neuartigen Seitenwand erforderlich.

AP 1.2: Definition Funktionsmuster / Prototypen

Für eine Erforschung der Eigenschaften des in den Vorüberlegungen beschriebenen neuartigen Kabinenwandkonzepts (vgl. Abbildung 1.4) unter realitätsnahen Bedingungen wurde zweistufig vorgegangen.

Im ersten Schritt wurde ein Kabinenwandausschnitt ohne Fenster theoretisch und experimentell analysiert, um grundsätzlich zu ermitteln, welche max. Potenziale für eine akustische und hygrothermische Isolation mit Hilfe eines dort entsprechend dem vorgeschlagenen Konzept vollflächig zwischen zwei aufeinanderfolgende Rumpfspanten integrierten Luftkanals erreichbar sind. Mit diesem durch Weglassen der Fenster vereinfachten Kabinenwandmodell, welches im Folgenden als *Funktionsmuster* bezeichnet wird, wurden erste Studien durchgeführt. Hieran sollte die grundsätzliche Realisierbarkeit verbesserter Kabinenwandeigenschaften nachgewiesen werden.

Im zweiten Schritt, für dessen Bearbeitung gemäß Abbruchkriterium des Vorhabens erfolgreiche Zwischenergebnisse einer deutlich gesteigerten Kabinenwandisolation vorausgesetzt waren, wurde ein größeres Kabinenwandmodell, das zusätzlich auch noch den Fensterbereich der Kabinenwand abbildet, in seinen Eigenschaften mit integriertem Luftkanal untersucht. Da bei diesem Kabinenwandausschnitt geometrisch originalgetreue Abmessungen des Kabinenwandaufbaus eingehalten, sowie alle relevanten technisch-physikalischen Randbedingungen berücksichtigt und dabei originale Flugzeugkomponenten (A320 Rumpfstruktur mit zugehörigen Glaswollisoliertpaketen und Kabinenwandpaneel) eingesetzt wurden, wurde der entworfene Aufbau als *Prototyp* bezeichnet.

A. Aufbau Funktionsmuster, Prototypen sowie Komponenten

Funktionsmuster

Das Funktionsmuster wurde weitgehend aus originalen Flugzeugkomponenten aufgebaut. Der Rumpfbereich wurde durch einen Ausschnitt aus einem A320-Rumpf (ohne Fensterbereich, s.u.) dargestellt, dessen Breite gerade ein Hautfeld zwischen zwei Flugzeugspanten plus seitlich angrenzenden Hautfeldstreifen aufwies, deren zusätzliche Streifenbreite einen Einbau in einen kleinen Transmissionsfensterrahmen möglich machte. Der weitere Wandaufbau des Funktionsmusters (Abbildung 2.10 bzw. Abbildung 2.11) bestand aus originalen Glaswollisoliertpaketen (amber-farbige Glaswolle eingewickelt in Terul 18-Folie) verminderter Anzahl, um innerhalb der Kabinendoppelwand Platz für einen selbstgefertigten Luftkanal mit Schallminderungselementen zu schaffen und einem einspantigem A320-Seitenwandpaneel, das aus verfügbarkeitsgründen mit nachgebauten Halterungen an der A320-Rumpfstruktur befestigt wurde (Abbildung 2.12). Der Luftkanal wurde aus akustischen Metamaterialien und Helmholtz-Resonatoren mit integrierten Biegebalken im Resonatorhals (8) aufgebaut. Zur Belüftung des Luftkanals mit konditionierter Luft wurden für experimentelle thermische Untersuchungen Belüftungsanschlüsse integriert.

Das Funktionsmuster wurde als ein kleinstmögliches Experimentalsystem konzipiert, um die grundsätzlichen Fragestellungen in hinreichend realistischer Umgebung bei minimalstem experimentellem Aufwand studieren zu können. Für derartige experimentelle Untersuchungen gibt es an der HAW Hamburg sowohl im Akustiklabor als auch bei der Klima-Akustikkammer jeweils ein gleich großes Transmissionsfenster der maximalen Größe von $1000\text{ mm} \times 1200\text{ mm}$, in die das Funktionsmuster mit den Abmessungen von $705\text{ mm} \times 1130\text{ mm}$ eingebaut und bezüglich akustischer und hygrothermischer Eigenschaften bei variierten Luftkanalkonfigurationen vermessen wurde.

Beim Referenzwandaufbau (Abbildung 2.10) wurde der Luftkanal aus dem Funktionsmuster entfernt und durch ein entsprechendes Glaswollpaket gemäß dem Stand der Technik entsprechenden Wandaufbau (vereinfachend 100 mm Glaswollstärke (vereinfachte Referenz) ersetzt. Die hiermit erzielten Messdaten wurden mit denen für das Funktionsmuster erhaltenen Daten verglichen.

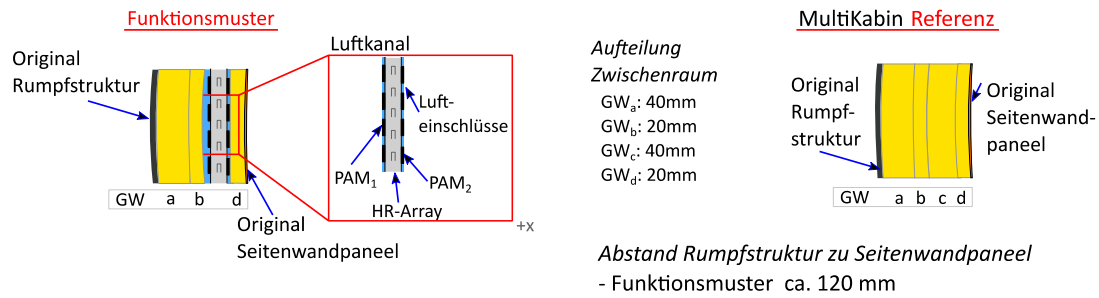


Abbildung 2.10: Schichtenweiser Aufbau experimentell untersuchter Kabinenwandkonfigurationen des Funktionsmusters, das ohne eine Flugzeugfensteröffnung vereinfacht aufgebaut ist

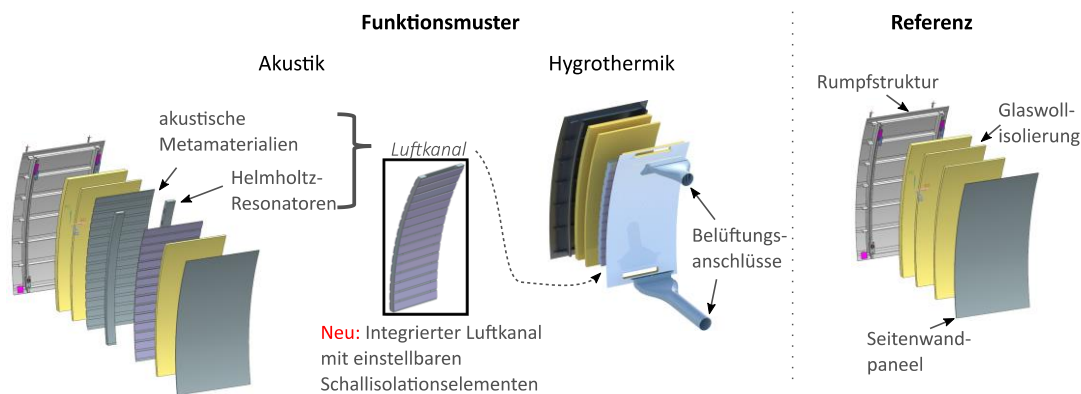


Abbildung 2.11: Schematische Darstellungen der einzelnen Komponenten im Funktionsmuster (links) sowie eines definierten Referenzwandaufbaus (rechts)

Die Verbindung des Seitenwandpaneels mit der Rumpfstruktur wurde mit einem in Eigenfertigung hergestellten Halterungssystem durchgeführt, da originale A320 Halterungskomponenten nicht in ausreichender Anzahl verfügbar waren. Es orientiert sich ihren entsprechenden Originalen wie es in Abbildung 2.12 dargestellt ist. Das Halterungssystem ist in zwei Komponenten aufgeteilt:

- Untere Halterung: Das Seitenwandpaneel wird über einen Schiebemechanismus in eine an der Rumpfstruktur angebrachte Führung eingeschoben.
- Obere Halterung: Das Seitenwandpaneel wird über eine Aufhängung an der Rumpfstruktur befestigt.

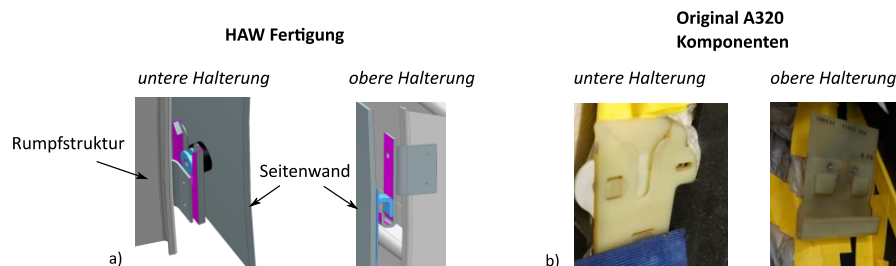


Abbildung 2.12: Darstellungen des nachgebauten Halterungssystems zur Verbindung des Seitenwandpaneels mit der Rumpfstruktur. a) Komponenten aus HAW eigener Fertigung, b) Beispiel eines originalen A320-Halterungssystems

Prototyp:

Für eine Berücksichtigung weiterer Effekte auf die akustische und hygrothermische Isolation einer Kabinenwand, wie z.B. des Einflusses einer Fensteröffnung oder Skalierungseffekte bei Laborversuchen, wurde ein Kabinenwandmodell mit größeren Abmessungen als die des Funktionsmusters definiert und aufgebaut, das, wie oben bereits begründet, als Prototyp bezeichnet wurde und die Abmessungen von ca. $1200\text{ mm} \times 1500\text{ mm}$ aufweist. Bei dieser Größe wurden ein entsprechend großer originaler A320-Rumpfstrukturausschnitt mit zwei Fenstern als Flugzeugaußenwand und ein standardmäßig eingesetztes Seitenwandpanel eines Flugzeugs der A320-Familie, das sich in seiner Breite über zwei nebeneinanderliegende Spantbereiche erstreckt und ebenfalls zwei Fenster enthält, als Innenwand verwendet. Im Zwischenwandbereich wurden originale Glaswollpakete sowie ein speziell für die geometrischen Gegebenheiten vor allem im Fensterbereich für die beiden Spantbereiche jeweils ein komplexer Luftkanal, bestehend aus akustischen Metamaterialien sowie speziellen Helmholtz-Resonatoren eingebaut. Schematische Darstellungen zum Prototyp werden in Abbildung 2.13 und Abbildung 2.14 gezeigt.

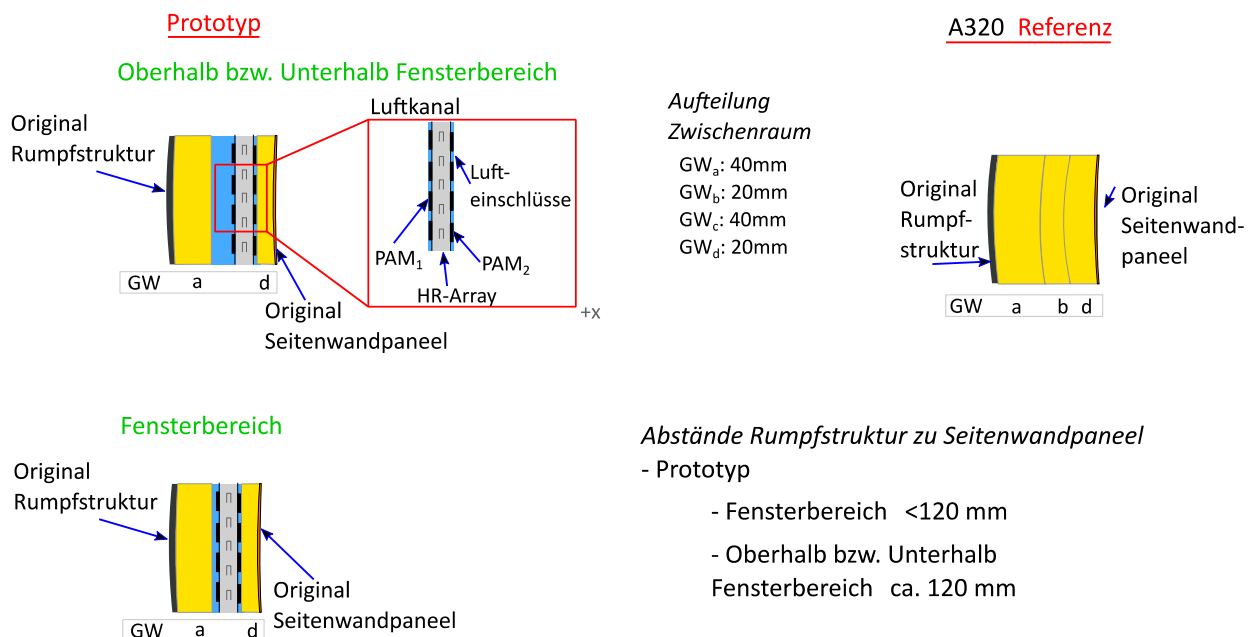


Abbildung 2.13: Schichtenweiser Aufbau experimentell untersuchter Kabinenwandkonfigurationen mit Flugzeugfensteröffnung des als Prototyp bezeichneten Kabinenseitenwandausschnitts

Der Wandaufbau im Bereich der Fenster erfordert für den Luftkanal aufgrund der geometriebedingten geringen Platzverhältnisse zwischen Fenstertrichter und links-bzw. rechtsseitigem Spant eine besondere Konstruktion, die einerseits einen nur geringen zusätzlichen Strömungswiderstand und andererseits dort eine möglichst hohe Schallisolation bietet. Wie in Abbildung 2.14 ersichtlich, wurde der zwischen den Spanten verlaufende breitflächige Luftkanal im unteren Bereich der Fenster durch strömungsgünstige Formteile in zwei Teil-Luftkanäle im Fensterbereich aufgeteilt, die oberhalb der links- bzw. rechtsseitigen Teil-Luftkanalabschnitte wiederum durch Formteile zu einem gesamten Luftkanal wieder vereinigt wurden. Die genannten Formteile, hergestellt aus Kunststoff durch ein additives Fertigungsverfahren, erfüllten einerseits durch ihre Hohlkammerbauweise die Anforderungen möglichst geringer Zusatzgewichte, andererseits wurden diese Hohlkammern durch abgestimmt eingebrachte Löcher als Helmholtz-Resonatoren mit definierten Resonanzfrequenzen ausgelegt, wobei ihre Formgebung für geringstmögliche Verwirbelungen der Luftströmung im Kanal sorgte. Gleichzeitig wurden die Formteile, welche im Wandaufbau für die Teil-

Kanalabschnitte miteinander verbunden wurden, als Träger für die Metamaterialien genutzt, die zusammen mit den Formteilen die Teil-Luftkanäle bildeten.

Zur Bewertung der geänderten Kabinenwandeigenschaften wurde als Referenzwand bei gleicher Rumpfstruktur und gleichem Kabinenwandpaneel der Kabinenwandzwischenraum nur mit Glaswollisolierung gefüllt, dessen Schichtendicke dem A320-Original entspricht (vgl. AP1.2, KKS-Labor).

Detailliertere Ansichten der einzelnen Komponenten werden im AP 1.3 anhand von 3D-CAD Modellen des Funktionsmusters sowie des Prototyps gegeben.

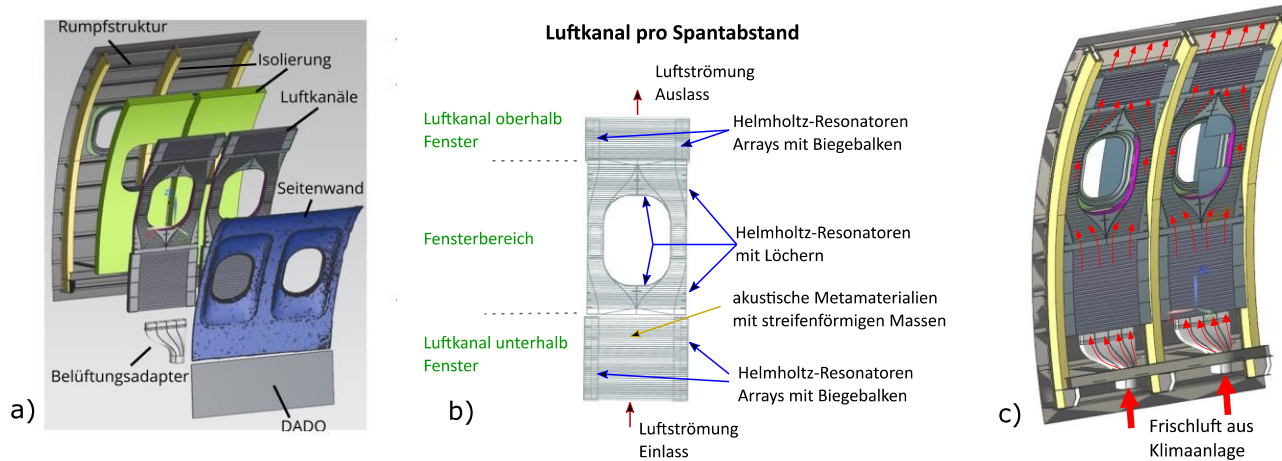


Abbildung 2.14: Schematische Darstellungen der einzelnen Komponenten im Kabinenwand-Prototyp: (a) Aufbau des Prototyps, (b) Luftkanal mit Schallminderungselementen, (c) Strömungsführung der Frischluft im Luftkanal

Die Befestigung der Seitenwand wurde mit dem in Abbildung 2.12 b) dargestellten originalen Halterungssystem eines A320-Flugzeugs durchgeführt.

B. Vorstudien

a. Schwerpunkt hygrothermische Isolation

Um die Wirkung des schon beschriebenen neuartigen Luftkanals, der in einer Flugzeug-Kabinendoppelwand integriert wurde, mit Blick auf die thermische Isolation durch die Wand und die Feuchtezustände innerhalb der Doppelwand zu untersuchen, wurde eine Versuchskampagne unter realistischen Temperatur- und Feuchtebedingungen, wie sie im Reiseflug auftreten, durchgeführt. Speziell sollte dabei die Fragestellung untersucht werden, welche Auswirkungen diffusionsoffene Luftkanalwände (Folien für das Metamaterial), bei einem vergleichsweise trockenen und auch erwärmten Luftstrom auf die Feuchtigkeitsverteilung innerhalb der Doppelwand haben und welche Temperaturprofile sich innerhalb der Wand einstellen.

Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Versuche wurde ein etwas vereinfachter Kabinenwandaufbau mit thermisch äquivalenten Bauteilen (Rumpfstruktur, Glaswollisolation, Seitenwandpaneel, vgl. Abbildung 2.16) in ein Messfenster der Klima-Akustikkammer im Labor für Kabine und Kabinensysteme (KKS-Labor) eingesetzt und kabinenseitig an eine selbstergestellte Einrichtung (Kabinensimulationskasten) zur physikalischen Simulation von Parametern der Kabinenbelüftung und des Kabinenklimas hermetisch dicht angeschlossen. Der Innenraum der Klima-Akustikkammer, der in direktem Wärmekontakt mit der Rumpfstruktur des Wandaufbaus steht, kann, wie im Reiseflug üblich, auf -30°C abgekühlt werden.

In

Abbildung 2.15 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

Um die Eigenschaften des Luftkanals bezüglich einer Diffusionsbarriere gegenüber Luftfeuchtigkeit zu bewerten, wurden im Kabinensimulationskasten hohe Luftfeuchtwerte eingestellt. Darüber hinaus wurde die Seitenwandverkleidung der Doppelwand durch eingebrachte rechteckige Löcher für eine Feuchtetransmission durchlässiger gemacht.

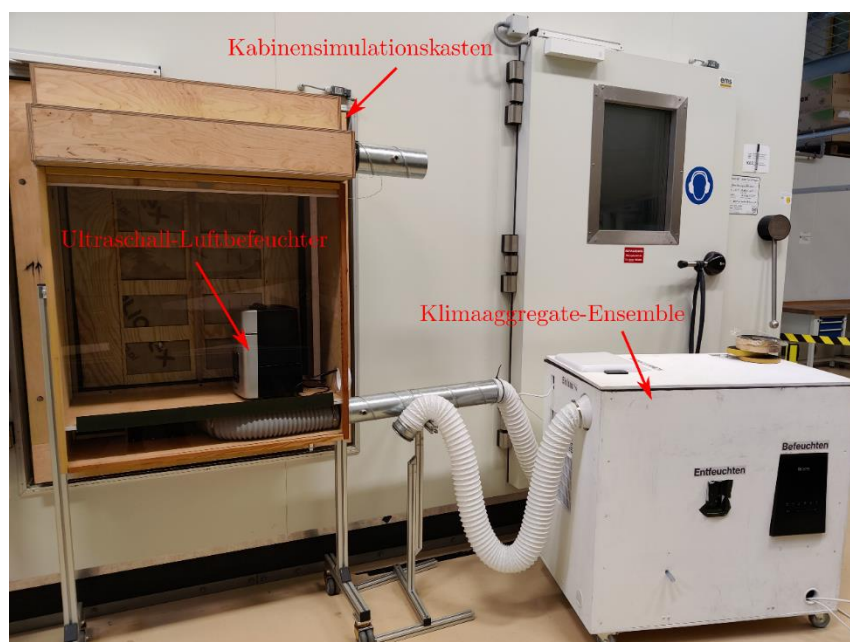


Abbildung 2.15: Versuchsaufbau eines Kabinenwand-Funktionsmodells im Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer mit vorgelagertem Kabinensimulationskasten und Klimaaggregaten

Der vereinfachte Kabinenwandaufbau besteht aus verschiedenen Komponenten, wie gezeigt in Abbildung 2.16 und beschrieben in Tabelle 2.1:

- Aluminiumplatte ohne strukturelle Verstärkung (1,5 mm dick)
- Zwei Glaswoll-Isoliermatten (Gesamtdicke ~ 6 cm), bzw. Basotect-Schaum (vgl. Tabelle 2.1)
- Luftkanal, begrenzt durch zwei feuchtigkeitsdiffusionsoffene Membranen (Membrandicke 0,5 mm)
- Lining mit rechteckigen Öffnungen, um die Diffusion von Feuchtigkeit aus der Kabinenumgebung zu ermöglichen

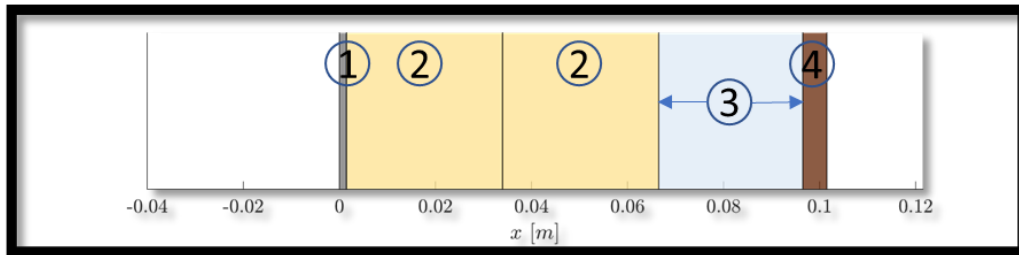


Abbildung 2.16: Querschnitt des Doppelwandaufbaus mit Lage und Dicke innerer Bereiche

Tabelle 2.1 Eigenschaften der doppelwandigen Komponenten

Schicht ID	Name	Dicke [m]	λ [W/mK]	μ [–]
1	Aluminium Struktur	0.0015	236	800
2	Glaswolle	0.0325	0.04	1
	Basotectschaum (versuch Nr. 5)	0.0325	0.035	-
3	Luftkanal (Diffusionsoffene Membranen)	0.0005	0.037	40
4	„Open Lining“	0.004	0.12	200

Um den Luftkanal mit einem konditionierten Luftstrom zu versorgen, wurde ein selbsterstelltes Klimaaggregate-Ensemble verwendet (

Abbildung 2.15). Innerhalb des Kastens befanden sich die folgenden Geräte:

- Klimagerät zur Einstellung der gewünschten Temperatur des Luftstroms
- Luftentfeuchter zum Erreichen niedriger relativer Luftfeuchtwerte im Luftkanal
- Axialventilator zur Erzeugung des gewünschten Luftvolumenstroms im Luftkanal

Im Inneren des Kabinensimulationskastens stellte ein Ultraschall-Luftbefeuchter eine gewünschte Luftfeuchtigkeit in der Kabine ein, die für die Vorstudien bei etwa 60 % relativer Luftfeuchtigkeit lag.

Zur Erfassung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in den einzelnen Schichten der Flugzeugkabinendoppelwand sowie an anderen kritischen Punkten des Systems wurden fünfzehn drahtlose Sensoren verwendet. An drei verschiedenen vertikalen Positionen wurden entlang eines horizontalen Querschnitts der Doppelwand jeweils vier verschiedene Sensoren angebracht, um die Profile von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit zu messen. Die übrigen Sensoren wurden im Inneren der Kabinenbox, am Einlass der Kabinenbox und am Auslass der Kabinenbox angebracht. Drei Thermoelemente wurden an der Innenseite des Rumpfes und eines an der Außenseite angebracht. Die Einlass- und Auslassgeschwindigkeit der Luft wurde mit zwei Hitzedraht-Anemometern kontrolliert. In Tabelle 2.2 sind die Eigenschaften der Messgeräte aufgeführt.

Tabelle 2.2 Merkmale der Messgeräte

Messgerät		Bereich	Auflösung	Genauigkeit
HWA (Hot Wire Anemometer)		0.1 - 25 [m/s]	0.01 [m/s]	± 5% +1d of the displayed value
CAO Gadget Drahtloser Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor	Temperatur	-40 to 125 [°C]	0.02 [°C]	± 0.4 [°C]
	Relative Luftfeuchtigkeit	0 to 100 [%]	0.12 [%]	± 2 [%]
Thermoelemente		/	1 [°C]	± 1 [°C]

Tabelle 2.3 zeigt die Bedingungen der Messversuche, um die Wandeigenschaften unter verschiedenen Bedingungen zu erfassen und später zu bewerten. Jeder Messversuch dauerte zwei Stunden, damit die Temperaturen im Wandverlauf (Temperaturprofil) unter dann mit Sicherheit erreichten Gleichgewichtsbedingungen nahezu zeitlich konstante Werte ergeben konnten.

Tabelle 2.3: Messversuche

Versuch Nr.	Beschreibung
1	Keine aktive Belüftung (Kanal nach außen und innen blockiert) mit GW-Isolierung
2	$Q_{Luft} = 35 \text{ m}^3/h$ im Kanal mit GW-Isolierung
3	$Q_{Luft} = 70 \text{ m}^3/h$ im Kanal mit GW-Isolierung
4	$Q_{Luft} = 35 \text{ m}^3/h$ und höheres T im Kanal mit GW-Isolierung
5	$Q_{Luft} = 35 \text{ m}^3/h$ im Kanal mit BT-Schaumisolierung

Wichtigste Ergebnisse

Die vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf die gemittelten Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsprofile während der letzten Stunde der Messungen. Darüber hinaus wird das wichtigste Ergebnis der Experimente erörtert, nämlich die Wirkung der Lüftung selbst und ihr Nutzen für die hygrothermischen Bedingungen innerhalb der Doppelwand.

Im Zwischenraum der Doppelwand (Abbildung 2.17 a) ist jeweils ein vertikaler Gradient in der Temperatur- und der relativen Feuchteverteilung zu erkennen. Aufgrund der geometrischen Öffnung in der Kabinenwand-Verkleidung und der Dampfdiffusionsfähigkeit der Luftkanal-Membran (Abbildung 2.16) kann die Feuchtigkeit ungehindert durch die Dämmschichten in den äußeren Wandbereich diffundieren und erreicht dort eine rel. Luftfeuchte von bis zu 70 %. Der untere Teil innerhalb der Doppelwand weist geringere Feuchtigkeitsniveaus auf, was einerseits auf eine dort niedrigere Temperatur zurückzuführen ist, die eine höhere Kondensation verursacht, und andererseits auf einen Lufttransport, bedingt durch natürlichen Auftrieb, der feuchte Luft (leichter als trockene) zum oberen Teil des Doppelwandzwischenraums hin anreichert.

In Abbildung 2.17 b) sind die Profile für den belüfteten Kanal dargestellt, und es ist zu erkennen, dass die vertikalen Gradienten für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit geringer sind als in Versuch 1. Aufgrund der konstant gehaltenen Temperatur der in den Luftkanal einströmenden Luft ist im Vergleich zum Versuch mit dem Luftkanal ohne Strömung die Temperatur im Inneren des Kanals höher und folgt dann meist einem linearen Verhalten durch die Isolierschichten. Die relative Luftfeuchtigkeit sinkt von 60 % im Inneren der Kabine auf etwa 40 % im Kanal und steigt zum Rumpf hin leicht an. Für dieses Verhalten gibt es zwei

Erklärungen: Aufgrund der höheren Temperatur ist der Dampfsättigungsdruck höher, was zu einer Verringerung der relativen Luftfeuchtigkeit beiträgt. Andererseits wirkt der konstante Luftstrom, der trockener als die Luft in der Kabine ist, wie eine "Barriere", die verhindert, dass Feuchtigkeit aus der Kabine in den äußeren Bereich der Kabinen-Doppelwand sowie an die Flugzeugrumpfstruktur gelangt. Außerdem konnte durch das Sammeln und Wiegen des am Rumpf angesammelten Eises ein Rückgang des Eises von ~19 Gramm bei Versuch 1 auf ~9 Gramm bei Versuch 2 beobachtet werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Versuchskampagne lassen den Schluss zu, dass der Einbau eines belüfteten Luftkanals in einer Kabinendoppelwand die Wärmeisolierung verbessern kann, indem die Temperatur im Spalt erhöht und die von der Kabinenseite kommende Feuchtigkeit abgehalten wird. Diese Kampagne diente in erster Linie dazu, die grundlegenden physikalischen Eigenschaften der neuen Kabinenwandkonstruktion zu verstehen; der Versuchsaufbau wies jedoch viele Vereinfachungen auf, wie z. B. das Fehlen einer strukturellen Verstärkung der Primärstruktur. Daher ist nun geplant, hygrothermische Messungen mit einer tatsächlichen Flugzeugrumpfstruktur durchzuführen, kombiniert mit einer Sandwichauskleidung aus Verbundwerkstoff und einem anderen Design für den Luftkanal. So wird beispielsweise der Einfluss einer Dampfsperre oder einer dampfoffenen Membran als Kanalwand eines der Hauptforschungsinteressen sein. Die Integration mit schalldämmenden Komponenten wie Helmholtz-Resonatoren oder Metamaterialien ist ebenfalls eines der Hauptthemen, die die folgenden Arbeiten prägen werden.

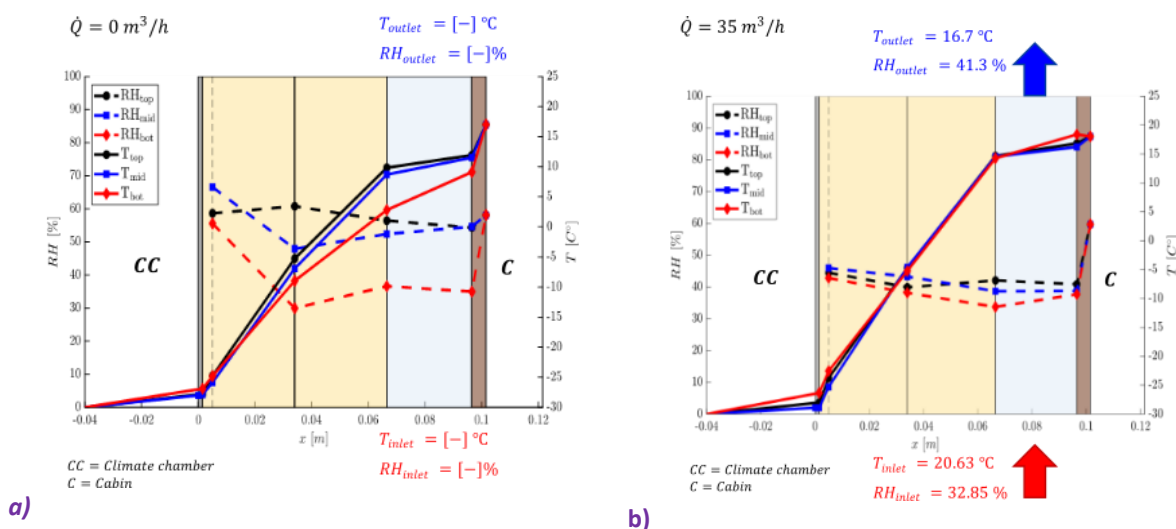


Abbildung 2.17: a) T- und RH-Profil für Versuch 1; b) T- und RH-Profil für Versuch 2

b. Schwerpunkt Akustik

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Masterarbeit durchgeführt, welche das Ziel hatte, die akustischen Schalltransmissionseigenschaften eines Flugzeugseitenwandaufbaus mit integriertem Luftkanal anhand von zwei unterschiedlich ausgelegten Funktionsmustern zu ermitteln.

Die Funktionsmuster mit den Außenabmessungen von ca. $1,0 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$ (passend für Transmissionsfenster im Akustiklabor) wurden zunächst durch theoretische Studien definiert, wobei der besondere Fokus bei der theoretischen Auslegung der Schallminderungselemente für eine höchste Wirksamkeit im integrierten Zustand in der Doppelwand bei tieferen Frequenzen $< 1000 \text{ Hz}$ lag. Diese Schallminderungselemente, die in Form von akustischen Platten-Metamaterialien („plate-type acoustic metamaterials, PAM“) und Helmholtz-Resonatoren (HR) definiert wurden, bildeten gleichzeitig in multifunktionaler Weise gemeinsam formgebend die Struktur des Luftkanals. Die akustischen Platten-

Metamaterialien bilden die Kanalwände parallel zu der Rumpfstruktur und dem Kabinenwandpaneel, sowie die Helmholtz-Resonatoren die Kanalwände parallel zu den Spanten der Flugzeugrumpfstruktur. Eine schematische Darstellung zweier unterschiedlich ausgelegter Funktionsmuster wird in Abbildung 2.18 gegeben.

Mit Hilfe theoretischer Modelle für die Funktionsmuster, für die u.a. die Transfer-Matrix Methode zum Einsatz kam, wurde bei festgelegter Doppelwandtiefe und unterschiedlichen geometrischen und akustischen Parametern des Luftkanals und seiner Position innerhalb der Doppelwand die resultierende Schalldämmung der gesamten Anordnung berechnet. Dabei wurden die Abstände des Luftkanals zu Außen- bzw. Innenwand und die Dicke des Luftkanals sowie die Resonanz- bzw. Antiresonanzfrequenzen der Helmholtz-Resonatoren und Metamaterialien variiert (vgl. Abbildung 2.18).

In Abbildung 2.19 werden exemplarisch die Ergebnisse dieser Studie gezeigt. Hier kann entnommen werden, dass die Genauigkeit der Positionierung des Luftkanals im Wandaufbau einen großen Einfluss auf dessen Schalltransmissionseigenschaften hat. Ebenfalls bewirken die Platten-Metamaterialien eine breitbandige Schalldämmmaßverbesserung im tiefen Frequenzbereich gegenüber einem Referenzwandaufbau mit Glaswollisierpaketen mit einer Tiefe von 10 cm.

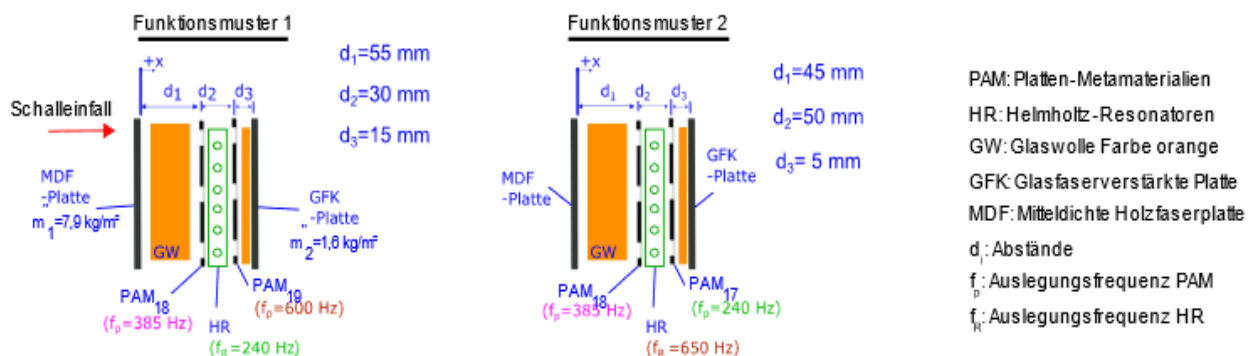


Abbildung 2.18: Schematische Darstellungen der in einer Vorstudie untersuchten Schalldämmeigenschaften generischer Doppelwandaufbauten mit integriertem Luftkanal

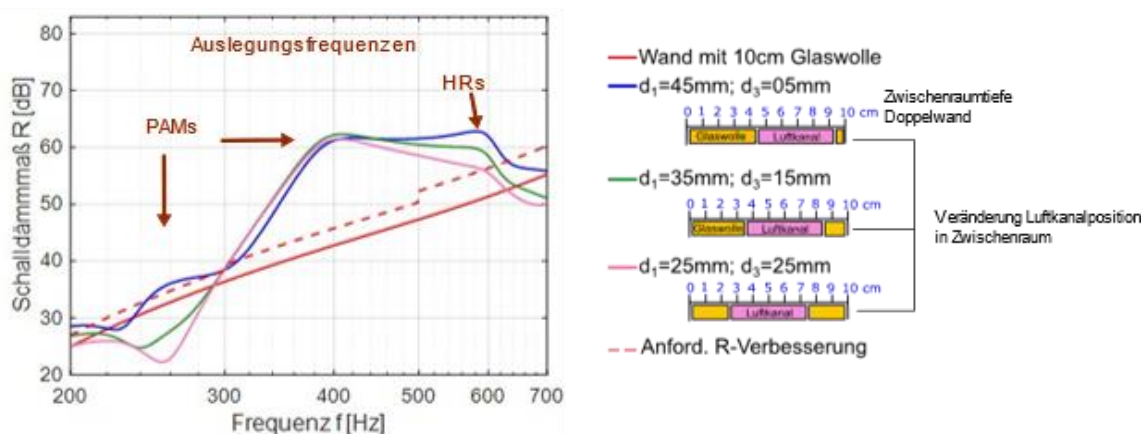


Abbildung 2.19: Berechnete Ergebnisse einer Studie zur Abschätzung von Schalldämmeigenschaften eines generischen Doppelwandaufbaus mit variierender Positionierung des Luftkanals im Doppelwand Zwischenraum. In die Berechnung integrierte Modelle akustischer Metamaterialien und Helmholtz-Resonatoren werden zur Identifizierung deren Wirkung hervorgehoben (Annahme senkrechter Schalleinfall).

Aus den Ergebnissen der theoretischen Untersuchungen wurden beide der in Abbildung 2.20 dargestellten Konfigurationen ausgewählt, als Funktionsmuster 1 und 2 angefertigt und später jeweils für Messzwecke in ein Transmissionsfenster des Akustik Labors der HAW Hamburg eingebaut. Wie dort dargestellt wurden zwei

unterschiedliche Luftkanäle ungleicher Kanaldicken d_2 mit auf verschiedene Frequenzen abgestimmten Metamaterialien und Helmholtz-Resonatoren hergestellt und an unterschiedlichen Positionen in der Doppelwand eingebaut.

Die Ergebnisse der akustischen Transmissionsmessungen mit den beiden unterschiedlichen Funktionsmustern zeigen frequenzabhängige Schalldämmmaßverbesserung bis zu einem Spitzenwert von ca. 5 dB gegenüber einem generischen, flugzeugmassenäquivalenten Wandaufbau mit Glaswolle (Abbildung 2.20). Durch geeignete Kombinationen der akustisch unterschiedlich eingestellten Schallminderungselemente konnte je Funktionsmuster eine entsprechende frequenzabhängige breitbandigere Schalldämmung im tieffrequenten Bereich erreicht werden.

Die Höhe der Schalldämmmaßverbesserung wird allerdings bei diesen Funktionsmustern durch einen schalldämmungsfördernden Massezuwachs gegenüber einem flugzeugmassenäquivalenten Wandaufbau mitverursacht. Für die nachfolgenden Arbeiten wurden daher Konzepte für eine Massereduktion der Funktionsmuster definiert und erprobt.

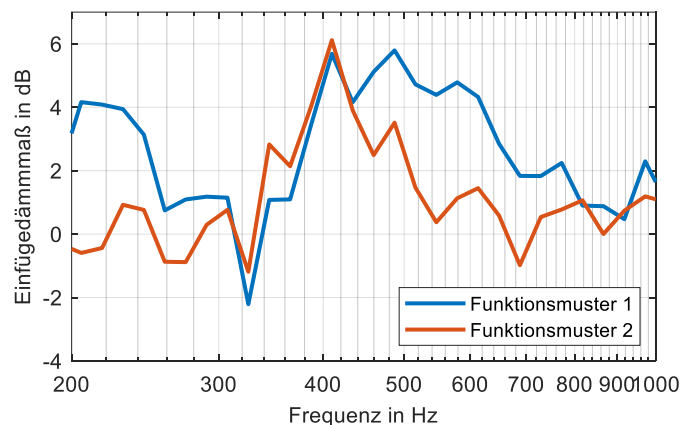


Abbildung 2.20: Darstellung der aus Schalltransmissionsmessungen ermittelten Einfügedämmmaße für Funktionsmuster 1 und Funktionsmuster 2 bezogen auf einen generischen, flugzeugmasseäquivalenten Referenzwandaufbau mit 10 cm Glaswollisolierung (basierend auf Messung bei diffusem Schalleinfall)

Des Weiteren wurde die Verwendung von mikroperforierten Schallabsorbern in dem hier betrachteten Wandaufbau untersucht. Ein mikroperforierter Absorber wandelt bei einer einstellbaren Resonanzfrequenz durch Reibungseffekte Schallenergie in Wärmeenergie um. Die Dimensionierung ist im Wesentlichen abhängig von der Auslegung von Geometrieparametern und somit nahezu unabhängig von der Werkstoffwahl. In Bezug auf hohe Anforderungen an in Flugzeugen eingesetzten Materialien können sich mikroperforierte Absorber als vorteilhaft erweisen. Eine theoretische und experimentelle Potentialabschätzung zur Wirkungsweise von mikroperforierten Absorbern in einem Wandaufbau mit integriertem Luftkanal wurde durchgeführt.

C. Schwerpunkt thermische Auslegungen

a. Auslegung Funktionsmuster

Randbedingungen

Im folgenden Abschnitt werden Temperatur- und Feuchtigkeitsprofile in der Doppelwand des Funktionsmusters bei erhöhter Kabinenluftfeuchtigkeit und erhöhter Temperatur der in den Luftkanal eingeblasenen Luft analysiert. Das Ziel in dieser Phase ist es, die Eigenschaften und das Verbesserungspotenzial der neuen Kabinenwand in einem erweiterten Temperatur- und Feuchtigkeitsbereich der angrenzenden Kabine zu untersuchen, so dass mit Hilfe deutlicher messbarer Sensitivitätsanalysen bezüglich der Temperatur- und Feuchteverteilungen innerhalb der Kabinenwand sichere Erkenntnisse über die diesbezüglichen Unterschiede zu einer Referenzwand gewonnen werden können.

Abbildung 2.21 zeigt die Größen, die als Randbedingungen für theoretische und experimentelle Untersuchungen an Funktionsmuster- und Prototyp-Wandaufbauten sowie an deren Referenzwänden verwendet werden.

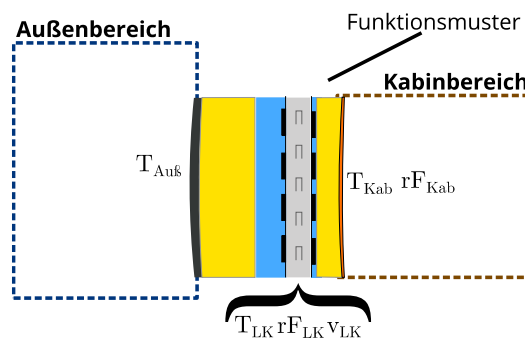


Abbildung 2.21: Verwendete Größen als Randbedingungen für hygrothermische Untersuchungen an Funktionsmuster- und Prototyp-Wandaufbauten sowie an deren Referenzwänden

Tabelle 2.4 zeigt die gewählten Werte für die Auslegung der Funktionsmuster. Der Außentemperaturwert $T_{Auß}$ wurde auf -30°C gesetzt, um die äußeren Flugbedingungen während der Reiseflugphase zu simulieren. In der Kabine stellen die Werte T_{Kab} und rF_{Kab} Bedingungen dar, bei denen die relative Luftfeuchtigkeit künstlich auf bis zu 60 % erhöht wird, um den Komfort der Passagiere zu verbessern. Im Inneren des Luftkanals hingegen sind die hygrothermischen Werte T_{LK} und rF_{LK} so eingestellt, dass die Temperatur etwas höher ist als in der Kabine und die relative Luftfeuchtigkeit sehr niedrig. Die Luftströmungsgeschwindigkeit v_{LK} im Luftkanal beträgt $1,8 \text{ m/s}$, was einem Luftstrom $Q_{Luft,LK} = 70 \text{ m}^3/\text{h}$ entspricht, einem Wert, der die Anforderungen der CS 25.831 (13) für den Luftaustausch in der Kabine erfüllt.

Für die Analyse dieses Modells wurde beschlossen, die aufgeführten Randbedingungen nicht zu verändern, sondern statische Bedingungen zu berücksichtigen, die für die Reiseflugphase eines kommerziellen Fluges repräsentativ sind.

Tabelle 2.4: Randbedingungen für Funktionsmuster

Parameter	Werte
$T_{Au\beta}$	$-30^{\circ}C$
T_{LK}	$22^{\circ}C$
rF_{LK}	25 %
v_{LK}	1.8 m/s
T_{Kab}	$20^{\circ}C$
rF_{Kab}	60 %

Analytische Bewertung des Wärmestroms durch die Doppelwand

Die Einfügung eines Kanals mit einer großen Wärmeaustauschfläche in die Doppelwand der Kabine führt zu erheblichen Veränderungen in der Wärmebilanz. Ein eindimensionales analytisches Modell auf der Grundlage der Matrixnotation wurde verwendet, um eine vorläufige Bewertung der Unterschiede zwischen dem Funktionsmuster und der Referenzwand vorzunehmen (Theoretisches Modell vorgestellt in (14)). An jedem Knotenpunkt i zwischen zwei verschiedenen Schichten wird die Temperatur anhand der folgenden Energiebilanz berechnet:

$$T_j \left(\frac{1}{R_j} + \frac{1}{R_{j+1}} \right) - \frac{T_{j-1}}{R_j} - \frac{T_{j+1}}{R_{j+1}} = 0 \quad (2.1)$$

Die zur Berechnung der Wärmewiderstände R_j der einzelnen Materialien verwendeten Parameter sind in Abschnitt G dieses Kapitels angegeben. Der konvektive Wärmeaustausch aufgrund der turbulenten Strömung im Luftkanal wird mit Hilfe der Nusselt-Zahl Nu berechnet, die die Berechnung des äquivalenten Wärmewiderstands des Luftstroms ermöglicht. Das analytische Modell wurde dann auf die beiden Konfigurationen Funktionsmuster und Referenzwand angewendet, die im Folgenden kurz beschrieben werden:

- Funktionsmuster: der Beitrag zur Wärmeübertragung aufgrund der turbulenten Strömung im Luftkanal wird ebenfalls in die Widerstandsmatrix aufgenommen. Die Nusselt-Zahl Nu wird berechnet und ermöglicht die Abschätzung eines Ersatzwiderstandes.
- Referenz: Die konstruierte Widerstandsmatrix berücksichtigt eine Standardisolierung, die aus vier Schichten Glaswolle besteht.

Die Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 2.22 dargestellt. Zunächst ist der Unterschied in den Temperaturprofilen zu erkennen: durch den Luftkanal ist die Temperatur in fast der gesamten Dicke der Doppelwand höher als in der Referenzwand. Mit der Kenntnis der Temperaturen und Wärmewiderstände lässt sich auch der Wärmestrom $\dot{Q}$ für die beiden Konfigurationen berechnen. In Abbildung 2.22 sind die Wärmeströme an den Punkten hervorgehoben, die der Außenfläche der Rumpfstruktur und der Innenfläche der Seitenwand entsprechen.

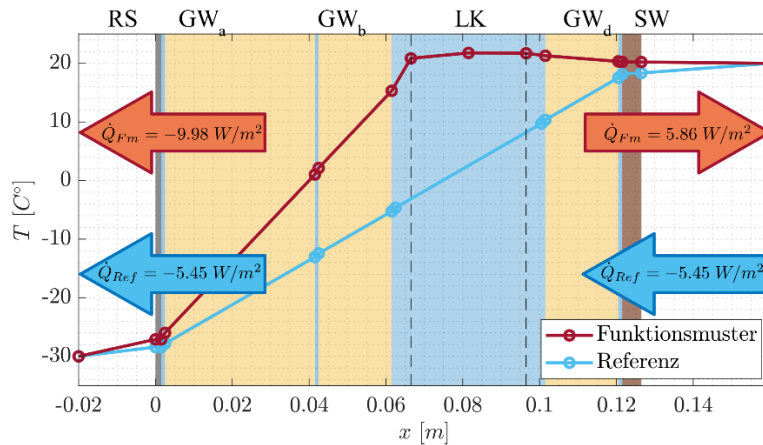


Abbildung 2.22: Ergebnisse der analytischen Auswertung der Temperaturprofile und Wärmeströme für das Funktionsmuster und die Referenzwand (RS = Rumpfstruktur; GW = Glaswolle; LK = Luftkanal; SW = Seitenwand)

Bei der Referenzwand ist zu erkennen, dass der Wärmestrom konstant und nach außen gerichtet ist. Beim Funktionsmuster ist der Wärmestrom an der Außenfläche des Rumpfes zwar intensiver als in der Referenz, aber an der Oberfläche des Seitenwandpaneels kehrt sich die Strömungsrichtung der Wärmeenergie in Richtung der Kabine um. Diese Umkehrung des Wärmeenergiestroms führt zu einer potenziellen Verbesserung des Wärmekomforts für Passagiere, die im Fensterbereich der Kabine sitzen und in Wandnähe keine kalten Schultern mehr bekommen können.

Numerisches 2D-Modell der Kabinendoppelwand

Um eine vollständige hygrothermische Analyse durchzuführen, die nicht nur den Wärmeaustausch, sondern auch die Feuchtigkeitsverteilung innerhalb des Funktionsmusters berücksichtigt, reicht ein analytisches eindimensionales Modell nicht aus. Mit der Modellierungs- und Simulationssoftware COMSOL Multyphysics wurde daher ein 2D-Modell erstellt, das die Doppelwand der Kabine darstellt (siehe Abbildung 2.23). Die Software ermöglicht die Erstellung der Modellgeometrie, die Zuweisung von Materialeigenschaften, die Kombination mehrerer verschiedener physikalischer Modelle und die numerische Diskretisierung. Weitere Einzelheiten über die Software sind in (15) dargestellt.

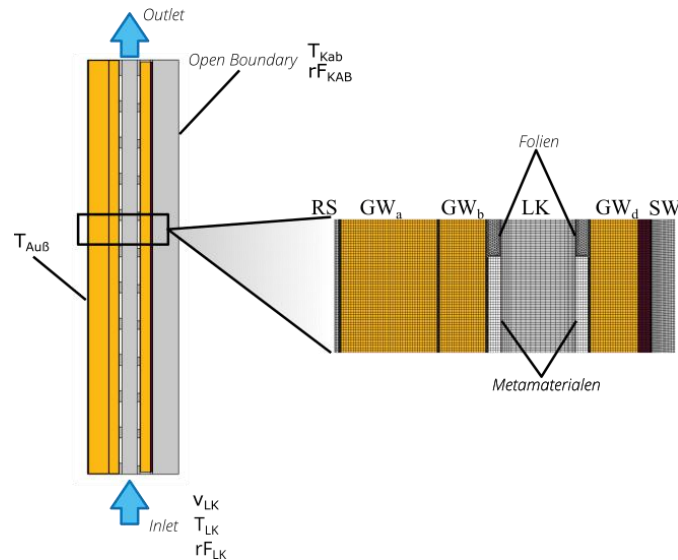


Abbildung 2.23: Darstellung des in COMSOL Multiphysics erstellten 2D-Modells des Funktionsmusters, das für hygrothermische Simulationen verwendet wird

Die äußeren und inneren Randbedingungen wurden auf die äußere Oberfläche des Rumpfes bzw. eine "Open Boundary"-Oberfläche angewendet, wodurch es möglich war, das Vorhandensein eines sehr großen Luftvolumens zu simulieren, ohne dass eine spezielle Geometrie erstellt werden muss, was Rechenressourcen spart. Auf der Einlassfläche hingegen wurden die Bedingungen angewendet, unter denen der Luftstrom in den Luftkanal eintritt.

Neben den Materialeigenschaften und -merkmalen ist ein wichtiger Vorteil von COMSOL Multiphysics die Möglichkeit, 2D-Grenzflächen einen Durchlässigkeitswert für Feuchtigkeitsdiffusion zuzuweisen. Dieser Wert, der durch die äquivalente Luft-Schichtdicke S_d ausgedrückt werden kann, ermöglicht es, verschiedene Folientypen mit unterschiedlicher Durchlässigkeit zu integrieren.

Die Eigenschaften der im Modell verwendeten Materialien sind in Abschnitt *Überblick über alle verwendeten Parameter* auf Seite 101 dieses Kapitels aufgeführt.

Zur Lösung des gesamten Strömungsfeldes wurde ein algebraisches γ Plus-Turbulenzmodell gewählt, dessen Lösung als Input für die zeitabhängige gekoppelte Lösung des Wärme- und Feuchtetransfers verwendet wird und in COMSOL in folgenden physikalischen Modulen umgesetzt wurde (detaillierte Beschreibung in (15)):

- "Heat Transfer in Moist Air": die Fourier-Gleichung bewertet das gesamte thermische Feld unter Berücksichtigung des Wärmeaustauschs durch Leitung, Konvektion und Strahlung, der Wärmequellen und der thermischen Enthalpie aufgrund von Phasenwechsel.
- "Moisture Transport in Air": dieses Physik-Modul beschreibt den Transport von Feuchtigkeit in Luft und porösem Materialien wie z.B. Glaswolle. Über ein "Multiphysics Interface" ist dieses Modul mit dem vorherigen gekoppelt, um die Abhängigkeit zwischen den Thermischen- und den Massendifusionsvariablen zu bewerten.

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wird eine Gesamtsimulationszeit von 120 Minuten angesetzt, was einer Reiseflugphase für einen kommerziellen Mittelstreckenflug entspricht.

Einfluss des S_d -Wertes der externen Folie

Die Auswahl der Materialien für den Bau der beiden Wände des Luftkanals muss genaue akustische und schwingungstechnische Anforderungen erfüllen, aber auch die Dampfdurchlässigkeit ist ein grundlegender Parameter, der bei der Auslegung berücksichtigt werden muss. Mit Hilfe einer numerischen Simulation kann diese Eigenschaft anhand einer Parameterstudie beurteilt werden, bei der die Durchlässigkeit der

Außenwandmembran durch die Variable S_d dargestellt wird, die durch Multiplikation des μ -Wertes und der Materialdicke berechnet wird. Für die Modellierung wurde folgende Membrananordnung verwendet:

- Innen liegende Luftkanalwand: $S_d = 2.68 \text{ m}$, Wert von Terul 18, einem Material, das üblicherweise für (16) die Umhüllung der Glaswoldecken verwendet wird.
- Außen liegende Luftkanalwand: wird eine Reihe von sechs verschiedenen Werten von S_d angewendet.
- Glasswool envelope: $S_d = 2.68 \text{ m}$, Wert von Terul 18. Bei diesem Modell wird davon ausgegangen, dass die Umhüllung des Dämmstoffs keine Perforationslöcher hat.

Im Gegensatz zu den in Tabelle 2.4 angegebenen Werten für die Randbedingungen wurden für diese Analyse zwei unterschiedliche Werte für die relative Luftfeuchtigkeit am Einlass des Luftkanals von 45 % und 15 % verwendet, um die Auswirkungen auf die sich im Außenbereich ansammelnde Gesamtfeuchtigkeit zu untersuchen. Außerdem wird in der folgenden Simulationsstudie am Ende der vorgegebenen Flugzeit unter Reiseflugbedingungen die Außentemperatur allmählich auf $T=20^\circ\text{C}$ erhöht und das System für 30 Minuten in diesem Zustand belassen (repräsentativ für eine kurze Bodenphase).

Die für den Vergleich analysierten Werte sind die Dampfpartialdruckprofile p_d durch die Doppelwand, extrapoliert entlang einer horizontalen Linie in der mittleren Höhe der Doppelwand, dargestellt in Abbildung 2.24, am Ende der Bodenphase. In Abbildung 2.24 a) ist zu erkennen, dass der Unterschied zwischen den verschiedenen Durchlässigkeiten der Außenwand nicht zu großen Unterschieden in den p_d -Profilen führt. Das liegt daran, dass der Unterschied in der Dampfkonzentration zwischen Luftkanal und Außenbereich nicht ausreicht, um einen effizienten Feuchtigkeitsentzug zu erreichen, unabhängig von der Art der verwendeten Folie. Stattdessen ist in Abbildung 2.24 b) zu erkennen, dass eine erhöhte Durchlässigkeit der Luftkanal-Außenwand nicht nur zu einer Verringerung der Feuchtigkeitsmenge im angrenzenden Luftspalt führt, sondern auch zu einer Verringerung der Feuchtigkeit innerhalb des Glaswollbereichs GWb.

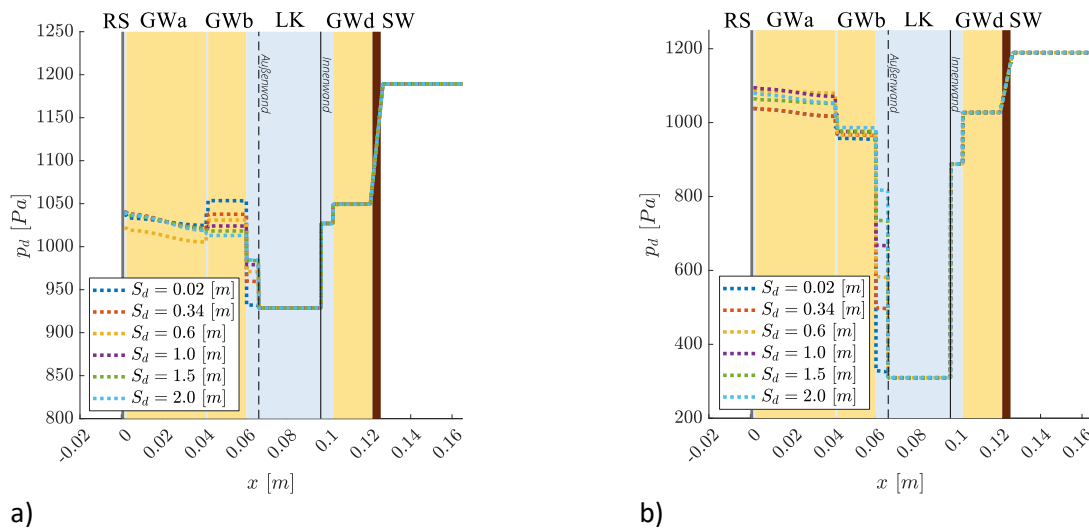


Abbildung 2.24: Numerische Ergebnisse der Parameterstudie, bei der die Variation des Parameters S_d zu Unterschieden in der Feuchtmenge im Außenbereich beiträgt, für zwei unterschiedliche Feuchtwerte im Luftkanal: a) $rF_{Kab} = 45\%$ und b) $rF_{Kab} = 15\%$

Gesamtwandaufbau Eigenschaften

In diesem Abschnitt werden die hygrothermischen Mengenprofile des Funktionsmusters und der Referenzwand am Ende einer simulierten 120-minütigen Reisephasenzeit verglichen. In Abbildung 2.25 a) zeigt der Unterschied zwischen den Temperaturprofilen einen Anstieg der Temperatur an der Seitenwand, was für die Passagiere einen höheren Komfort bedeutet, aber auch einen allgemeinen

Temperaturanstieg in der gesamten Doppelwand. Dieser thermische Effekt geht mit der Einführung von Luft mit einem geringen Feuchtigkeitsgehalt in den Luftkanal einher, der lokal reduziert wird, wie in Abbildung 2.25 b) zu sehen ist. Es ist jedoch zu erkennen, dass der Wert der relativen Luftfeuchtigkeit an der Wand höher ist: dies ist darauf zurückzuführen, dass trotz des thermischen Effekts des Luftstroms die Luftzufuhr die Feuchtigkeitsmenge in der Doppelwand erhöht. Wie in Abbildung 2.25 c) zu sehen ist, besteht die Hauptwirkung des Funktionsmodells jedoch in der allgemeinen Erhöhung des Sättigungsdrucks p_s in Bezug auf den effektiven Partialdampfdruck p_d . Je näher der Sättigungsdruck p_d am Sättigungswert liegt, desto größer ist die Gefahr der Kondensation oder Eisbildung aufgrund lokaler Schwankungen der Oberflächentemperatur.

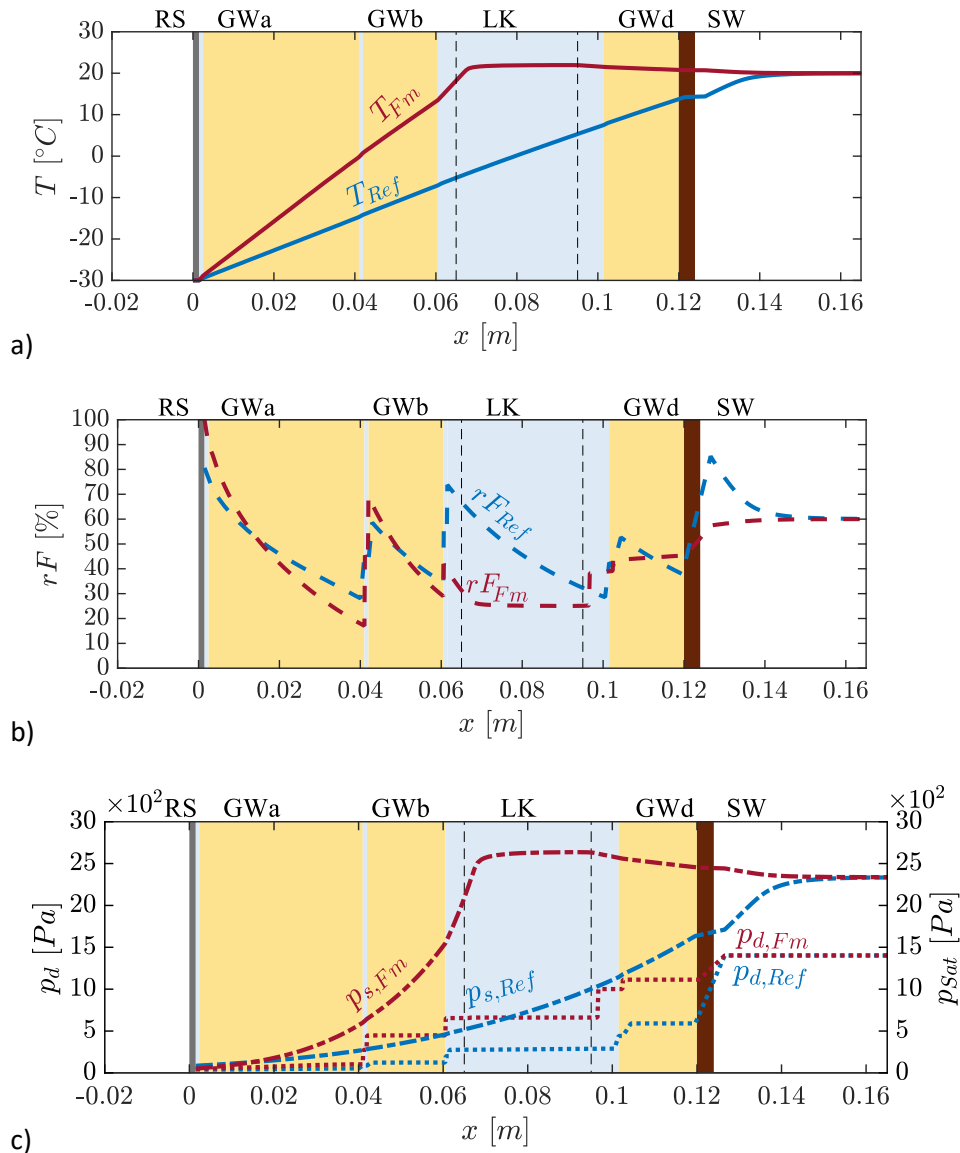


Abbildung 2.25: Numerische Ergebnisse des Vergleichs zwischen neuartigem Funktionsmuster (Index: Fm) und Referenzwand (Index: Ref). a) Temperatur Profile b) relative Luftfeuchtigkeit Profile; c) Sättigungsdruck- und Dampfpartialdruck Profile.

b. Auslegung Prototyp

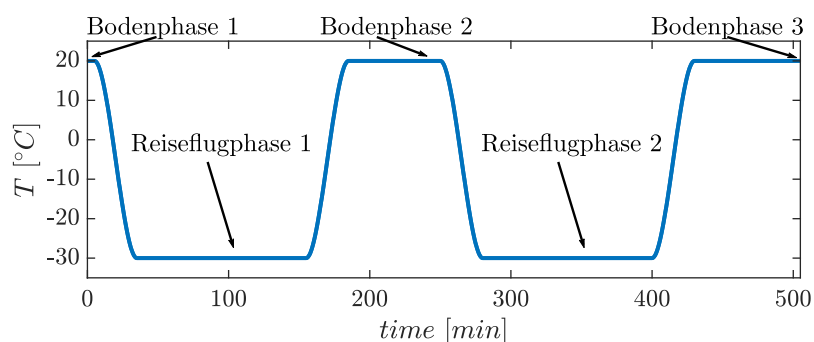
Randbedingungen

Die Auslegung des Funktionsmusters erfolgte unter Berücksichtigung der hygrothermischen Eigenschaften unter statischen Randbedingungen, die für die Reiseflugphase repräsentativ sind.

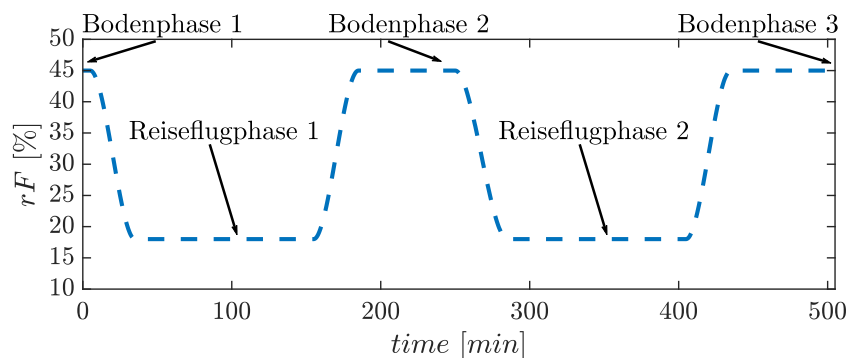
Die korrekte Dimensionierung des Prototyps erfordert jedoch die Anwendung variabler Randbedingungen, die für mindestens zwei aufeinanderfolgende Flugzyklen repräsentativ sind. Die angewandten Randbedingungen sind in Tabelle 2.5 und Abbildung 2.26 dargestellt. Die Kabine ist in diesem Fall durch eine sehr niedrige relative Luftfeuchtigkeit gekennzeichnet, die der im Luftkanal entspricht, um eine Kontinuität zwischen der Belüftung und den Bedingungen in der Kabine numerisch zu simulieren. Die anderen Bedingungen, wie z. B. die Temperatur in der Kabine, bleiben während der gesamten Dauer der Gesamtaufbausimulation unverändert.

Tabelle 2.5: Randbedingungen für Prototyp

Parameter	Werte
$T_{Au\beta}$	Abbildung 2.26 a)
T_{LK}	20°C
rF_{LK}	Abbildung 2.26 b)
v_{LK}	1.0 m/s
T_{Kab}	20°C
rF_{Kab}	Abbildung 2.26 b)



a)



b)

Abbildung 2.26: Variable Profile von Temperatur a) und relativer Luftfeuchtigkeit b), die als Randbedingungen im numerischen Modell des Prototyps angewendet wurden.

Perforation der Terul 18 - Primärdämmung Glaswollmatten Umhüllung

Vor der Analyse des Gesamtwandaufbaus ist es notwendig, die Implementierung der Folie im Modell entsprechend anzupassen. Im vorherigen Modell wurde die Terul 18-Hülle aus Glaswolle numerisch in das Modell implementiert, ohne irgendeine Art von Perforation zu berücksichtigen, was einem Wert von $S_d = 2,68$ m entspricht. Wie jedoch in verschiedenen Quellen ((16), (17), (18)) und als Ergebnis von Voruntersuchungen im A320 Kabine Mock up in der HAW Hamburg berichtet wird, gibt es auf der Rückseite der Blankets, in Richtung Fuselage, Perforationen. Diese Perforationen haben mehrere Funktionen:

- Ausgleich des Drucks im Inneren der Glaswollmatten während des Steigens
- Ableitung der Feuchtigkeit, die sich während der Reisephase in den Matten angesammelt hat

In COMSOL Multiphysics wurde ein 3D-Modell erstellt, in dem verschiedene Arten von Membranen, darunter auch eine mit Perforationen, zwischen zwei Umgebungen mit unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt eingefügt wurden, um ein Konzentrationsgefälle zu erzeugen, das den Dampfdruck von einer Umgebung in die andere ermöglicht. Die angewandten Randbedingungen sind in der DIN EN ISO 12572 für die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit vorgeschrieben (19).

Das in Abbildung 2.27 a) dargestellte 3D-Modell ist durch folgende Elemente gekennzeichnet:

- Äußere Seite: hier wurde die relative Luftfeuchtigkeit mit 50% angesetzt.
- Innenseite: hier wurde die relative Luftfeuchtigkeit mit 0% angesetzt.
- Folie: 2D-Fläche mit den Maßen $7\text{ cm} * 7\text{ cm}$, der der Wert S_d zugewiesen wurde (bei Folien mit Perforationen ist das verwendete Muster in Abbildung 2.27 b) dargestellt).
- Symmetrie Seite: Fläche, die eine symmetrische Wiedergabe des angrenzenden numerischen Volumens simuliert.

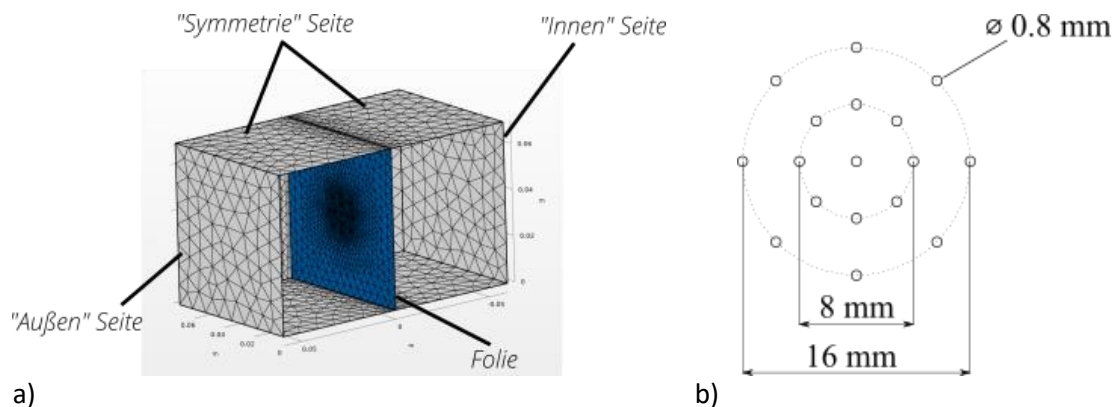


Abbildung 2.27: a) Simulationsmodell in COMSOL zur Bewertung der Durchlässigkeit verschiedener Folien b) Perforationen auf der Terul 18-Hülle der Glaswollmatten (18)]

Die Grafik in Abbildung 2.28 zeigt den gesamten Feuchtigkeitsfluss durch Folien ohne Perforationen im Vergleich zu einem perforierten Terul 18, für eine simulierte Zeit von 60 Minuten, so dass ein Gleichgewicht zwischen den beiden Umgebungen bei unterschiedlichen Konzentrationen erreicht werden kann. Durch den Vergleich des Profils von Terul 18 mit Perforationen mit dem von Folie, dem ein S_d -Wert von $0,02$ m zugewiesen ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Perforationen Terul 18 extrem durchlässig für den Feuchtigkeitsaustausch machen.

Um die Perforationen in das 2D-Modell des Gesamtwandaufbaus zu integrieren, wurde die Wirkung der Perforationen integriert, indem dem Terul 18, das die Glaswollmatten auf der Außenseite bedeckt, der Wert $S_d = 0,02$ m zugewiesen wurde.

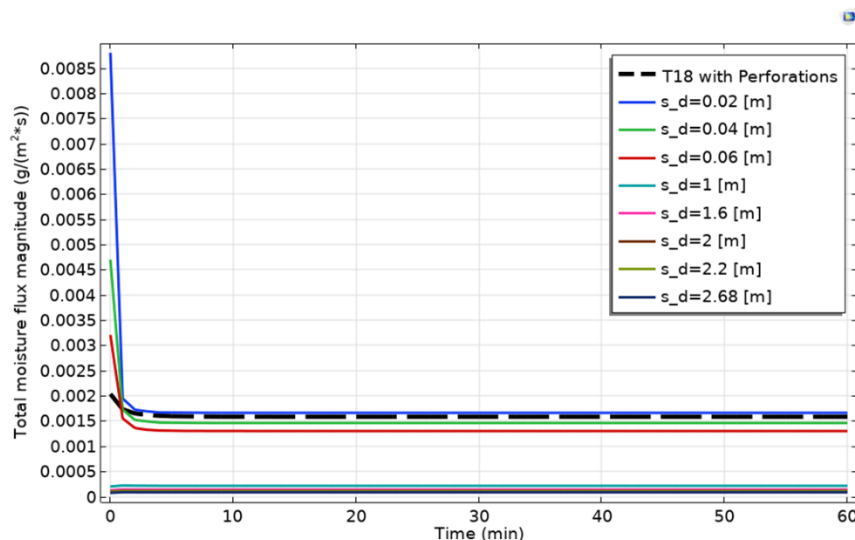


Abbildung 2.28: Feuchtigkeitsstrom im Laufe der Zeit, im Vergleich zwischen einer perforierten Terul 18-Folie und einer Reihe von nicht perforierten Folien mit unterschiedlichen s_d -Werten

Vergleichsfolie für die Wand des Luftkanals

Für die akustische Auslegung des Prototyps wurden neue Folien ausgewählt, um den Luftkanal zu realisieren (siehe Abschnitt D). Da in der Versuchsphase nur ein Prototyp sowohl für akustische als auch für hygrothermische Messungen hergestellt wurde, war eine Bewertung der Durchlässigkeitseigenschaften des Materials erforderlich.

Die folgenden S_d -Werte wurden vom Hersteller für zwei Folientypen mit zwei unterschiedlichen Dicken zur Verfügung gestellt, die berücksichtigt wurden. Die Werte sind in Tabelle 2.6 aufgeführt:

Tabelle 2.6: Parameter der PET-Folie

Material description	S_d Wert
75 μm PET	0.34 m
50 μm PET	0.56 m

Diese Werte wurden in das zu Beginn dieses Abschnitts vorgestellte 3D-Modell integriert und mit den Werten der für den Luftkanal im Funktionsmuster verwendeten Materialien verglichen.

In der Grafik, die den Trend des Feuchtigkeitsstroms in Abbildung 2.29 darstellt, ist zu erkennen, dass die neuen Materialien näher an Terul 18 als an Strotex 1300 liegen und somit eine geringere Durchlässigkeit für Feuchtigkeit aufweisen.

Von den beiden Materialien wurde für die Integration und die anschließende Analyse das 75 μm Material ausgewählt.

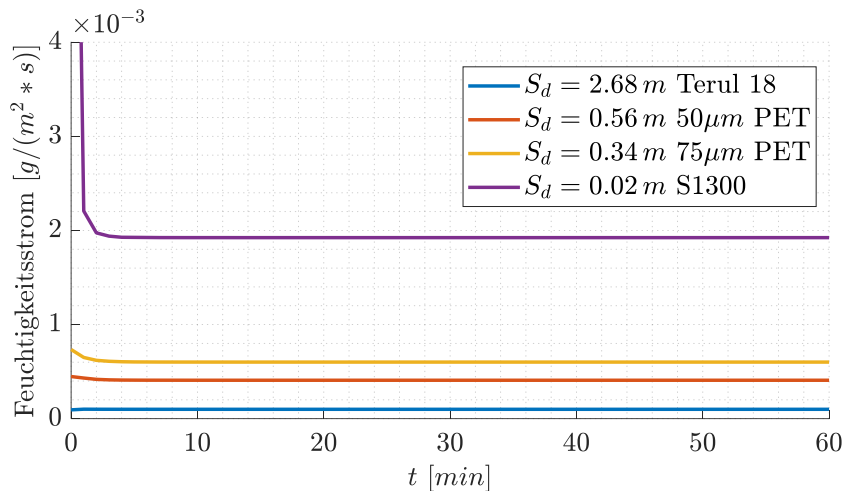


Abbildung 2.29: Feuchtigkeitsstrom im Laufe der Zeit: Vergleich zwischen der neuen Folie für den Prototyp (50 µm und 75 µm PET) und der im Funktionsmuster verwendeten Folie (Terul 18 und S1300)

Gesamtwandaufbau

Das im Abschnitt Auslegung Funktionsmuster vorgestellte numerische Modell wurde durch Hinzufügen und Ändern der folgenden Elemente optimiert:

- Anwendung der oben beschriebenen aktualisierten variablen Randbedingungen
- Neue Materialien für die Luftkanalwände und Integration der Perforationen in Terul 18 für die Glaswollmatten
- Änderung der Anordnung der Glaswollmatten, wie in Abschnitt AP1.2 B beschrieben.

Die beiden im Folgenden analysierten und verglichenen Konfigurationen sind wie folgt

- Prototyp: neue Kabinenwand mit Luftkanal wie in Abbildung 2.13 dargestellt
- Referenzwand: Standardisolierung ohne Luftkanal, dargestellt in Abbildung 2.13

Vergleich von Prototyp und Referenzwand während der Reiseflugphase

Der erste Vergleich zwischen den beiden Konfigurationen wurde wie zuvor beim Funktionsmuster durchgeführt. Es werden die Hauptprofile der isothermen Größen während Reiseflug 1 verglichen. Beim Vergleich der Temperaturen, in Abbildung 2.30 a), ist ein ähnlicher Unterschied zwischen den beiden Profilen dargestellt, wie es bereits im Funktionsmuster festgestellt wurde. Wie die Profile der relativen Luftfeuchtigkeit zeigen (Abbildung 2.30 b)), ist ein Rückgang der Werte am Luftkanal zu beobachten, aber auch einen leichten Anstieg an der 'inneren' Seite der Glaswolldecke GW_a , in Richtung Kabine zeigenden Seite. Dies kann dadurch verursacht werden, dass feuchte Luft von Terul 18 der GW_a 's blockiert wird, die aufgrund des Temperaturabfalls entlang des Außenbereichs lokal kondensiert. Es ist anzumerken, dass das Profil der relativen Luftfeuchtigkeit der Referenzwand aufgrund von numerischen Fehlern im Modell Werte von über 100% erreicht: das Modell, das die Realisierung des Phasenwechsels ermöglicht, ist vereinfacht, um eine höhere Rechengeschwindigkeit zu ermöglichen, ist jedoch nicht in der Lage, die Gesamtmenge des Dampfes, der bei der Verfestigung zu Eis die Phase wechselt, korrekt zu berechnen, wodurch ein Zustand der "Übersättigung" entsteht, der physikalisch nicht korrekt ist.

Der Vergleich der verschiedenen Partialdampfdruck- und Sättigungsdruckprofile in Abbildung 2.30 c) zeigt, dass selbst beim Prototyp der Abstand zwischen den beiden Kurven für fast die gesamte Doppelwand größer ist als bei der Referenzwand, wodurch die Wahrscheinlichkeit einer Kondensation innerhalb der Doppelwand verringert wird.

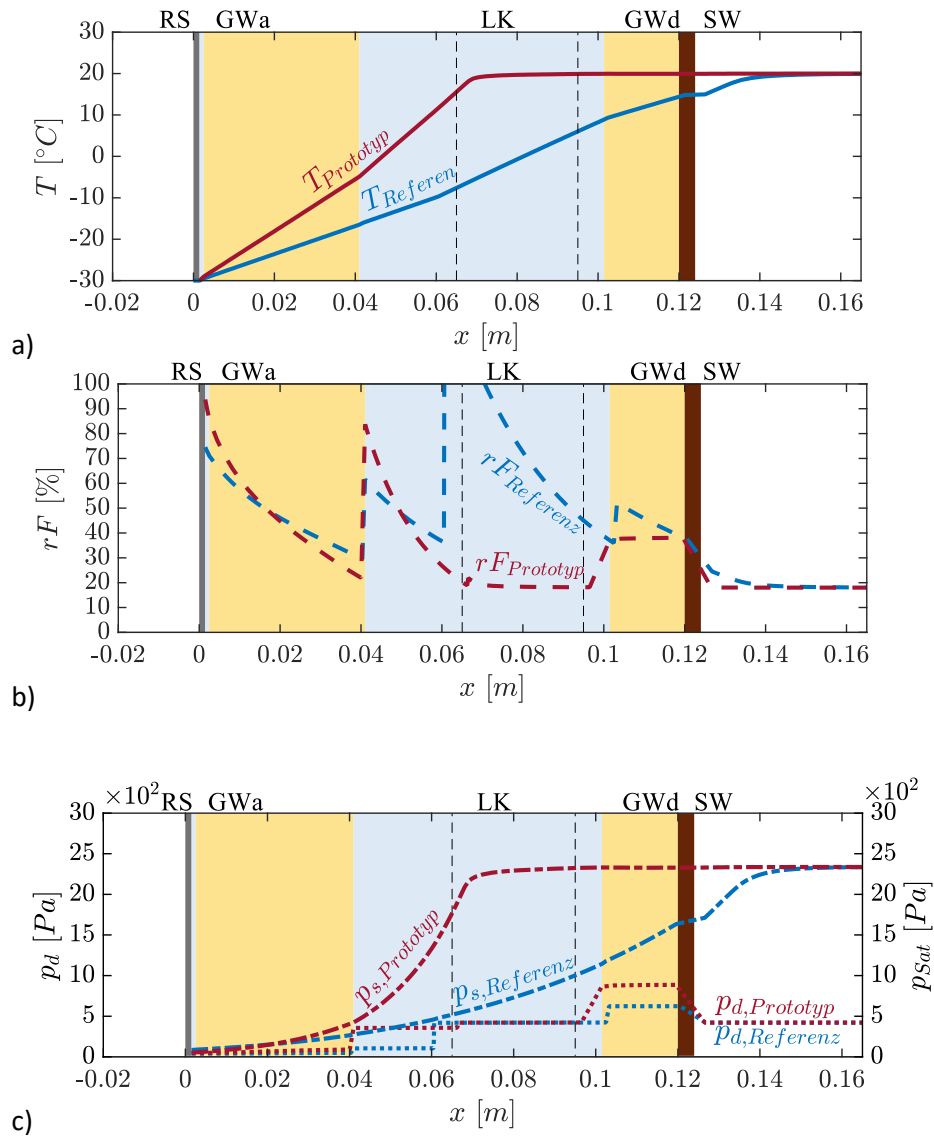


Abbildung 2.30: Numerische Ergebnisse des Vergleichs zwischen Prototyp und Referenzwand. a) Temperatur Profile b) relative Luftfeuchtigkeit Profile ; c) Sättigungsdruck- und Dampfpartialdruck Profile.

Dank der Anwendung variabler Flugbedingungen, die die Abfolge von zwei Flugzyklen simulieren, konnte gezeigt werden, wie der Prototyp eine Abnahme des Gesamtfeuchtwertes im Außenbereich erreicht. In Abbildung 2.31 sind die Trends von p_d im Prototyp und in der Referenzwand während der drei verschiedenen Bodenphasen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass beim Prototyp (Abbildung 2.31 a)) nach zwei aufeinanderfolgenden Flugzyklen ein Rückgang von p_d um etwa 5% zu verzeichnen war. Im Gegensatz dazu ist bei der Referenzwand ein, wenn auch geringer, stetiger Anstieg von p_d im Außenbereich zu beobachten (Abbildung 2.31 b)). Eine weitere Möglichkeit, den Unterschied zwischen den beiden Konfigurationen zu veranschaulichen, ist die Betrachtung der Variablen für den Feuchtigkeitsgehalt. Für diese Variable, die sich aus der Dampf- und Wasserkomponente zusammensetzt, wurde die zeitliche Entwicklung des Mittelwerts berechnet, extrapoliert auf den Raum zwischen der Rumpfstruktur und der Außenwand, im Prototyp und der Referenzwand. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.32 dargestellt. Diese theoretischen Ergebnisse zeigen, dass die Integration eines breitflächigen Luftkanals in die Kabinenwand ein wichtiges Potenzial hat, um der Ansammlung von Feuchtigkeit im Außenbereich wirksam entgegenzuwirken.

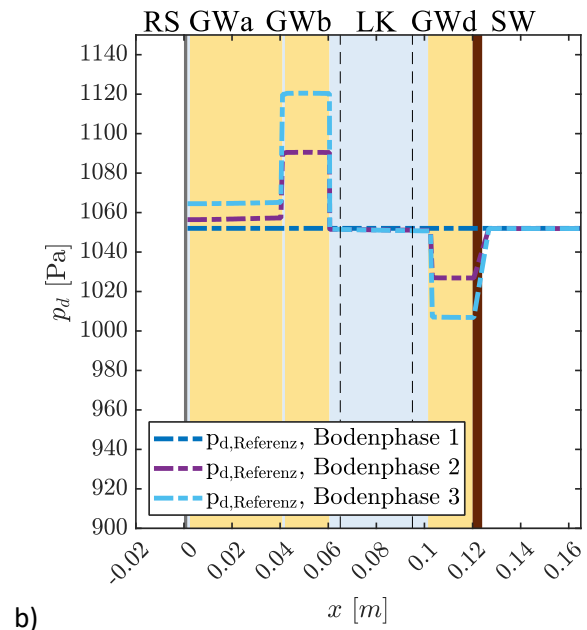
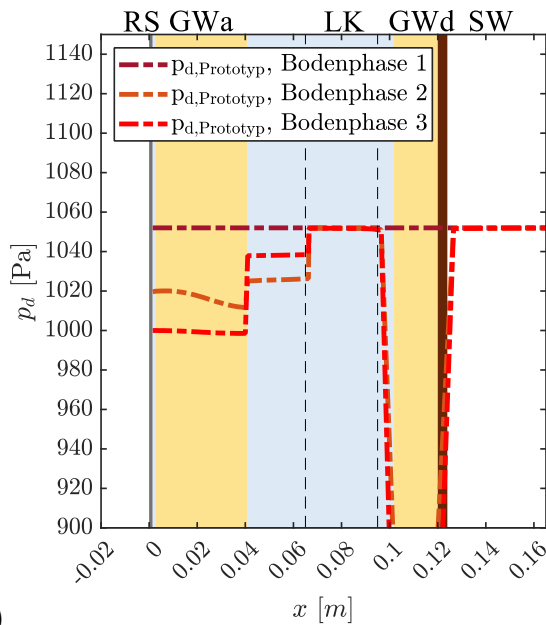


Abbildung 2.31: Vergleich der p_d Profile während der verschiedenen Bodenphasen für Prototyp a) und Referenzwand b)

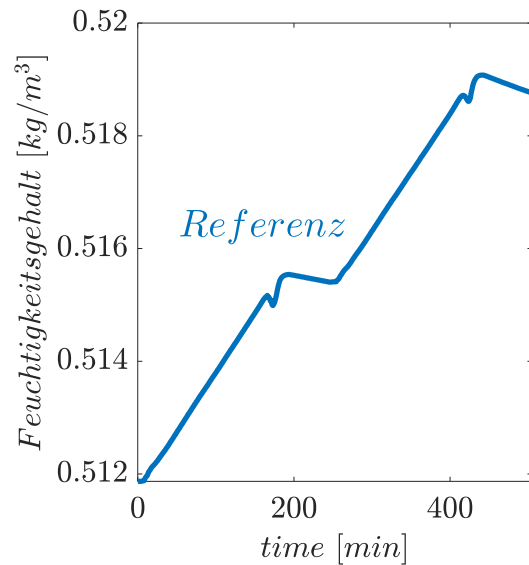
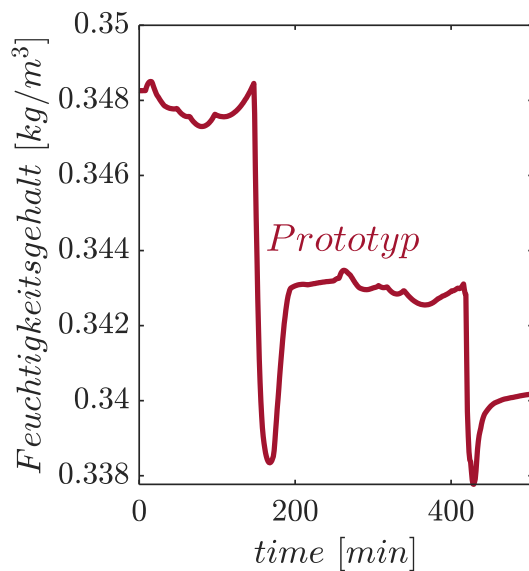


Abbildung 2.32: Zeitliche Veränderung der Feuchtigkeit im Außenbereich für den Prototyp a) und die Referenzwand b)

Integration von Aerogel als primäre Isolierung

Ein Ziel des Projekts ist es, die herkömmliche Primärdämmung aus Glaswolle durch ein neu entwickeltes Aerogel-Material zu ersetzen. Das Aerogel wurde vom Projektpartner DLR in Zusammenarbeit mit der Universität zu Köln hergestellt. Von hier stammen die Informationen über die Materialeigenschaften, die in Tabelle 2.7 aufgeführt sind.

Tabelle 2.7: Materialparameter von Glaswolle und Aerogel

Material	Dichte [kg/m^3]	Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$]
Amber Glaswolle	6.73	0.04
Aerogel mit Vlies	100	0.033

Die beiden Konfigurationen, die numerisch untersucht wurden, werden im Folgenden vorgestellt:

- Prototyp mit Glasswolle: Konfiguration einer Doppelwand mit Luftkanal und 40 mm „Amber Glasswool“ als Primärisolierung
- Prototyp mit Aerogel: Bei dieser Konfiguration wurde die Primärisolierung durch eine Aerogelschicht ersetzt.

Die verwendeten Randbedingungen sind die für Reiseflug 1, die am Anfang dieses Abschnitts angegeben sind. Um die Minstdicke des Aerogels zu ermitteln, die erforderlich ist, um die Glaswolle zu ersetzen und die gleiche Wärmedämmung zu erreichen, wurde die Äquivalenz des Wärmestroms $\dot{Q}$, der auf der Oberfläche der Rumpfstruktur erzeugt wird, als Kriterium herangezogen. Tabelle 2.8 zeigt den Vergleich zwischen dem Wärmestrom, der für 40 mm Glaswolle erzielt wurde, und dem Äquivalent für verschiedene Dickenwerte von Aerogel. Bei gleicher Dicke liegt der Wärmestrom bei -23,2 W und damit unter den -25,5 W, die mit Glasswool erzielt wurden. Da das Ziel jedoch darin besteht, den von der Isolierung eingenommenen Raum zu verkleinern, ist es notwendig, diese Äquivalenz für kleinere Dickenwerte zu suchen: Diese Äquivalenz wird für einen Dickenwert von 35 mm erreicht. Bei kleineren Werten ist der Wärmestrom in absoluten Zahlen größer.

Ein Temperaturverlaufsdiagramm für die beiden Konfigurationen ist in Abbildung 2.33 dargestellt: Aufgrund des niedrigeren Wärmeleitfähigkeitswertes ist die Temperatur für die Aerogel-Konfiguration im Außenbereich um einige Grad höher. In einem Abstand von etwa 5 cm vom Rumpf dominiert bei beiden Konfigurationen das Vorhandensein des Luftkanals, was ab dieser Stelle in Richtung innerer Wandbereich zu einer Überlappung der beiden Kurven führt.

Tabelle 2.8: Wärmestromwerte berechnet auf der Rumpfstruktur im numerischen Modell des Prototyps mit Glaswolle als Primärisolierung und des Prototyps mit Aerogel als Primärisolierung

Prototyp mit Glaswolle		Prototyp mit Aerogel	
Dicke [m]	Wärmestrom [W]	Dicke [m]	Wärmestrom [W]
0.04	-25.5	0.04	-23.2
		0.035	-25.2
		0.03	-28
		0.025	-30

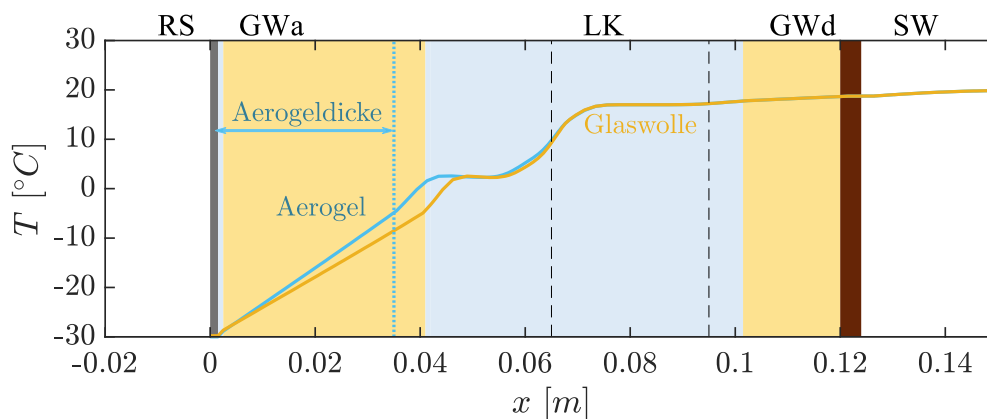


Abbildung 2.33: Numerische Ergebnisse der Temperaturverläufe innerhalb der Kabinenwand bei Prototyp mit Glaswolle (braune Kurve) und dem Prototyp mit Aerogel (blaue Kurve).

D. Schwerpunkt akustische Auslegungen

a. Auslegung Funktionsmuster

Akustische Metamaterialien mit streifenförmigen Massen

Durch die bereits im Forschungsprojekt NAIMMTA von der HAW entwickelten akustischen Metamaterialien mit streifenförmigen Massen (PAM, engl. Plate-type acoustic metamaterials) konnten sehr gute Schalldämmeigenschaften nachgewiesen werden, die gegenüber einer massenäquivalenten Platte in schmalbandigem Frequenzbereich deutlich höhere Schalldämmeigenschaften zeigen. Aufgrund dieser ersten sehr guten Einzelkomponentenergebnisse und der im Vergleich zu akustischen Metamaterialien mit Punkt- bzw. Ringmassen deutlich reduzierten Fertigungsaufwand erschien eine Anwendung in der Kabinenwand im Projekt Multikabin als aussichtsreich.

Dieser Unterabschnitt gibt zunächst eine Einführung in die für die akustische Auslegung der Metamaterialien verwendeten analytischen sowie numerischen Modelle. Anschließend werden analytische- sowie numerische Ergebnisse ausgelegter akustischer Metamaterialien für das Funktionsmuster gegenüber den Schalldämmeigenschaften masseäquivalenter Platten bewertet.

Analytisches Modell zur Auslegung akustischer Metamaterialien

Für den Auslegungsprozess von akustischen Metamaterialien für das Funktionsmuster wurde das in (20) detailliert beschriebene analytische Modell verwendet. Das in (20) aufgeführte Modell beschreibt die akustische Wirkung des Metamaterials bzw. einer Einheitszelle eines akustischen Metamaterials (Darstellung Einheitszelle siehe Abbildung 2.34), durch den Ansatz einer effektiv wirkenden Flächenmasse m''_{eff} .

$$m''_{eff} = m''_0 \left(1 - \frac{\omega^2}{(1 + \mu_1)\omega^2 - \mu_1\omega_1^2(1 + i\eta)} \right) \quad (2.2)$$

m''_0 beschreibt in Gleichung 2.2 die Gesamtflächenmasse einer Einheitszelle eines akustischen Metamaterials. Details zur ersten Resonanzfrequenz ω_1 sowie zur normalisierten modalen Masse μ_1 werden in (11) erläutert.

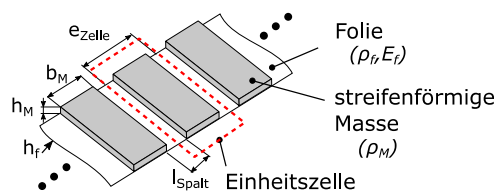


Abbildung 2.34: Darstellung einer Einheitszelle eines akustischen Metamaterials

Zur Quantifizierung der durch Resonanzeffekte erreichten Schalldämmmaßerhöhungen wurden die analytischen Ergebnisse ausgelegter Metamaterialien mit Schalldämmmaßergebnissen massenäquivalenter homogener Platten verglichen und mit Gleichung 2.3 berechnet.

$$R = 10 * \log\left(1 + \frac{2 * \pi * f * m''}{2 * Z_L}\right) \quad (2.3)$$

Eine Gegenüberstellung der analytisch abgeschätzten Schalldämmmaße ausgelegter akustischer Metamaterialien erfolgt nach einer kurzen Einführung in die Auslegung der Einheitszelle eines akustischen Metamaterials mittels numerischer Modellierung.

Numerisches Modell zur Auslegung akustischer Metamaterialien

Die numerische Auslegung wurde mit der Finite-Elemente-Methode in der Software Comsol Multiphysics durchgeführt. Dafür wurde zunächst ein vereinfachtes Modell in 2D von einer Einheitszelle eines akustischen Metamaterials in Comsol Multiphysics, wie in Abbildung 2.35 gezeigt, aufgebaut.

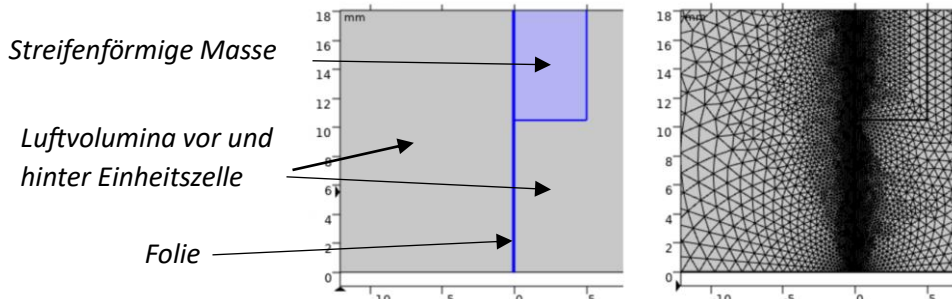


Abbildung 2.35: Darstellung des Ausschnitts einer in 2D modellierten Einheitszelle in Comsol Multiphysics (links) sowie dessen Diskretisierung (rechts)

Die Folie sowie die streifenförmige Masse wurden mit dem Physik Modul Solid Mechanics definiert, welche eine Beschreibung der Komponenten durch dessen Bewegungsgleichungen zugrunde liegt. Die Luftvolumina wurden mit dem Physik Modul Pressure Acoustic modelliert, welches eine Schallausbreitung mit der Beschreibung der Helmholtz-Gleichungen beinhaltet. Zur Berücksichtigung von Interaktionseffekten zwischen der Einheitszelle des Metamaterials und der angrenzenden Luftvolumina wurde die Funktion Acoustic-Structure-Boundary implementiert, die über Kopplungsparameter die Bewegung der Einheitszelle des Metamaterials mit den Luftteilchenbewegungen in den Luftvolumina berücksichtigt. Für eine detaillierte Beschreibung der in den aufgeführten Physik Modulen verwendeten Gleichungssystemen wird auf die Comsol Benutzerhandbücher (21) verwiesen.

Parameter für akustische Metamaterialien des Funktionsmusters

Zur Erreichung einer möglichst breitbandigen Schalldämmmaßerhöhung im Frequenzbereich kleiner 1000 Hz wurden zwei akustische Metamaterialien mit unterschiedlichen Anti-Resonanzfrequenzen definiert. Aufbauend auf den Ergebnissen aus (20) und Gründen der Materialverfügbarkeiten wurden zwei akust. Metamaterialien mit den Anti-Resonanzfrequenzen PAM1 ca. 210 Hz sowie PAM2 ca. 400 Hz ausgelegt.

Als Material für die Folie wurde ein PET-Film verwendet, dessen Materialparameter aus (20) entnommen wurden. Die streifenförmigen Massen wurden aus PVC hergestellt (22). Vollständige Parameter zur Definition der Geometrie, der Materialdaten sowie akustischer Daten sind in Tabelle 2.9 angegeben.

Tabelle 2.9: Parameter für akustische Metamaterialien des Funktionsmusters

Materialdaten		Geometriedaten			Sonstige Daten*		
PAM 1 & 2			PAM 1	PAM 2		PAM 1	PAM 2
ρ_M	460 kg/m³	b_M	49 mm	54 mm	m''	1,99 kg/m²	1,82 kg/m²
ρ_f	1400 kg/m³	h_M	5 mm	5 mm	f_p	385 Hz	210 Hz
E_f	3500 MPa	h_f	100 µm	100 µm	f_R	692 Hz	402 Hz
η_{iso}^{**}	20 %	l_{Spalt}	21 mm	16 mm			
		e_{Zelle}	70 mm	70 mm			
* Werte aus theoretischer Berechnung							
** Wert angenommen in theoretischer Auslegung, basierend auf Ergebnissen aus (20)							

Gegenüberstellung der Ergebnisse aus analytischer bzw. numerischer Auslegung akustischer Metamaterialien

Mit den in Tabelle 2.9 aufgeführten Parametern wurden mit zuvor vorgestellten analytischen bzw. numerischen Modellierungsmethodiken zu erwartende Schalldämmmaßprofile der akustischen Metamaterialien PAM1 sowie PAM2 abgeschätzt. Die Ergebnisse für das akustische Metamaterial PAM1 sind in Abbildung 2.36 dargestellt. Die analytisch bzw. numerisch berechneten Anti-Resonanzspitzen liegen bei ca. 210 Hz nahezu übereinander. Gegenüber einer massenäquivalenten Platte konnte mit Gleichung 2.3 für das Massegesetz eine Schalldämmmaßerhöhung von ca. 12 dB bei ca. 210 Hz in der Theorie erreicht werden.

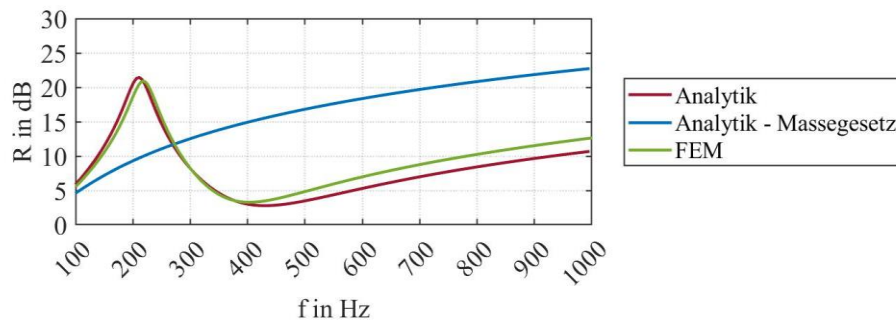


Abbildung 2.36: Analytisch bzw. numerisch abgeschätzte Schalldämmmaßeigenschaften von akustischem Metamaterial (PAM1) dargestellt gegenüber Schalldämmmaßeigenschaften einer massenäquivalenten Platte

Vergleichbare Aussagen können der Abbildung 2.37 zur theoretischen Auslegung vom akustischen Metamaterial PAM2 abgeleitet werden. Bei der berechneten Anti-Resonanzspitze um die ca. 400 Hz zeigen analytische- wie auch numerische Auslegungsmethodik nahezu gleiche Ergebnisse. Im Bereich der Anti-resonanzspitze konnte eine Schalldämmmaßerhöhung von um die 10 dB gegenüber einer massenäquivalenten homogenen Platte erreicht werden. Im Vergleich der Bandbreite der akustischen Metamaterialien wurde mit PAM2 eine etwas breitbandigere Wirkung erzielt.

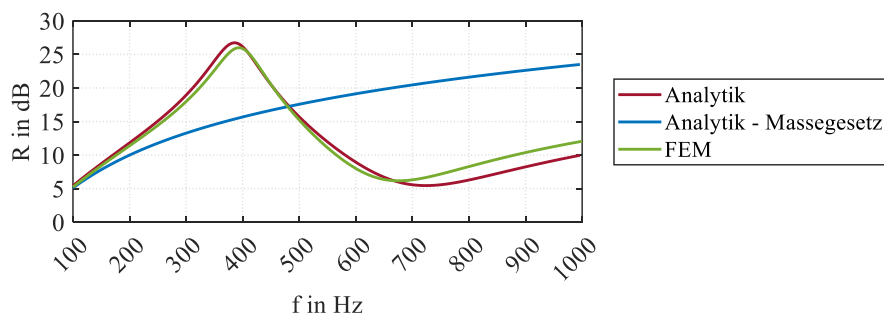


Abbildung 2.37: Analytisch bzw. numerisch abgeschätzte Schalldämmmaßeigenschaften von akustischem Metamaterial (PAM2) dargestellt gegenüber Schalldämmmaßeigenschaften einer massenäquivalenten Platte

Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken

Wie in Arbeitspaket 1.2 vorgestellt wurden für einen luftdichten Abschluss der zu den Spanten orientieren Seitenflächen des Luftkanals Komponenten eingesetzt, welche als Helmholtz-Resonatoren ausgelegt wurden. Der Vorteil liegt in einer multifunktionalen Nutzung dieser Helmholtz-Resonator Komponenten als für den Luftkanal formgebendes-, für die Kabinenebelüftung strömungsführendes- sowie akustisch wirksames Element. Die akustische Wirkung eines Helmholtz-Resonators ist dabei formunabhängig und nur von dessen Materialsteifigkeit, Kavitätavolumen und Öffnungsmaße bzw. mehreren Öffnungen, abhängig.

Zur Erhöhung der Absorptionsbandbreite wurden in einem, an der HAW Hamburg, vorherigen Forschungsprojekt Flight-Lab (23) sogenannte neuartige Helmholtz-Resonatoren mit zwei Resonanzmechanismen entwickelt. Durch die geometrische Gestaltung einer Helmholtz-Resonator Öffnung in der Form eines U-förmigen Schlitzes lässt sich ein schwingfähiger Biegebalken als zusätzlicher Freiheitsgrad integrieren. Das Volumen und die Masse des Helmholtz-Resonators bleiben dabei nahezu unverändert. Die Schwingfrequenz des Biegebalkens lässt sich durch seine Geometrie, Masseverteilung sowie der Materialsteifigkeit einstellen. Durch die bei Beschallung des Helmholtz-Resonators mit Biegebalken überlagert auftretenden Resonanzeffekte lässt sich eine Vergrößerung der auch tieffrequent einstellbaren Absorptionsbandbreite erreichen.

Die im Forschungsprojekt Flight-Lab vorgestellten, vielversprechenden und experimentell validierten Ergebnisse wurden für die Auslegung des Funktionsmusters eingesetzt und weitere Zusammenhänge, wie z.B. Materialeigenschaften auf die Resonatoreigenschaften wirken, wurden untersucht. Als Material wurde ein Hartschaum mit dem Handelsnamen Rohacell 31HF verwendet. Die geringe Dichte von ca. 32 kg/m^3 ist ein wesentlicher Vorteil dieses Materials für den Verwendungszweck in einer Kabinenwand eines Verkehrsflugzeugs. Unter Berücksichtigung des sehr beengten Bauraums in der Kabinenwand und im Projektvorhaben verfügbarer Materialien wurden für einen Helmholtz-Resonator mit Biegebalken folgende Parameter gewählt:

Tabelle 2.10: Parameter eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken für das Funktionsmuster

Materialdaten		Geometriedaten	
ρ	$32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	B_{HR}	20 mm
E	36 MPa	L_{HR}	95 mm
		H_{HR}	60 mm
		t_{HR}	5 mm
		l_{CL}	35 mm
		b_{CL}	t_{HR}
		h_{CL}	t_{HR}
		$d_{HR,Spalt}$	2 mm

Für eine erste akustische Dimensionierung wurde ein analytischer Ansatz zur Auslegung von Helmholtz-Resonatoren nach (8) bzw. (24) verwendet. Die Modellierungsmethodik aus (8) bzw. (24) berücksichtigt keine Materialeigenschaften, sodass die Resonatoren-Wände im analytischen Modell als ideal steif angenommen wurden. Anhand des analytischen Modells aus (8), (24) wurden Resonanzfrequenzen f_1 bzw. f_2 für die in Tabelle 2.10 angegebenen Parameter von 521 Hz bzw. 633 Hz berechnet.

Für eine erste Validierung der analytischen Ergebnisse wurde in der Software Comsol Multiphysics ein 3D-Modell, dargestellt in Abbildung 2.38, eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken aufgebaut, welche in der folgenden Abbildung 2.38 geometrisch definiert ist.

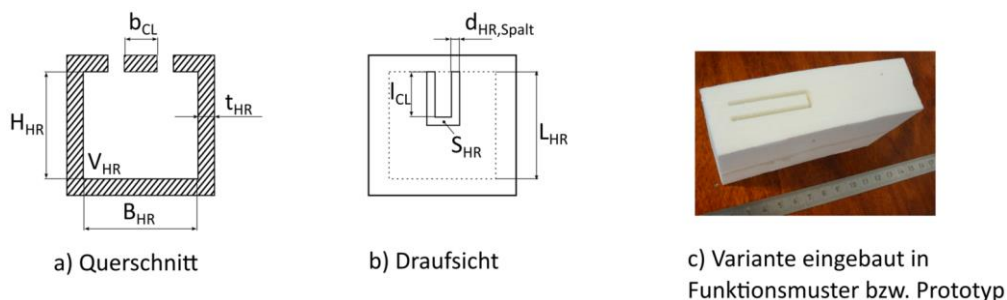


Abbildung 2.38: Darstellung der geometrischen Nomenklatur eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken (a,b) sowie eines gefertigten Helmholtz-Resonators mit Biegebalken (c)

Numerisches Modell eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken

Das 3D-Modell eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken wurde in der Software Comsol Multiphysics aufgebaut. Es wurden die Ziele verfolgt mit Hilfe der FEM ein Helmholtz-Resonator mit Biegebalken für das Funktionsmuster akustisch auszulegen und weitere Studien über Parametersensitivitäten bezüglich der Resonator-Eigenschaften, u.a. des Einflusses einer Materialsteifigkeit der Resonatorstruktur auf die akustischen Eigenschaften, durchzuführen, um die Absorptionsfähigkeit zu optimieren.

Eine Darstellung des 3D-FEM-Modells wird in Abbildung 2.39 gegeben. Für den Aufbau des Modells wurden die von Comsol Multiphysics bereitgestellten Funktionsmodule *Solid Mechanics* sowie *Pressure Acoustics* verwendet. Über Kopplungsparameter wurde mit dem Funktionsbaustein *Acoustic-Structure Boundary* eine Wechselwirkung zwischen der mit Luftschall angeregten Luft und den Körperschwingungen des angeregten Helmholtz-Resonators berücksichtigt. Es werden somit Materialeigenschaften in der Modellierung berücksichtigt. Auftretende Reibungseffekte, z.B. im Bereich der U-förmigen Öffnung, wurden mit der Unterfunktion *Narrow Region Acoustics* eingebunden. Für eine detaillierte Beschreibung der in Comsol integrierten mathematischen Zusammenhänge wird auf (21) verwiesen.

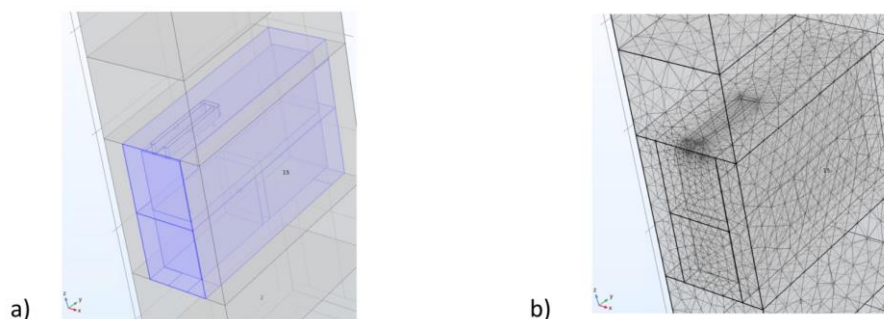


Abbildung 2.39: Darstellung des in Comsol Multiphysics aufgebauten 3D-Modells von eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken (a) sowie dessen Diskretisierung (b)

Die numerisch abgeschätzten Resonanzfrequenzen liegen bei ca. 360 Hz und 590 Hz, welche z.T. deutlich von den zuvor analytisch ermittelten Resonanzfrequenzen mit 521 Hz bzw. 633 Hz abweichen. Mögliche Einflussfaktoren werden in der folgenden Studie über Parametersensitivitäten bezüglich der Resonator-Eigenschaften diskutiert.

Parametersensitivitäten auf die akustischen Resonatoreigenschaften eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken

Es ist das Ziel einen Helmholtz-Resonator zu entwickeln, welcher einen bestmöglichen Absorptionsbeitrag in die Kabinenwand einbringt. Zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit des Resonator-Systems, vor seiner Fertigung als Komponente, wurden daher zunächst numerische Studien durchgeführt. Es wurde untersucht, welche Einflüsse einzelne Modifikationen auf die Absorptionscharakteristik des Helmholtz-Resonators mit Biegebalken haben. Folgende Untersuchungen zur Absorptionscharakteristik werden anhand von Abbildung 2.40 vorgestellt:

- Grundmodell eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken.
- Modifikation 1: Integration eines Versteifungsstegs zur mechanischen Verbindung der beiden relativ großflächigen Seiten des Helmholtz-Resonators. Über eine Verbindung der beiden Seitenflächen soll die Grundmode der Schwingungsamplitude der Seitenflächen des Helmholtz-Resonator Körpers in

höhere Frequenzbereiche oberhalb der für den Helmholtz-Resonator ausgelegten Resonanzfrequenzen verschoben werden.

- Modifikation 2: Fertigungsbedingt wird der Helmholtz-Resonator in zwei Teilkomponenten, Ober- bzw. Unterteil, hergestellt, welche über eine Klebung zusammengefügt werden. Detailliertere Informationen zur Fertigung der Helmholtz-Resonatoren werden in AP1.3. erläutert. Zur Untersuchung des Einflusses einer Klebnaht, welche versteifend wirken könnte, wurde im Modell die Unterfunktion Fixed Constrains zur Unterdrückung einer möglichen Verformung der Seitenflächen des Helmholtz-Resonators verwendet (siehe die in Abbildung 2.40 dargestellte und umlaufende Linie).
- Modifikation 3: Die Frequenzlage der Schwingungsresonanz des Biegebalkens ist u.a. abhängig von der Materialsteifigkeit. Zur Beurteilung der Sensitivität der Frequenzlage der ersten Schwingungsresonanz des Biegebalkens, auch gegenüber möglichen Abweichungen realer Materialeigenschaften und Angaben in Produktdatenblättern, wurde der E-Modul des Materials des Biegebalkens bzw. des gesamten Helmholtz-Resonators variiert.

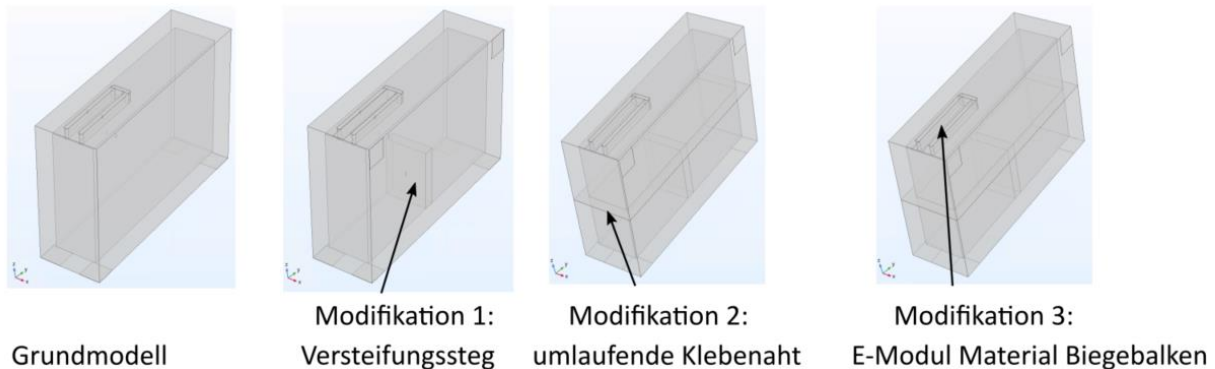


Abbildung 2.40: Darstellungen eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken, sowie in einer Studie untersuchte Modifikationen zur Abschätzung deren Einflusses auf die Schallabsorptionscharakteristik des Resonators

Die Ergebnisse der Parametersensitivitätsstudie werden mit Abbildung 2.41 diskutiert. Die Absorptionscharakteristik, ausgedrückt durch den Absorptionskoeffizienten des Grundmodells, sind in der Farbe Pink dargestellt. Es lassen sich zwei Absorptionsspitzen bei ca. 360 Hz mit einer Amplitude von ca. 0,7 bzw. 590 Hz mit einer Amplitude von ca. 0,3 erkennen, welche deutlich von den analytischen Ergebnissen 521 Hz und 633 Hz abweichen. Eine Ursache für die Abweichung der Ergebnisse ist auf die Annahme unterschiedlicher Wandsteifigkeiten in den verwendeten Modellierungen zurückzuführen. Im Gegensatz zu den in der analytischen Auslegung angenommenen ideal steifen Wänden wird im numerischen Modell die Wandsteifigkeit des realen E-Moduls berücksichtigt, wodurch Verformungen bzw. Schwingungen der Resonatorenwände in die Berechnung einfließen. Über die im Modell aktivierten Kopplungsparameter werden Schwingungseinflüsse der Resonatorwände auf die Resonanzwirkung eines Helmholtz-Resonators, physikalisch wirkend als ein erweitertes Feder-Masse-System, berücksichtigt. In Abbildung 2.42 a) wird gezeigt, dass bei einer Frequenz ca. 475 Hz die Seitenwände des Resonators in der erste Eigenmode schwingen. Die durch ein Schwingen der Seitenwände hervorgerufenen Volumenänderungen der Kavität des Helmholtz-Resonators führen dazu, dass die Volumensteifigkeit der Luftfeder geringer wird, wodurch die erste Resonanzfrequenz in niedrigere Frequenzbereiche verschoben wird. Zur Unterdrückung der ersten Eigenmode der Seitenwände des Helmholtz-Resonators wurde, wie in Abb. 2.40 illustriert, als erste Modifikation ein sogenannter Versteifungssteg eingebaut. Dieser Versteifungssteg verbindet die beiden Seitenflächen des Resonators und stellt quasi eine Freiheitsgradeinschränkung dar, welche zu einer geringen Volumenänderung des Luftvolumens in der Kavität führt, was an den Auslenkungsamplituden der Seitenwände in Abbildung 2.42 b) zu erkennen ist. Durch diese Modifikation 1 konnte die Volumensteifigkeit der Luft in der Kavität erhöht werden, sodass sich die erste Resonanzfrequenz auf ca. 440 Hz verschoben hat. Die höhere Volumensteifigkeit wirkt darüber hinaus auch der Auslenkung des Biegebalkens entgegen, was

sich durch eine leichte Verschiebung der zweiten Resonanzfrequenz hin zu höheren Werten und einer höheren Dämpfung zeigt.

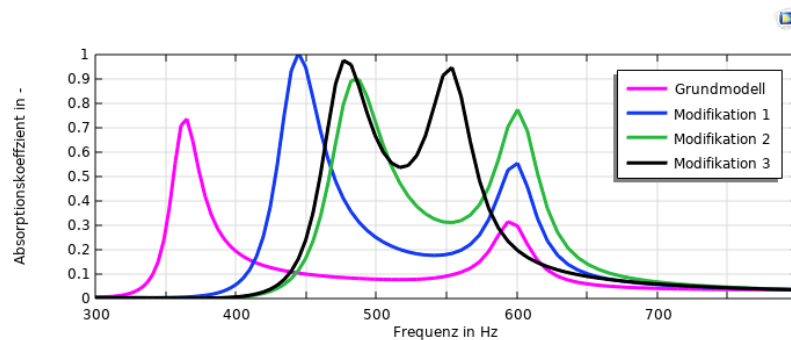


Abbildung 2.41: Numerische Ergebnisse der Studie über Parametersensitivitäten unterschiedlicher Modifikationen auf die Absorptionscharakteristik eines Helmholtz-Biegebalken-Resonators

Fertigungsbedingt wurde, wie in Abbildung 2.40 gezeigt, horizontal mittig am Helmholtz-Resonator eine mit Epoxid-Harz verklebte Fügenaht in die zu fertigende Komponente eingebracht. Zur Berücksichtigung dieser Bauweise im numerischen Modell, wurde dort eine Freiheitsgrad-Einschränkung implementiert und mit Modifikation 2 bezeichnet. Die Auswirkungen dieser Modifikation 2 auf die Absorptionscharakteristik wird in Abbildung 2.41 anhand der grünen Kurve gezeigt. Die erste Resonanzfrequenz verschiebt sich von von ca. 440 Hz (blaue Kurve) auf ca. 480 Hz (grüne Kurve). Der durch die Klebnaht modellierte Versteifungseffekt führt zu einer weiteren Verringerung der Schwingamplituden der Seitenwände und daraus folgend zu einer höheren Luftsteifigkeit im Helmholtz-Resonator und der Verschiebung von Schwingungsmoden der Resonatorenwände in höhere Frequenzbereiche.

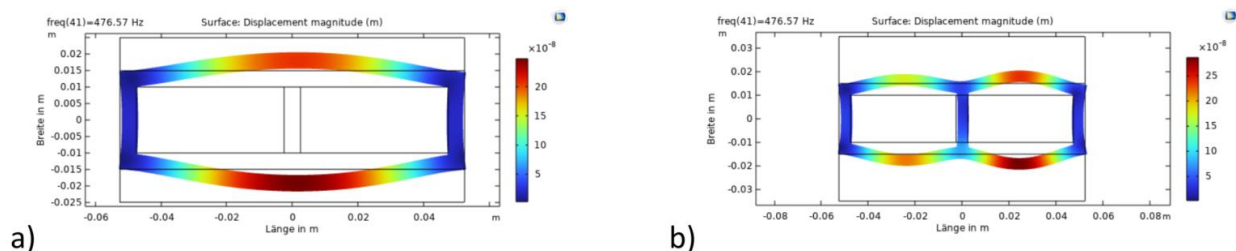


Abbildung 2.42: Numerische Ergebnisse der Bewegungsamplitude der Resonatorwände des Helmholtz-Biegebalken-Resonators bei Schallanregung unter Berücksichtigung von Materialeigenschaften. a) ohne Versteifungssteg, b) mit Versteifungssteg

In Modifikation 3 wurde der E-Modul des Materials von 36 MPa auf 32 MPa reduziert. Das entsprechende Simulationsergebnis wird in Abbildung 2.41 als schwarze Kurve dargestellt. Die erste Resonanzfrequenz verschiebt sich etwas in einen niedrigeren Frequenzbereich. Der zuvor aufgeführten Argumentation folgend führt eine Reduzierung des E-Moduls zu einer geringen Wandsteifigkeit, welche mehr Verformungen durch Schalldruckeinwirkungen zulässt. Größere Verformungsamplituden führen durch Veränderung des Volumens der Kavität zur einer geringen Volumensteifigkeit, welches eine Verschiebung der ersten Resonanzfrequenz zur Folge hat. Der zweite Resonanzpeak verschiebt sich von 600 Hz (grüne Kurve) auf ca. 550 Hz (schwarze Kurve), was unter Beachtung einschlägiger Literatur für die Auslenkung von einseitig eingespannten Balken auf eine verringerte Wandsteifigkeit durch Reduzierung des E-Moduls zurückzuführen ist. Das hier vorgestellte Model wurde mit experimentellen Ergebnissen in AP4.2 validiert. Eine Übersicht der akustischen Parameter basierend auf den geometrischen Parametern aus Tabelle 2.10 wird in Tabelle 2.11 zusammengefasst.

Tabelle 2.11: Akustische Parameter eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken für das Funktionsmuster

Akustische Parameter	
Numerische Ergebnisse	
f_{HR}	475,9 Hz
f_{CL}	554 + 13,8i Hz
$f_{CL,V}$	561 + 13,7i Hz
f_1	461,75 + 1,2i Hz
f_2	538,7 + 11,8i Hz
Analytische Ergebnisse	
f_1	521 Hz
f_2	633 Hz

Die in Tabelle 2.10 und Tabelle 2.11 vorgestellten geometrischen sowie akustischen Parameter wurden für die Auslegung von Helmholtz-Resonatoren Arrays verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der Auslegung der Helmholtz-Resonator-Arrays für die Funktionsmuster ist im Kapitel zu AP1.3 gegeben.

Gesamtwandaufbau

Positionierung des Luftkanals in der Kabinenwand unter Beachtung kritischer Wandabstände von PAMs

Ein Doppelwandsystem, wie z.B. einer Rumpfstruktur mit Seitenwandpaneel, ist ein gekoppeltes schwingendes System, welches über die dazwischen liegende Luft, wirkend als Feder, miteinander verbunden ist. Durch eine Integration von akustischen Metamaterialien innerhalb einer Doppelwand werden der Doppelwand weitere Freiheitsgrade hinzugefügt. In (11) wurde dieser Einfluss näher untersucht. Als Ergebnis können sogenannte kritische Wandabstände berechnet werden, welche als Auslegungskriterien in der Auslegung des Funktionsmusters berücksichtigt wurden. Durch die Integration eines akust. Metamaterials in eine Doppelwand wird neben dem gewünschten eingebrachten Effekt, einer frequenzabhängigen Schalldämmmaßerhöhung, eine Resonanzfrequenz durch Kopplung der Schwingungseigenschaften des akustischen Metamaterials und der referenzierten Wandkomponente, z.B. Rumpfsstruktur oder Seitenwandpaneel, über das dazwischenliegende, als Feder wirkende, Luftvolumen eingebracht. Für detailliertere Erläuterungen wird auf (11) verwiesen.

Zur Berücksichtigung der kritischen Wandabstände in der Auslegung des Funktionsmusters wurden dies nach (11) in Tabelle 2.12 berechnet und in Abbildung 2.43 dargestellt. In dieser Abbildung wurde der Zwischenraum der Kabinenwand zwischen Rumpfstruktur und Seitenwandpaneel der Kabine mit einem Maßstab (Einheit cm) versehen, dessen Ursprung an der Rumpfstruktur liegt und der am Seitenwandpaneel endet. Die Lagen der berechneten kritischen Wandabstände im Zwischenraum, zwischen Rumpfstruktur und Seitenwand, sind mit einem pinken Kreis gekennzeichnet. Die Positionierungen der akustischen Metamaterialien wurden mit Sternen gekennzeichnet. Um möglichst wenig Bauraum in der Kabinenwand mit dem Luftkanal in Anspruch zu nehmen wurde eine Luftkanaltiefe von 30 mm gewählt. Aus Abbildung 2.43 kann man entnehmen, dass die akustischen Metamaterialien nicht auf den Positionen vorher berechneter kritischer Wandabstände liegen.

Tabelle 2.12: Kritische Wandabstände von akustischen Metamaterialien im Funktionsmuster

PAM1	
$d_{krit,1}$	0,010 [m]
$d_{krit,2}$	0,083 [m]
PAM2	
$d_{krit,1}$	0,003 [m]
$d_{krit,2}$	0,110 [m]

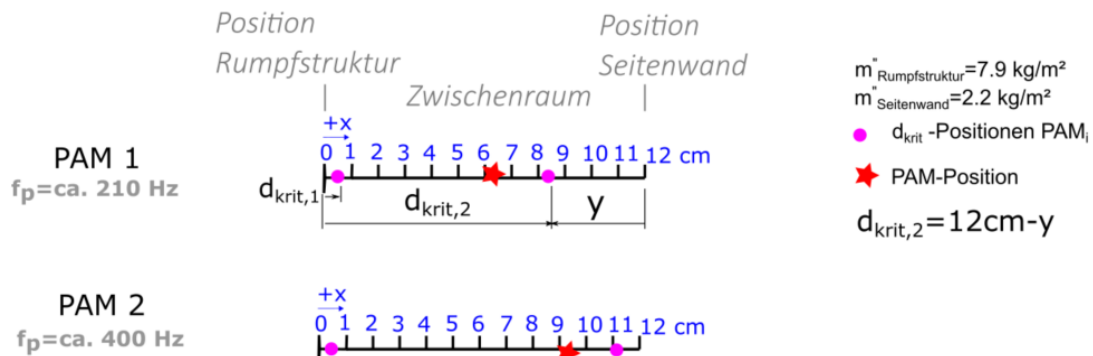


Abbildung 2.43: Darstellung der positionierten akustischen Metamaterialien im Kabinenwand-Zwischenraum in Relation zu deren kritischen Wandabständen

Überblick über die numerische Modellierung des Funktionsmusters

Zur Abschätzung der zu erwartenden Schalldämmmeigenschaften des Funktionsmusters wurde ein vereinfachtes numerisches Modell vom Funktionsmuster in Comsol Multiphysics entwickelt. In Abbildung 2.44 wird eine Darstellung des numerischen Modells gezeigt. Es werden die bereits auf Seite 80 eingeführten und von Comsol bereitgestellten Funktionsmodule *solid mechanics* und *pressure acoustic* zur numerischen Integration physikalischer bzw. akustischer Effekte verwendet. Die akustischen Wirkweisen der Einzelkomponenten des Funktionsmusters Rumpfstruktur, Glaswolle (GW), akustische Metamaterialien (PAMs), Helmholtz-Resonatoren und Seitenwand wurden wie folgt in das numerische Modell integriert:

- Rumpfstruktur: vereinfacht modelliert über den Ansatz einer zur Prüfkomponenten flächenmassenäquivalenten homogenen Platte
- Glaswolle (GW): Modelliert mit äquivalenter Fluid Methode nach Belany-Bazley Miki
- Akustische Metamaterialien (PAMs): über Transfer-Impedanzen der jeweiligen PAMs wurde die akustische Wirkung in das Modell des Gesamtwandaufbaus integriert. Die akustische Impedanz eines PAMs wurde mit dem zuvor beschriebenen Modell auf Seite 76 zuvor berechnet.
- Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken: Die Resonatoren wurden mit einem analytischen Ansatz eines effektiven Kompressionsmoduls aus (25) eingebunden
- Seitenwand: vereinfacht modelliert über den Ansatz einer zur Prüfkomponente flächenmassenäquivalenten homogenen Platte

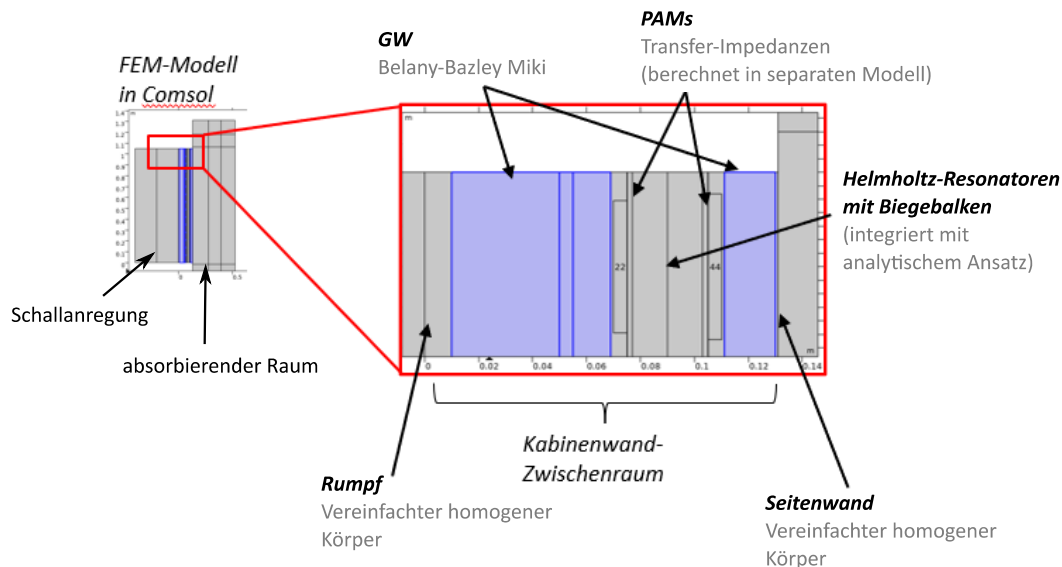


Abbildung 2.44: Darstellung des in Comsol Multiphysics aufgebauten numerischen Modells für das Funktionsmuster mit Bezeichnung integrierter Funktionsbausteine

Untersucht wurden mehrere sich unterscheidene Kabinenwandkonfigurationen:

- Konfiguration: Referenz

Als Bewertungsmaßstab wurde eine sogenannte Referenzkonfiguration, wie sie bereits in Unterabschnitt A. *Aufbau Funktionsmuster, Prototypen sowie Komponenten* eingeführt wurde, berechnet (S. 52 -54).

- Konfiguration: Funktionsmuster

Das Funktionsmuster wurde mit integriertem Luftkanal, einmal in der Variante mit und ohne Wirkung der Helmholtz-Resonatoren, berechnet.

- Konfiguration: Referenz massenäquivalent zu Funktionsmuster

Zur Bewertung der akustischen Leistungsfähigkeit der resonant wirkenden Schallisolationsverfahren, akust. Metamaterialien und Helmholtz-Resonatoren, in dem Funktionsmuster, wurde zusätzlich eine zum Funktionsmuster massenäquivalente Referenzwandkonfiguration simuliert. Die durch den Luftkanal zusätzlich eingebrachte Masse von ca. $+3,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ wurde im massenäquivalenten Referenzfall zur bestehenden Seitenwand hinzugefügt.

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 2.45 aufgeführt. In der Farbe grün wird die Referenzkonfiguration nur mit Glaswollisolierung im Zwischenraum, äquivalent zu einem konventionellen Kabinewandaufbau, dargestellt. Die blaue Kurve zeigt das Funktionsmuster mit integriertem Luftkanal. Bei den Frequenzen ca. 210 Hz und ca. 400 Hz bzw. ca. 475 Hz lassen sich gut die Dämmwirkungen der akustischen Metamaterialien bzw. Helmholtz-Resonatoren erkennen. Die hellblaue Kurve zeigt das Funktionsmuster ohne Wirkung der Helmholtz-Resonatoren im Luftkanal. Aus dem direkten Vergleich zwischen den Kurven Funktionsmuster (blau) und Funktionsmuster ohne Wirkung Helmholtz-Resonatoren (hellblau) wird ersichtlich, dass die Helmholtz-Resonatoren einen wichtigen Beitrag zur breitbandigeren Schalldämmmaßerhöhung bewirken. Die zum Funktionsmuster massenäquivalente Referenzwandkonfiguration ist in rot dargestellt und zeigt wie erwartet ein über den gesamten betrachteten

Frequenzbereich höheres Schalldämmmaßprofil gegenüber der grünen Kurve. Für einen von der Luftfahrt akzeptierten Wandaufbau, ist die Masse der hier mit Labormitteln gefertigten Luftkanalkomponenten, insbesondere die der PAMs, deutlich zu hoch, die aber, wie später noch gezeigt wird, deutlich reduziert werden kann.

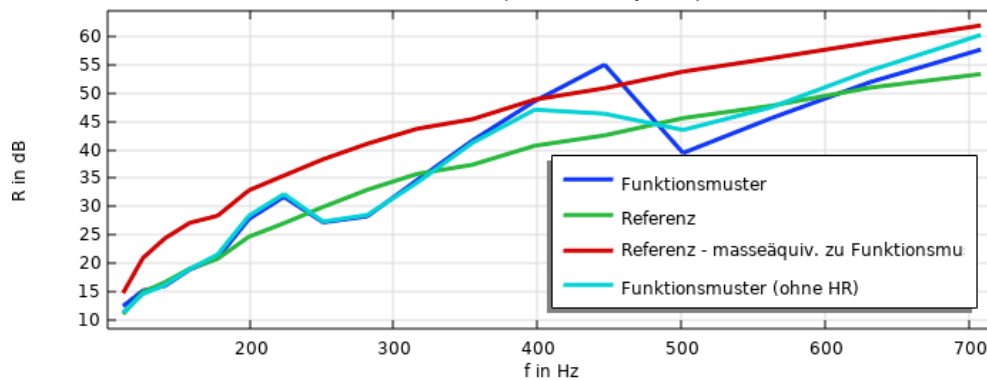


Abbildung 2.45: Numerische Simulationsergebnisse zur Abschätzung der zu erwartenden Schalldämmeigenschaften des Funktionsmuster im Vergleich zu einem Referenzwandaufbau (Darstellung in 1/6-Oktavspektren)

Theoretische Untersuchung des Gesamtschalldämmmaßes des Funktionsmusters in Abhängigkeit der gewählten Luftkanal-Einbauposition in Relation auf die dortigen kritischen Wandabstände

Die Positionierung des Luftkanals im Zwischenraum der Kabinenwand wurde zuvor anhand der Positionen entsprechender kritischer Wandabstände durchgeführt. Mit dem im Vorwege aufgeführten numerischen Modell eines Funktionsmusters wurde eine numerische Studie durchgeführt, in der die Position des Luftkanals in der Kabinenwand verändert wurde und die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Gesamtschalldämmmaß berechnet. In der Studie werden zwei Luftkanalpositionen in der Kabinenwand definiert (vgl. Abbildung 2.46):

- Luftkanal Position 1: Abstand Luftkanal von Rumpfstruktur 45 mm
- Luftkanal Position 2: Abstand Luftkanal von Rumpfsruktur 65 mm

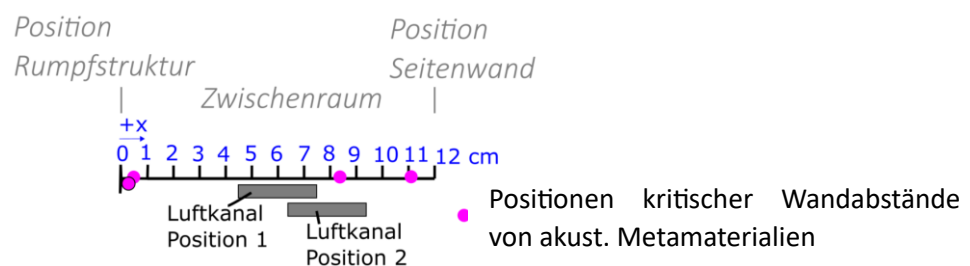


Abbildung 2.46: Maßstab zur Darstellung eines 12 cm tiefen Zwischenraums einer Kabinenwand und Kennzeichnung simulierter Luftkanalpositionen in Funktionsmuster sowie deren Abstände zu kritischen Wandabständen ausgelegter akustischer Metamaterialien

Die Ergebnisse in Abbildung 2.47 zeigen, dass die größten Abweichungen zwischen den berechneten Gesamtschalldämmmaßen, im Frequenzbereich der ausgelegten ersten Anti-Resonanzfrequenzen der akustischen Metamaterialien von ca. 210 Hz bzw. ca. 400 Hz liegen. In Funktionsmuster-Position 2 wurde der Luftkanal, gegenüber dem Funktionsmuster-Position1, um ca. 20 mm in Richtung der Seitenwand verschoben (vgl. Abbildung 2.46). In den Ergebnissen in Abbildung 2.47 konnte eine Verringerung des Schalldämmmaßes bis zu ca. 5 dB um ca. 400 Hz abgeschätzt werden.

Die in Abbildung 2.47 berechneten Ergebnisse werden mit Messergebnissen in AP4.2 validiert.

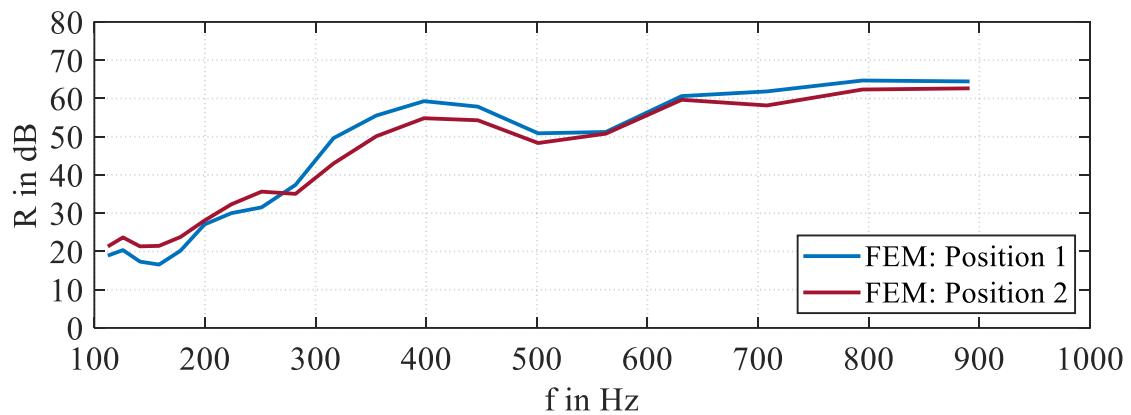


Abbildung 2.47: Mit numerischem Modell unterschiedlich parametrierter Funktionsmuster berechnete Schalldämmmaßprofile für zwei unterschiedlich nahe zur Seitenwand positionierten Luftkanäle (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

Theoretische Betrachtungen zur Integration mikroperforierter Absorber in das Kabinenwandkonzept

Folgende aufgeführte Ergebnisse wurde z.T. in (26) veröffentlicht.

Ergebnisse aus der Literatur zeigen, dass die akustische Wirkung von MPAs u.a. beeinflusst wird vom Lochdurchmesser der Perforation. In (27) wird gezeigt, dass kleine Lochdurchmesser bis auf ca. 0,15 mm zu einer deutlichen Vergrößerung der theoretisch berechneten, tieffrequent einstellbaren Absorptionsbandbreite des MPAs führen. In Kombination mit Glaswolle zeigen Messergebnisse an einem MPA, dass sich die Absorptionsbandbreite eines MPA vergrößern lässt (28). Dieser Effekt soll durch eine Kombination eines MPAs mit im gegenwärtigen Wandaufbau vorhandener Glaswollisolierung ausgenutzt werden. In (29) werden die Auswirkungen von Vibrationen des MPAs auf seine akustische Absorptionseigenschaft theoretisch untersucht. Durch Schallwellen erzwungene Schwingungen eines z.B. mikroperforierten Absorbers führen im ungünstigen Fall einer gleichgerichteten Phasenlage der Schwingungsrichtung des MPAs und der Schwingungsrichtung der Luftteilchen zu verminderten Absorptionseigenschaften.

Um die sehr strengen Anforderungen in der Luftfahrt hinsichtlich Strukturgewicht zu erfüllen, müssen grundsätzlich leichtgewichtige Bauweisen von Bauteilen realisiert werden. Dünne MPA-Platten müssen daher durch konstruktive Maßnahmen so versteift werden, dass ein Mitschwingen infolge von Schallwellenanregung minimiert werden kann.

Ein Ansatz ist dünne, flächige Materialien mit Stegen zu versteifen, um ein schallinduziertes Mitschwingen zu reduzieren. In Abbildung 2.48 werden zwei akustisch identisch ausgelegte MPA-Proben für ein akustisches Impedanzrohr gezeigt, welche in den Varianten b) ohne Versteifung und c) mit Versteifung aus dem Material Polyamid PA12 hergestellt wurden (Herstellungsverfahren: Lasersintern). Während einer Absorptionsmessung im Impedanzrohr (Aufbau siehe Unterabschnitt AP5.1) wurde parallel mit einem Laservibrometer die Geschwindigkeitsamplitude des in a) gekennzeichnet Punkts auf den MPAs gemessen. Es wurde im Bereich der Resonanzfrequenz $f_R = 270 \text{ Hz}$ der MPAs in Variante b) eine Geschwindigkeitsamplitude $\hat{v} = 0,5 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ und in c) $\hat{v} = 0,1 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ gemessen. Mit Versteifungsstegen konnten somit schallinduzierte Schwingungen auf dem MPA im Bereich der Lage der akustischen Resonanzfrequenz verringert werden.

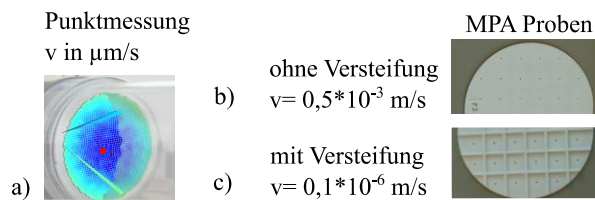


Abbildung 2.48: Darstellung von MPA-Proben für Impedanzrohrmessungen. In a) Darstellung der Geschwindigkeitsamplitudenverteilung über der MPA-Oberfläche, sowie MPA-Probe in b) ohne und c) mit Versteifungsstegen.

Das hier angewandte neuartige Kabinenwandkonzept mit integriertem Luftkanal bietet Integrationsmöglichkeiten von MPAs z.B. in der Nähe der Rumpfstruktur, Seitenwandpaneel, aber auch zusätzlich am oder im Luftkanal. Über Befestigungspunkte z.B. am Luftkanal lässt sich eine Versteifung des MPAs begünstigen. Denkbar ist auch eine multifunktionale Nutzung der Glaswollumhüllung als MPA wie in Abbildung 2.49 z.B. an Position 2.

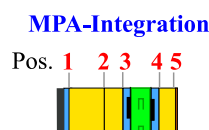


Abbildung 2.49: Darstellung der MPA- Integrationsmöglichkeiten in den neuartigen Wandaufbau mit Luftkanal

Zur Abschätzung des Beitrags eines MPAs zum Gesamtschalldämmmaß, des neuen Kabinenwandaufbaus wurde in Comsol Multiphysics ein vereinfachtes 2D FEM-Modell vom Prototyp nachgebaut, welches in Abbildung 2.44 visualisiert ist. Es wurden dabei die physikalischen Module:

- *solid mechanics*: für Rumpfstruktur und Seitenwandpaneel im Vergleich zum experimentellen Aufbau vereinfachten, massenäquivalenten ebenen Platten, sowie akust. Metamaterialen und
- *pressure acoustic*: für Glaswollisolierung sowie Helmholtz-Resonatoren [6], jeweils vereinfacht als äquivalent wirkende Fluide verwendet.

Das MPA wurde mit dem Sub-Modul *Interior Perforated Plate*, welches gute Übereinstimmungen mit unseren MPA-Impedanzrohrmessungen zeigte, modelliert. Als Schalleinfallbedingung wurde diffuser Schalleinfall gewählt. Das Modell wurde ansonsten geometrisch gleich dem vermessenden Funktionsmusters ausgelegt

Ergebnisse in (29) zeigen hohe Absorptionskoeffizienten bei MPAs mit Lochdurchmessern kleiner ca. 0,3 mm. Davon ausgehend wurde für die numerischen Untersuchungen des Potentials von MPAs im neuartigen Wandaufbau mit Luftkanal die Parameter $d = 0,1 \text{ mm}$ für Lochdurchmesser, $t = 0,5 \text{ mm}$ für die Plattendicke und $\sigma = 1 \%$ als Perforationsverhältnis gewählt.

In Abbildung 2.50 werden die Ergebnisse als Einfügedämmmaß des Wandaufbaus mit MPA gegenüber des Wandaufbaus ohne MPA, also nur integriertem Luftkanal, gezeigt. Ein positives Einfügedämmmaß beschreibt daher eine Erhöhung der Schalldämmwirkung des Wandaufbaus gegenüber des Wandaufbaus ohne MPA. In Abbildung 2.50 werden exemplarisch die rechnerisch abgeschätzten Ergebnisse für die MPA-Positionen 5 bzw. 2 (vgl. Abbildung 2.50) gezeigt. Zusätzlich wurde der Einfluss schallinduzierter Schwingungen durch Berücksichtigung der Massenträgheit des MPAs, wie in (29) detailliert beschrieben, aufgeführt (grüne Kurven in Abbildung 2.50). Der bestmögliche, unbewegliche Fall ohne schallinduzierte Schwingungen, geht von der Annahme einer unendlichen Massenträgheit aus.

In Abbildung 2.50 oben werden die numerischen Ergebnisse der Integration eines MPAs an Position 5 gezeigt. Die Rechenergebnisse zeigen, dass bei Berücksichtigung nur sehr geringer Massenträgheit des MPAs (grün), die ein Mitschwingen nicht verhindern kann, keine Erhöhung der Dämmwirkung erreicht werden konnte.

Hingegen lassen sich für den unbeweglichen Fall Erhöhungen im Einfügedämmmaß z.T. bis zu ca. 5 dB im Frequenzbereich ca. 150 – 600 Hz rechnerisch ermitteln.

Aus Abbildung 2.50 unten sieht man, dass für die Integration eines MPAs an Position 2, für den unbeweglichen Anwendungsfall (blau), eine Erhöhung der Dämmwirkung durch den MPA um z.T. bis zu 5 dB und mehr berechnet wurde. Bei geringer Massenträgheit und zu geringer Steifigkeit des MPAs kann die Dämmwirkung deutlich geringer ausfallen (grün).

Sehr steife und gleichzeitig leichtgewichtige MPAs könnten durch geeignete Bauweisen gefertigt werden, deren Struktur, wie zuvor an einem Beispiel gezeigt, durch einfache MPA-Platten deutlich versteift werden können, ohne dabei deren Masse zu stark zu erhöhen. An den durch die blauen und grünen Kurven in Abbildung 2.50 oben und unten aufgespannten Bereichen lässt sich zeigen, dass für die hier angenommen Randbedingungen theoretisch eine zusätzliche Schalldämmmaßerhöhung durch MPAs je nach Grad der erreichbaren Steifigkeit der MPA-Struktur erwartet werden kann.

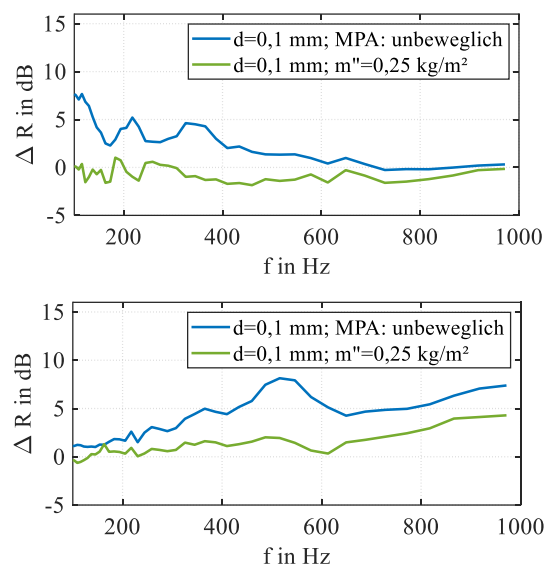


Abbildung 2.50: Darstellung der Potentiale von MPAs mit berechneten Einfügedämmmaßen, in 1/12-Oktavspektren, im neuartigen Kabinenwandkonzept am Fallbeispiel leichtgewichtiger MPA-Flächenmasse $m''=0,25\text{kg/m}^2$ (grün) gegenüber einem idealisiertem Fallbeispiel MPA unbeweglich (blau). Parameter MPA: Lochdurchmesser 0,1 mm, Porosität 1 %, Dicke 0,5 mm an Positionen a) Pos. 5 und b) Pos. 2 (vgl. Abb. 5). Die Nulllinie wird definiert durch den beschriebenen neuartigen Wandaufbau ohne MPA.

Für weitere Betrachtungen gilt es die Fertigbarkeit der Löcher in der Größenordnung von $d = 0,1\text{ mm}$ mit einzubeziehen. Eine weitere Herausforderung ist die Strukturschwingungsentkopplung von MPAs von umgebenden Komponenten.

Auslegung mikroperforierter Absorber für Fertigungsversuche

Für einen ersten Versuch für eine mögliche Implementierung von mikroperforierten Absorbern (MPA) in das hier untersuchte neuartige Kabinenwandkonzept wurden zunächst kleine kreisrunde Proben für Absorptionsversuche in einem Impedanzrohr, mit einem Durchmesser von 10 cm ausgelegt. Für die akustische, tieffrequente Dimensionierung wurde ein analytischer Ansatz aus (27) verwendet. Die ausgelegten geometrischen Parameter werden in Tabelle 2.13 vorgestellt. Die darausfolgenden analytisch abgeschätzten Absorptionsergebnisse werden in Abbildung 2.51 visualisiert. Man kann aus Abbildung 2.51 ablesen, dass nach der theoretischen Auslegung Absorptionsspitzen im Frequenzbereich um 300 Hz zu erwarten sind. Als Materialien wurden Aluminium und Kunststoff Polyamid PA12 ausgewählt. Da Aluminium

eine relativ hohe Dichte hat (2700kg/m^3), wurde der deutlich leichtere Kunststoff Polyamid mit einer Dichte von 930 kg/m^3 ausprobiert, um so den Leichtbauanforderungen der Luftfahrt nahe zu kommen. Die Proben aus Aluminium wurden HAW intern zerspanend hergestellt. Die Proben aus Polyamid wurde mit einem Lasersinternverfahren additiv gefertigt.

Tabelle 2.13: Parameter für zu fertigende mikroperforierte Absorber Proben

Probe	Material	t [mm]	d [mm]	B [mm]	D [mm]	f_R [Hz]	α [-]
1	Polyamid	1,8	1,1	15	50	280	1,0
2	Aluminium	1,0	0,9	15	50	310	1,0

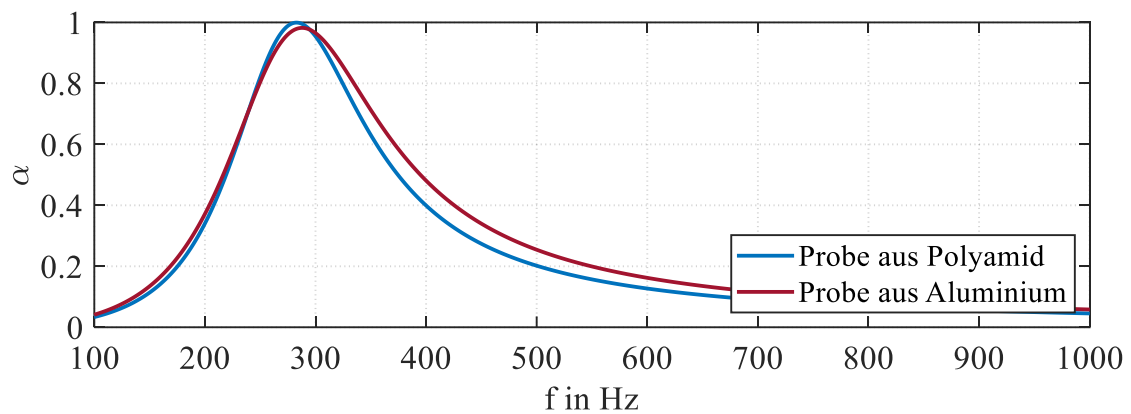


Abbildung 2.51: Analytische Abschätzungen mit gemäß (27) ausgelegter Impedanzrohrproben von mikroperforierten Absorbern aus den Materialien Polyamid bzw. Aluminium

b. Auslegung Prototyp

Akustische Metamaterialien

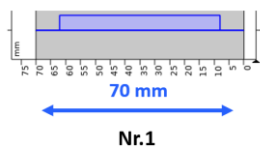
Bei den im Funktionsmuster vorgestellten akustischen Metamaterialien mit einer Flächenmasse von jeweils ca. $m'' = 1,9 \frac{kg}{m^2}$ wurde das größte Potential zur Einsparung von Masse identifiziert. Mittels Parameterstudien konnte durch Verkleinerung der Einheitszellen von akustischen Metamaterialien mit Streifenmassen eine Verringerung der Flächenmasse bei nur geringfügiger Reduktion des Schalldämmmaßes bei der Anti-Resonanzfrequenz erreicht werden. In Abbildung 2.52/Abbildung 2.53 wird gezeigt, dass von den ersten Entwürfen akustischer Metamaterialien des Funktionsmusters (Nr. 1) mit einer Flächenmasse ca. $1,9 \frac{kg}{m^2}$ und einer Einheitszellengröße von ca. 70 mm durch Verkleinerung der Einheitszellengröße auf ca. 21 mm akustische Metamaterialien mit einer Flächenmassen von ca. $1,2 \frac{kg}{m^2}$ rechnerisch erreicht wurde. Bei der jeweiligen Anti-Resonanzfrequenz in Abbildung 2.53 von ca. 400 Hz ist zu erkennen, dass der Verlust des Schalldämmmaßes ca. 2 dB beträgt, was gegenüber den Vorteilen der Reduzierung der Flächemasse des akustischen Metamaterials Nr. 6 gegenüber Nr. 1 von ca. $0,7 \frac{kg}{m^2}$ akzeptiert wurde. Die Parameter für die exemplarisch hier vorgestellten akustischen Metamaterialien Nr. 1 und Nr. 6 nahezu gleicher Anti-Resonanzfrequenz werden in Tabelle 2.14 gegeben (Nr. 1 entspricht Angaben aus Tabelle 2.9-Funktionsmuster).

Definition Einheitszelle



Erster Entwurf für Funktionsmuster

- Flächenmasse $m''_{PAM} = \text{ca. } 1,9 \frac{kg}{m^2}$
- Einheitszellengröße $e = 70 \text{ mm}$



Neuer Entwurf für Prototyp

- Flächenmasse $m''_{PAM} = \text{ca. } 1,2 \frac{kg}{m^2}$
- Einheitszellengröße $e = 21 \text{ mm}$

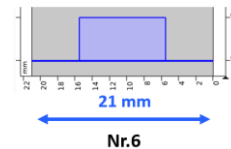


Abbildung 2.52: Definition einer Einheitszelle eines akustischen Metamaterials mit streifenförmigen Massen sowie Ergebnisse einer Studie zur Verringerung der Flächenmasse zuvor ausgelegte akustischer Metamaterialien.

Prinzipiell ist eine weitere Reduzierung der Einheitszellengröße akustischer Metamaterialien mit Streifenmassen denkbar, jedoch wäre eine Fertigung mit HAW internen Fertigungsmöglichkeiten nicht im Projektzeitrahmen möglich gewesen.

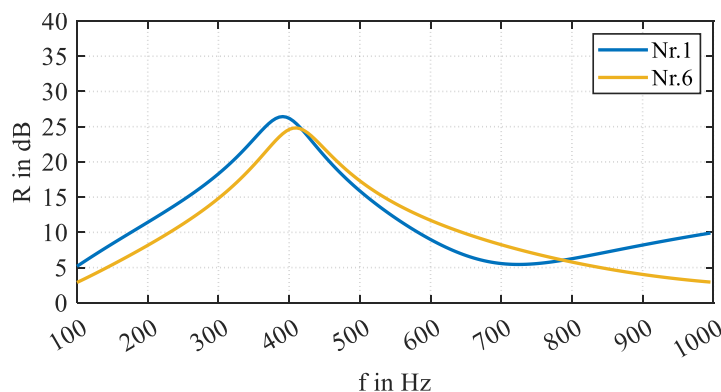


Abbildung 2.53: Darstellung einer Einheitszelle eines Metamaterials und Ergebnisse der Reduzierung der Flächenmasse einer Einheitszelle durch Veränderung der Einheitszellengröße (oben), sowie Auswirkungen auf die jeweiligen analytisch berechneten Schalldämmmaßeigenschaften

Tabelle 2.14: Parameter zweier akustisch gleich ausgelegter aber geometrisch verschiedener akustischer Metamaterialien mit Streifenmassen

Materialdaten		Geometriedaten			Sonstige Daten*		
PAM Nr.1 & Nr.6			PAM Nr.1	PAM Nr.6		PAM Nr.1	PAM Nr.6
ρ_M	460 kg/m ³	b_M	54 mm	10 mm	m''	1,9 kg/m ²	1,2 kg/m ²
η_{iso}^{**}	20 %	h_M	5 mm	5 mm	f_p	ca. 400 Hz	ca. 400 Hz
PAM Nr.1		h_b	100 μm	75 μm			
ρ_f	1400 kg/m ³	l_{Spalt}	19 mm	11 mm			
E_f	3500 MPa	e_{Zelle}	70 mm	21 mm			
PAM Nr.6							
ρ_f^{***}	942 kg/m ³						
E_f^{****}	2317 MPa						

* Werte aus Berechnung

** Wert angenommen in theoretischer Auslegung, basierend auf Ergebnissen aus (20)

*** Materialangaben vom Hersteller Biolink GmbH

**** Messdaten vom Projektpartner DLR

Numerische Validierung analytisch ausgelegter akustischer Metamaterialien

Das im vorherigen Absatz neu ausgelegte akustische Metamaterial, PAM Nr. 6, wurde mit dem auf Seite 76 bereits eingeführten numerischen Modell einer Einheitszelle validiert. Das Ergebnis wird in Abbildung 2.54 visualisiert. Zur Bewertung der für akustische Metamaterialien charakteristischen Schalldämmmaßerhöhung bei der Anti-Resonanzfrequenz gegenüber einer masseäquivalenten homogenen Platte, wurden in Abbildung 2.54 diese Daten ebenfalls eingezeichnet. Im Bereich der Anti-Resonanzfrequenz bei ca. 400 Hz zeigt sich eine rechnerische Schalldämmmaßerhöhung gegenüber eine masseäquivalenten homogenen Platte von > 10 dB.

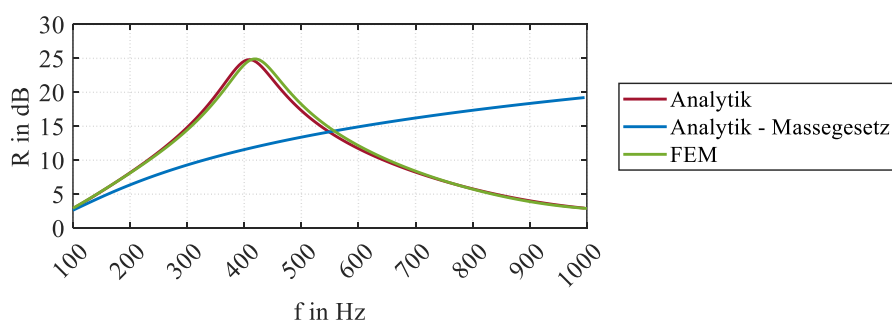


Abbildung 2.54: Schalldämmmaß eines analytisch neu ausgelegten akustischen Metamaterials für eine Anti-Resonanzfrequenz bei ca. 400 Hz im Vergleich mit entsprechenden numerischen Ergebnissen, sowie Gegenüberstellung des Schalldämmmaßes einer masseäquivalenten homogenen Platte.

Ergebnisse aus Untersuchungen des Funktionsmusters haben ergeben, dass das für das Funktionsmuster ausgelegte PAM1 bei ca. 210 Hz höherfrequent ausgelegt werden sollte. Ausgehend von dem in Tabelle 2.14 massereduzierten akustischen Metamaterial wurde ein akustisches Metamaterial mit einer Anti-Resonanzfrequenz bei ca. 670 Hz ausgelegt. Der Wirkbereich des akustischen Metamaterials bei ca. 670 Hz liegt damit etwas oberhalb des Wirkbereichs der bereits vorgestellten Helmholtz-Resonatoren. Die Parameter des akustischen Metamaterials bei ca. 670 Hz sind in Tabelle 2.15 angegeben. Die entsprechenden analytischen bzw. numerischen Ergebnisse der Schalldämmmaße des akustischen Metamaterials, sowie einer

massenäquivalenten homogenen Platte werden in Abbildung 2.55 aufgeführt. Deutlich zu erkennen ist dort eine relativ breitbandige Schalldämmmaßerhöhung des akustischen Metamaterials bei ca. 670 Hz von bis zu > 10 dB gegenüber einer massenäquivalenten Platte.

Tabelle 2.15: Parameter des für eine Anti-Resonanzfrequenz von ca. 670 Hz ausgelegten akustischen Metamaterials

Materialdaten		Geometriedaten		Sonstige Daten*	
PAM 2			PAM 2		PAM 2
ρ_M	460 kg/m³	b_M	10 mm	m''	1,2 kg/m²
ρ_f	1400 kg/m³	h_M	4 mm	f_p	ca. 670 Hz
E_f	3500 MPa	h_f	75 µm		
η_{iso}^{**}	20 %	l_{Spalt}	9 mm		
		e_{Zelle}	19 mm		
* Werte aus theoretischer Berechnung					
** Wert angenommen in theoretischer Auslegung, basierend auf Ergebnissen aus (20)					

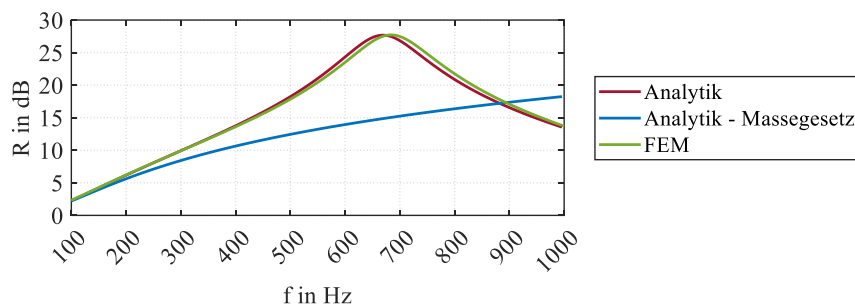


Abbildung 2.55: Analytisch berechnete Schalldämmmaßeigenschaften eines neu ausgelegten akustischen Metamaterials mit kleinerer Einheitszelle im Vergleich mit einer massenäquivalenten homogenen Platte sowie numerisch ermittelten Werten – Anti-Resonanzfrequenz ca. 670 Hz

Überprüfung ob kritische Wandabstände für akustische Metamaterialien bei ihrem Einbau in eine Kabinenwand vermieden werden können

Der Prototyp wurde mit einem originalen Seitenwandpaneel eines A320 aufgebaut. In Abbildung 2.56 a) wird das verwendete Seitenwandpaneel gezeigt. Das Seitenwandpaneel hat, gegenüber dem Seitenwandpaneel des Funktionsmusters, eine lokal abhängig verformte Geometrie um das Flugzegfenster. In Abbildung 2.56 b) wird ein besonders kritischer Bereich neben dem Fenster rot umrandet gekennzeichnet, in welchem eine starke lokale Formänderung des Seitenwandpaneels in besonderem Maße die Auslegung bzw. die Lage des Luftkanals in der Kabinenwand beeinflusst. Neben den Fensterbereichen verringert das Seitendpaneel die Kabinenwandtiefe in unterschiedlichen Umfängen (Abbildung 2.56 c)). Aus diesem Grund wurde der vertikale Verlauf des Luftkanals im Fensterbereich auf die Formgebung der Seitenwand angepasst (Abbildung 2.56 d)). Durch das Seitenwandpaneel wird daher nicht nur eine lokal abhängige Kabinenwandtiefe, sondern auch lokal abhängige Abstände vom Seitenwandpaneel zum Luftkanal bzw. den Luftkanalkomponenten neben den Flugzeugfenster vorgeben. Im Folgenden soll daher dieser Einfluss auf die Lage von kritischen Wandabständen neu ausgelegter akustischer Metamaterialien in der Kabinenwand untersucht werden.

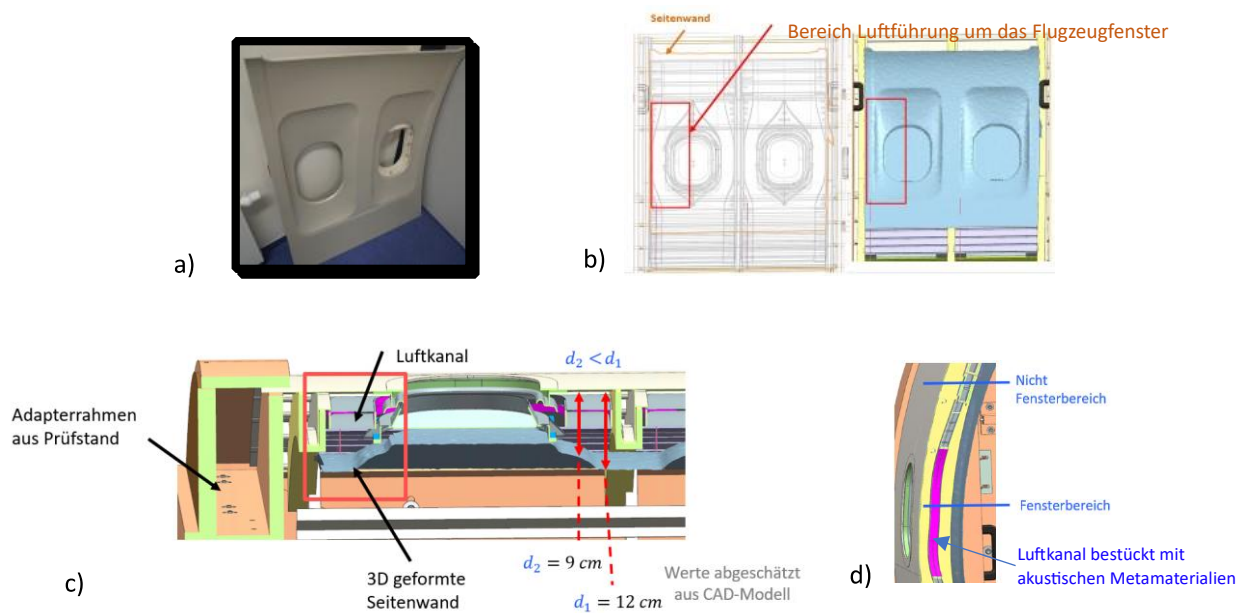


Abbildung 2.56: Foto des im Prototyp verwendeten Seitenwandpanels und Darstellung des Einflusses der speziellen Form des Seitenwandpanels auf die geometrische Auslegung des Luftkanals im Fensterbereich.

Die mit der Methode aus (11) berechneten kritischen Wandabstände werden in Tabelle 2.16 aufgeführt. In Abbildung 2.57 werden die Ergebnisse kritischer Wandabstände aus Tabelle 2.16 in Relation zu den Einbaupositionen der akustischen Metamaterialien gezeigt. Mit diesen Werten wurden exemplarisch für zwei Wandabstände im Fensterbereich bzw. Ober- sowie Unterhalb des Fensterbereichs die Untersuchungen durchgeführt. Die Lage der Punkte innerhalb der Wandbereiche sind, wie schon zuvor beim Funktionsmuster, maßstäblich in cm eingezeichnet. Die kritischen Abstände zu den Wänden sind mit pinken Kreisen, sowie die Einbaupositionen der akustischen Metamaterialien mit roten Sternen gekennzeichnet. Aus den Darstellungen ist entnehmbar, dass beim Prototyp die Positionen kritischer Wandabstände der ausgelegten akustischen Metamaterialien sich nicht mit deren Einbaupositionen überlagern.

Tabelle 2.16: Kritische Wandabstände von akustischen Metamaterialien im Funktionsmuster

Fensterbereich Kabinenwandtiefe 9 cm		Nicht-Fensterbereich Kabinenwandtiefe ca. 12 cm	
PAM1 ($f_p = 400\text{ Hz}$)			
$d_{krit,1}$	0,003 [m]	$d_{krit,1}$	0,003 [m]
$d_{krit,2}$	0,080 [m]	$d_{krit,2}$	0,109 [m]
PAM2 ($f_p = 670\text{ Hz}$)			
$d_{krit,1}$	0,001 [m]	$d_{krit,1}$	0,001 [m]
$d_{krit,2}$	0,086 [m]	$d_{krit,2}$	0,116 [m]

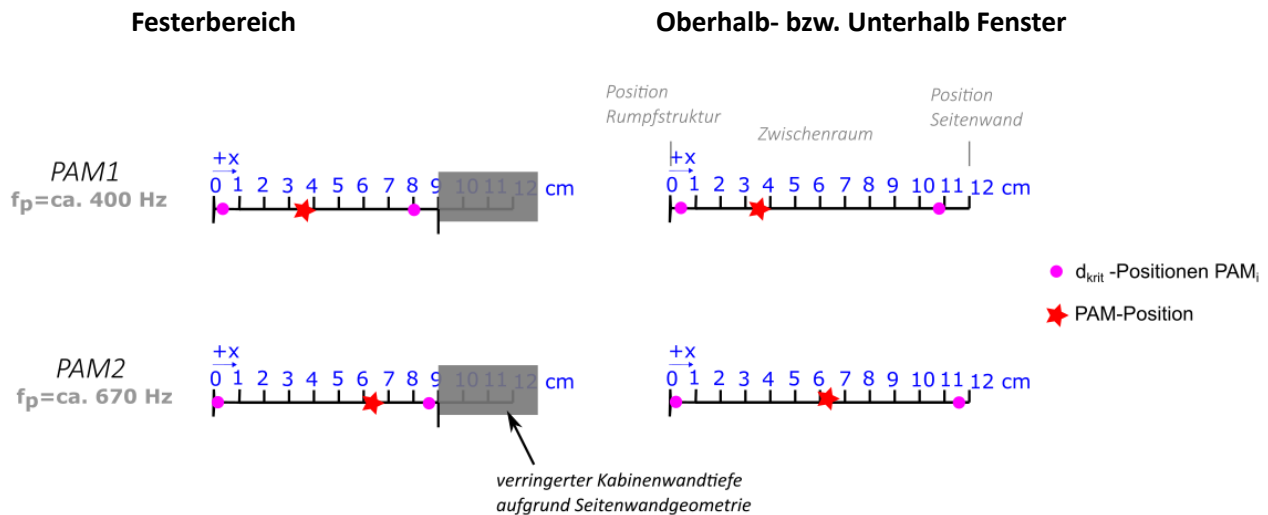


Abbildung 2.57: Skizze zur Untersuchung kritischer Wandabstände akustischer Metamaterialien des in einer Kabinenwand montierten Luftkanals im Fensterbereich sowie oberhalb- bzw. unterhalb des Fensterbereichs

Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich

Zur Beurteilung, welchen Einfluss ein Flugzeugfenster auf das Schalldämmmaß einer Kabinenwand gegenüber einer Kabinenwand ohne Flugzeugfenster hat, wurde eine Messstudie in dem Kabinenbereich des in der Klima-Akustikkammer eingebauten A320-Teilrumpfes durchgeführt und in AP4.2 dokumentiert.

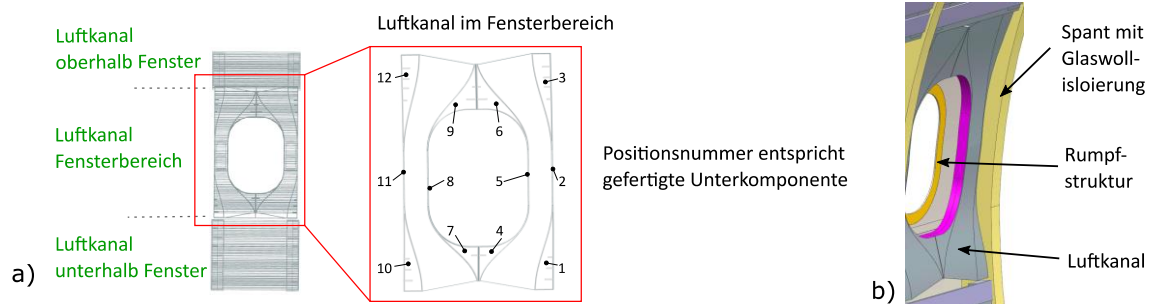


Abbildung 2.58: (a) Schematische Darstellung des Luftkanals im Fensterbereich, (b) Integration des Luftkanals im Fensterbereich der Rumpfstruktur dargestellt mit CAD-Modell

Wie auch bei der Auslegung des zuvor beschriebenen Funktionsmusters wird bei der Auslegung der im Prototyp eingebauten Komponenten der Ansatz multifunktionalen Nutzens von in die Kabinenwand eingebrachten Komponenten bzw. Materialien angewandt. Daher wurden die, den Luftkanal im Fensterbereich bildenden, sowie den Frischluftstrom führende Strukturen spezieller Formgebung, wo umsetzbar, als Helmholtz-Resonatoren ausgelegt (siehe Abbildung 2.58). Bei der Auslegung der Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich musste eine komplizierte Formgebung der Resonatorwände berücksichtigt werden. Aufgrund der vom originalen Seitenwandpaneel (vgl. Abbildung 2.56 a)) vorgegebenen komplexen Form und der darausfolgenden lokalen Verringerung der Kabinenwandtiefe wurde die Geometrie des Luftkanals im Fensterbereich darauf abgestimmt. Anhand des in Abbildung 2.14 gezeigten 3D-CAD-Modells wurde der Luftkanal im Fensterbereich mit seinen speziell geformten Strukturen / Gehäuse der Helmholtz-Resonatoren, unter Berücksichtigung der in der Kabinenwand benötigten Glaswollisloierung, in den Zwischenraum zwischen Seitenwandpaneel und Rumpfstruktur eingepasst. Als Ergebnis ergaben sich stark dreidimensional geformte Gehäuse für die Helmholtz-Resonatoren wie sie in Abbildung 2.59 gezeigt werden.



Abbildung 2.59: Foto von mittels additiver Fertigung hergestellter Gehäuse der Helmholtz-Resonatoren für den Luftkanal im Fensterbereich. Öffnungen für Helmholtz-Resonator Wirkung nachträglich gefertigt.

Die Fertigung der in Abbildung 2.59 gezeigten Gehäuse für die Helmholtz-Resonatoren wurden HAW intern mittels Additiver Fertigung im KKS-Labor und manueller Nachbearbeitung durchgeführt. Als Helmholtz-Resonator-Konzept wurde hier nicht eine Variante mit Biegebalken, sondern eine Variante mit mehreren kreisrunden Öffnungen pro Resonator gewählt. Der Grund liegt in den, durch das additive Fertigungsmittel Filament, zu erwartenden sehr steifen Materialeigenschaften (Material: Ultimaker PLA). Dies hätte zur Folge, dass die Resonanzfrequenz eines Biegebalkens, welcher im ersten Ansatz in der Größenordnung eines Biegebalkens der ausgelegten Helmholtz-Resonatoren des Funktionsmusters liegen sollte (vgl. Auslegung Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken ab Seite 78), oberhalb des hier betrachteten Frequenzbereichs liegen würde. Eine Abstimmung eines Biegebalken mit sehr steifen Materialeigenschaften auf einen Frequenzbereich <1000 Hz ist prinzipiell durch Erhöhung der Masse am freien Ende des Biegebalken, Vergrößerung der Länge des Biegebalken, Materialeigenschaften bzw. den Einspannbedingungen denkbar. Eine detaillierte Erforschung dieser Maßnahmen konnte im zeitlichen Umfang nicht abschließend durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurden mehrere, einfacher zu fertigende, kreisrunde Löcher pro Resonatorgehäuse gebohrt. Die Resonatoröffnung bzw. Resonatoröffnungen wurden mit der Methode in (30) ausgelegt. Als Resonanzfrequenz wurde in Anlehnung an die Ergebnisse aus Tabelle 2.11 und zur Vergrößerung des Füllgrads der Helmholtz-Resonatoren in der Kabinenwand, eine Resonanzfrequenz von ca. 510 Hz gewählt, welche zwischen den Resonanzfrequenzen f_1 bzw. f_2 der Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken (vgl. Tabelle 2.11) liegt. Eine Auflistung der ausgelegten geometrischen sowie akustischen Parameter ist in Tabelle 2.17 dargestellt. Eine Validierung der theoretischen Ergebnisse mit experimentell ermittelten Messergebnissen ist in Arbeitspaket 4.2. dokumentiert.

Tabelle 2.17: Auflistung geometrisch und akustisch ausgelegter Parameter für die Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich

Resonatorgehäuse-Nr. / Strukturteil-Nr. (vgl. Abbildung 2.58)	Wandstärke bzw. Öffnungslänge [mm]	Volumen Kavität [mm ³]	Anzahl Öffnungen [-]	Durchmesser Öffnung [mm]	Berechnete Resonanzfrequenz [Hz]
1,10	2	184974	6	4,5	523
3,12	2	200984	5	5,5	524
4,7	2	102000	4	4,0	531
6,9	2	172510	5	5,0	531

Gesamtwandaufbau

Die zu erwartenden Schalldämmmaßeigenschaften des Prototyps wurden mit dem auf Seite 85 bereits eingeführten vereinfachten numerischen Modell berechnet. Die Modellierungsmethodik der Rumpfstruktur wurde für den Prototyp dahingehend optimiert, dass mit Messdaten, von Abbildung 2.99, eine Transfer-Impedanz der Rumpfstruktur berechnet und in das numerische Modell integriert wurde. Dieser Modellierungsansatz ermöglicht die Berücksichtigung weiterer spezifischer Schwingeffekte der Rumpfstruktur, welche durch den komplexen Aufbau einer Originalrumpfstruktur, bestehend aus Spanten- und Stringerversteifungselementen, vorhanden ist. Eine Übersicht des numerischen Modells des Prototyps und der angewandten Modellierungsansätze der Wandkomponenten wird in Abbildung 2.60 gegeben.

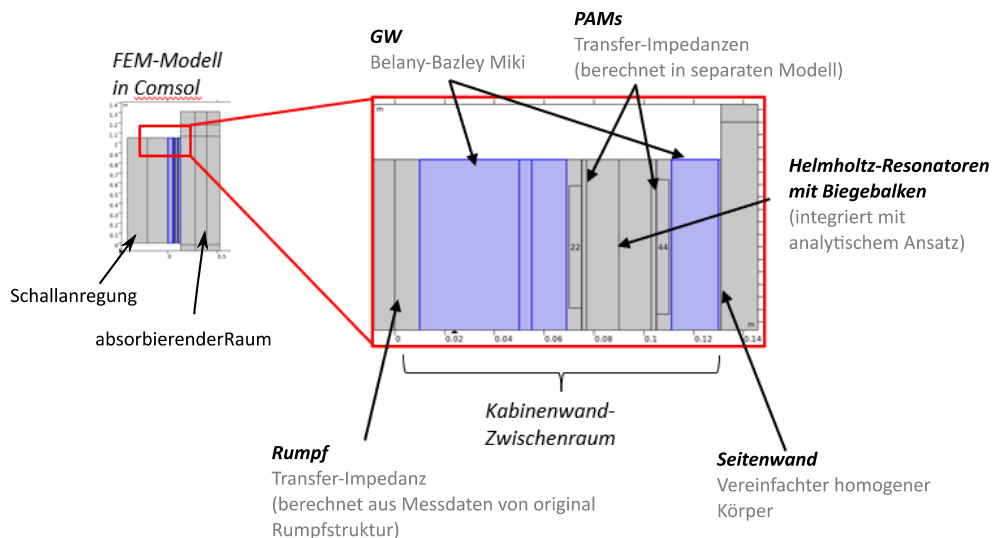


Abbildung 2.60: Darstellung des in Comsol Multiphysics vereinfacht aufgebauten Modells für numerische Schalldämmmaße-Berechnungen des Kabinenwand-Prototyps mit einer Übersicht der in der Modellierung verwendeten Teilmodelle für einzelne Wandkomponenten

In einer Simulationsstudie wurden mit dem in Abbildung 2.60 gezeigten numerischen Modell drei Wandkonfigurationen gerechnet:

- Prototyp: vgl. Aufbau wie in Abbildung 2.13 auf Seite 55
- A320 Referenz: vgl. Aufbau wie in Abbildung 2.13 auf Seite 55
- A320 Referenz massenäquivalent zu Prototyp: entspricht dem Wandaufbau wie A320 Referenz. Zusätzlich wurde das Seitenwandpaneel um die im Prototyp zusätzlich eingebrachte Masse, von ca. $2,6 \frac{kg}{m^3}$, erhöht.

Die Ergebnisse der Simulationsstudie werden in Abbildung 2.61 gezeigt. Die Schalldämmmaßeigenschaften des Prototyps sind in blau und die des A320 Referenzwandaufbaus in grün dargestellt. Die numerischen Ergebnisse zeigen, dass durch die Wirkung der Metamaterialien bei ca. 400 Hz bzw. 670 Hz sowie der Helmholtz-Resonatoren ca. 475 Hz die Schalldämmmaßeigenschaften des Prototyps über denen des Referenzwandaufbaus zu erwarten sind. Wird im A320 Referenzwandaufbau die durch den Luftkanal zusätzlich eingebrachte Masse berücksichtigt, ergibt sich eine etwas höhere Schalldämmung, welche mit der roten Kurve dargestellt wurde. Im direkten Vergleich der nahezu massengleichen Studienfälle Prototyp (blau) und A320 Referenz massenäquiv. (rot) ist weiterhin eine höhere Schalldämmwirkung durch den Prototyp < 1000 Hz um bis zu 10 dB zu erwarten.

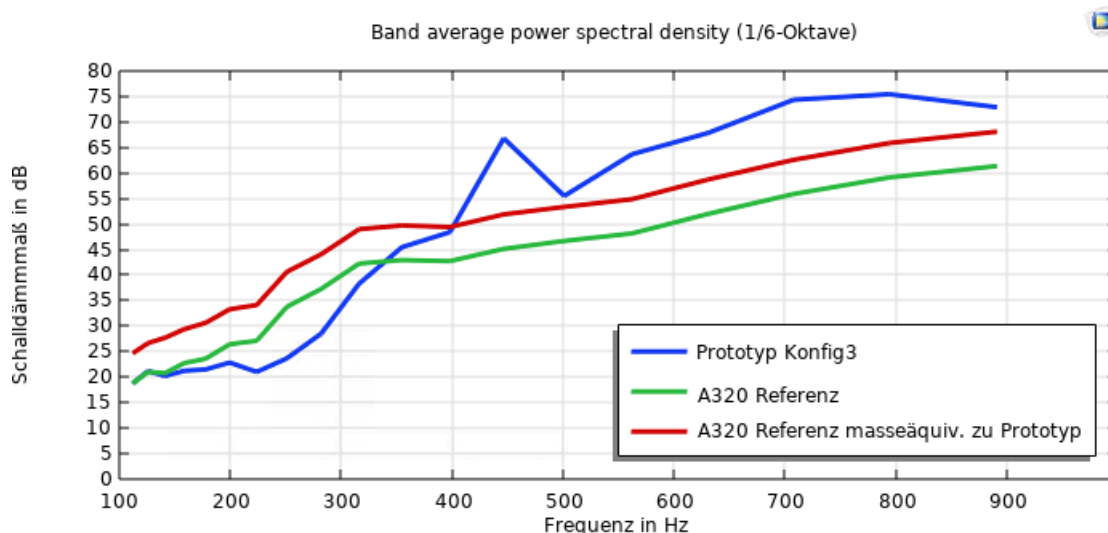


Abbildung 2.61: Numerisch abgeschätzte Schalldämmmaßegebnisse des Kabinenwand-Prototyps gegenüber einem Referenzwandaufbau bzw. einem massenäquivalenten Referenzwandaufbau

Potenzialabschätzung zur zusätzlichen Reduktion des Schalleintrags in die Kabine durch weitere Absorber im Fensterbereich

Zur Erhöhung der Absorptionskapazität der Kabinenwand wurde ein Ansatz untersucht, das Flugzeugfenster, ein bisher durch eine Kabinenwand kaum gedämpfter Schalltransmissionspfad, als Absorber zur Schallisolation der Flugzeugkabine zu nutzen. Ein denkbarer Ansatz ist die Integration von Helmholtz-Resonatoren oder mikroperforierten Absorbern, wie in Abbildung 2.62 gezeigt, im Randbereich als eine in ein Flugzeugfenster eingebrachte ringförmige und mit Helmholtz-Resonatoren ausgelegte Komponente. Perspektivisch könnte in einer weiterentwickelten Bauform eine ringförmige Komponente in ein Fensterverkleidungskonzept integriert werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Flugzeugfenster selber als Resonator auszulegen. Die in der Rumpfstruktur eines A320 Flugzeugs vorhandene Fensterverglasung besteht aus einer Zweifachverglasung, dessen Innenraum über einer Gummidichtung nach außen hin gelagert wird. Der Zwischenraum zwischen der Zweifachverglasung ist mit Luft gefüllt und könnte in einem ersten Ansatz als Resonatorkammer eines Helmholtz-Resonators genutzt werden. In der nach innen orientierten Verglasung ist bereits eine Bohrung von ca. 3 mm im Durchmesser vorhanden, welche letztendlich ein Beschlagen der Feuchtigkeit an der äußeren Fensterscheibe verhindert. Diese Bohrung könnte akustisch ausgelegt in Kombination mit dem Zwischenraum in der Zweifachverglasung einen Helmholtz-Resonator bilden.

Durch Positionierung von Schallabsorbern im bisher ungedämpften Schalltransmissionspfad eines Flugzeugfensters soll dort die Schalltransmission in einem Frequenzbereich gemindert werden, welche normalerweise in Hautfeldbereichen ohne Fensteröffnung durch die Kabinenwand in der Kombination aus Doppelwand mit integrierter Glaswolle bereits gemindert ist.

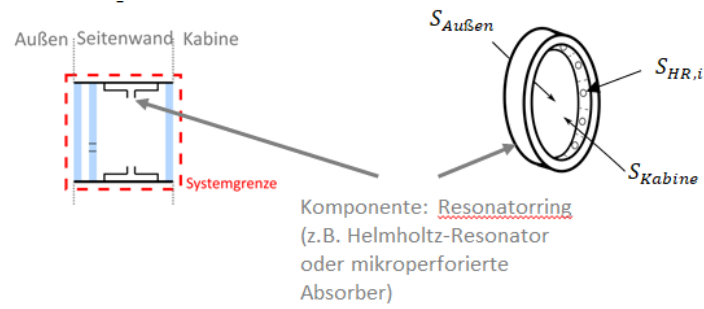


Abbildung 2.62: Konzeptskizze zur Integration von Schallabsorbern im Flugzeugfenster zur Dämpfung des bisher ungedämpften Schalltransmissionspfads

Zur Abschätzung ob und in welchem Maß sich im Flugzeugfenster integrierte Absorber auf das Gesamtschalldämmmaß einer Kabinenwand auswirken, wird der Ansatz einer analytischen Leistungsbilanzierung um die Systemgrenze Flugzeugfenster, vgl. Abbildung 2.62 bzw. Abbildung 2.63, angewendet. Die einzelnen Schallleistungen, berechnet mit $P_i = I_i \cdot S_i$, werden zur Bilanzierung wie folgt angenommen:

- P_e : einfallende Schallleistung (z.B. Triebwerkslärm oder weißes Rauschen)
- P_{VL} : Schallverlustleistung in der Luft (hier angenommen als vernachlässigbar)
- P_{VA1} : Schallleistungsverlust durch eine Absorberkomponente Nr.1 im Flugzeugfenster (z.B. Helmholtz-Resonatoren ausgelegt als integrierte ringförmige Komponente)
- P_{VA2} : Schallleistungsverlust durch eine Absorberkomponente Nr.2 im Flugzeugfenster (z.B. als Helmholtz-Resonator ausgelegte Zweifachverglasung)
- P_{V1} : Schallleistung, welche durch Spalte der Flugzeugfensterberandung in die Kabinenwand transmittiert
- P_{Vt} : in die Kabine transmittierte Schallleistung

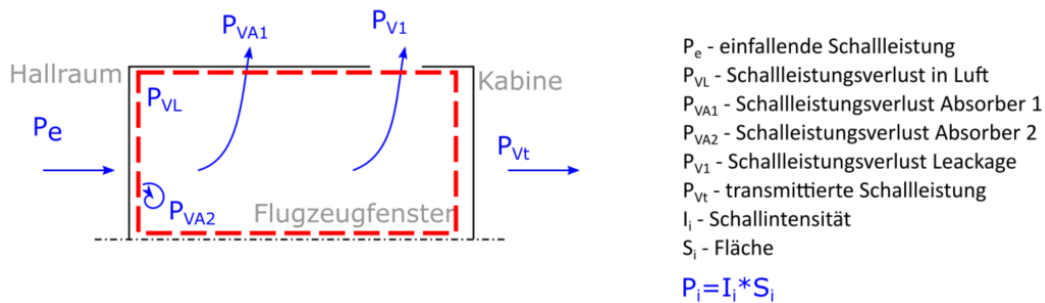


Abbildung 2.63: Darstellung zur Bilanzierung angenommener Schallleistungsströme durch ein Flugzeugfenster

Die Wirkungen von möglichen Schallabsorbern wurden über die Integration äquivalenter Schallabsorptionsflächen und ausgelegter Absorptionskoeffizienten berücksichtigt. Die vereinfacht angenommene Gesamtschall-Leistungsbilanz ergibt sich in Gleichung 2.4 zu

$$P_e = P_{VL} + P_{VA1} + P_{VA2} + P_{V1} + P_{Vt} \quad (2.4)$$

Die Schallleistungsströme P_{VL} sowie P_{V1} werden für alle im Folgenden betrachteten Studienfälle als gleich groß und somit für einen direkten Vergleich der Studienfälle als vernachlässigbar angenommen. Zur Berechnung eines Gesamtschalldämmmaßes $R = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\tau}\right)$ einer Kabinenwandwand wird Gleichung 2.4 nach der transmittierten Schallenergie I_{Vt} in Gleichung 2.5 umgestellt.

$$I_{Vt} = I_e \cdot \left(\tau_{Mess} - \frac{S_{VA1}}{S_e} \cdot \tau_{Mess} \cdot \alpha_{VA1} - \frac{S_{VA2}}{S_e} \cdot \tau_{Mess} \cdot \alpha_{VA2} \right) \quad (2.5)$$

Die Parameter I_e sowie τ_{Mess} wurden aus Messdaten einer Schalltransmissionsmessung in einem A320 Demonstrator ermittelt. Die frequenzabhängigen Absorptionskoeffizienten zweier angenommener Absorber α_{VA1} bzw. α_{VA2} können Abbildung 2.64 entnommen werden. Aufbauend aus den Erkenntnissen aus AP5.3, zur Untersuchung der frequenzabhängigen Schalldurchlässigkeit eines Flugzeugfensters, wurde eine ausgelegte Absorptionsfrequenz von ca. 900 Hz gewählt.

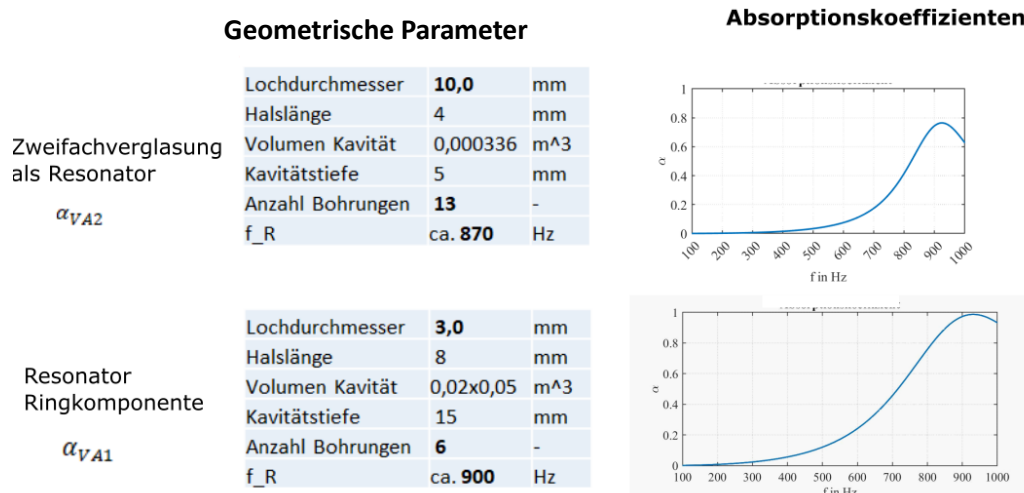


Abbildung 2.64: Beispielauslegung für ein Flugzeugfenster als Helmholtz-Resonator (oben) sowie einer zusätzlich eingefügten mit Helmholtz-Resonatoren bestückten Ringkomponente. Die Beispielauslegung berücksichtigt die geometrischen Abmessungen eines A320 Flugzeugfensters

S_{VA1} und S_{VA2} sind die kumulierten äquivalenten Schallabsorptionsflächen der jeweiligen Absorber: die Resonator Ringkomponente bestehend aus einem Helmholtz-Resonator Array, sowie die als Resonator ausgelegte Zweifachverglasung. $S_e = 0,0671 \text{ m}^2$ beschreibt die Fläche des betrachteten Flugzeugfensters.

Die Ergebnisse der Studie werden in Abbildung 2.65 gezeigt. Dort wird das analytisch berechnete Schalldämmmaß eines mit Absorbern ausgestatteten Flugzeugfensters, gegenüber dem eines konventionellen Flugzeugfensters betrachtet. Als äquivalente Absorptionsflächen wurden $S_{VA1} = 0,000721 \text{ m}^2$ bzw. $S_{VA2} = 0,00102 \text{ m}^2$, welche aus den in Abbildung 2.64 aufgeführten Parametern abgeleitet wurden und in die vorhandene Fenstergeometrie integriert werden könnten. In Abbildung 2.65 a) wird gezeigt, dass mit den zuvor aufgeführten Parametern von zwei im Flugzeugfenster integrierten Absorbern keine Erhöhung des Gesamtschalldämmmaßes der Kabinenwand abgeschätzt werden konnte. Eine Erhöhung des Gesamtschalldämmmaßes konnte berechnet werden, in dem in einer Studie exemplarisch die äquivalente Schallabsorptionsfläche der Ringkomponente auf $S_{VA1} = \frac{S_e}{2} = 0,035 \text{ m}^2$ erhöht wurde. In diesem Fallbeispiel konnte im Frequenzbereiche eine Schalldämmmaßerhöhung um die Absorptionsfrequenzlage bei ca. 900 Hz in Abbildung 2.65 b) von ca. 2 – 3 dB berechnet werden. Allerdings würde eine Vergrößerung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche durch eine Neuauslegung von z.B. Helmholtz-Resonatoren der Ringkomponente zu größeren Resonatorkavitäten führen, welche nur durch zusätzlichen Bauraum im Fensterbereich, durch z.B. einer Vergrößerung der Kabinenwandtiefe, realisiert werden könnte.

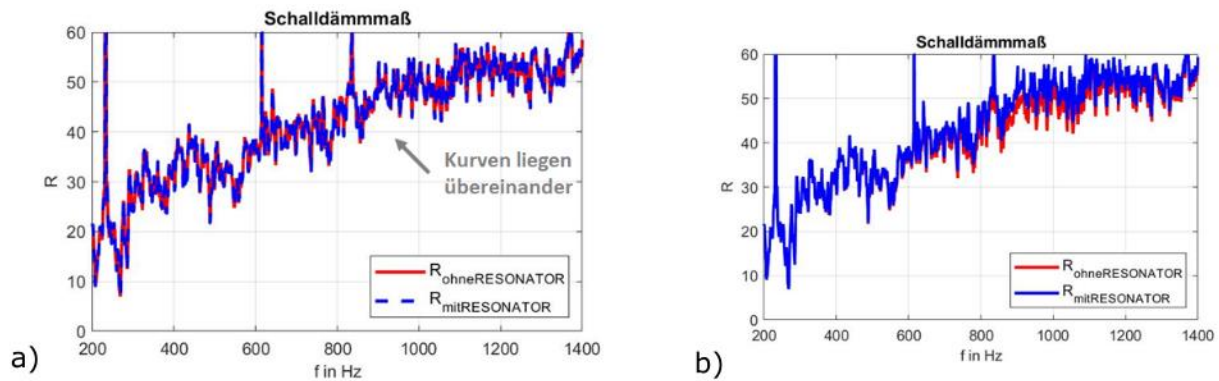


Abbildung 2.65: Darstellung von messtechnisch ermittelten Schalldämmmaßkurven einer A320 Flugzeugkabinenwand (rot) gegenüber Schalldämmmaßabschätzungen durch analytisch eingebundene Absorptionseffekte (blau) in a) für das Fallbeispiel in vorhandene Fenstergeometrie vorgeschlagene und integrierbare Absorberelemente und in b) geometrisch stark vergrößerte Absorberelemente

E. Überblick über alle verwendeten Parameter

Glaswollisolierung

Tabelle 2.18: Verwendete Parameter der Glaswollisolierung in der analytischen bzw. numerischen Auslegung

Geometrieparameter		Materialparameter	
Breite	B	Dichte	6,73 kg/m ³
Höhe	H	Strömungswiderstand	23824 Pa*s/m ²
Dicke	$GW_a; GW_b; GW_c; GW_d$	Wärmeleifigkeit	0,04 W/mK
		Wärmekapazität	850 J/K

Komponenten – Helmholtz-Resonatoren oberhalb bzw. unterhalb Fenster

Tabelle 2.19: Parameter theoretisch ausgelegter Helmholtz-Resonatoren oberhalb bzw. unterhalb des Flugzeugfensterbereichs

Materialdaten		Geometriedaten		Akustische Parameter	
P	$32 \frac{kg}{m^3}$	B_{HR}	20 mm	f_{HR}	475,9 Hz
E	36 MPa	L_{HR}	95 mm	f_{CL}	554 + 13,8i Hz
		H_{HR}	60 mm	$f_{CL,V}$	561 + 13,7i Hz
		t_{HR}	5 mm	f_1	461,75 + 1,2i Hz
		l_{CL}	35 mm	f_2	538,7 + 11,8i Hz
		b_{CL}	t_{HR}	ϕ_{in}	
		h_{CL}	t_{HR}	ϕ_{ext}	
		$d_{HR,Spalt}$	2 mm		

c. Funktionsmuster

Komponente – akustische Metamaterialien

Tabelle 2.20: Parameter der für das Funktionsmuster ausgelegten akustischen Metamaterialien mit Streifenmassen

Materialdaten		Geometriedaten			Sonstige Daten*		
PAM 1 & 2			PAM 1	PAM 2		PAM 1	PAM 2
ρ_M	460 kg/m ³	b_M	49 mm	54 mm	m''	1,99 kg/m ²	1,82 kg/m ²
ρ_f	1400 kg/m ³	h_M	5 mm	5 mm	f_p	385 Hz	210 Hz
E_f	3500 MPa	h_f	100 μ m	100 μ m	f_R	692 Hz	402 Hz
η_{iso}^{**}	20 %	l_{Spalt}	21 mm	16 mm	S_d	0.02 m	2.68 m
		e_{Zelle}	70 mm	70 mm			
* Werte aus theoretischer Berechnung							
** Wert angenommen in theoretischer Auslegung, basierend auf Ergebnissen aus (20)							

Komponente – Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken

Tabelle 2.21: Parameter der für das Funktionsmuster ausgelegten Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken

Akustische Parameter	
Numerische Ergebnisse	
f_{HR}	475,9 Hz
f_{CL}	554 + 13,8i Hz
$f_{CL,V}$	561 + 13,7i Hz
f_1	461,75 + 1,2i Hz
f_2	538,7 + 11,8i Hz
Analytische Ergebnisse	
f_1	521 Hz
f_2	633 Hz

Materialdaten		Geometriedaten	
ρ	$32 \frac{kg}{m^3}$	B_{HR}	20 mm
E	36 MPa	L_{HR}	95 mm
		H_{HR}	60 mm
		t_{HR}	5 mm
		l_{CL}	35 mm
		b_{CL}	t_{HR}
		h_{CL}	t_{HR}
		$d_{HR,Spalt}$	2 mm

d. Prototyp

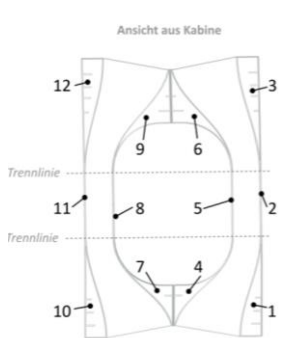
Komponente – akustische Metamaterialien

Tabelle 2.22: Parameter der für den Prototyp eingesetzten Metamaterialien mit reduzierter Masse

Materialdaten		Geometriedaten			Sonstige Daten**		
PAM 1 & 2			PAM 1	PAM 2		PAM 1	PAM 2
ρ_M	480 kg/m ³	b_M	10 mm	10 mm	m''	1,21 kg/m ²	1,08 kg/m ²
ρ_f	942 kg/m ³	h_M	5 mm	4 mm	f_p	400 Hz	670 Hz
E_b	2317 MPa*	h_b	75 μ m	75 μ m	f_R	1090 Hz	1630 Hz
η_{iso}	20 %	l_{Spalt}	11 mm	9 mm	S_d	0.34 m	0.34 m
S_D	0.34 m	e_{Zelle}	21 mm	19 mm			
*angenommen in theoretischer Auslegung, geliefert wurde eine andere Folie mit möglicherweise abweichendem E-Modul							
** Werte aus theoretischer Berechnung							

Komponente – Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich

Tabelle 2.23: Parameter für die im Fensterbereich positionierten Helmholtz-Resonatoren mit mehreren Löchern pro Resonator-kammer

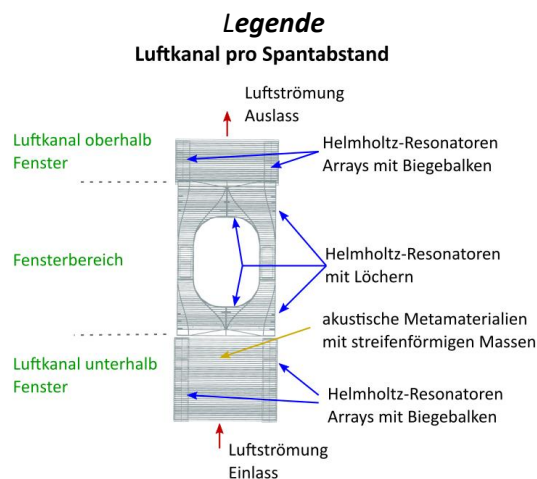
		Geometriedaten				Sonstiges Daten*	
	Nr.	V [m ³]	l_{Loch} [m]	d_{Loch} [m]	$d_{abstand}$ [m]	n [–]	f_R [Hz]
	3;12	0,00020098	0,002	5,5	0,03	5	524
	6;9	0,00017251	0,002	5,0	0,03	5	531
	4;7	0,000102	0,002	4,0	0,03	4	531
	1;10	0,00018497	0,002	4,5	0,03	6	523
*Werte aus theoretischer Berechnung							

Luftkanäle

Außenmaße

Tabelle 2.24: Geometrische Abmaße der einzelnen Luftkanalabschnitte ober- bzw. unterhalb der Flugzeugfenster als auch im Flugzeugfensterbereich

Geometriedaten			
	Luftkanal oberhalb Fensterbereich [m] (ohne Fenster)	Luftkanal unterhalb Fensterbereich [m] (ohne Fenster)	Luftkanal- Fensterbereich [m]
Länge	225 mm	410 mm	760 mm
Breite	504 mm	504 mm	504 mm



Gesamtmassebilanz Prototyp vs. Referenzwandaufbau

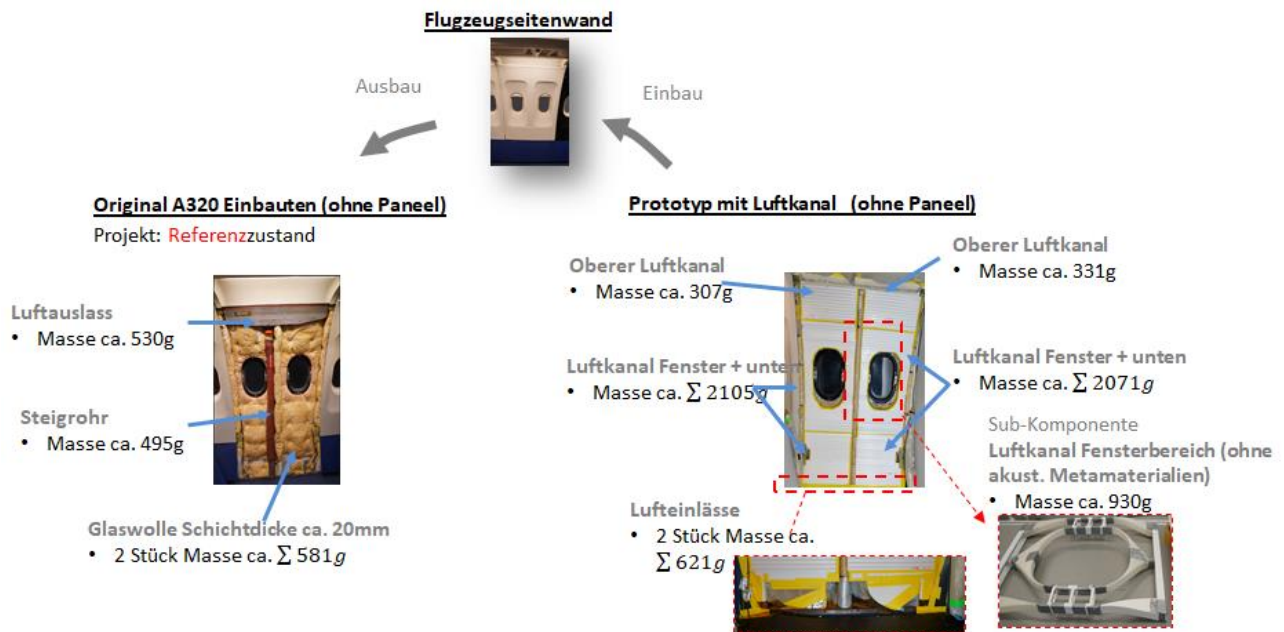


Abbildung 2.66: Gegenüberstellung ermittelter Massen von Kabinenwandkomponenten, die aus dem Referenzwandaufbau (linkes Bild) ausgebaut wurden, damit ein aus mehreren Teilkomponenten bestehender Luftkanal zur Realisierung des Kabinenwand-Prototyps (rechtes Bild) in die Seitenwand einer A320-Kabine eingebaut werden konnte.

Bilanzierung

Ausbau	Einbau
530g	307g
495g	331g
581g	2105g
	2071g
	621g
1506g	5435g

$\gg 5435g - 1506g \approx 3900g$
 pro Spantabstand:
 $m = \frac{3900g}{2}$
 $A = 0,52m * 1,4m = 0,73m^2$
 $\rightarrow \text{Flächenmasse} + 2,6 \frac{kg}{m^2}$

Abbildung 2.67: Vergleich der aus einer Standardseitenwand ausgebauten Komponenten mit denen, die zum Einbau des zusammengesetzten Luftkanals gehören (vgl. Abbildung 2.66)

Aerogelmaterial als alternative Isolierung für den Prototyp

Als alternative Isolierung zur bestehenden Glaswolle ist die Dichte (Tabelle 2.25) des Aerogelmaterials deutlich zu hoch und würde in dieser Form für den Einsatz in Verkehrsflugzeugen sehr wahrscheinlich nicht zum Einsatz kommen.

Tabelle 2.25: Gemessene Größen für das Aerogelmaterial (Quelle: Projektpartner DLR)

Dichte	$100 \frac{kg}{m^3}$
Wärmeleitfähigkeit	$0,033 \frac{W}{m * K}$
Wasserdampfdurchlässigkeit	ca. 31 [-]

AP 1.3: Auslegung von Funktionsmuster und Prototyp und Realisierung zugehöriger Komponenten

Im Rahmen des AP1.3 wurden Funktionsmuster und Prototyp anhand des neuen Isolationskonzepts ausgelegt und zugehörige Komponenten wurden realisiert. Ausgenommen waren die Komponenten vom Halterungssystem zur Montage der Seitenwandpaneele an den Rumpfstrukturen, welche bereits in AP1.2 in Abbildung 2.12 gezeigt wurden. Die der Auslegung zugrunde liegenden theoretischen Überlegungen der Funktionsmuster bzw. Prototypen wurden bereits in AP1.2 ausführlich vorgestellt.

Funktionsmuster

Rumpfstruktur

Der für die Funktionsmuster eingesetzte Rumpfstrukturausschnitt ist in Abbildung 2.68 zu sehen. Dieser Ausschnitt wurde von der HAW aus einem größeren Teil einer originalen A320-Rumpfstruktur für den Einbau in den Akustikprüfstand bzw. den Klima-Akustikprüfstand ausgeschnitten. Die Außenmaße der Struktur betragen $1130\text{ mm} \times 705\text{ mm}$.



Abbildung 2.68: Ausschnitt einer originalen A320-Rumpfstruktur, welche im Funktionsmuster eingebaut wurde

Seitenwandpaneel

Für einen möglichst realitätsnahen Wandaufbau wurde ein vorhandenes Seitenwandpaneel bestehend aus einer ca. 6 mm dicken Honeycombstruktur mit originalgetreuen Deckschichten verwendet (Abbildung 2.69 a). Am Seitenwandpaneel ist eine in Terul-Folie eingewickelte, ca. 20 mm dicke Sekundärisolierung (s. Abbildung 2.69 b) montiert. Die Abmessungen des Seitenwandpaneels ohne Fensteraussparung decken einen Spantabstand zur oben gezeigten Rumpfstruktur für das Funktionsmuster ab.



Abbildung 2.69: Für Funktionsmustertests verwendetes Seitenwandpaneel

Glaswollisolierpakete

Die Glaswollisolierpakete entsprechen den in Flugzeugen eingebauten originalen Isolierpaketen bestehend aus in Terul 18-Folie eingewickelter Glaswolle (Abbildung 2.70). Die Isolierpakete des Funktionsmusters wurden entsprechend der definierten Schichtdicken in AP1.2 in ca. $1\text{ m} \times 0,5\text{ m}$ Matten vorbereitet.



Abbildung 2.70: Im Funktionsmuster eingesetzte Glaswollisolerpakete

Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken - Einzelkomponente

Die Helmholtz-Resonatoren wurden aus dem Material Rohacell HF gefertigt (Materialdatenblatt in Anhang B). Die geometrischen Größen eines einzelnen Helmholtz-Resonators mit Biegebalken für die Resonator Arrays wurde bereits in AP1.2 vorgestellt. In

Abbildung 2.71 wird eine technische Zeichnung eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken gezeigt. Die Fertigung erfolgte mittels einer CNC-Fräsmaschine beim Verein Neues Fliegen e.V. an der HAW Hamburg. Die Fertigung des Resonators mittels Fräsen hatte für diesen Anwendungsfall den Vorteil, dass notwendige geringe Fertigungstoleranzen, wie z.B. beim U-förmigen Resonatorhals, von nur wenigen Zehntelmillimeter realisierbar waren. Ebenfalls ließen sich die leicht gekrümmte Formen des Resonators und das Aushöhlen der Resonatorhöhlen sehr gut fertigen. Eine besondere Herausforderung ergab sich jedoch durch die Staubentwicklung während des Fräsvorgangs. Aufgrund der Materialeigenschaften des Rohacells ergab sich eine grobkörnige Staubbildung, welche während des Fräsvorgangs abgesaugt werden musste.

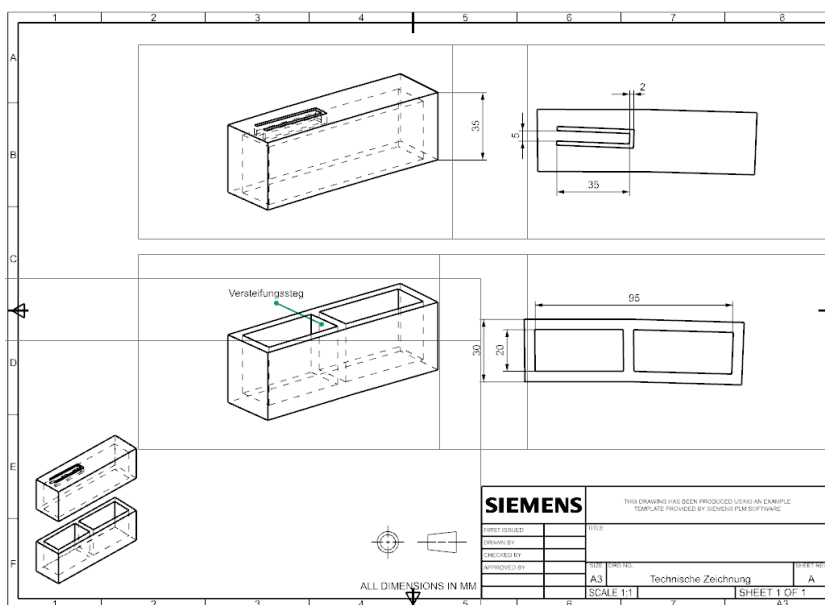


Abbildung 2.71: Gefertigte Komponente eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken wie im Funktionsmuster bzw. Prototyp eingebaut

Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken als Arrays für den Wandbereich unterhalb u. oberhalb der Fenster

In Abbildung 2.72 werden die gefertigten Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken Arrays gezeigt. Ein Array besteht aus einem mechanischen Verbund von 10 einzelnen, getrennt wirkenden Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken. Die Fertigungsweise des Arrays entspricht der Beschreibung im vorherigen Abschnitt. Fertigungsbedingt besteht ein Array aus vier Teilkomponenten, welche mit Epoxidharz Kleber verklebt wurden.



a)



b)

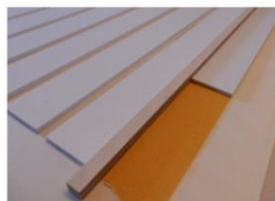
Abbildung 2.72: Fertigung von Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken Arrays für Funktionsmuster a) Darstellung Teilkomponenten nach Fräsvorgang und b) Endprodukt

Akustische Metamaterialien – HAW interne Fertigung

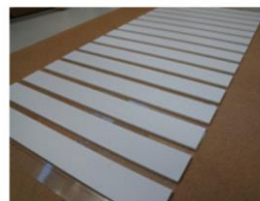
Der Herstellung von akustischen Metamaterialien liegen die in Tabelle 2.9 vorgestellten Material- bzw. Geometriedaten zugrunde. Für die Herstellung der akustischen Metamaterialien wurden folgende Materialien verwendet:

- Streifenförmige Massen: PVC Material
- Folienmaterial:
 - Hygrothermische Untersuchungen:
 - Folienmaterial Terul 18 mit nahezu wasserdampfundurchlässigen Diffusionseigenschaften eingesetzt auf der, der Seitenwand zugewandten Seite des Luftkanals
 - Folienmaterial Strotex 1300 mit wasserdampfdurchlässigen Diffusionseigenschaften für die der Rumpfstruktur zugewandte Seite des Luftkanals
 - Akustische Untersuchungen: PET-Folie aus (27)
- Doppelseitiges Klebeband: Zur Fixierung der streifenförmigen Massen auf den jeweiligen Folienmaterialien. Es hatte sich später herausgestellt, dass doppelseitiges Klebeband sich zum Teil wieder gelöst hatte und dadurch die Wirksamkeit des Metamaterials erheblich beeinträchtigt wurde (Entstehung von lokalen Schallnebenwegen). Deswegen wurden spätere Massenstreifen mit einer dünn aufgetragenen Klebeschicht an der Trägerfolie befestigt.

Entscheidend für die Funktionalität der akustischen Metamaterialien ist das exakte Einstellen der Spaltabstände zwischen den streifenförmigen Massen (vgl. theoretische Hintergründe AP1.2), welches über eine in Abbildung 2.73 a) gezeigte Abstandleiste im Klebeprozess der Massen auf die Folie verwendet wurde.



a)



b)

Abbildung 2.73: a) Abstandleiste für ein positionsgetreues Aufbringen von Streifenmassen auf eine Trägerfolie bei der Fertigung eines akustischen Metamaterials, b) Beispiel eines gefertigten akustischen Metamaterials

Akustische Metamaterialien – industrielle Fertigung

Eine wichtige Komponente des Luftkanals sind die akustischen Metamaterialien, welche großflächig den Luftkanal begrenzen. Für eine mögliche spätere Industrialisierung des hier untersuchten Kabinenwandkonzepts mit integriertem Luftkanal ist es daher erforderlich, industriell umsetzbare Lösungen zu entwickeln. Einen möglichen Fertigungsansatz wurde in Kooperation mit dem Unternehmen *SG PPL Biolink GmbH* (Im Folgenden *Biolink GmbH*) (31) ausgearbeitet.

Für einen ersten Fertigungsversuch wurde dem Unternehmen *SG PPL Biolink GmbH* folgender Parametersatz für ein zu fertigendes akustisches Metamaterial mit Streifenmassen zur Verfügung gestellt:

Größe	Wert	Einheit
Gesamtkomponente		
Gesamtlänge Metamaterial	1054	[mm]
Gesamtbreite Metamaterial	500	[mm]
Spalt	16	[mm]
Folie		
Dicke	100	[µm]
Länge	Siehe Gesamtlänge	
Breite	Siehe Gesamtbreite	
Streifenförmige Massen		
Breite	54	[mm]
Länge	Siehe Gesamtlänge	
Masse (pro Stück)	62-65	[g]
Anzahl	15	Stück

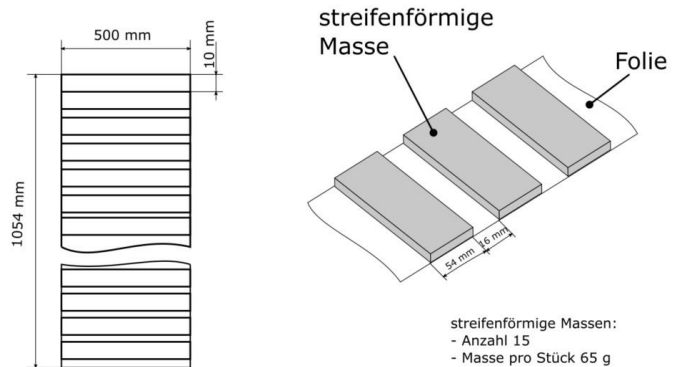


Abbildung 2.74: Parameter für die Fertigung des ersten industriell gefertigten akustischen Metamaterials mit streifenförmigen Massen

Die Parameter für die Folie sowie für die streifenförmigen Massen wurden abgeleitet aus dem für das Funktionsmuster ausgelegten akustischen Metamaterial PAM2 aus AP1.2. In Abbildung 2.75 wird das von *SG PPL Biolink GmbH* erste industriell gefertigte akustische Metamaterial mit Streifenmassen gezeigt.

Eine Diskussion der experimentell ermittelten Schalldämmmaße erfolgt in dem Kapitel über die Arbeitsergebnisse von AP. 4.2.

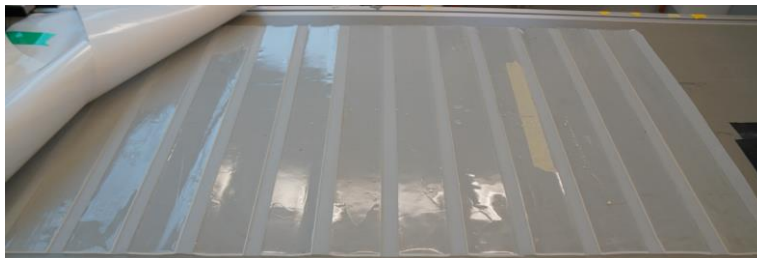


Abbildung 2.75: Erstes industriell gefertigtes akustisches Metamaterial mit streifenförmigen Massen (31)

Baugruppe Luftkanal

In Abbildung 2.76 wird der montierte Luftkanal für das akustisch sowie das hygrothermisch untersuchte Funktionsmuster gezeigt. Die zur Rumpfstruktur bzw. zur Kabine orientierten Flächen des Luftkanals wurden

mit akustischen Metamaterialien abgedeckt. Die zu den Rumpfspanten orientierten schmalen Seitenflächen wurden durch Helmholtz-Resonatoren Arrays abgeschlossen. Die akustischen Metamaterialien wurden mit Gewebeklebeband an den Helmholtz-Resonatoren befestigt. Das Klebeband hatte zudem die Funktion der Luftabdichtung, der im Betrieb vorhanden Luftströmung innerhalb des Luftkanals nach außen.

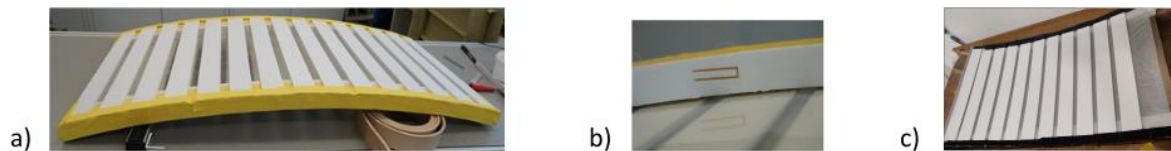


Abbildung 2.76: a) Foto vom Luftkanal für das akustisch untersuchte Funktionsmuster, b) Ansicht der Helmholtz-Resonatoren innerhalb des Luftkanals (zur Darstellung wurde das obere akustische Metamaterial entfernt), c) Foto vom Luftkanal für das hygrothermisch untersuchte Funktionsmuster

Mikroperforierte Absorber

In AP1.2 wurden leichtgewichtige mikroperforierte Absorber mit Blick auf den Zusammenhang ihrer Eigenschaften und ihre charakterisierenden Größen untersucht. Für ihren Aufbau wurden zwei Materialien unterschiedlicher Dichten ausgewählt.

In Abbildung 2.77 a) sind gefertigte mikroperforierte Absorber dargestellt, welche aus dem Material Polyamid PA12 mittels additiver Fertigung eines Laser-Sinter-Verfahrens hergestellt wurden. Ein Datenblatt zu Materialparametern ist Anhang B beigefügt. Das Polyamid PA2200 Material hat eine Dichte von ca. 930 kg/m^3 und liegt damit deutlich unter der Dichte von Aluminium mit 2700 kg/m^3 . (Abbildung 2.77 b) zeigt einen gefertigten mikroperforierten Absorber aus Aluminium). Dieser wurde HAW intern mit einem zerspanenden Verfahren gefertigt.

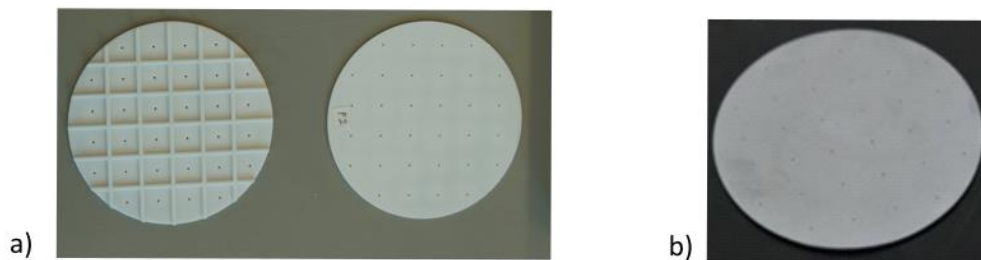


Abbildung 2.77: Für Impedanzrohrmessungen gefertigte mikroperforierte Absorberproben a) aus Polyamid b) aus Aluminium

Zu- und Abluftadapter für den Luftkanal

Die Zu- und Abluftadapter für die Luftkanäle führten Frischluft dem Luftkanal zu bzw. ab (Abbildung 2.78). Die Fertigung der in Abbildung 2.78 a) als CAD-Modell dargestellten Zu- und Abluftadapter erfolgten mit additiver Fertigung an einem Ultimaker S5 3D-Drucker, mit dem Material Ultimaker PLA, im KKS-Labor.

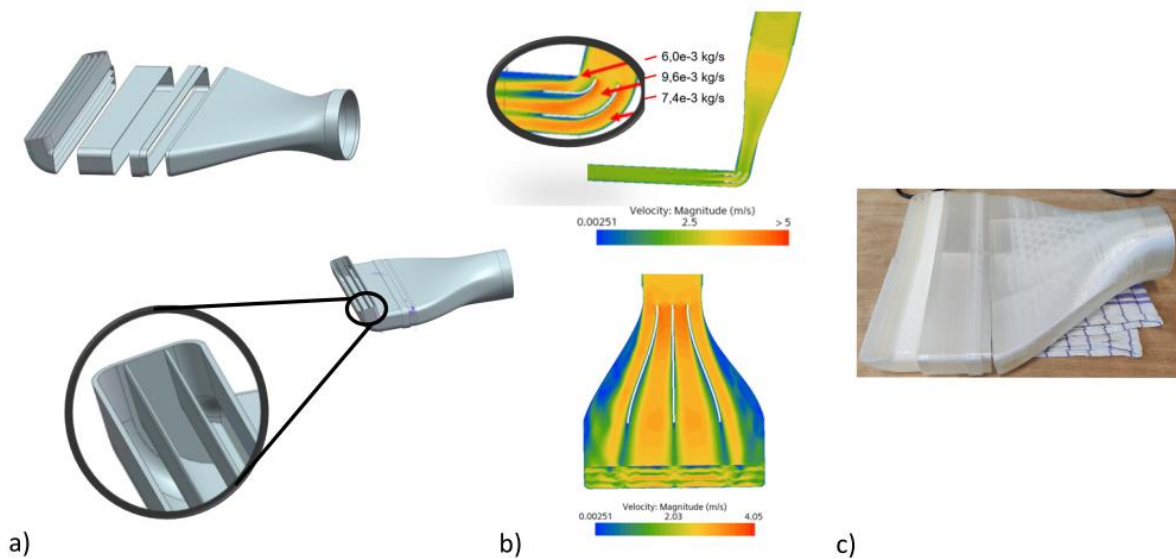


Abbildung 2.78: Darstellung des im Funktionsmuster eingesetzten Zu- und Abluftadapters zur Speisung des Luftkanals mit Frischluft a) CAD-Abbildung b) numerische Luftströmungsergebnisse innerhalb der Komponente (Ergebnisse vom Projektpartner Novicos) c) gefertigte Komponente

Aufbau Funktionsmuster

Das Funktionsmuster wird als Wandaufbau in die Prüfstands-Transmissionsfenster im Akustik- Labor bzw. der Klima-Akustikkammer eingebaut. Zur bildlichen Veranschaulichung wird in Abbildung 2.79 ein Foto vom prinzipiellen Wandaufbau vorgestellt. Die letztendlich integrierten Funktionsmuster werden in Abbildung 2.80 im Akustikprüfstand und in Abbildung 2.81 im Klima-Akustikprüfstand gezeigt. Einbaubedingte Freiräume neben bzw. oberhalb und unterhalb der Funktionsmuster wurden mit Dämmmaterialien abgedichtet.



Abbildung 2.79: Exemplarische Ansicht des Aufbaus eines Funktionsmusters

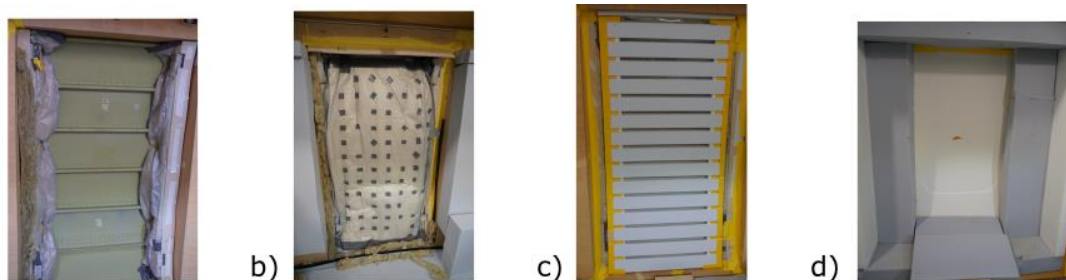


Abbildung 2.80: Darstellung des schichtenweisen Aufbaus des Funktionsmusters im Akustikprüfstand a) Rumpfstruktur, b) integrierte Glaswollisolierung, c) Luftkanal und d) Seitenwandpaneel



Abbildung 2.81: Darstellung des schichtenweisen Aufbaus des Funktionsmusters in der Klima-Akustikkammer a) Rumpfstruktur, b) integrierte Glaswollisolierung, c) Luftkanal und d) Seitenwandpaneel

Prototyp

Rumpfstrukturen

Die für den Prototyp eingesetzten Rumpfstrukturen sind in Abbildung 2.82 a) und b) für Messungen im Akustiklabor sowie in Abbildung 2.82 c) und d) für Messungen in der A320-Kabine des A320 Rumpfabschnitts in der Klima-Akustikkammer (Kabinendemonstrator) abgebildet. Die für Messungen im Akustiklabor verwendete Rumpfstruktur wurde von der HAW aus einem größeren Teil einer originalen A320-Rumpfstruktur für den Einbau in den Akustikprüfstand zugeschnitten. Die Außenmaße der Struktur betragen 1996 mm x 1245 mm. In Abbildung 2.82 c) ist ein zu a) bzw. b) äquivalenter Ausschnitt der Rumpfstruktur dargestellt, der aber Teil des gesamten A320-Rumpfabschnitts der Klima-Akustikkammer Abb. 2.82 d) ist.

Akustikprüfstand

Kabinendemonstrator in Klima-Akustikprüfstand



Abbildung 2.82: Für den Kabinenwand-Prototyp verwendete Rumpfstruktur: a), b) A320-Rumpfstrukturausschnitt, eingebaut in einem Transmissionsfenster des Akustiklabors, c) Teilbereich des A320 Rumpfabschnitts, der in der Klima-Akustikkammer aufgestellt ist, d) Ansicht des in der Klima-Akustikkammer aufgestellten A320-Rumpfabschnitts

Seitenwandpaneel

Als Seitenwandpaneel wurde ein originales Seitenwandpaneel aus einem A320-Flugzeug verwendet (s. Abbildung 2.83).



Abbildung 2.83: Für den Prototyp verwendetes Seitenwandpaneel mit am Seitenwandpaneel angebrachter Glaswollisolierung

Glaswollisolierpakete

In Abbildung 2.84 sind die für den Prototypen eingesetzten in Terul18-Folie eingehüllte amber-farbenen Glaswollisolierungen zu sehen.



Abbildung 2.84: In Terul18 Folie eingewickelte Glaswollisolierungsmaterialien für den Messaufbau des Prototyps und der Referenzwand

Akustische Metamaterialien – HAW interne Fertigung

Die Material- bzw. geometrischen Parameter für die zu fertigenden akustischen Metamaterialien mit Streifenmassen für den Prototyp wurden bereits in AP1.2 in Tabelle 2.22 aufgeführt. Für die Herstellung der akustischen Metamaterialien Metamaterialien wurden folgende Materialien verwendet:

- Streifenförmige Massen: PVC Material von
- Folienmaterial: von dem Unternehmen *SG PPL Biolink GmbH* bereitgestellte PET-Folie mit einem vom Hersteller deklarierten S_d -Wert von 0.340
- Epoxid Harz Klebstoff: Zur Fixierung der streifenförmigen Massen auf dem Folienmaterial

Die Fertigung der akustischen Metamaterialien erfolgte durch:

- Zuschnitt der streifenförmigen Masse – Toleranzbereich $\pm 0,1 \text{ mm}$
- Anfertigung zweier Vorrichtungen zur Vorpositionierung der streifenförmigen Massen zum exakten Einstellen von Spaltabständen, die je Vorrichtung unterschiedliche Abstandsmaße aufwiesen. Die Vorrichtungen bestanden jeweils aus 4 Aluminiumstreifen mit eingefrästen Nuten definierter Abstände voneinander, die auf einem dünnen Brett montiert waren. Die streifenförmigen Massen wurden in den eingefrästen Nuten der Aluminiumleisten fixiert (s. Abbildung 2.85 a))

- Benetzen der streifenförmigen Massen mit Epoxidharz Klebstoff (s. Abbildung 2.85 b))
- Positionierung Vorrichtung, mit Klebstoff benetzter streifenförmigen Massen, auf Folienmaterial
- Entfernen der Vorrichtung und Fertigstellung des für den Luftkanal passenden akustischen Metamaterials (s. Abbildung 2.85 c))

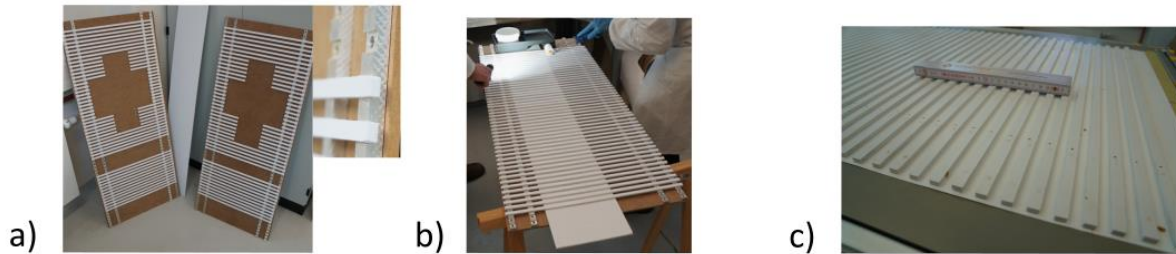


Abbildung 2.85: Herstellungsprozess der akustischen Metamaterialien für den Luftkanal des Kabinenwand-Prototyps a) Vorrichtung mit vormontierten Streifenmassen in abstandsdefinierenden Nutbereichen, b) Benetzung der Streifenmassen mit Epoxidharz Klebstoff sowie c) Beispiel eines für den Luftkanal gefertigten akustischen Metamaterials

Helmholtz-Resonatoren mit mehreren Löchern für den Fensterbereich der Kabinenwand

Die 3D-Konstruktion sowie Fertigung der Helmholtz-Resonatoren mit mehreren Löchern für den Fensterbereich des Luftkanals wurden gemäß den in Tabelle 2.23 angegebenen geometrischen Größen durchgeführt (s. Abbildung 2.86) a). Als Fertigungsverfahren wurde, aufgrund der sehr komplex geformten Körper, die additive Fertigung mit einem Ultimaker S5 3D-Drucker gewählt. Als Druckmaterial, sogenanntes Filament, wurde ein vom Vertreiber Ultimaker herkömmliches angebotenes Filament, Ultimaker PLA, verwendet.

Die in Abbildung 2.86 a) gezeigten Komponenten wurden jeweils als zwei halbe Helmholtz-Resonatorkammern– gedruckt und anschließend zusammengeklebt. Der Hals des Helmholtz-Resonators wurde anschließend durch eine Bohrung in eine Seitenfläche des Resonators realisiert. Die eingestellten Bohrungsdurchmesser wurden in AP1.2 bereits ausgelegt. Final wurde in AbbXY b) die Luftkanalstruktur im Fensterbereich, formgebend durch die angefertigten Helmholtz-Resonatoren, zusammengesetzt.

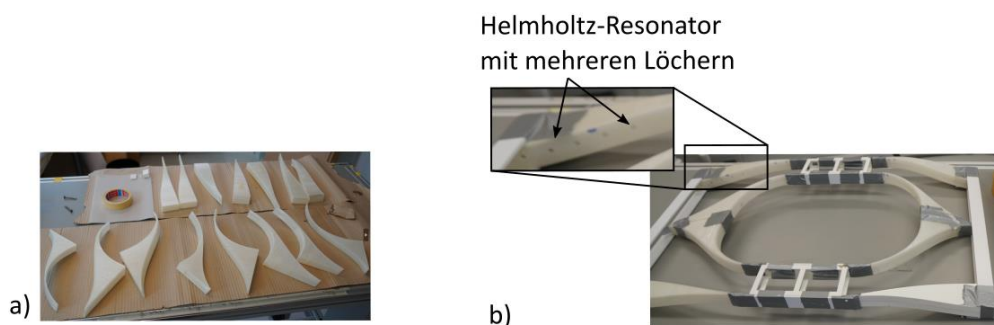


Abbildung 2.86: a) Teilkomponenten gefertigter Helmholtz-Resonatoren mit mehreren Löchern, b) zu einer Baugruppe des Luftkanals zusammengesetzte Helmholtz-Resonatoren für den Fensterbereich

Baugruppe Luftkanal

Der Luftkanal des Prototyp-Wandaufbaus besteht aus mehreren Teilen: Luftkanal unterhalb der Fenster, zwei Teilluftkanäle im Bereich der Fenster und wieder vereinter Luftkanal oberhalb der Fenster. Abbildung 2.87

zeigt die Metamaterialien zum Einbau in den Luftkanal unterhalb der Fenster als auch diejenigen, die im Fensterbereich eingebaut wurden.

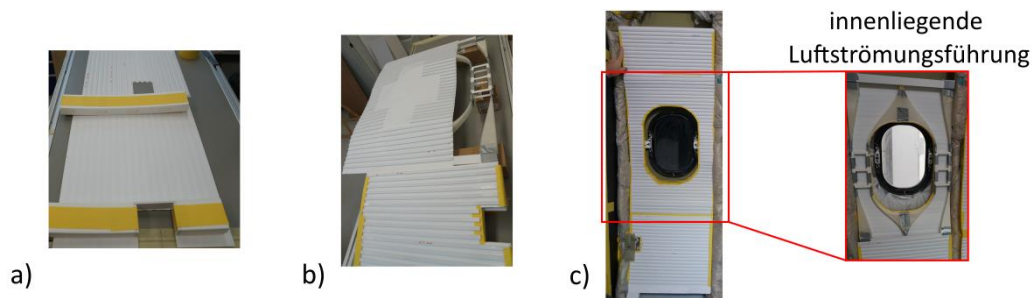


Abbildung 2.87: a) Fertigung des Luftkanals für einen Einbau unterhalb der Fenster des Kabinenwand-Prototyps, b) Momentaufnahme beim Zusammenfügen des Luftkanals unterhalb und oberhalb der Fenster als auch im Fensterbereich, c) Ansicht der Luftkanalbaugruppe für den Prototyp um das Flugzeugfenster herum

Zu- und Abluftadapter für den Luftkanal

Das Konzept für den Zu- und Abluftkanal zur Speisung des Luftkanals mit Frischluft musste für den Prototyp den Einbaubedingungen in einer originalen A320 Kabine im Kabinendemonstrator der HAW angepasst werden. Grund sind Verbindungen des Kabinenbodenträgers mit der Rumpfstruktur über Querstreben (s. Abbildung 2.88 a)). Der Zu- und Abluftkanal wurde darauf geometrisch und mit innenliegenden Strömungsblenden angepasst. In Abbildung 2.88 b) ist eine CAD-Darstellung und in ABB c) ein Beispiel einer, mittels additiver Fertigung hergestellter, Zu- und Abluftadapter Komponente dargestellt.

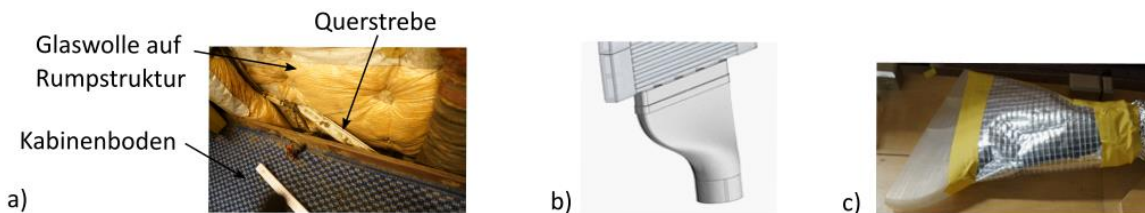


Abbildung 2.88: a) Eingeschränkter Bauraum zwischen Kabinenboden und Rumpfstruktur zum Einbau der Frischluftzuführung aus dem Frachtraum in die Luftkanäle der Kabinenseitenwand, b) CAD Abbildung des Bauraum angepassten Zu- und Abluftadapters, c) Beispiel eines gefertigten Zu- und Abluftadapters

Aerogel-Isolierpakete

Das Aerogelmaterial wurde vom Projektpartner Deutsches Luft- und Raumfahrt Zentrum in Köln hergestellt und zur Verfügung gestellt. Im vorliegenden Projekt EIKABIN wurde das Aerogelmaterial für den Einbau in eine Rumpfstruktur zugeschnitten und in Terul18-Folie eingehüllt.

Aufbau Kabinenwand-Prototyp

Der Aufbau des Kabinenwand-Prototyps ist in Abbildung 2.89 in seinem Einbauumfeld der A320-Kabine in der Klima-Akustikkammer und in Abbildung 2.90 im Schalltransmissionsfenster des Akustiklabors jeweils in seinen einzelnen Ebenen dargestellt. Bereiche außerhalb des Prototyps, die möglicherweise Schallnebenwege bilden konnten, wurden mit zusätzlichen Dämmmaterialien abgedichtet.



a)



b)



c)



d)

Abbildung 2.89: Kabinenwand-Prototyp, eingebaut in der A320-Kabine der Klima-Akustikkammer, dargestellt in einzelnen Wand-Ebenen: a) Rumpfstruktur, b) integrierte Glaswollisolierung, c) Luftkanal und d) Seitenwandpaneel



a)



b)



c)



d)

Abbildung 2.90: Kabinenwand-Prototyp, eingebaut in ein Transmissionsfenster des Akustiklabors, dargestellt in einzelnen Wand-Ebenen: a) Rumpfstruktur, b) integrierte Glaswollisolierung, c) Luftkanal und d) Seitenwandpaneel

AP 1.4: Definition ergänzender Halbzeug-Eigenschaften

A. Kabinenwand-Funktionsmuster

Halbzeug für mikroperforierter Absorber (MPA)

In AP1.2 wurden zwei Impedanzrohrproben geometrisch bzw. akustisch gleich ausgelegt. Der Unterschied der zwei Impedanzrohrproben liegt in der Verwendung verschiedener Materialien, Polyamid bzw. Aluminium, sowie unterschiedlichen Fertigungsmethoden, 3D-Lasersintern bzw. spanende Fertigung (detaillierte Informationen zum Polyamid-Material in Anhang B). Messergebnisse aus Impedanzrohrmessungen in AP4.2 für mikroperforierten Absorber aus Polyamid in Abbildung 2.112 bzw. aus Aluminium in Abbildung 2.114 zeigen, entgegen theoretischer Abschätzungen aus AP1.2, Abweichungen in der Absorptionscharakteristik im Bereich der ausgelegten Absorptionsfrequenz bei ca. 280 Hz. Mittels eines Laservibrometers wurden in weiteren Untersuchungen Oberflächenschwingungen der beiden Impedanzrohrproben im Bereich der Absorptionsfrequenz untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Probe aus Polyamid gegenüber der deutlich steiferen Probe aus Aluminium größer Schwingungsamplituden hat, was wahrscheinlich zu einer anderen Absorptionscharakteristik der Impedanzrohrprobe aus Polyamid geführt hat. Unter Berücksichtigung einer möglichen Anwendung in Verkehrsflugzeugen sind sehr leichte, daher z.T. dünn ausgelegte Materialien erforderlich. Diese können aufgrund Ihrer Auslegung zu größeren Schwingungsamplituden, aufgrund schallinduzierter Schwingungen, tendieren. Ein Ansatz zur Verringerung eines schallinduzierten Mitschwingens mikroperforierter Absorber könnte durch geeignete Bauweisen, z.B. durch Versteifungsrippen bei sehr leichten bzw. sehr dünnwandigen, Auslegungsvarianten, wie im Rahmen dieses Projekt in (26) veröffentlicht, sein.

Halbzeuge für akustische Metamaterialien (PAM)

Im Kapitel zu AP4.2 werden in Abbildung 2.100 und Abbildung 2.101 die theoretisch abgeschätzten Schalldämmmaßprofile mit den experimentell ermittelten Schalldämmmaßegebnissen der akustischen Metamaterialien PAM 1 bzw. PAM 2 für das Funktionsmuster dargestellt. Die Messergebnisse zeigen breitere Schalldämmwirkungen gegenüber den theoretischen Abschätzungen sowie signifikante Dämpfungseinflüsse im Schwingverhalten der akustischen Metamaterialien. Ein Dämpfungseinfluss könnte in der Fertigungsmethodik der Montage der streifenförmigen Massen mit doppelseitigem Klebeband auf der Folie liegen (AP1.3). Das doppelseitige Klebeband ist sehr weich und könnte durch innere Reibungseinflüsse das Schwingverhalten der streifenförmigen Massen dämpfen. Zur Verminderung dieser möglichen Einflüsse wurde für die Luftkanäle zum Aufbau des Kabinenwand-Prototyps das doppelseitige Klebeband durch eine steifere Klebeverbindung, wie z.B. Epoxid-Harz, ersetzt.

Darüber hinaus wurde in AP4.2 in einem ersten industriellen Fertigungsversuch ein akustisches Metamaterial mit streifenförmigen Massen hergestellt. Das gelieferte akustische Metamaterial zeichnete sich durch streifenförmigen Massen mit eher geringer Steifigkeit aus. In (20) wurden Ergebnisse veröffentlicht, welche u.a. ein Kriterium zur Auslegung eines Steifigkeitsverhältnisses zwischen Folienmaterial und Material streifenförmige Masse beinhalten. Aufgrund fehlender Materialparameter zum akustischen Metamaterial aus dem ersten industriellen Fertigungsversuch eines PAMs, kann nur vermutet werden, dass dieses Kriterium unterschritten wurde. Von daher werden für weitere Fertigungsversuche unter Berücksichtigung der in (20) erzielten Ergebnisse optimierte Ergebnisse erwartet.

Halbzeug für Helmholtz-Resonatoren

Für die Herstellung von Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken wurde das Material Rohacell HF verwendet (Anhang B). Dieses hat einen relativ geringen Elastizitätsmodul (siehe Tabelle 2.10), welches, wie auf Seite 81 dargestellt ist, einen Einfluss auf die akustische Wirkung hat. Steifere Materialeigenschaften könnten den Fertigungsprozess der Helmholtz-Resonatoren vereinfachen, da dann der Versteifungssteg in der Helmholtz-Resonator Kavität entfallen könnte, welcher als Lösung für das hier verwendete relativ weiche Material entworfen wurde.

Darüberhinaus wurde beim Umgang mit dem Material Rohacell festgestellt, dass es verhältnismäßig spröde ist, was erhöhte Anforderungen an den Fertigungsprozess bzw. dem Montageprozess stellt. Mechanisch stabilere Eigenschaften sind wünschenswert, um bei Fertigung und Montage Schäden an den Komponenten zu vermeiden.

B. Kabinenwand-Prototyp

Halbzeug Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich

Die Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich wurden aus Fertigungsgründen zunächst aus schnell beschaffbaren PLA-Filament Material hergestellt, welches noch nicht gewichtsoptimiert ist. Aus der in Abbildung 2.67 auf Seite 104 aufgeführten Gesamtmassebilanz des Prototyps gegenüber einem Kabinenwandaufbau nur mit aus Glaswolle bestehender Isolierung im Zwischenraum lässt sich entnehmen, dass Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich wesentlich zur Masseerhöhung des Gesamtwandaufbaus beitragen, weshalb eine Verwendung leichter Materialien erforderlich ist. Denkbar wäre eine Anwendung des Materials Rohacells wie bereits oberhalb und unterhalb der Fensterbereiche eingesetzt wurde.

Halbzeuge für akustische Metamaterialien - Folienmaterial

Die für die Wände des Luftkanals verwendeten Materialien sind Folien, die aufgrund ihrer optimalen elastischen und mechanischen Eigenschaften ausgewählt wurden. Auf der Grundlage der vom Materialhersteller zur Verfügung gestellten Daten wurden erste numerische Analysen durchgeführt, deren Ergebnisse in AP 1.2 wiedergegeben sind. Aus diesen Ergebnissen konnte geschlossen werden, dass die neuen Materialien irgendwo zwischen einem hochgradig undurchlässigen und einem für den Dampfdurchgang durchlässigen Material liegen. Die Messungen an den Materialproben, berichtet in AP 4.2, die später tatsächlich in den Prototyp integriert wurden, führten jedoch zu dem Schluss, dass die tatsächliche Durchlässigkeit niedriger ist. Dies führte uns zu dem Schluss, dass bei der Bewertung der hygrothermischen Eigenschaften des Prototyps die mögliche Verwendung eines Materials mit einem niedrigeren tatsächlichen S_d -Wert zu weiteren Vorteilen beim Trocknungsprozess des Außenbereichs führen würde.

Halbzeug für Aerogel

Die im Prototyp verwendeten Aerogelmaterialien (Probefbezeichnung 2123FHE-001-022) wurden vom Projektpartner DLR gefertigt. Die charakterisierenden Daten werden in Tabelle 2.25 gegeben. Das Aerogel zeichnet sich durch gute thermische Isolationseigenschaften bei geringerer Schichtdicke gegenüber einer thermisch äquivalenten Glaswollisolierung aus. Demgegenüber steht eine deutlich höhere Dichte des

Aerogelmaterials (ca. 100 kg/m^3) im Vergleich zur Glaswollisolierung (ca. 6 kg/m^3). Eine Reduzierung der Dichte ist für einen akzeptierten Einsatz in Verkehrsflugzeugen zwingend notwendig.

Weitere allgemeine notwendige Halbzeugeigenschaften

Für eine mögliche Anwendung müssen Materialien verwendet bzw. entwickelt werden, welche nicht brennbar sind bzw. die Anforderungen zur Entflammbarkeit erfüllt. In diesem Projekt wurde zur Fertigung der akustischen Metamaterialien bzw. Aerogel zunächst auf eine Einhaltung von Brennbarkeitsanforderungen verzichtet. Forschungsergebnisse zur Verringerung der Brennbarkeit werden vom Projektpartner Uni zu Köln gegeben.

AP 1.5: Definition von Komponentenoptimierungen

Weiterentwicklungen aus Erfahrungen mit dem Funktionsmuster für einen Einsatz im Prototyp

Auslegung akustischer Metamaterialien

Ergebnisse des Funktionsmusters haben gezeigt, dass das auf die Anti-Resonanzfrequenz ca. 210Hz ausgelegte akustische Metamaterial zu keiner nennenswerten Gesamtschalldämmmaßverbesserung gegenüber dem Referenzwandaufbau geführt hat. Aus diesem Grund wurde für die Auslegung dieses akustischen Metamaterials für den Prototyp ein Frequenzbereich gewählt, welcher im Bereich $>400\text{Hz}$ liegt, um außerhalb des vermuteten dominierenden Schalldämmeinflusses der sehr versteiften Bauweise der Rumpfstruktur, zu liegen.

Darüber hinaus sind die akustischen Metamaterialien als Komponenten mit dem größten Masseanteil identifiziert worden, der zusätzlich in die Kabinenwand eingebracht wurde. Für den Kabinenwand-Prototyp wurde daher bei der Auslegung der Metamaterialien ein besonderes Augenmerk auf eine möglichst leichtgewichtige, aber an der HAW Hamburg noch realisierbaren Bauweise der Metamaterialien (Materialverfügbarkeit und Fertigungsverfahren) gerichtet. In einer neuen Auslegung der akustischen Metamaterialien konnte mittels einer Verkleinerung der Einheitszellengröße und den entsprechenden neu definierten Parametern für Geometrie- und Materialien eine Gewichtsreduzierung von ca. 800g/m^2 bzw. ca. 42 % erreicht werden.

Des Weiteren wurden die streifenförmigen Massen der Metamaterialien für das Funktionsmuster mit relativ elastischem, gummiartigem, doppelseitigem Klebeband auf der Trägerfolie montiert. Aufgrund des Wirkprinzips von akustischen Metamaterialien könnten die gummiartigen Eigenschaften zu höheren Dämpfungseffekten im Schwingverhalten der akustischen Metamaterialien führen. Für die Herstellung neuer akustischer Metamaterialien wurde die Montageart durch deutlich steifere Epoxidharzklebeverbindungen ersetzt.

Auslegung einer Halterung für ein Kabinenwandpaneel

Im Funktionsmuster wurde ein dem Original eines A320-Flugzeugs nachgebautes Halterungssystem verwendet. Für eine Testumgebung, welche noch näher am Original eines A320 Flugzeug ist (Klima-Akustikkammer mit A320 Originalrumpfabschnitt), wurden für den Prototyp Originalkomponenten eines Halterungssystems eines A320 Flugzeugs mit originalgetreuen Aufhängungspunkten an der Rumpfstruktur verwendet.

Auslegung eines Luftkanals im Fensterbereich

Das Funktionsmuster bildete einen vereinfachten Kabinenwandausschnitt ohne Fensteröffnung ab. Der Prototyp soll weitere Wandelemente wie z.B. einen bzw. zwei integrierte Fensterausschnitte berücksichtigen. Der Luftkanal musste im Bereich der Fensteröffnung neu ausgelegt, konstruiert und gefertigt werden. Die Luftkanalkomponenten im Fensterbereich wurden multifunktional ausgelegt, um zum einen die konditionierte Luft um das Fenster zu leiten und zum anderen an der Schallisolation im Fensterbereich mitzuwirken. Die Komponenten wurden daher als Helmholtz-Resonatoren, zur Erhöhung des Volumenfüllgrads (vgl. (32)), ausgelegt und auf die Frequenz der bereits verwendeten Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken abgestimmt.

Aspekte zur Weiterentwicklung des neuartigen Kabinenwandkonzepts nach Prototyp Erprobung

Fertigung akustischer Metamaterialien

Ein wichtiger Faktor für eine potentielle Anwendung von akustischen Metamaterialien in der Luftfahrt ist eine kosteneffiziente Fertigung. In einem ersten Versuch konnte in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Biolink GmbH eine industrielle Fertigung eines akustischen Metamaterials mit streifenförmigen Massen gelingen. Auch mit Blick auf eine weitere mögliche Reduzierung der Flächenmasse von akustischen Metamaterialien ist in einem nächsten Schritt eine Fertigung akustischer Metamaterialien mit punktförmigen Massen sinnvoll. Akustische Metamaterialien mit punktförmigen Massen bieten das Potential die Flächenmasse der akust. Metamaterialien noch weiter zu reduzieren, erfordern allerdings ein automatisiertes Fertigungsverfahren, um eine extrem langwierige Bauweise von Hand zu vermeiden. Deshalb müssen in nächsten Arbeitsschritten Konzepte für eine mögliche industrielle Serienfertigung akustischer Metamaterialien erstellt werden.

Luftauslässe

In herkömmlichen Kabinenwandsystemen werden die Steigrohre für die Frischluft hinter dem Seitenwandpaneel über eine Verzweigung geteilt, sodass ein Teil der Luft unterhalb der Gepäckablage über den Passagieren und der andere Teil oberhalb der Gepäckablage ausströmt. Zur Vereinfachung der Versuche mit dem Prototyp wurde nur die Ausströmungsblende für die Luft unterhalb der Gepäckablage in Betracht gezogen. Für eine mögliche Weiterentwicklung ist eine Verzweigungskomponente in den Luftkanal zu konzipieren, welche zu beiden breitflächigen Ausströmungsblenden unterhalb bzw. oberhalb der Gepäckablagen passt.

Material für Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich

Zur Vereinfachung des Fertigungsprozesses wurden die Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich mittels additiver Fertigung hergestellt. Aufgrund vorhandener Maschinenkapazitäten wurde FDM-Material als Filament bzw. Druckmaterial verwendet. Dieses Material ist mit einer Dichte von ca. 1000 kg/m^3 relativ schwer und kann aber durchaus durch leichtere Materialien ersetzt werden.

2.2 HAP 4: Aerogelmaterialien und Komponentenherstellung

AP 4.2: Charakterisierung der Halbzeuge und Funktionsmuster

A. Rumpfstruktur ohne Fenster für Funktionsmuster

a. Ergebnisse Schalldämmmaßmessungen

Für das Funktionsmuster wurde der in AP1.3 vorgestellte Ausschnitt aus einer Originalrumpfstruktur eines A320 Flugzeugs verwendet. Zur Charakterisierung der Schalldämmeigenschaften dieses Rumpfstruktur-Ausschnitts wurde dieser wie in AP 5.1 beschrieben akustisch untersucht. Die Messergebnisse werden in Abbildung 2.91 gezeigt. In Abbildung 2.91 ist bis ca. 300 Hz ein Anstieg des Schalldämmmaß $< 18\text{ dB/Oktave}$ zu erkennen, was sehr wahrscheinlich auf Versteifungseffekte der Bauweise aus Spanten und Stringer elementen der Rumpfstruktur zurückzuführen ist.

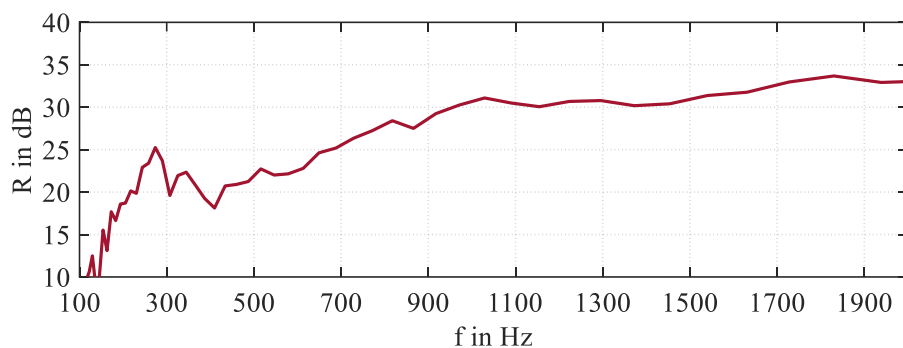


Abbildung 2.91 Experimentell ermitteltes Schalldämmmaß des für das Funktionsmuster verwendeten Ausschnitts einer originalen Rumpfstruktur ohne Flugzeugfenster eines A320 Flugzeugs (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

b. Ergebnisse Modalanalyse

Die Modalanalyse wurde jeweils für die Außenseite bzw. die Innenseite des Ausschnitts einer Rumpfstruktur ohne Fenster eines A320 Flugzeug durchgeführt.

Modalanalyse Außenseite

Der Versuch zur Modalanalyse wurde im Akustiklabor im Freifeldraum 4 aufgebaut und durchgeführt. Die Rumpfstruktur wurde, zur Realisierung möglichst freier Randbedingungen, an zwei Punkten mit elastischen Expandern aufgehängt. Fotos vom Versuchsaufbau und der Position der Anregung durch einen Vibrationsshaker sind in Abbildung 2.92 aufgeführt. Für die Anregung wurde ein MiniSmartShaker mit integriertem Verstärker, Modell K2004E01 von modalshop.com verwendet. Folgende Signal- bzw. Aufzeichnungsdaten wurden gewählt:

Tabelle 2.26: Gewählte Einstellungen für die Modalanalyse einer Rumpfstuktur ohne Fenster

Einstellung Anregungssignal	Einstellung Aufzeichnungsdaten	Auswertemethodik Moden
Signalform: Periodic Chirp Amplitude: 0,08 V Shaker-Gain Level: 1 (niedrigste Verstärkung)	0 bis 800 Hz Auflösung 1 Hz Messzeit 1s Anzahl Mittelungen: 5	RFP-Z Global Solve Max. Iterationen 130

Die Messung wurde mit einem Laservibrometer von Polytec GmbH durchgeführt und aufgezeichnet (siehe AP 5.1). Die Modalanalyse wurde mit der Software BK Connect – Modul Modalanalyse von Hottinger Brüel&Kjaer durchgeführt.



Abbildung 2.92: Versuchsaufbau zur Modalanalyse an der Außenseite eines Rumpfstruktur-Ausschnitts ohne Fenster, welche im Funktionsmuster verwendet wurde

Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.93 und ausgewählte Moden grafisch in der folgenden Tabelle 2.27 aufgeführt:

Mode Table1					
Mode	Damped Frequency (Hz)	Dampi...	Description	Complexity	Parameter Estimation Method
☒ 1	138,73221	3,63923		0,01752	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 2	138,74229	3,64037		0,01752	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 3	153,2378	0,23552		0,01314	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 4	167,33333	0,17672		0,00532	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 5	182,84859	0,13566		0,01022	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 6	230,32749	0,43567		0,09397	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 7	230,32845	0,4358		0,09398	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 8	248,1291	1,46074		0,39102	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 9	262,5744	0,81342		0,05792	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 10	286,29424	0,32309		0,36211	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 11	329,82391	0,35264		0,55397	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 12	329,90803	0,54227		0,60199	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 13	348,73947	0,54592		0,4482	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 14	419,04637	0,39206		0,28711	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 15	435,1226	0,29076		0,36153	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 16	486,44314	0,27451		0,4671	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 17	720,66547	0,24818		0,86661	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 18	746,92857	0,29169		0,89049	Rational Fraction Polynomial-Z

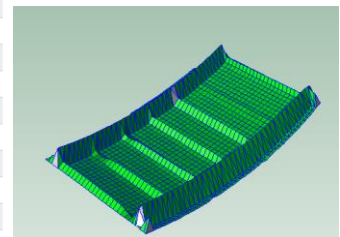
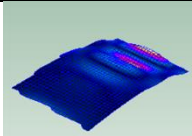
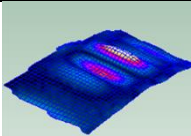
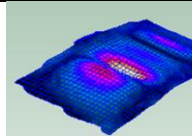
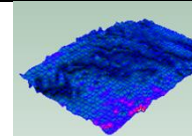
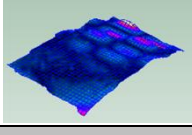
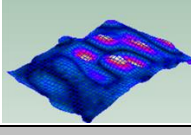
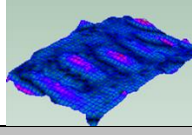
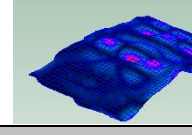
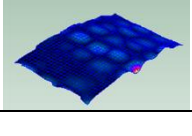
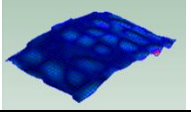
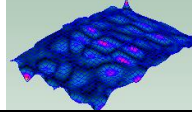
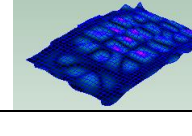


Abbildung 2.93: Gemessene Moden an der Rumpfstruktur-Außenseite. (Die Rumpfstruktur wurde für das Funktionsmuster verwendet).

Tabelle 2.27: Ermittelte Moden in der Modalanalyse für die Außenseite der Rumpfstruktur, welche für das Funktionsmuster eingesetzt wurde.

Mode - Frequenz (Hz) (gedämpft)	153	167	182	248
				
Mode - Frequenz (Hz) (gedämpft)	262	286	348	419
				
Mode - Frequenz (Hz) (gedämpft)	435	486	720	746
				

Modalanalyse Innenseite

Die Modalanalyse für die Innenseite wurde auf die gleiche Art und Weise durchgeführt wie zuvor für die Modalanalyse an der Außenseite beschrieben. In Abbildung 2.94 wird der Versuchsaufbau gezeigt.



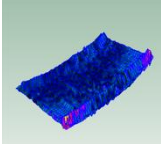
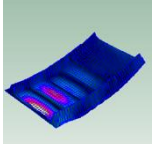
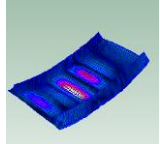
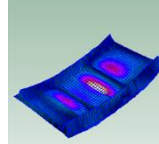
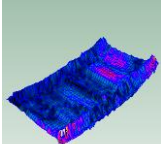
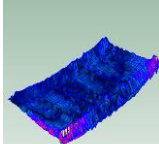
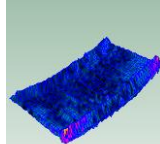
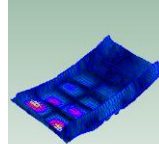
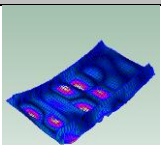
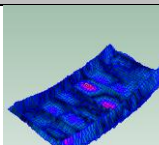
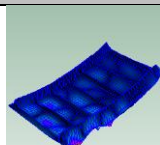
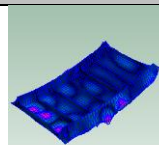
Abbildung 2.94: Versuchsaufbau zur Modalanalyse an der Innenseite eines Rumpfstruktur-Ausschnitts ohne Fenster, welche im Funktionsmuster eingebaut worden ist

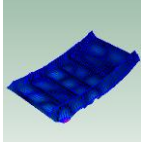
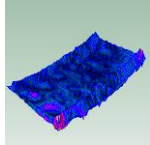
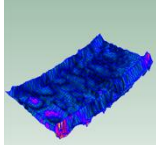
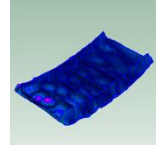
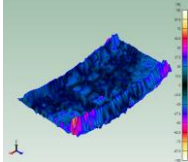
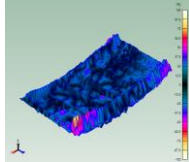
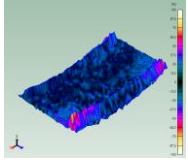
Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.93 und ausgewählte Moden grafisch in der folgenden Tabelle 2.28 aufgeführt:

Mode	Damped Frequency (Hz)	Damp...	Description	Complexity	Parameter Estimation Method
☒					
☒ 2	153,45906	0,23714		0,00163	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 3	167,60252	0,25512		0,03465	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 4	182,99723	0,14259		0,09185	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 5	197,95028	0,1763		0,35005	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 6	231,30041	0,43629		0,47129	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 7	251,40892	1,74483		0,16078	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 8	263,73406	0,50886		0,01165	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 9	288,76831	0,1636		0,48177	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 10	333,70108	0,61413		0,83018	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 11	369,56157	0,27888		0,26102	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 12	386,90664	0,35094		0,13741	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 13	404,69081	0,26319		0,26541	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 14	433,38853	0,35911		0,68645	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 15	528,23505	0,40432		0,8348	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 16	579,53714	0,28449		0,62177	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 17	614,46327	0,53783		0,45263	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 18	614,50562	0,5112		0,46381	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 19	636,24199	0,33411		0,11054	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 20	636,41546	0,32548		0,1026	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 21	667,70983	0,39052		0,05072	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 22	667,71251	0,41366		0,05403	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 23	688,74961	0,54872		0,08105	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 24	689,48848	0,54105		0,07364	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 25	722,98212	0,33386		0,54021	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 26	744,2463	0,32686		0,78697	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 27	778,32316	0,32893		0,13123	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 28	778,33718	0,31942		0,13712	Rational Fraction Polynomial-Z
☒ 29	787,75844	0,23957		0,51767	Rational Fraction Polynomial-Z

Abbildung 2.95: Gemessene Moden an der Rumpfstruktur-Innenseite. (Die Rumpfstruktur wurde für das Funktionsmuster verwendet).

Tabelle 2.28: Ermittelte Moden in der Modalanalyse für die Innenseite der Rumpfstruktur, welche für das Funktionsmuster eingesetzt wurde

Mode - Frequenz (Hz) (gedämpft)	136	153	167	182
				
Mode - Frequenz (Hz) (gedämpft)	197	231	251	263
				
Mode - Frequenz (Hz) (gedämpft)	288	333	369	386
				
Mode - Frequenz (Hz) (gedämpft)	404	433	528	579

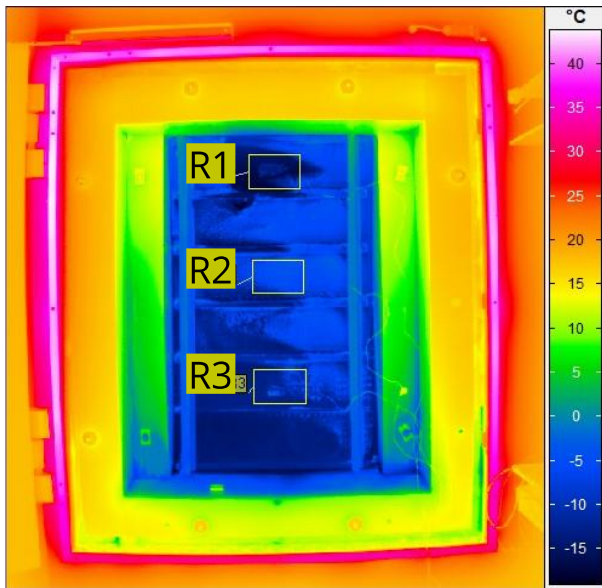
				
Mode - Frequenz (Hz) (gedämpft)	722	744	787	-
				

c. Ergebnisse thermische Messungen

Parallel zu den vibroakustischen Messungen der Rumpfstruktur wurden thermische Messungen durchgeführt, um vor allem die Temperaturverteilung entlang ihrer Oberfläche zu überprüfen, wenn sie im Klimakammer-Transmissionsfenster eingebaut ist. Das Bauteil wurde wie in AP 5.2 beschrieben eingebaut, jedoch ohne den weiteren Einbau der anderen Komponenten, wie z.B. der Dämmstoffe oder des Kabinsimulationskastens. Die Temperatur $T_{Au\beta}$ der Klimakammer wurde auf -30°C eingestellt, während die Temperatur im Inneren des Labors zwischen 19 und 21°C schwankte. Mit einer Wärmebildkamera wurden die Oberflächentemperaturen gemessen und mit den Werten verglichen, die mit Hilfe von Thermoelementen ermittelt wurden, die an drei verschiedenen Stellen direkt auf der Oberfläche installiert waren

In Abbildung 2.96 ist der Vergleich zwischen dem Infrarotbild und dem Foto des Aufbaus zu sehen. Zunächst einmal ist aus der Temperaturverteilung in Abbildung 2.96 a) zu erkennen, dass es einen vertikalen Temperaturgradienten auf der Oberfläche des hölzernen Einbauadapters gibt; die Oberfläche an der Oberseite ist etwa $10/5^{\circ}\text{C}$ wärmer als die Unterseite. Thermisch auffällig ist auch der beheizte Messfenster-Rahmen, der eingebaut wurde, um ein Anfrieren der Türdichtung zu verhindern, wenn das Übertragungsfenster geschlossen ist und damit ggf. eine Beschädigung der Dichtung zu vermeiden. Diese Heizung könnte die Ursache für einige Wärmebrücken sein. Wenn die mit der Wärmebildkamera gemessenen lokalen Werte (R1, R2, R3) und die mit den Thermoelementen (TE1, TE2, TE3) gemessenen Werte in Tabelle 2.29 verglichen werden, erkennt man, dass in Position 2 der Unterschied zwischen den beiden Werten mehr als 10°C beträgt. Dies ist auf das Vorhandensein von Eis zurückzuführen, das sich auf der Oberfläche gebildet hat und als isolierendes Material wirkt, das das Thermoelement TE2 bedeckt, das eine viel niedrigere Temperatur misst als die, die von der Wärmebildkamera aufgezeichnet wurde. Nach der Entfernung des Eises auf der Oberfläche, wie in Abbildung 2.97 dargestellt, sind die Temperaturen nun einheitlicher zwischen den Werten der Wärmebildkamera und der Thermoelemente, wie in Tabelle 2.30 dargestellt.

Im Vergleich zu den Oberflächentemperaturen des Adapters ist auf der Oberfläche des Rumpfes eine Umkehrung zu erkennen: Tatsächlich sind die Temperaturen an der Oberseite geringer als an der Unterseite. Diese Inhomogenität könnte auf die interne Temperaturverteilung im Labor zurückzuführen sein. Das Anbringen von isolierenden Glaswollmatten, wie in Abbildung 2.98 gezeigt, beantwortet diese Frage. Betrachtet man die von der Wärmebildkamera gemessenen Werte in Tabelle 2.31, so zeigt sich, dass die Temperaturen durch das Vorhandensein des Isoliermaterials deutlich höher sind, während die Thermoelemente, die zwischen dem Rumpf und den Glaswollmatten angebracht sind, homogene Werte aufweisen.

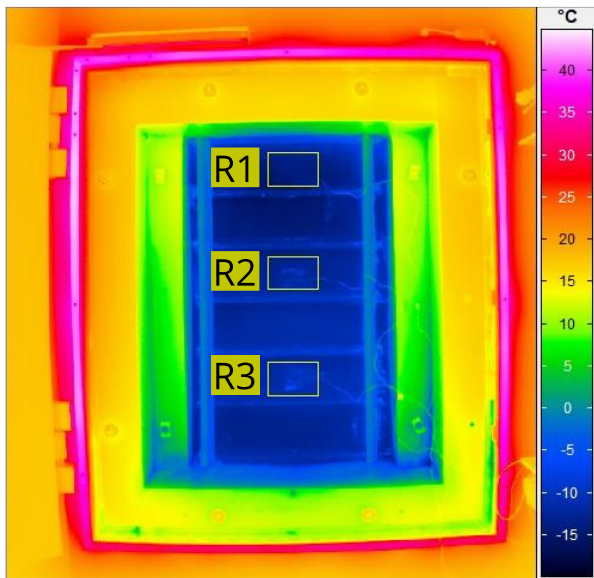


a)

Abbildung 2.96 a) Infrarotbild einer A320-Rumpfstruktur mit Eis auf der Oberfläche b) Foto einer A320-Rumpfstruktur mit Eis auf der Oberfläche

Tabelle 2.29: Gemessene Werte aus Infrarotbildern und Thermoelementen mit Eis auf der Oberfläche

Werte aus dem Infrarotbild		Werte aus Thermoelementen	
R1	-14.50 °C	TE1	-16.00 °C
R2	-5.91 °C	TE2	-17.00 °C
R3	-11.03 °C	TE3	-12.00 °C



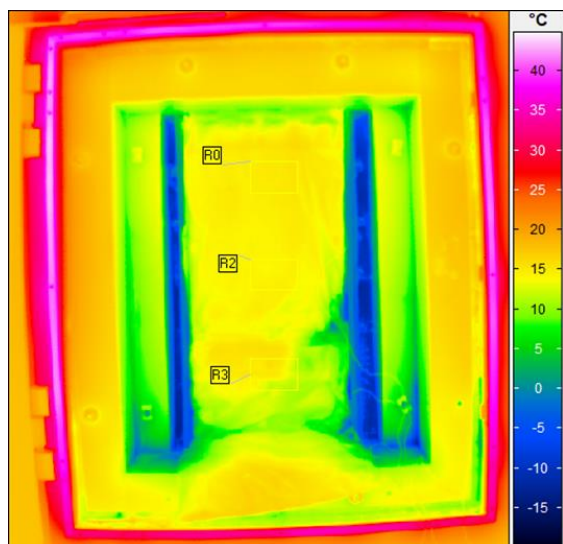
a)

b)

Abbildung 2.97 a) Infrarotbild einer A320-Rumpfstruktur nach der Eisentfernung b) Foto einer A320-Rumpfstruktur nach der Eisentfernung

Tabelle 2.30: Gemessene Werte aus Infrarotbildern und Thermoelementen nach der Eisentfernung

Werte aus dem Infrarotbild		Werte aus Thermoelementen	
R1	-14.17 °C	TE1	-14.00 °C
R2	-12.42 °C	TE2	-11.00 °C
R3	-10.84 °C	TE3	-10.00 °C



a)



b)

Abbildung 2.98 a) Infrarotbild einer A320-Rumpfstruktur nach dem Einbau einer Glaswolledecke b) Foto einer A320-Rumpfstruktur nach dem Einbau einer Glaswolledecke

Tabelle 2.31: Gemessene Werte aus Infrarotbildern und Thermoelementen nach dem Einbau einer Glaswolledecke

Werte aus dem Infrarotbild		Werte aus Thermoelementen	
R1	14.98 °C	TE1	-18.00 °C
R2	14.30 °C	TE2	-19.00 °C
R3	13.67 °C	TE3	-18.00 °C

B. Rumpfstruktur mit Fenster für Kabinenwand-Prototyp

Die Komponente, Ausschnitt einer Original Rumpfstruktur für den Prototyp, wurde bereits in AP1.3 vorgestellt. Zur Charakterisierung der Schalldämmeigenschaften wurde diese mit dem in AP5.1 beschriebenen Verfahren untersucht. Die Ergebnisse sind Abbildung 2.99 aufgeführt.

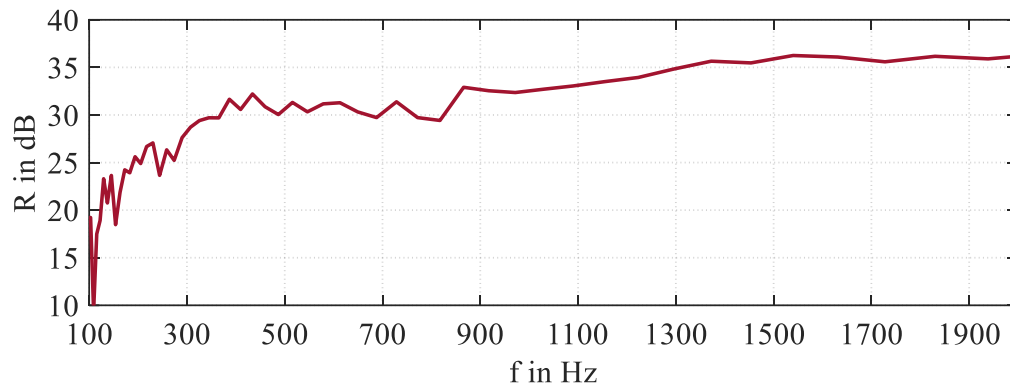


Abbildung 2.99: Messergebnisse der frequenzabhängigen Schalldämmmaße des für den Prototyp verwendeten Rumpfstruktur-Ausschnitts (Breite über 3 Spante) aus einem A320-Rumpf (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

C. Akustische Metamaterialien für Funktionsmuster

Die Auslegung der akustischen Metamaterialien für das Funktionsmuster wurden bereits in AP1.2 beschrieben. In Abbildung 2.100 werden die numerischen Ergebnisse mit den experimentell ermittelten Ergebnissen validiert. Die Ermittlung des Schalldämmmaßes erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 15186-1. In Abbildung 2.100 und Abbildung 2.101 sind jeweils in rot die Messdaten der akustischen Metamaterialien und in blau, grün bzw. hellblau die numerischen Ergebnisse unter Berücksichtigung unterschiedlicher, isotrop angenommener Dämpfungsfaktoren aufgeführt. In beiden Fällen, akustisches Metamaterial mit Anti-Resonanzfrequenz bei ca. 210 Hz bzw. 400 Hz, haben die Messdaten und die numerischen Ergebnisse qualitative eine sehr ähnliche Verlaufsform. Quantitativ zeigen nur die Schalldämmeigenschaften bei den jeweiligen Anti-Resonanzfrequenzen eine Übereinstimmung zwischen Messdaten und numerischen Ergebnissen. Die Messergebnisse liegen außerhalb der jeweiligen Anti-Resonanzfrequenzen deutlich über den numerisch abgeschätzten Dämmeigenschaften. Eine tiefergehende Analyse von möglichen Einflüssen in akustischen Metamaterialien mit Streifenmassen außer den dargestellten Dämpfungseinflüssen konnte im Projektzeitrahmen nicht abschließend durchgeführt werden.

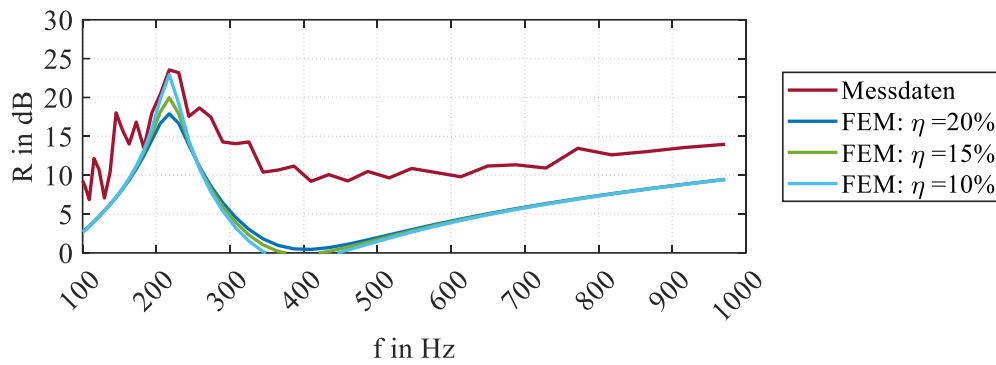


Abbildung 2.100: Vergleich numerisch abgeschätzter Schalldämmmaßeigenschaften mit experimentell bestimmten Daten des akustischen Metamaterials mit Streifenmassen für das Funktionsmuster – Anti-Resonanzfrequenz ca. 210 Hz (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

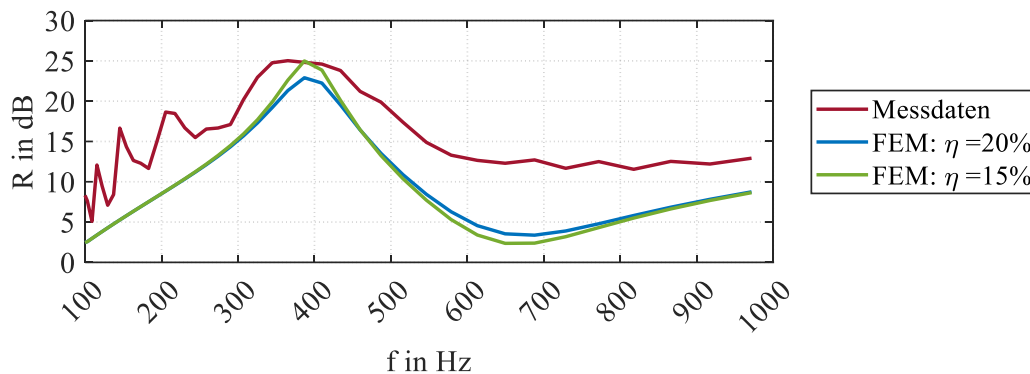


Abbildung 2.101: Vergleich numerisch abgeschätzter Schalldämmmaßeigenschaften mit experimentell bestimmten Daten des akustischen Metamaterials mit Streifenmassen für das Funktionsmuster – Anti-Resonanzfrequenz ca. 400 Hz (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

D. Akustische Metamaterialien für den Kabinenwand-Prototyp

Die Auslegung der akustischen Metamaterialien für den Prototyp wurden bereits in AP1.2, sowie die Fertigung dieser in AP1.3 beschrieben. In Abbildung 2.102 und Abbildung 2.103 bzw. Abbildung 2.104 werden die numerischen Ergebnisse einer Simulationsstudie mit unterschiedlich angenommenen Dämpfungsfaktoren, in blau bzw. grün dargestellt und mit den experimentell ermittelten Ergebnissen, in rot dargestellt, validiert. Die Ermittlung des Schalldämmmaßes erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 15186-1. Die numerisch abgeschätzten Anti-Resonanzspitzen haben eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Schalldämmmaßamplitude bei der Anti-Resonanzfrequenz des akustischen Metamaterials. Wie auch bei der Validierung der Ergebnisse der akustischen Metamaterialien für das Funktionsmuster zeigen die Messergebnisse außerhalb der Anti-Resonanzfrequenz höhere Schalldämmmaßwerte, welches möglicher Weise auf weitere Eigenschaften der Bauweise, die in der numerischen Modellierung nicht berücksichtigt wurde, zurückgeführt werden könnte. Wie beim Funktionsmuster konnten die genauen Hintergründe im zeitlichen Rahmen dieses Vorhabens nicht geklärt werden.

In Abbildung 2.103 werden die in AP1.2 beschriebenen numerischen Ergebnisse für das Metamaterial mit der ausgelegten Anti-Resonanzfrequenz bei ca. 400 Hz (grüne Kurve) aufgeführt. Den numerischen Ergebnissen gegenüber werden in blauer Farbe die experimentell ermittelten Messergebnisse gezeigt. In der blauen Kurve zeigt sich keine für akustische Metamaterialien typische Schalldämmmaßüberhöhung. In einer darauffolgenden Untersuchung der akustischen Metamaterialkomponente konnte festgestellt werden, dass es lokal zu Ablösungen der Streifenmassen von der Folie gekommen ist. Das hatte zur Folge, dass Folie und Streifenmassen bei der Anti-Resonanzfrequenz nicht gegenphasig schwingen können und sich die schalldämmende Wirkweise der akustischen Metamaterialien nicht ausreichend einstellen konnte (siehe

Wirkweise akustische Metamaterialien in (20)). Die Bereiche lokaler Delamination stellen somit Schallnebenwege dar, welche zu einer Auslöschung der typischen Dämmwirkung des akustischen Metamaterials im Bereich seiner Anti-Resonanzfrequenz führen. Nach erfolgter Reparatur des akustischen Metamaterials konnten die Messergebnisse, in Abbildung 2.103 in rot dargestellt, erreicht werden. Die Messdaten zeigen eine Schalldämmmaßspitze im Bereich von ca. 550 Hz, welche in etwa 150 Hz über den numerischen Ergebnissen liegt.

Über eine numerische Parameterstudie in Abbildung 2.104 konnte der E-Modul der Folie variiert werden und eine Übereinstimmung mit den Messdaten bei einem E-Modul von $E_f = 4000 \text{ MPa}$ erzielt werden. Aufgrund der bereits zuvor vorgestellten guten Übereinstimmungen der numerischen und experimentellen Ergebnisse des akustischen Metamaterials bei ca. 670 Hz, kann eine grundsätzliche Annahme eines zu kleinen E-Moduls der Folie in Tabelle 2.14 eher ausgeschlossen werden. Es könnte allerdings sein, dass es während des Fertigungsprozesses zu einer Vorspannung der Folie gekommen ist, welche aufgrund der Bauweise nach der Fertigung in der Folie erhalten geblieben ist. Für die Fertigung wurde die Folie zur Fixierung im Klebprozess an den Ecken mit Klebeband auf einem Tisch fixiert. Eine abschließende Untersuchung, welchen Einfluss eine mögliche durch die angewandte Fertigungsmethodik eingebrachte Vorspannung auf die Schalldämmeigenschaften des akustischen Metamaterials hat konnte im Zeitrahmen des Projekts nicht abschließend untersucht werden.

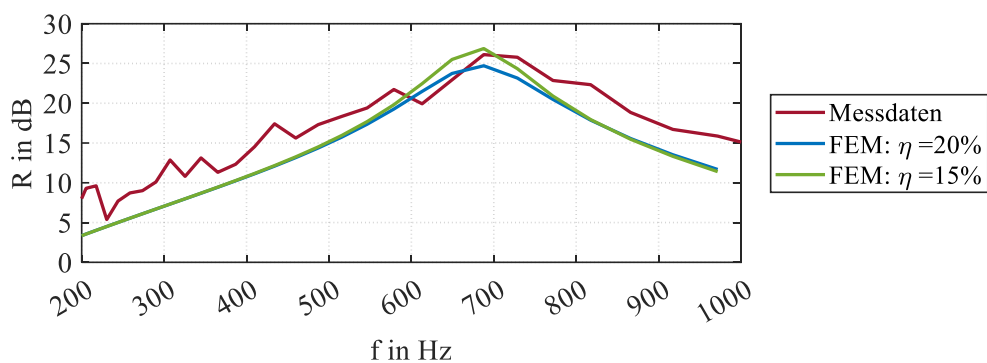


Abbildung 2.102: Vergleich numerisch abgeschätzter Schalldämmeigenschaften mit experimentell bestimmten Daten des akustischen Metamaterials mit Streifenmassen für den Luftkanal des Kabinenwand-Prototyps – Anti-Resonanzfrequenz ca. 670 Hz (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

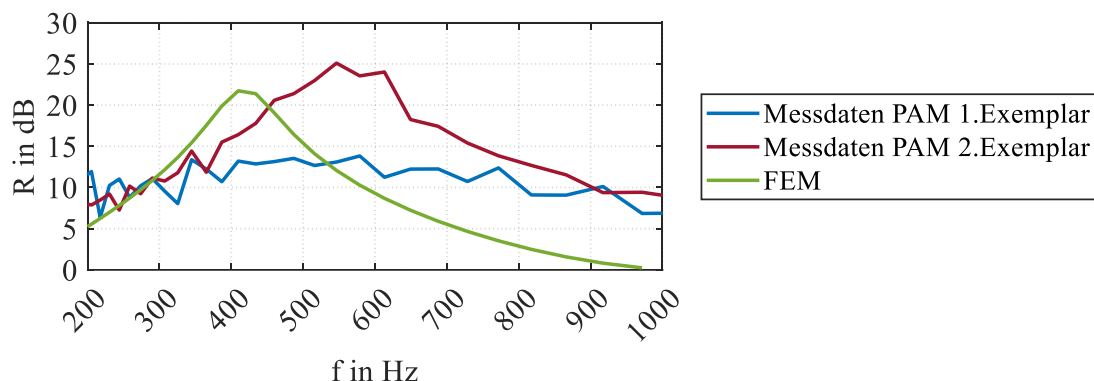


Abbildung 2.103: Vergleich numerisch abgeschätzter Schalldämmeigenschaften ($E_f = 2300 \text{ MPa}$) mit experimentell bestimmten Daten eines akustischen Metamaterials mit Streifenmassen für den Luftkanal des Kabinenwand-Prototyps – theoretische Anti-Resonanzfrequenz ca. 400 Hz.

Blaue Kurve: zuerst hergestelltes Exemplar mit fehlerbehafteten Klebungen zwischen Streifenmassen und Folie;
Rote Kurve: als zweites hergestelltes Exemplar mit ausgebesselter Klebung zwischen Streifenmassen und Folie
(Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

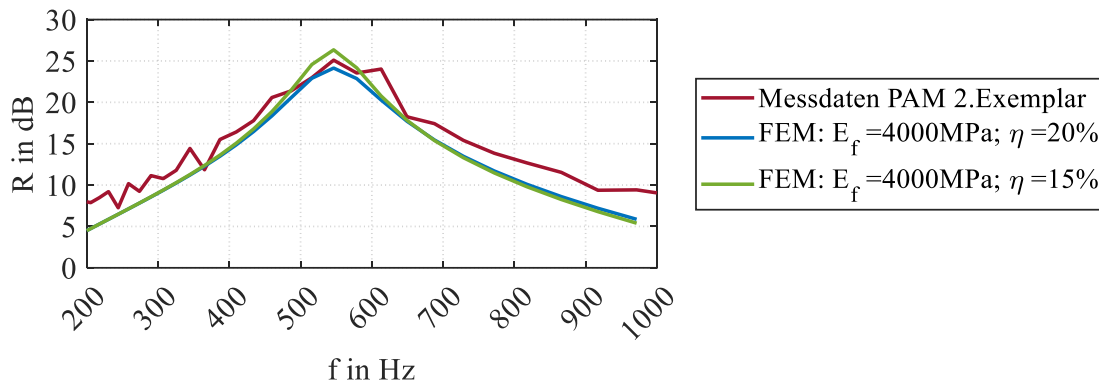


Abbildung 2.104: Vergleich numerisch abgeschätzter Schalldämmmaßeigenschaften mit experimentell bestimmten Daten des akustischen Metamaterials mit Streifenmassen für den Luftkanal des Kabinenwand-Prototyps – mit ausgelegter Anti-Resonanzfrequenz ca. 400 Hz (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

E. Industriell gefertigtes akustisches Metamaterial

Zur Bestimmung der experimentell ermittelten Schalldämmmaßeigenschaften des vom Hersteller Biolink GmbH gelieferten akustischen Metamaterials mit streifenförmigen Massen wurde dieses, wie in AP5.1 beschrieben, in den Akustik Prüfstand eingebaut. Die Ermittlung des Schalldämmmaßes erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 15186-1. Die Messergebnisse sind in Abbildung 2.105 aufgeführt. Im Frequenzbereich 300-400 Hz kann eine Schalldämmmaßerhöhung im Bereich der ausgelegten Anti-Resonanzfrequenz lokalisiert werden. Die Lage der Anti-Resonanzfrequenz ist daher etwas in den tieferen Frequenzbereich verschoben als mit dem akustischen Metamaterial PAM2 des Funktionsmusters abgeschätzt. Weitere Untersuchungen des von Biolink GmbH gefertigten akustischen Metamaterial haben ergeben, dass zum einen die Gesamtmasse des Metamaterial um ca. 100 g schwerer ist als in der Auslegung vorgegeben, sowie eine Folie mit geringere Dicke 75 μm verwendet worden ist. Beide Faktoren begünstigen eine Verschiebung der Anti-Resonanzfrequenz zu niedrigeren Frequenzen.

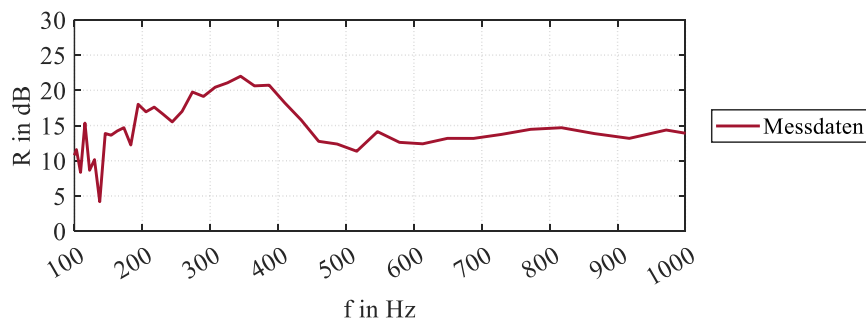


Abbildung 2.105: Experimentell ermittelte Schalldämmmaßeigenschaften des von dem Unternehmen Biolink GmbH (31) industriell gefertigten akustischen Metamaterials mit streifenförmigen Massen (Darstellung Messdaten in 1/12-Oktavspektren).

F. Charakterisierung eines Helmholtz-Resonators mit Biegebalken als Element für ein Resonatoren-Array des Luftkanals im Funktionsmuster

Die in AP1.2 numerisch abgeschätzten Absorptionsergebnisse eines einzelnen Helmholtz-Resonators mit Biegebalken aus AP1.3. werden mit entsprechenden experimentell gemessenen Daten eines gleichartigen Resonators in Abbildung 2.106 gegenübergestellt. Die numerischen Ergebnisse (durchgezogene Linie) zeigen qualitativ eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Ergebnissen (gestrichelte Linie). Die Messergebnisse wurden mit dem Messaufbau beschrieben in AP5.1 mit der Messmethodik nach DIN EN ISO

10534 erzielt. Die Abweichungen zwischen theoretischen und experimentellen Ergebnissen der Resonanzspitzen betragen bei f_1 ca. 20 Hz, welche wahrscheinlich auf in AP1.2 beschriebene Vereinfachungen in dem Modellaufbau zurückzuführen sind, sowie bei $f_2 < 5$ Hz. In den Frequenzbereichen außerhalb der Resonanzspitzen zeigen die Messergebnisse etwas höhere Absorptionskoeffizienten als die numerischen Ergebnisse, was sehr wahrscheinlich an den Vereinfachungen in der Modellierung von Strömungsdissipationseffekten zu begründen sein kann.

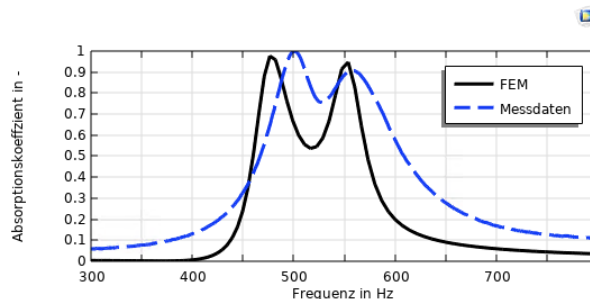


Abbildung 2.106: Gegenüberstellung numerisch abgeschätzter sowie experimentell gemessener frequenzabhängiger Absorptionskoeffizienten eines einzelnen Helmholtz-Resonators mit Biegebalken wie im Funktionsmuster bzw. Prototyp eingebaut

G. Helmholtz-Resonatoren für den Kabinenwand-Prototyp

d. Luftkanal oberhalb Fensterbereich – Helmholtz-Resonator Arrays mit Biegebalken

Die Messergebnisse der Helmholtz-Resonator Arrays für die oberen Luftkanäle werden in Abbildung 2.107 gezeigt. Die Messergebnisse wurden nach der Methodik in DIN EN ISO 10534 ermittelt. In den Ergebnissen in Abbildung 2.107 wird gezeigt, dass alle Resonanzfrequenzspitzen der Helmholtz-Resonatoren Arrays im ausgelegten Frequenzbereich liegen (vgl. Tabelle 2.19). Die Absorptionskurven unterscheiden sich jedoch quantitativ etwas im Vergleich der einzelnen Helmholtz-Resonator Arrays Komponenten untereinander. Grund hierfür könnten sehr wahrscheinlich Fertigungsungenauigkeiten sein, da alle in Abbildung 2.107 gezeigten Komponenten nach den gleichen Parametern, aus Tabelle 2.19, gefertigt wurden (Komponente 3 & 4 sind gespiegelt zu Komponente 1 & 2).

Gegenüber den Messergebnissen eines einzelnen Helmholtz-Resonators mit Biegebalken (vgl. Abbildung 2.106) sind in den Abbildung 2.107 a)-d) bei den Helmholtz-Resonator Arrays z.T. mehr als zwei der zu erwartenden Resonanzspitzen zu erkennen. Ein Grund könnte möglicherweise ein weiterer Resonanzeffekt des Biegebalkens sein. In der bisherigen Betrachtung wurde nur die Schwingrichtung des Biegebalkens wie in Abbildung a) mit einer Eigenfrequenz von ca. $f_{R1,CL} = 550 + 6i$ Hz betrachtet. Eine tiefergehende Analyse der numerischen Ergebnisse ergab eine weitere Eigenfrequenz des Biegebalkens bei ca. $f_{R2,CL} = 608 + 15i$ Hz, welche auf eine Bewegungsrichtung des Biegebalkens wie in Abbildung 2.108 b) zurückzuführen ist. In Abbildung 2.109 werden beide Eigenfrequenzen $f_{R1,CL}$ bzw. $f_{R2,CL}$ den Messergebnissen aus Abbildung 2.107 d) gegenübergestellt. Aufgrund von Fertigungsunsicherheiten könnten es z.B. in Abbildung 2.107 a)-d) zu einer Überlagerung der beiden Resonanzeffekte gekommen sein.

Darüber hinaus könnte es zu Interaktionseffekten der Resonatorkammern der Helmholtz-Resonatoren gekommen sein. Eine tiefergehende Untersuchung in welcher Art und Weise die Bauform und darauf folgend nebeneinander liegende Resonatorkammern einen Einfluss auf die Absorptionseigenschaften der Helmholtz-Resonatoren Arrays konnte im Zeitrahmen dieses Projekts nicht abschließend untersucht werden.

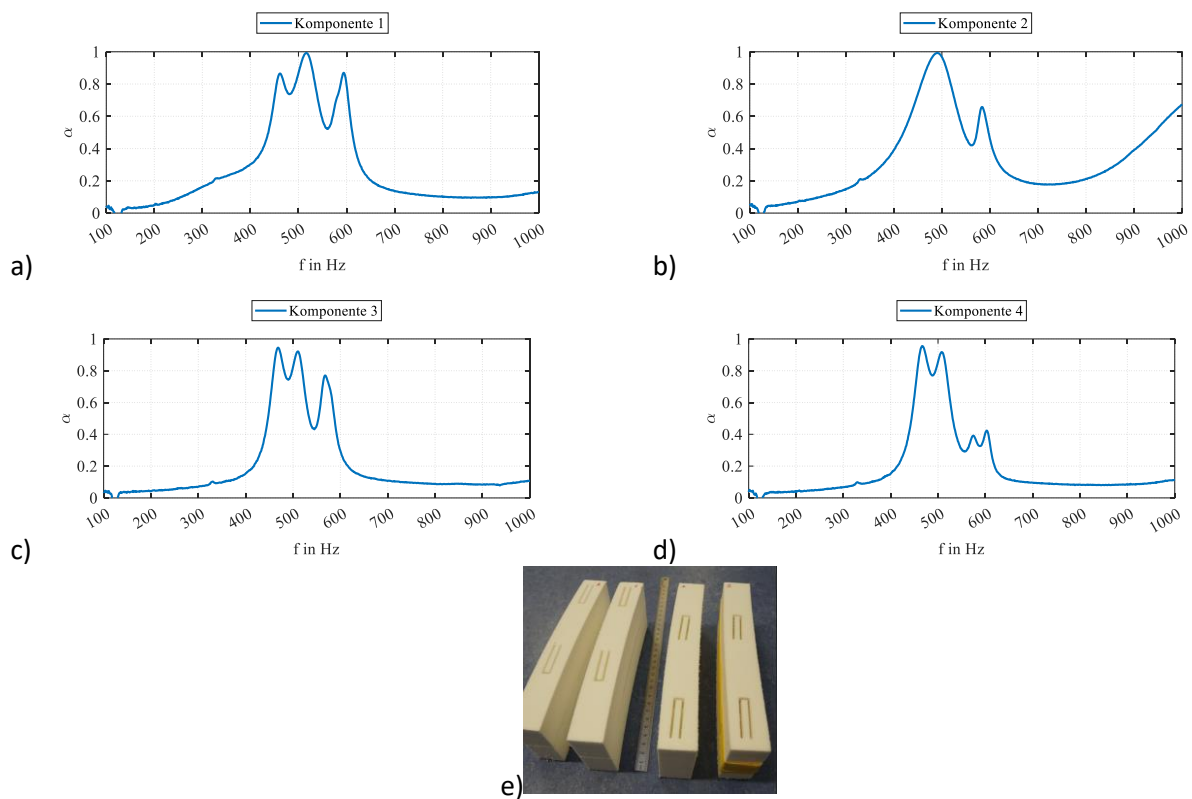


Abbildung 2.107: a)-d) Mit einem Impedanzrohr gemessene Absorptionskoeffizienten hergestellter Einzelresonatoren der Helmholtz-Resonator-Arrays mit Biegebalken für die oberen Luftkanäle; e) Foto von Helmholtz-Resonator Arrays mit Biegebalken

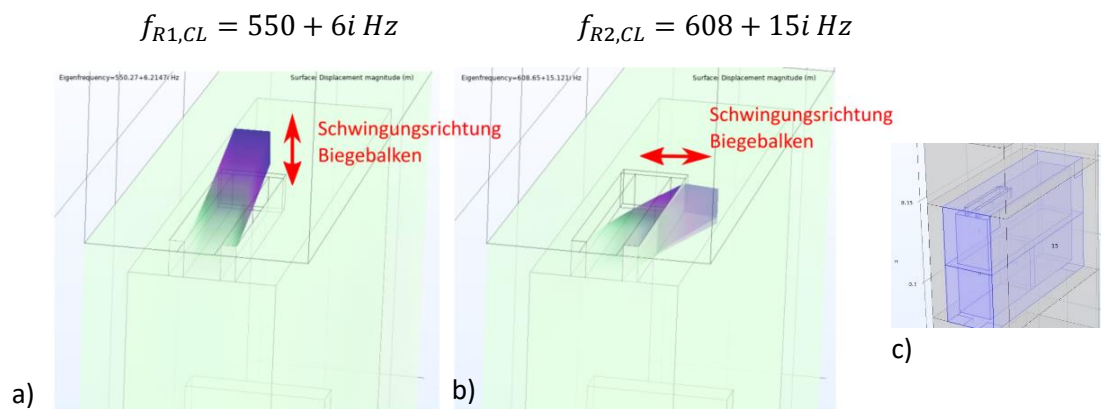


Abbildung 2.108: a)-b): Berechnung der ersten beiden Eigenfrequenzen des Biegebalkens mit einem FEM 3D-Modell; c) Isometrische Ansicht Geometrie aus FEM 3D-Modell

Ausschnitt aus Abbildung 2.107 d

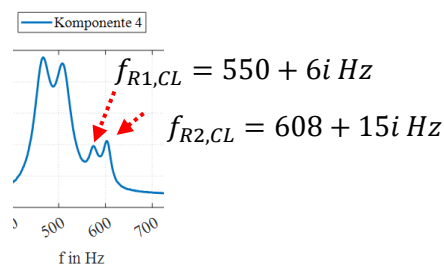


Abbildung 2.109: Ausschnitt aus Abbildung 2.107 und Gegenüberstellung weiterer möglicher Resonanzeffekte im Absorptionsspektrum von den gefertigten Helmholtz-Resonator Arrays

e. Luftkanal unterhalb Fenster – Helmholtz-Resonator Arrays mit Biegebalken

Die Messergebnisse der Helmholtz-Resonator Arrays für die unteren Luftkanäle werden in Abbildung 2.110 gezeigt. Die Messergebnisse wurden nach der Methodik in DIN EN ISO 10534 ermittelt. Die Auswertung der Ergebnisse folgt der Argumentation der zuvor aufgeführten Ergebnisse aus dem Abschnitt Luftkanal unterhalb Fensterbereich – Helmholtz-Resonator Arrays mit Biegebalken.

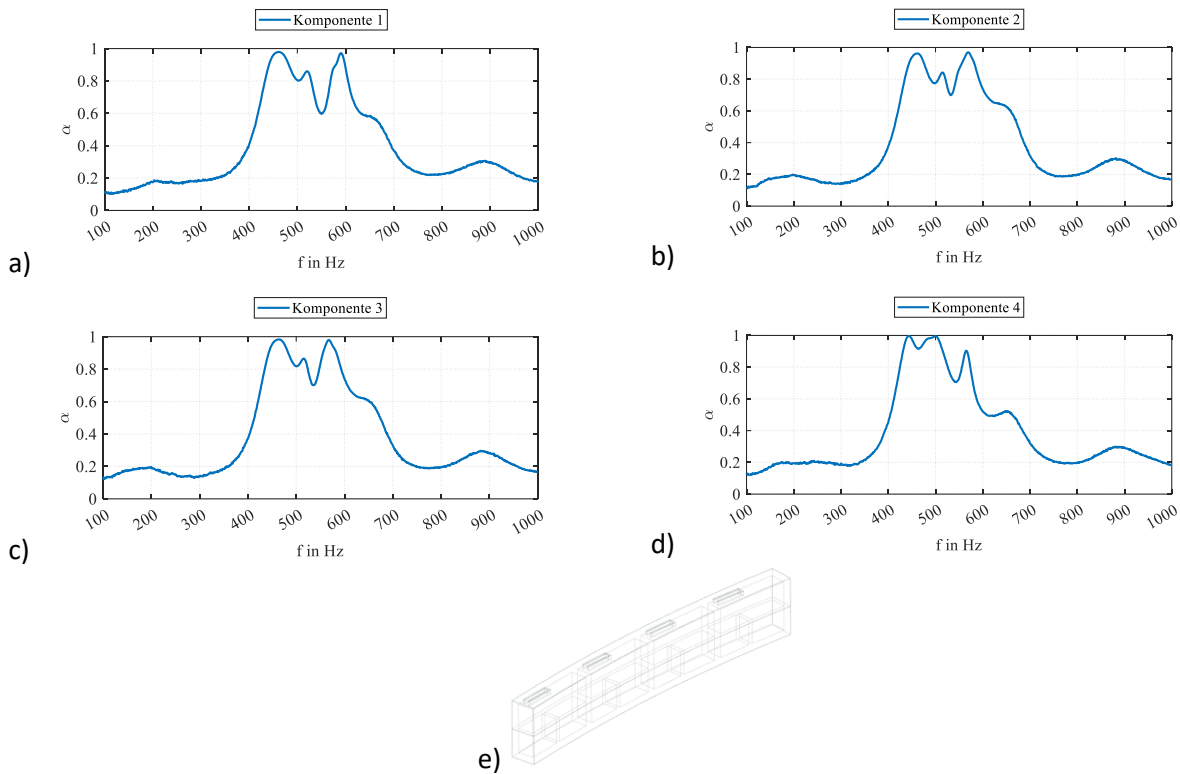


Abbildung 2.110: a)-d) Mit einem Impedanzrohr gemessene Absorptionskoeffizienten hergestellter Helmholtz-Resonator-Array-Komponenten mit Biegebalken zum Aufbau der Luftkanäle unterhalb des Fensterbereichs; e) CAD-Abbild eines Helmholtz-Resonator Arrays mit Biegebalken

f. Luftkanal im Fensterbereich – Helmholtz-Resonatoren mit kreisrunden Löchern

Die Messergebnisse der Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich werden in Abbildung 2.111 gezeigt. Die Messergebnisse wurden nach der Methodik in DIN EN ISO 10534 ermittelt. In Abbildung 2.111 a)-d) können für alle Helmholtz-Resonatoren Resonanzspitzen identifiziert werden. Die Resonanzspitzen liegen im zuvor in AP1.2 beschriebenen analytisch ausgelegten Frequenzbereich, vgl. Tabelle 2.23.

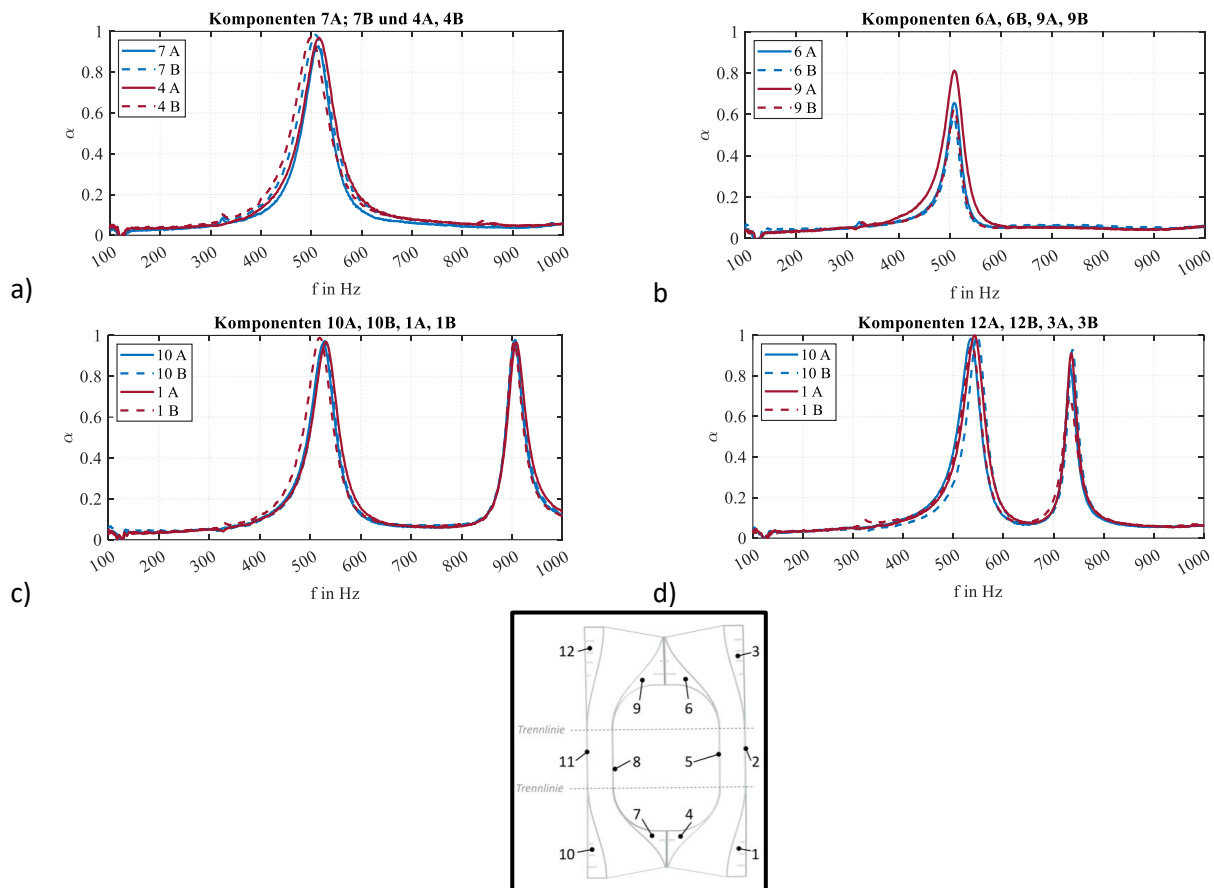


Abbildung 2.111: a)-d) Mit einem Impedanzrohr gemessene Absorptionskoeffizienten hergestellter einzelner Helmholtz-Resonator Komponenten mit Löchern zum Aufbau der Luftkanäle im Fensterbereich; e) CAD-Abbild von Helmholtz-Resonatoren im Fensterbereich

H. Mikroperforierte Absorber

In diesem Abschnitt wird die Validierung der in AP1.2 analytisch abgeschätzten Impedanzrohrproben aufgeführt. Die Impedanzrohrproben wurden mit den in AP1.3 beschriebenen Verfahren gefertigt. Die Messergebnisse wurden nach der Methodik in DIN EN ISO 10534 ermittelt.

Die Messergebnisse der Impedanzrohrprobe des mikroperforierten Absorbers aus Kunststoff werden in Abbildung 2.112 gezeigt. Zum Vergleich werden die in AP1.2 beschriebenen und analytisch abgeschätzten Ergebnisse dargestellt. Im Bereich um ca. 300 Hz zeigt sich in den analytischen Ergebnissen wie auch in den Messdaten eine Resonanzspitze. Die Messergebnisse weichen jedoch in der Höhe und Bandbreite deutlich von den analytischen Ergebnissen ab. Ein Grund könnte in der Lochgeometrie zu finden sein. In Abbildung 2.113 wird eine Nahaufnahme eines Lochs der mikroperforierten Absorberprobe gezeigt, auf welcher eine abgerundete Lochberandung erahnt werden kann. Die Beschaffenheit der Lochberandung wird analytisch in einem sogenannten Mündungskorrekturfaktor berücksichtigt und verringert die Absorptionsleistung je abgerundeter die Lochumrandung ist. Im Vergleich dazu konnte in der mikroperforierten Absorberprobe aus Aluminium fertigungsbedingt eine deutlich schärfere Lochumrandung erreicht werden, welches sehr wahrscheinlich in Abbildung 2.123 zu einer größeren Bandbreite der Resonanzspitze um ca. 300 Hz führt.

Die in Abbildung 2.112 bei ca. 400 Hz bzw. in Abbildung 2.123 bei ca. 460 Hz Resonanzspitzen sind auf Strukturmoden zurückzuführen, welche vom Projektpartner Novicos detaillierter analysiert wurden.

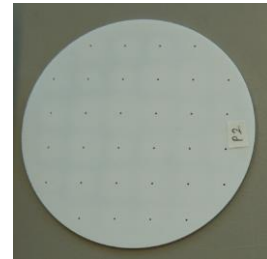
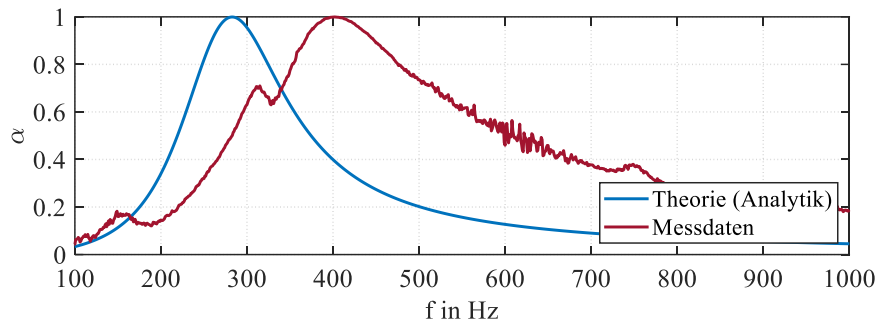


Abbildung 2.112: Gemessene Absorptionskoeffizienten eines in AP1.2 ausgelegten mikroperforierten Absorbers aus Kunststoff (Impedanzrohrmessung).

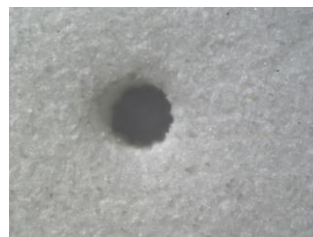


Abbildung 2.113: Nahaufnahme einer Mündung einer mit Lasersintern gefertigten mikroperforierten Absorberprobe aus Kunststoff

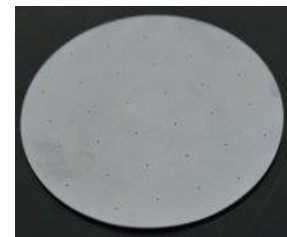
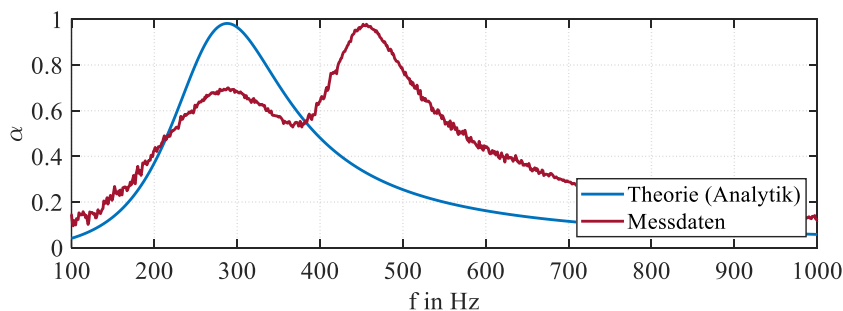


Abbildung 2.114: Gemessene Absorptionskoeffizienten eines in AP1.2 ausgelegten mikroperforierten Absorbers aus Aluminium (Impedanzrohrmessung).

I. Wasserdampfdurchlässigkeit von Metamaterial-Folien und Einhüllfolien für Glasswollisolierpakete

Um die Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedener Folien zu messen, wurde eine Messkampagne in Anlehnung an die DIN EN ISO 12572 (19) an drei Membranproben durchgeführt. Der Zweck dieses Versuchs ist rein qualitativ, um die Durchlässigkeit von Wasserdampf der drei Materialien zu bestimmen. Absolute Werte sind daher mit Vorsicht zu interpretieren. Weitere Einzelheiten zum Messaufbau finden sich in HAP 5.1, während Einzelheiten zum Messverfahren in (10) zu finden sind. Die drei untersuchten Proben sind wie folgt

- 75 µm PET: Probe der PET-Folie, die bei der Herstellung der Prototyp-PAMs verwendet wurde.

- Terul 18 mit Perforationen: Probe des Materials Terul 18 ohne Perforationsmuster.
- Terul 18 ohne Perforationen: Probe des Materials Terul 18 mit dem in Abbildung 2.27 dargestellten Perforationsmuster.

Die Ergebnisse in Bezug auf die Gewichtsveränderung des Trockenmaterials in den Behältern sind in Abbildung 2.115 dargestellt. Die Grafik zeigt, dass sich der Inhalt des Behälters mit 75 μm PET trotz der vom Materialhersteller angegebenen Werte während der Messzeit nicht verändert hat, was auf eine hohe Permeabilitätsbeständigkeit des Materials hindeutet. Andererseits nahm die Masse des Behälters aus Terul 18 mit Perforationen zu, was auf den effektiven Beitrag zur Wasserdampf-Permeabilität aufgrund der Perforationen hinweist.

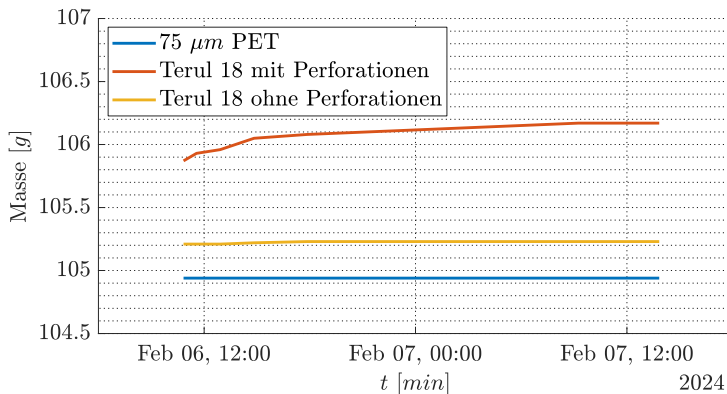


Abbildung 2.115: Experimentelle Ergebnisse zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von drei verschiedenen Folienmustern zur Verwendung im Kabinenwand-Prototyp

J. Schallabsorption von Glaswolle zur Isolation der Flugzeugkabinenwand

Zur Schallisolation der Flugzeugkabine werden zurzeit in die Kabinenwand integrierte Glaswollisolerpakete verwendet. In Abbildung 2.116 bzw. Abbildung 2.117 werden für Materialproben aus Originalglaswollisolerpaketen eines A320 Flugzeugs die experimentell ermittelten Absorptions- bzw. Schalldämmeigenschaften gezeigt. Die Messergebnisse wurden mit Impedanzrohrmessungen nach DIN EN ISO 10534 für Probendicken von 25 mm bzw. 100 mm durchgeführt.

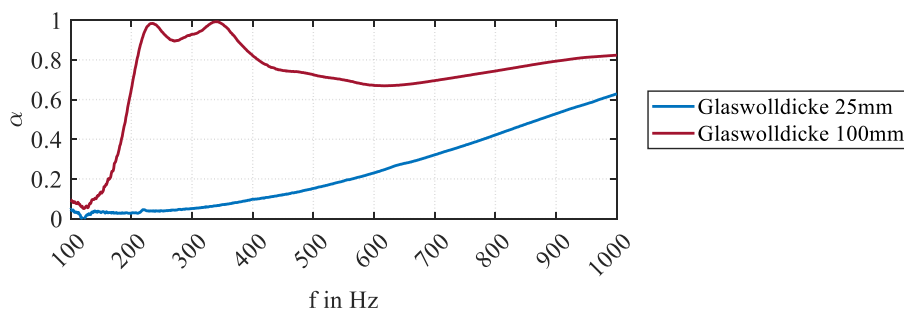


Abbildung 2.116: Experimentell nach DIN EN ISO 10534 ermittelte Absorptionskennlinien des im Funktionsmuster bzw. Prototyp eingebauten Glaswollisolerungsmaterials

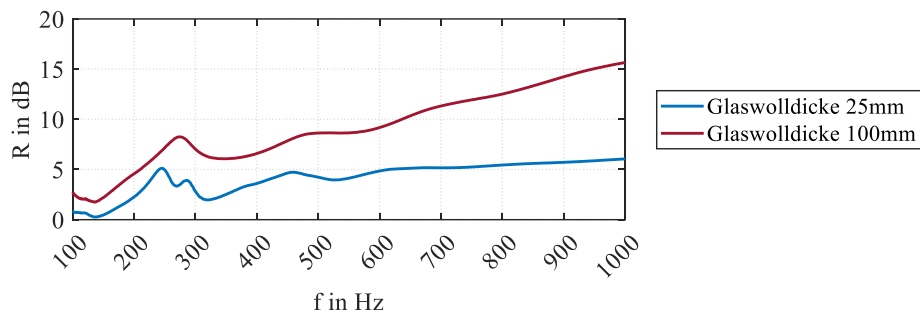


Abbildung 2.117: Experimentell nach DIN EN ISO 10534 ermittelte Schalldämmmaßkennlinien des im Funktionsmuster bzw. Prototyp eingebauten Glaswollisolierungsmaterials

K. Aerogelmaterial

a. Aerogelmaterial Proben KS-121 und KS-123

Im Rahmen der Entwicklung von Herstellprozessen von Aerogelmaterialien wurde die HAW Hamburg vom Projektpartner DLR damit beauftragt Aerogelmaterialproben mit den Bezeichnungen KS-121 bzw. KS-123 akustisch zu charakterisieren. Die Aerogelproben waren für eine Charakterisierung im Impedanzrohr nach DIN EN ISO 10534 auf eine kreisrunde Größe von ca. 10 cm im Durchmesser und einer Schichtdicke von ca. 12 mm gefertigt worden. Jeder Materialprobensatz, bezeichnet mit KS-121 und KS123 bestand jeweils aus zwei Scheiben, damit ein mehrlagiger Aufbau untersucht werden konnte. Jeweils eine Probenseite war mit einem Punkt bzw. einer Strichmarkierung versehen, um identifizieren zu können, ob sich durch unterschiedlich orientierte Anordnungen der Proben bei den Absorptionsmessungen ggf. mögliche Unterschiede bei den Messergebnissen zeigen. In Abbildung 2.118 sind die gewählten Versuchsanordnungen dargestellt. In Tabelle 2.32 werden die Angaben zur Schichtdicke eines Probensatzes bzw. der Gesamtmasse gegeben. Referenziert werden die Aerogelproben auf herkömmliche Materialproben, mit den Dicken 25 mm bzw. 100 mm, einer amberfarbigen Glaswollisolierung aus einem Standardwandaufbau eines A320 Flugzeugs. Die Ergebnisse für die Absorptionseigenschaften bzw. Schalldämmeigenschaften sind in Abbildung 2.119 bzw. Abbildung 2.120 sowie Abbildung 2.121 aufgeführt. Die der Messkurve zugehörige Versuchsanordnung ist der Legendenbezeichnung, also z.B. "-2" für Versuchsanordnung 2, zu entnehmen.

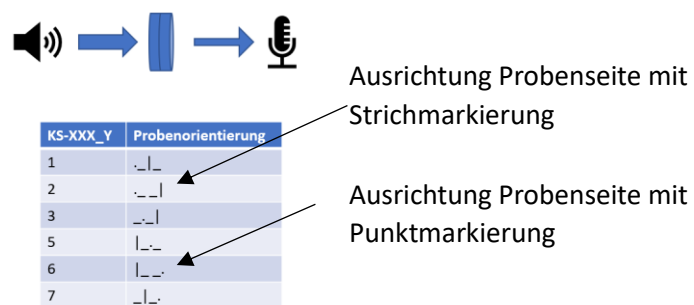


Abbildung 2.118: Versuchsanordnungen im Impedanzrohr für die akustische Charakterisierung von Aerogelproben in mehrlagigen Aufbauten (ausgearbeitet vom Projektpartner DLR)

Tabelle 2.32: Gemessene Parameter von Aerogelproben KS-121 bzw. KS-123

Materialprobe Durchmesser ca. 10 cm	Schichtdicke	Masse
Glaswolle (amber)	25 mm	2,15 g
Glaswolle (amber)	100 mm	7,76 g
KS-121 (doppellagig)	25 mm	16,16 g
KS-123 (doppellagig)	25 mm	16,48 g

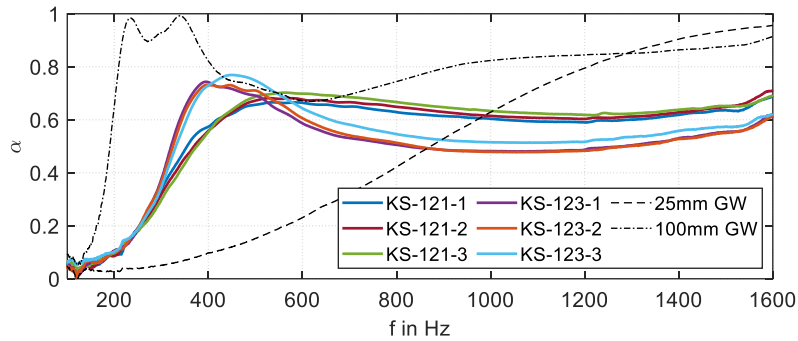


Abbildung 2.119: Nach DIN EN ISO 10534 experimentell ermittelte Absorptionskennlinien von Glaswolle bzw. Aerogelproben KS-121 bzw. KS-123

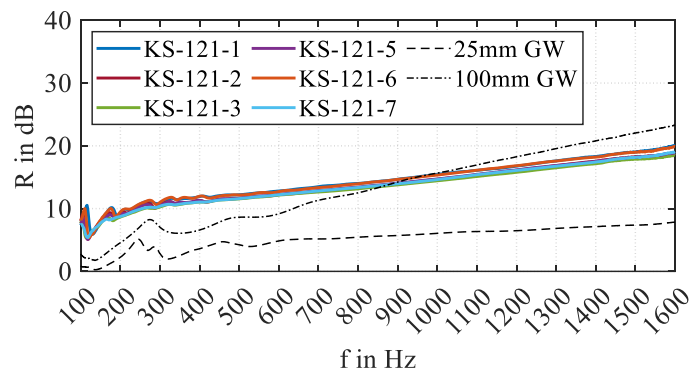


Abbildung 2.120: Nach DIN EN ISO 10534 experimentell ermittelte Schalldämmmaßkennlinien von Glaswolle bzw. Aerogelprobe KS-121

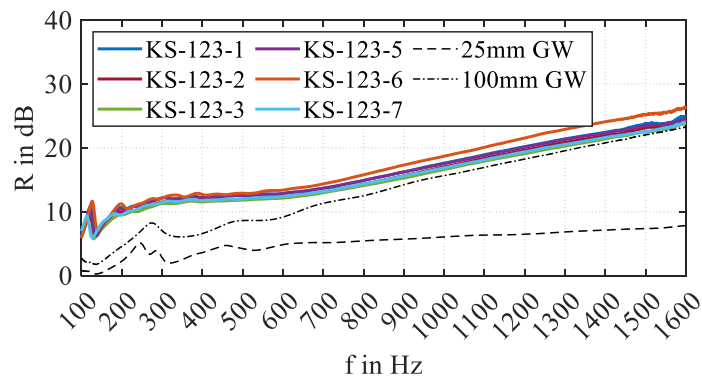


Abbildung 2.121: Nach DIN EN ISO 10534 experimentell ermittelte Schalldämmmaßkennlinien von Glaswolle bzw. Aerogelproben KS-123

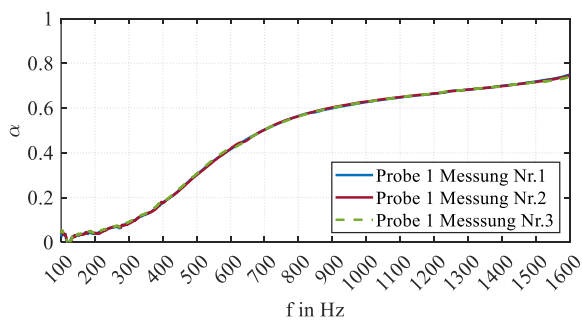
Die gemessenden Strömungswiderstände der in Tabelle 2.32 aufgeführten Materialproben werden in Abbildung 2.122 unter dem Parameter Airflow Resistivity gezeigt.

Messergebnisse Strömungswiderstand Aerogel-Impedanzproben v. d. UZK					
Datum 24.03.2023					
		P: mit Stempelaufgabe F: Frei bzw. ohne Stempelaufg.	specific Airflow resistance	Probendicke	Airflow resistivity $r = \frac{R_s}{t}$
Probe	Messdurchgang	Messbedingung	R_s [Pa*s/m]	t [m]	r [Pa*s/m^2]
KS-121 Probe: 1 Markierung: Punkt	1	P	1250		
	2	P	2450	ca. 0,0125	
	3	F	1290		103200
KS-121 Probe: 2 Markierung: Strich	1	P	2690		
	2	P	2630	ca. 0,0125	
	3	F	1410		112800
KS-121 Probe: 1 & 2 Markierung: -	1	F	2980	ca. 0,025	119200
KS-123 Probe: 1 Markierung: Punkt	1	P	3170		
	2	P	2800	ca. 0,0125	
	3	F	2060		164800
KS-123 Probe: 2 Markierung: Strich	1	P	4290		
	2	P	4300	ca. 0,0125	
	3	F	1990		159200
KS-123 Probe: 1 & 2 Markierung: -	1	F	3370	ca. 0,025	134800

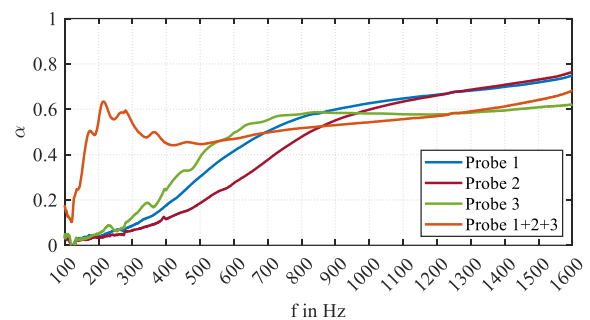
Abbildung 2.122: Gemessene Strömungswiderstände von Aerogelproben KS-121 bzw. KS-123

b. Aerogelmaterial für den Kabinenwand-Prototyp

Das im Prototyp eingesetzte Material wurde vom Projektpartner DLR unter der Bezeichnung 2123FHE-001-022 gefertigt. Die Absorptionseigenschaften wurden mit einem Impedanzrohr und der Messmethodik nach DIN EN ISO 10534 durchgeführt. Die Absorptionsergebnisse der Aerogelprobe Nr.1 wird in Abbildung 2.123 a) dargestellt. In Abbildung 2.123 b) werden die Absorptionsmessergebnisse der Aerogelproben Nr.1, Nr.2, Nr.3 sowie ein mehrschichtiger Lagenaufbau bestehend aus den Aerogelproben Nr1. bis Nr.3 gegenübergestellt. Eine Fotoaufnahme der gemessenden Aerogelproben ist in Abbildung 2.123 c) zu sehen.



a)



b)



c)

Abbildung 2.123: Ergebnisse aus Impedanzrohrmessungen von a) Aerogelprobe 1 von mehreren Messdurchgängen, b) Aerogelproben 1 bis 3 jeweils einzeln gemessen, sowie als Probe mit drei Lagen 1+2+3 gemessen und c) Fotos der Impedanzrohrproben aus Aerogelmaterial

Die Strömungswiderstände der zuvor beschriebenen Proben wurden mit dem in AP5.1 beschriebenen Verfahren experimentell ermittelt und sind in Abbildung 2.124 unter dem Parameter Airflow resistivity aufgelistet.

			P: mit Stempelaufgabe F: Frei bzw. ohne Stempelaufg.	specific Airflow resistance	Probendicke	Airflow resistivity $r = \frac{R_s}{t}$
Probe	Messdurchgang	Messbedingung		R _s	t	r
				[Pa*s/m]	[m]	[Pa*s/m^2]
Probe 1	1	F		2550	0,015	170000
Probe: 1	2	F		2760		184000
Markierung: ein Punkt	3	F		2850		190000
Probe 2	1	F		2670	0,015	178000
Probe: 2	2	F		2690		179333
Markierung: zwei Punkte	3	F		2340		156000
Probe 3	1	F		3440	0,013	264615
Probe: 3	2	F		3400		261538
Markierung: drei Punkte	3	F		3640		280000

Abbildung 2.124: Gemessene Strömungswiderstände von Aerogelproben für den Prototyp mit der Bezeichnung 2123FHE-001-022

2.3 HAP 5: Integration der Einzelkomponenten in eine Kabinenwand, Optimierung, Validation

AP 5.1: Erweiterte Integrations-und Testtechnologien

Vorstudien: Charakterisierung Prüfstandseigenschaften

a. Hygrothermische Charakterisierung A320-Demonstrator – Hallraum (Klima-Akustikkammer)

In der Vormessung wurde die Temperaturverteilung innerhalb der Klimakammer gemessen. In

Abbildung 2.125 ist der Versuchsaufbau abgebildet. Drei Temperatursensoren wurden auf einem Ständer installiert, der zwischen dem Transmissionsfenster und dem A320-Rumpfabschnitt positioniert wurde. Die Sensoren wurden in drei verschiedenen Höhen angebracht, um die vertikale Temperaturverteilung zu messen.

Ein Diagramm der von den drei Sensoren in zeitlicher Abfolge gemessenen Temperaturen ist in Abbildung 2.126 dargestellt. Dabei folgte die Temperaturregellung einem in den Einstellungen der Klimakammer festgelegten zeitlichen Profil. Die Differenz zwischen den drei gemessenen Temperatur-Werten betrug zu jedem Zeitpunkt weniger als ein Grad Celsius. Dank dieser Messung konnte festgestellt werden, dass die Temperaturverteilung innerhalb der Klimakammer homogen ist, was für die hygrothermischen Messungen an Funktionsmuster und am Prototyp der Kabinenwand eine notwendige Bedingung war.

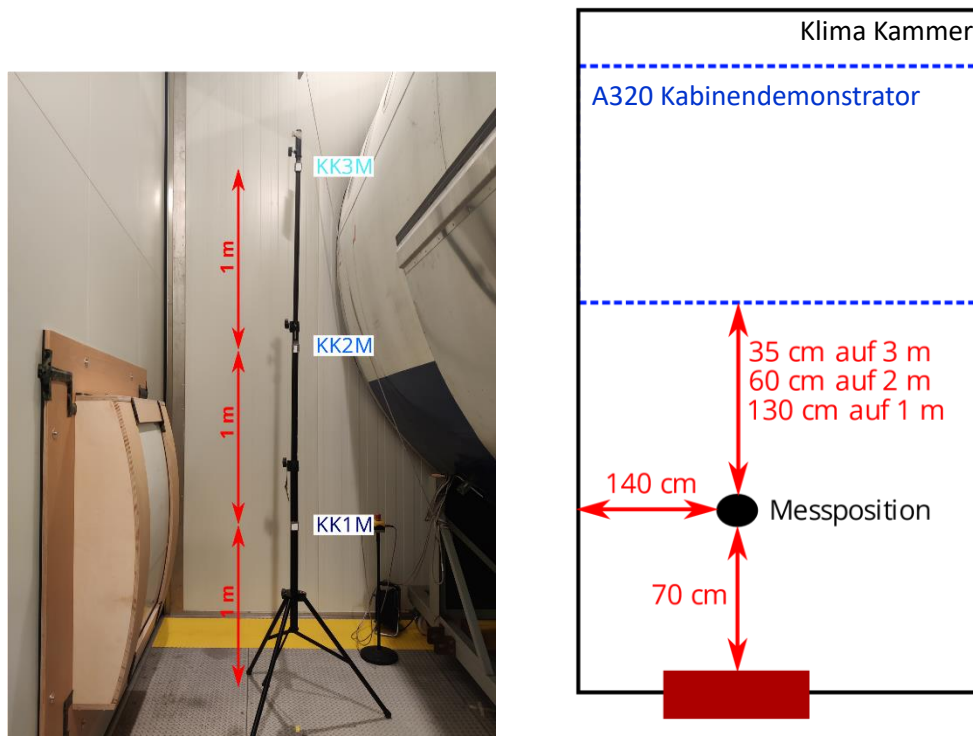


Abbildung 2.125: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung der Temperaturverteilung im Inneren der Klimakammer

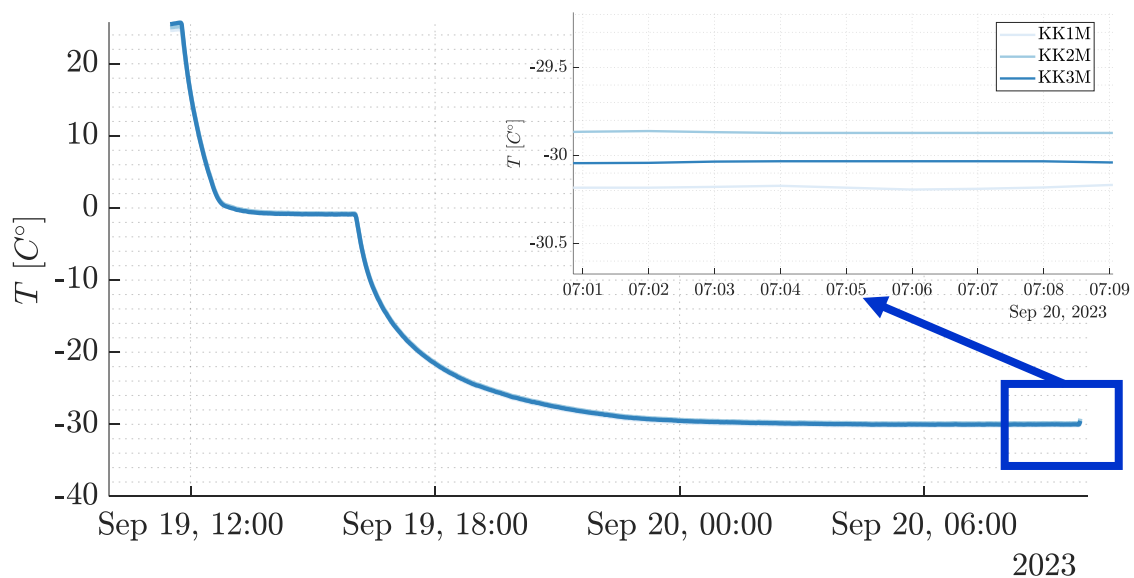


Abbildung 2.126: Zeitlicher Temperaturverlauf für die drei Sensoren während des Abkühlvorgangs in der Klima-Akustikkammer und der Messphase (blauer Kasten und vergrößerte Darstellung). Der Temperaturunterschied zwischen den 3 Temperatursensoren beträgt weniger als 1° C.

b. Vermessung der Hallraumeigenschaften der Klima-Akustikkammer mit eingebautem A320-Rumpfabschnitt

In Vormessungen wurden zunächst die akustischen Eigenschaften, insbesondere die Schallpegelverteilung, in der Klima-Akustikkammer („Hallraum“), in welchen der A320-Demonstrator eingebaut ist, experimentell bestimmt. Dazu wurden an sechs unterschiedlichen Positionen Schalldruckmessungen mit einem Schalldruckanalysator Type 2270 von Brüel & Kjaer Hottinger durchgeführt. Die Positionierung der Lautsprecher bzw. die gewählten Messpositionen im Hallraum können Abbildung 2.127 entnommen werden. In Abbildung 2.128 werden die verwendeten Lautsprecher in der Klimakammer außerhalb der A320-Rumpfsektion gezeigt. Die Ergebnisse der Vormessungen können dem Schallpegeldiagramm in Abbildung 2.129 entnommen werden. Die ab etwa 400 Hz relativ glatten und trotz deutlich unterschiedlicher Messpositionen dicht beieinander liegenden, gemessenden Schalldruckkurven bekräftigen die Aussage, dass das Schallfeld innerhalb der Klima-Akustikkammer ab ca. 400 Hz einigermaßen diffus ist und daher wie ein Hallraum betrachtet werden kann. Wie man bei den Messergebnissen sieht, sind die Schallpegelunterschiede zwischen den Messpositionen auf der linken Seite (M1, M2, M3) zur rechten Seite (M4, M5, M6) kleiner 3 dB.

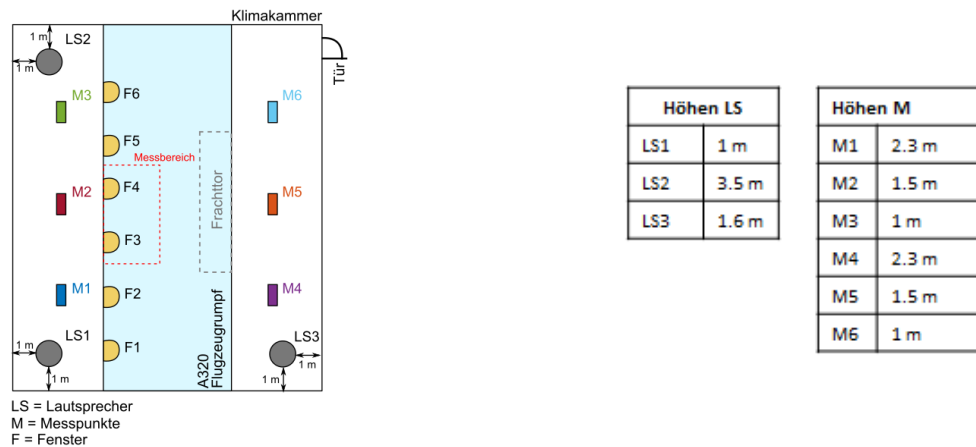


Abbildung 2.127: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften des Klima-Akustikkammerraums (Hallraum) mit A320-Rumpfabschnitt



Abbildung 2.128: Fotos von unterschiedlich aufgestellten Kugellautsprecher in der Klima-Akustikkammer mit A320-Rumpfabschnitt

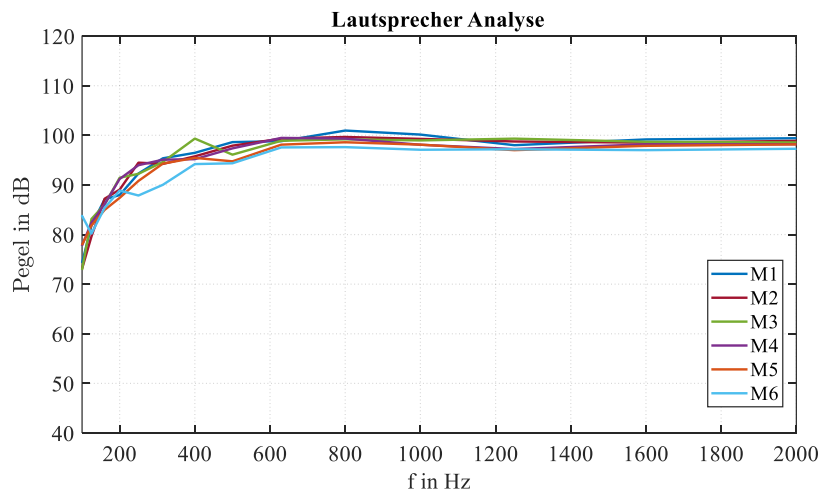


Abbildung 2.129: Gemessene Schallpegel an unterschiedlichen Positionen M1-M6 in der Klima-Akustikkammer mit A320-Rumpfabschnitt.

- c. Experimentelle Bestimmung möglicher Schallnebenwege an den Rändern des in den Transmissionsfensterrahmen eingebauten Kabinenwand-Prototyps bei Schalldämmmaßmessungen im Akustiklabor

In Vormessungen wurden zunächst die Schalldämmeigenschaften des Transmissionsfensterrahmens, für die Aufnahme des späteren Prototyps, bestimmt. Der Fokus lag auf der Analyse möglicher Schallnebenwege durch die Adapterkonstruktion zur Aufnahme des Ausschnitts einer A320 Rumpfstruktur. Rumpfstruktur und mögliche Schallnebenwege wurden, wie in Abbildung 2.130 abgedeckt bzw. abgeklebt. Die Messfläche ist in Abbildung 2.130 in rot gekennzeichnet. Die Messung des Schalldämmmaßes wurde nach DIN EN ISO 15186-1 durchgeführt. Anhand erster Vormessungen konnten Schallnebenwege identifiziert und gedämmt werden. Die Ergebnisse, die in Abbildung 2.131 dargestellt sind, zeigen, dass ein Schalldämmmaß ab 300 Hz von über 50 dB und ab ca. 500 Hz von über 60 dB erreicht worden ist (Finaler Messaufbau).



Abbildung 2.130: Messaufbau 1 zur Charakterisierung von Schallnebenwegen im Prüffenster für den Prototyp

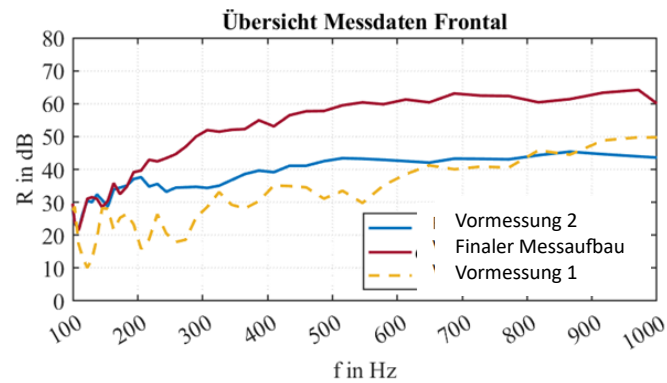


Abbildung 2.131: Messergebnisse erreichter Schalldämmung von Schallnebenwegen an den Rändern des im Transmissionsfenster eingebauten Kabinenwand-Prototyps

Zur Bewertung der Schallnebenwege, welche über die Seiten der Messumgebung abgestrahlt werden, wurden ebenfalls Schallnebenwegsmessungen durchgeführt. Im Ergebniss konnte ab ca. 250 Hz ein Schalldämmmaß von über 60 dB im Finalen Messaufbau erreicht werden (siehe Abbildung 2.132).

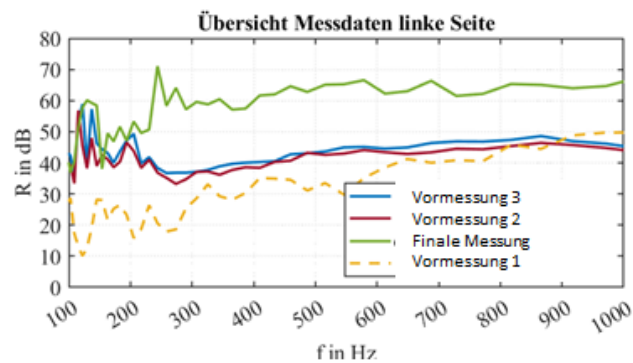


Abbildung 2.132: Messaufbau 2 zur Charakterisierung von Schallnebenwegen an den Rändern des im Transmissionsfenster eingebauten Kabinenwand-Prototyps sowie Messergebnisse erreichter Schalldämmung

Schwerpunkt hygrothermische Untersuchungen

Das Funktionsmuster und der Prototyp wurden einer Versuchskampagne unterzogen, um die zuvor in AP 1.2 theoretisch analysierten Eigenschaften und Merkmale zu messen. Die Messungen der einzelnen Komponenten, wie z.B. der Rumpfstruktur oder der Wasserdampfdurchlässigkeit der Membranen, wurden bereits in AP 4.2 beschrieben.

In diesem Arbeitspaket werden der Testplan für das Funktionsmuster und den Prototyp sowie die verschiedenen Testtechnologien beschrieben, während die für die verschiedenen Messungen realisierten Integrationsverfahren in AP 5.2 beschrieben wurden. Schließlich werden die Ergebnisse der Versuchskampagnen im Kapitel für das AP 5.3 berichtet.

Folgende Integrationsverfahren wurden angewendet (ausführlichere Beschreibung in AP5.2):

<i>Integration in</i>	<i>Kennung Integrationsverfahren</i>
• A320-Kabine des Rumpfabschnitts in der Klima-Akustikkammer	E
• Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer	F
• kleine Klimakammer für Folien- Wasserdampfpermeabilitätsmessungen	H

Folgende Testtechnologien wurden angewendet (ausführlichere Beschreibung auf Seite 154):

	<i>Kennung Testverfahren</i>
• Hygrothermische Messungen an einem Funktionsmuster mit Hilfe eines Aufbaus in einem Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer	A
• Thermische Messungen an einer Rumpfstruktur mit Hilfe eines Aufbaus in einem Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer	B
• Hygrothermal Messungen am Prototypwandaufbau eingebaut in den A320-Kabinendemonstrator der Klima-Akustikkammer	C
• Messungen Folien-Wasserdampfpermeabilität	D

a. Testplan Kabinenwand-Funktionsmuster

Charakterisierung von Einzelkomponenten

Nachfolgend ein Überblick über den Prüfplan zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften der im Funktionsmuster verbauten Einzelkomponenten.

Tabelle 2.33: Testplan zur experimentellen Charakterisierung der Einzelkomponenten für das Funktionsmuster

Titel	Testverfahren	Integrations- verfahren (AP5.2)	Definition Parameter für Nachweisführung
Rumpfstruktur	A	F	Temperaturverteilung auf der Struktur

Charakterisierung von Kabinenwandaufbauten

Im Folgenden wird eine Übersicht über den Testplan zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften des Prototyps aufgeführt. Die daraus folgenden Ergebnisse sind in AP5.3 aufgeführt.

Tabelle 2.34: Testplan zur experimentellen Charakterisierung des Funktionsmusters

Versuch Nr.	Titel	Testverfahren	Integrationsverfahren (AP5.2)	Definition Parameter für Nachweisführung
1	Funktionsmuster	B	F	Hygrothermische Eigenschaften
2	Referenz	B	F	Hygrothermische Eigenschaften

Erläuterung zu Versuch Nr. 1

Zielsetzung

- Experimentell bestimmte hygrothermische Eigenschaften des Funktionsmusters.
- Validierung der mit dem numerischen Modell erzielten Ergebnisse.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für das Funktionsmuster ist in Abbildung 2.133 schematisch dargestellt. Das Funktionsmuster besteht aus

- einer Rumpfstruktur, die als Ausschnitt aus einem originalen A320-Rumpfteil herausgeschnitten wurde
- einer Primärisolierung, bestehend aus zwei Glaswoldecken (Dicke 40mm und 20 mm), die beide mit einer Terul 18 – Folie (ohne Perforation) umwickelt waren,
- einem Luftkanal
- einer 20 mm dicken Sekundärisolierung aus Glaswolle, die direkt auf dem Seitenwandpaneel angebracht ist
- einem Seitenwandpaneel, das aus einer A320-Kabine stammt

Die WLAN-Sensoren zur Messung der hygrothermischen Größen sind mittig zwischen den verschiedenen Schichten, aus denen die Kabinenwand besteht, angebracht. Die für den Versuch Nr. 1 verwendeten Randbedingungen sind in Tabelle 2.4 aufgeführt.

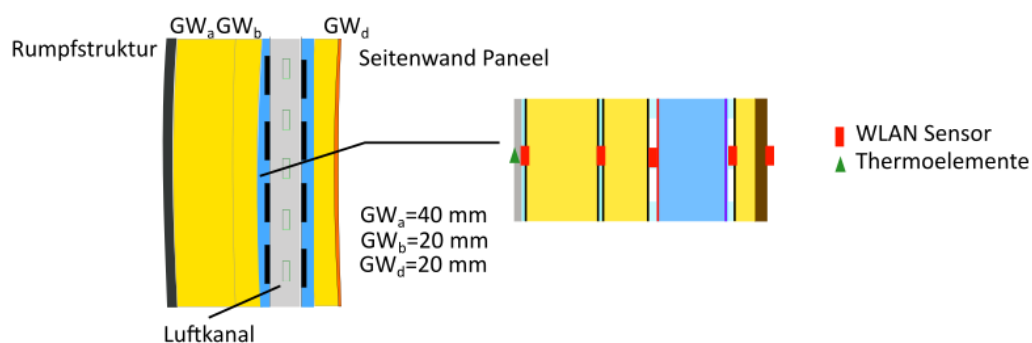


Abbildung 2.133: Schematische Darstellung des Prototyp-Kabinenwandaufbaus zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften

Erläuterung zu Versuch Nr. 2

Zielsetzung

- Experimentell bestimmte hygrothermische Eigenschaften einer Standardkabinenwand.
- Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen für das Funktionsmuster aus Versuch Nr. 1

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für die Referenzwand ist in Abbildung 2.134 dargestellt. Es wurden die gleichen Komponenten des Funktionsmusters verwendet wie bei der ursprünglichen Rumpfstruktur und Seitenwand. Die Primärisolierung besteht aus zwei Glaswoll-Decken, die beide mit Folie Terul 18 ohne Perforation umwickelt sind, 40 mm bzw. 20 mm. Da der Luftkanal nicht vorhanden ist, wurde eine zusätzliche 40 mm dicke Glaswoll-Decke zwischen der Primärisolierung und der Sekundärisolierung eingefügt. Die Sekundärisolierung, eine 20-mm-Glaswolldecke, wird direkt über der Seitenwand angebracht. Das Seitenwandpaneel ist ebenfalls ein Originalbauteil aus einer A320-Kabine, ebenso wie das Glaswollmaterial, das zur Herstellung der Isolierdecken verwendet wird. Die WLAN-Sensoren zur Messung der hygrothermischen Größen sind mittig zwischen den verschiedenen Schichten, aus denen die Kabinenwand besteht, angebracht. Die für den Versuch Nr. 2 verwendeten Randbedingungen sind in Tabelle 2.4 aufgeführt.

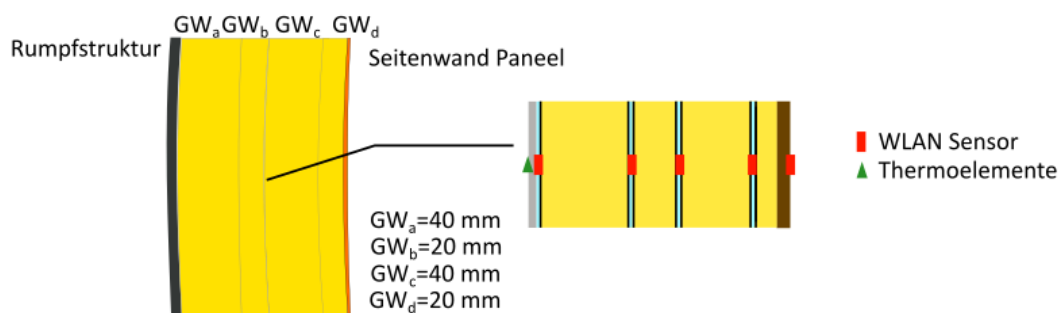


Abbildung 2.134: Schematische Darstellung des Referenz-Kabinenwandbaus zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften

b. Testplan Kabinenwand-Prototyp

Charakterisierung von Einzelkomponenten

Nachfolgend ist ein Überblick über den Prüfplan zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften der im Prototyp verbauten Einzelkomponenten gegeben.

Tabelle 2.35: Testplan zur experimentellen Charakterisierung der Einzelkomponenten für den Kabinenwand- Prototyp

Titel	Testverfahren	Integrations- verfahren (AP5.2)	Definition Parameter für Nachweisführung
Folien Wasserdampfpermeabilität	D	H	Wasserdampfpermeabilität

Charakterisierung von Kabinenwandaufbauten

Im Folgenden wird eine Übersicht über den Testplan zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften des Prototyps aufgeführt. Die daraus folgenden Ergebnisse sind in AP5.3 aufgeführt.

Tabelle 2.36: Testplan zur experimentellen Charakterisierung der Einzelkomponenten für den Kabinenwand- Prototyp

Versuch Nr.	Titel	Testverfahren	Integrations- verfahren (AP5.2)	Definition Parameter für Nachweisführung
1	Prototyp	C	E	Hygrothermische Eigenschaften
2	Referenz	C	E	Hygrothermische Eigenschaften
3	Referenz mit Aerogel	C	E	Thermische Eigenschaften

Erläuterung zu Versuch Nr. 1

Zielsetzung

- Experimentell bestimmte hygrothermische Eigenschaften.
- Bewertung der Integration des Luftkanals in den Demonstrator und die Funktion des Belüftungssystems

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für das Funktionsmuster ist in Abbildung 2.135 schematisch dargestellt. Der Kabinenwand-Prototyp ist direkt in die Kabinenwand der A320 Kabine in der Klima-Akustikkammer integriert und nimmt horizontal die Strecke von drei Spanten ein, also einschließlich zweier Fenster. Die Primärisolierung besteht aus einer Glasswoll-Decke, die mit 40 mm dicker Folie Terul 18 umwickelt ist. Bei diesem Versuch ist die Seite der Isolierdecke, die der Struktur zugewandt ist, mit Perforationen versehen, wie es bei einer echten Kabinenwand der Fall ist. Der Luftkanal befindet sich zwischen der Primärisolierung und der Sekundärisolierung, einer 20 mm dicken Glaswolldecke, die direkt auf dem Seitenwandpaneel verlegt ist. Das Seitenwandpaneel ist ein Originalbauteil, das aus einer A320-Kabine stammt und über Halterungen an der Struktur angebracht wird. Eine schematische Darstellung des Kabinenwand-Prototyps ist in Abbildung 2.135 zu sehen, wobei verschiedene Messpositionen hervorgehoben sind. Im Detail wird die Position unter dem linken Fenster und die Anordnung der verschiedenen Sensoren zwischen den Schichten der Doppelwand hervorgehoben. Die für den Versuch Nr. 1 verwendeten Randbedingungen sind in Tabelle 2.5 aufgeführt.

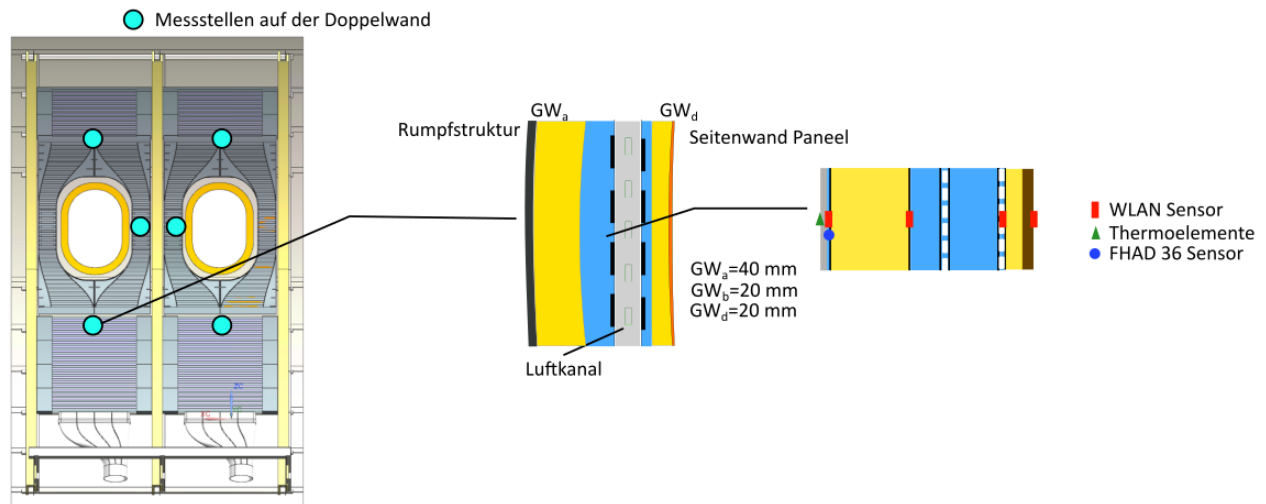


Abbildung 2.135: Schematische Darstellung des Prototyp- Kabinenwandaufbaus und der Lage der Messstellen zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften

Erläuterung zu Versuch Nr. 2

Zielsetzung

- Experimentell bestimmte hygrothermische Eigenschaften einer Standardwand, wie sie üblicherweise in einer A320-Kabinenwand aufgebaut ist.
- Festlegung als Referenz für hygrothermische Dämmeigenschaften.
- Vergleich hygrothermischer Dämmeigenschaften der Standardwand mit Funktionsmuster (Versuch Nr. 1)

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für die Referenzwand ist in Abbildung 2.136 dargestellt. Außer dem Luftkanal wurden die Komponenten des Funktionsmusters verwendet: Rumpfstruktur, Glaswollisolation und Seitenwandpaneel. Die Primärisolierung besteht aus zwei Glaswoll-Decken, die beide mit Folie Terul 18 mit einer Perforation von 40 mm bzw. 20 mm umwickelt sind. Die Sekundärisolierung, eine 20 mm dicke Glaswolldecke, wird direkt auf der Seitenwand angebracht. Das Seitenwandpaneel ist ebenfalls ein Originalbauteil aus einer A320-Kabine, ebenso wie das Glaswollmaterial, aus dem die Isolierdecken hergestellt werden. Die WLAN-Sensoren zur Messung der hygrothermischen Größen sind mittig zwischen den verschiedenen Schichten, aus denen die Kabinenwand besteht, angebracht. Die für den Versuch Nr. 2 verwendeten Randbedingungen sind in Tabelle 2.5 aufgeführt.

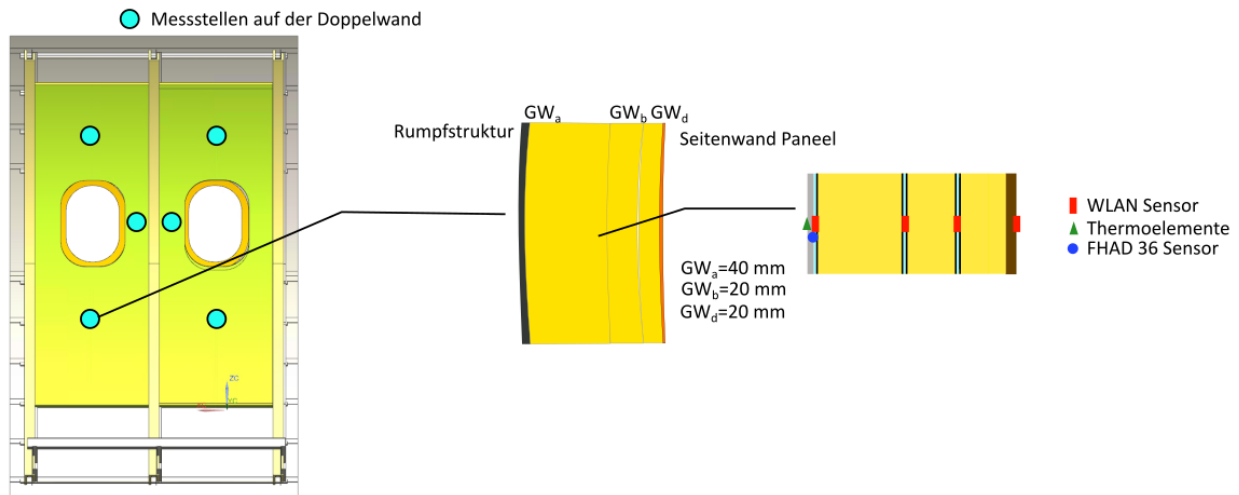


Abbildung 2.136: Schematische Darstellung des Referenz-Kabinenwandaufbaus und der Lage der Messstellen zur Bestimmung der hygrothermischen Eigenschaften

Erläuterung zu Versuch Nr. 3

Zielsetzung

- Experimentell bestimmte thermische Eigenschaften einer Standardwand mit Aerogel als Primärisolierung, die Glaswolle als Primärisolierung ersetzt
- Vergleich thermischer Dämmeigenschaften der Standardwand mit Referenzwand (Versuch Nr. 2)

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.137 schematisch dargestellt. Für die Rumpfstruktur und das Seitenwandpaneel wurden die schon bekannten Bauteile des Funktionsmusters verwendet. Die Primärisolierung bestand in dieser Konfiguration aus einer 37,5-mm-Schicht aus Aerogel-Material, das die in den vorherigen Versuchen verwendete Glaswolle ersetzt. Das Aerogel-Material ist nach wie vor in Terul 18 eingewickelt. Die Sekundärisolierung, eine 20 mm dicke Glaswolldecke, wurde direkt an der Seitenwand angebracht. WLAN-Sensoren zur Messung der hygrothermischen Größen sind mittig zwischen den verschiedenen Schichten, aus denen die Kabinenwand besteht, angebracht. Die für den Versuch Nr. 3 verwendeten Randbedingungen sind in Tabelle 2.5 aufgeführt.

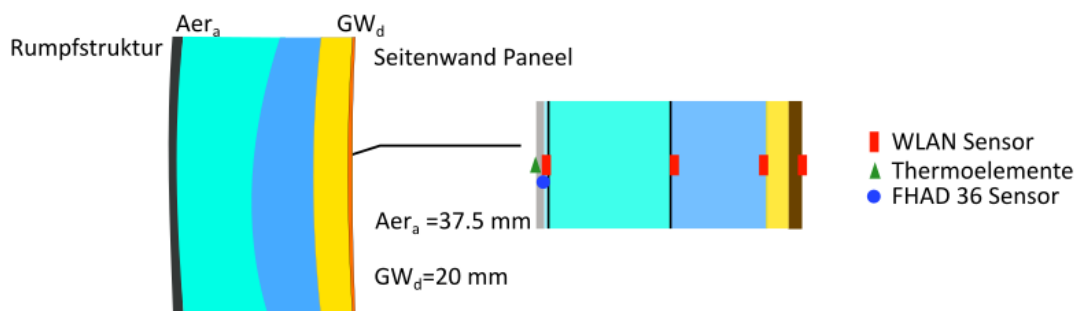


Abbildung 2.137: Schematische Darstellung des Kabinenwandaufbaus mit Aerogel als Glaswollersatz für die Primärisolierung

c. Testverfahren

Hygrothermische Messungen an einem Kabinenwand-Funktionsmuster eingebaut in ein Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer

Die Messungen wurden zur Bewertung der hygrothermischen Eigenschaften des Funktionsmuster mit der in Tabelle 2.37 aufgeführten Messtechnik durchgeführt.

Tabelle 2.37: Messtechnik für die hygrothermische Messung der Funktionsmuster

Messtechnik	
WLAN Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren	CAO Gadgets LCC Wireless Sensor Tag 13 bit
Kabelgebundene Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren	DHT22
Thermoelemente	Thermoelemente auf Ni-Cr-Basis
Thermokamera	Infratec VarioCAM® HD
Luftgeschwindigkeit	Anemometer VOLTcraft PL-135HAN
Wärmequelle KSK	100 W Lampe
Luftbefeuchter KSK	Steba Luftbefeuchter LB 5
Klimaanlage	Aggregat Klima-Akustik-Kammer des KKS-Labor der HAW Hamburg

Thermische Messungen an einer Rumpfstruktur mit Hilfe eines Aufbaus in einem Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer

Die Messungen wurden zur Bewertung der thermischen Eigenschaften der Rumpfstruktur mit der in Tabelle 2.38 aufgeführten Messtechnik durchgeführt.

Tabelle 2.38: Messtechnik für die thermische Messung an der Rumpfstruktur

Messtechnik	
Thermokamera	Infratec VarioCAM® HD
Klimaanlage	Aggregat Klima-Akustik-Kammer des KKS-Labor der HAW Hamburg

Hygrothermische Messungen am Kabinenwand-Prototyp eingebaut in die Kabine des A320-Rumpfabschnitts der Klima-Akustikkammer

Die Messungen wurden zur Bewertung der hygrothermischen Eigenschaften des Prototyps mit der in Tabelle 2.39 aufgeführten Messtechnik durchgeführt.

Tabelle 2.39: Messtechnik für die hygrothermische Messung am Kabinenwand- Prototyp

Messtechnik	
WLAN Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren	CAO Gadgets LCC Wireless Sensor Tag 13 bit
Separater Sensor für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit	Ahlborn FHAD 36 Sensor und Ahlborn ALMEMO 2590A Messgerät

Wärmestrom Sensor	Ahlborn Wärmestrom Sensor und ALMEMO 2590A Messgerät
Thermoelemente	Thermoelemente auf Ni-Cr-Basis
Thermocamera	Infratec VarioCAM® HD
Luftgeschwindigkeit	Anemometer VOLTcraft PL-135HAN
Wärmequelle KSK	100 W Lampe
Klimaanlage	Aggregat Klima-Akustik-Kammer des KKS-Labor der HAW Hamburg

Messungen der Wasserdampfdurchlässigkeit verwendeter Folien

Die Messungen wurden zur Bewertung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Membranen, die im Kabinenwand-Prototyp verwendet werden nach DIN EN ISO 12572 (19) durchgeführt. Die verwendete Messtechnik ist in Tabelle 2.40 dargestellt.

Tabelle 2.40: Messtechnik zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit einer Folie

Messtechnik	
Präzisionswaage	Kern EHA 500
WLAN Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensoren	CAO Gadgets LCC Wireless Sensor Tag 13 bit
Klimaanlage	Kleine Klimakammer des KKS-Labor der HAW Hamburg

Schwerpunkt akustische Untersuchungen

Die experimentellen Validierungen, in AP1.2 ausgelegter Schallisolationselemente, sowie Charakterisierungen von Kabinenwand-Funktionsmuster bzw. -Prototyp wurde stufenweise durchgeführt. Zunächst wurden in Einzelmessungen, zuvor in AP1.2 ausgelegte akustische Metamaterialien und Helmholtz-Resonatoren komponentenweise, charakterisiert. Darüberhinaus wurden zusätzliche experimentelle Charakterisierungen von Einzelkomponenten, wie z.B. Ausschnitte originaler A320 Rumpfstrukturen oder Glaswollisolierungen, durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden bereits in AP4.2 vorgestellt.

Im nächsten Schritt wurden die zuvor charakterisierten Einzelkomponenten in, wie in AP1.2 Abbildung 2.10 bzw. Abbildung 2.13 aufgeführten, Kabinenwandaufbauten realisiert und experimentell untersucht. Die Ergebnisse sind in AP5.3 aufgeführt.

Im folgenden Abschnitt sind die Testpläne für das Funktionsmuster und dessen Einzelkomponenten bzw. des Prototyps und dessen Einzelkomponenten inkl. angewandter Integrationsverfahren (AP5.2) sowie Testtechnologien, aufgelistet. Ausführlichere Beschreibungen der Versuchsaufbauten erfolgen in AP5.3.

Folgende Integrationsverfahren wurden angewendet (ausführlichere Beschreibung in AP5.2):

<i>Integration in</i>	<i>Kennung Integrationsverfahren</i>
• 1,0m x 1,2m großen Transmissionsfenster im Akustiklabor	A
• Transmissionsfenster für Einzelkomponentenmessungen im Akustiklabor	B
• 1,57m x 2,07m großen Transmissionsfenster im Akustiklabor	C
• Kabine des A320-Rumpfabschnitts der Klima-Akustikkammer	D
• Impedanzrohr	E

Folgende Testverfahren wurden angewendet:

	<i>Kennung Testverfahren</i>
• Schallintensitätsmessverfahren nach DIN EN ISO 15186-1	A
• Impedanzrohrmessungen	B
○ Absorptionsmessungen nach DIN EN ISO 10534	
○ Schalldämmmaßmessungen nach ASTM2611-09	
• Messung Strömungswiderstände nach ISO9053	C
• Messungen Vibrationseigenschaften von Oberflächen mittels Laservibrometer	D

a. Testplan Funktionsmuster

Charakterisierung von Einzelkomponenten

Im Folgenden wird eine Übersicht über den Testplan zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften der im Funktionsmuster verbauten Einzelkomponenten aufgeführt. Die daraus folgenden Ergebnisse sind in AP4.2 aufgeführt.

Tabelle 2.41: Testplan zur experimentellen Charakterisierung der Einzelkomponenten für das Funktionsmuster

Titel	Testverfahren	Integrations- verfahren (AP5.2)	Definition Parameter für Nachweisführung
Rumpfstruktur	A	A	Frequenzabhängige Schalldämmmaßeigenschaften
akustisches Metmaterial 1	A	B	
akustisches Metmaterial 2	A	B	
Helmholtz-Resonator mit Biegebalken	B	E	Frequenzabhängige Absorptionseigenschaften
Glaswollisolierung	B	E	

Charakterisierung von Kabinenwandaufbauten

Im Folgenden wird zunächst eine Übersicht der durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften des Funktionsmusters aufgeführt. Anschließend erfolgt eine detaillierte Darstellung der einzelnen, auf unterschiedlichen Zielsetzungen basierenden Kabinenwandaufbauten. Die daraus folgenden Ergebnisse sind in AP5.3 aufgeführt.

Tabelle 2.42: Testplan zur experimentellen Charakterisierung des Funktionsmusters

Versuch Nr.	Titel	Testverfahren	Integrations- verfahren (AP5.2)	Definition Parameter für Nachweisführung
1	Funktionsmuster	A	A	Frequenzabhängige Schalldämmmaßeigenschaften
2	Funktionsmuster Studie kritischer Wandabstand	A	A	
3	Rumpfstruktur mit Glaswolle ohne Seitenwandpaneel	A	A	
4	Referenz	A	A	

Erläuterung zu Versuch Nr. 1

Zielsetzungen:

- Messergebnisse zum Schalldämmmaß im Frequenzbereich < 1000 Hz für das Kabinenwand-Funktionsmuster mit integriertem Luftkanal (vereinfachter Kabinenwandaufbau ohne Fenster).
- Vergleich des Kabinenwand-Gesamtschalldämmmaßes mit individuellen Schalldämmmaßen der einzelnen im Luftkanal eingebauten Schallminderungselemente (PAMS, Helmholtz-Resonatoren) zwecks Analyse ihrer Wirksamkeiten in der Kabinenwand.

Kabinenwandaufbau des Funktionsmusters bestand aus

- einem Ausschnitt einer originalen, ein Spantfelder breiten A320-Rumpfstruktur ohne Fensterbereich,
- einer Primärisolierung aus einem in Terul 18 Folie eingewickelter amber-farbigem Glaswollisolierpaket von ca. 60 mm Dicke,
- einem Luftkanal, der im Abstand zur Rumpfstruktur von 65 mm montiert wurde
- einer Sekundärisolierung aus 20 mm dicker Glaswolle, die in Terul 18 Folie eingewickelt ist
- einem originalen Seitenwandpaneel des A320-Flugzeugtyps, das mit einem originalen Halterungssystem an der Rumpfstruktur befestigt wurde (vgl. Abbildung 2.12).

Dieser Aufbau ist in Abbildung 2.138 schematisch dargestellt.

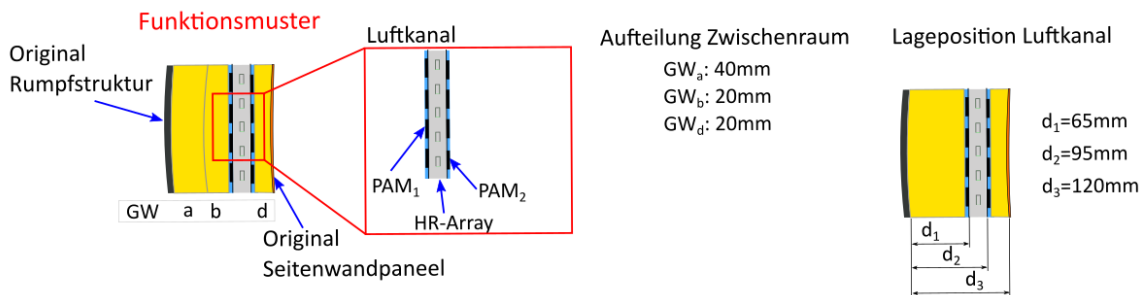


Abbildung 2.138: Schematische Darstellung des Kabinenwandaufbaus des Funktionsmusters zur Bestimmung der Schalldämmeigenschaften

Erläuterungen zu Versuch Nr. 2

Zielsetzungen:

- Messergebnisse zum Schalldämmmaß des Funktionsmusters im Frequenzbereich < 1000 Hz, in dessen Wandbereich zwischen Rumpfstruktur und Seitenwandpaneel der Luftkanal je Messdurchgang an unterschiedlichen Stellen positioniert wurde (vereinfachter Kabinenwandaufbau ohne Fenster).
- Experimenteller Nachweis des Einflusses unterschiedlicher Positionierungen von akustischen Metamaterialien in einer Doppelwand auf das Schalldämmmaß mit Blick auf berechnete kritische Wandabstände.
- Qualitative Validierung von Ergebnissen aus theoretischer Studie von Abbildung 2.47 (Seite 87).

Kabinenwandaufbau des Funktionsmusters:

- besteht aus den selben Komponenten wie sie bereit in Erläuterungen zu Versuch Nr. 1 aufgeführt wurden
- der Luftkanal wurde in der zweiten Messung um ca. 15 mm in Richtung der Rumpfstruktur verschoben (vgl. dazu Abbildung 2.46 auf Seite 86)

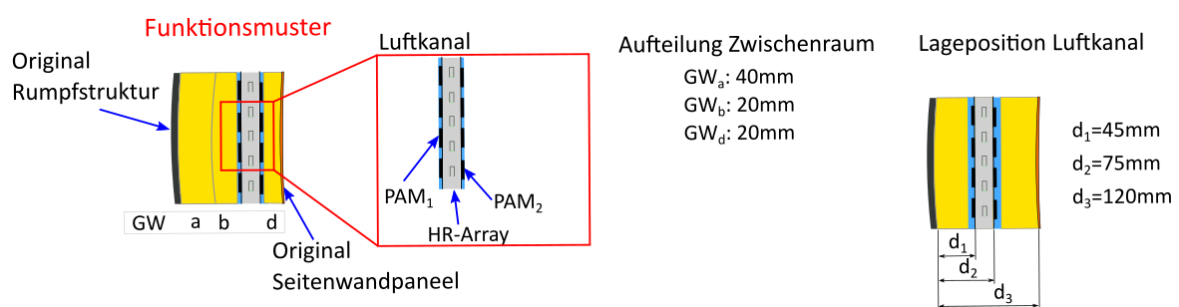


Abbildung 2.139: Schematische Darstellung des Kabinenwandaufbaus des Funktionsmusters zur Bestimmung von Schalldämmeigenschaften bei im Zwischenraum unterschiedlich positionierten Luftkanälen, hier im Vergleich zu Abbildung 2.138 ein in Richtung der Rumpfstruktur verschobener Luftkanal

Erläuterungen zu Versuch Nr. 2

Zielsetzungen:

- Messergebnisse zum Schalldämmmaß im Frequenzbereich < 1000 Hz für das Funktionsmuster ohne Seitenwandpaneel (vereinfachter Kabinenwandaufbau ohne Fenster).

- Generierung von Messdaten zur Validierung eines numerischen 3D-Modells des Projektpartners Novicos.

Kabinenwandaufbau des Funktionsmusters:

- Der Versuchsaufbau entspricht den Erläuterungen zu Versuch Nr. 2 jedoch ohne der Komponenten Seitenwandpaneel

Erläuterungen zu Versuch Nr. 4

Zielsetzungen

- Messergebnisse zum Schalldämmmaß des Funktionsmusters im Frequenzbereich < 1000 Hz mit ausschließlich in Terul18-Folie eingewickelter Glaswollisolierung (vereinfachter Kabinenwandaufbau ohne Fenster).
- Aufbau eines dem Stand der Technik möglichst nahekommenden Funktionsmusters
- Ermittlung von dem Stand der Technik zu erwartenden Schalldämmeigenschaften, welche im direkten Vergleich mit ermittelten Schalldämmcharakteristiken aus Versuch Nr. 1 (Funktionsmuster mit integriertem Luftkanal) als Mindestanforderungen zu erreichender Dämmeigenschaften verwendet wurden.

Kabinenwandaufbau des Funktionsmusters besteht aus:

- einem Ausschnitt einer originalen, ein Spantfelder breiten A320-Rumpfstruktur ohne Fensterbereich,
- Isolationsmaterialien aus in Terul 18 Folie eingewickelten amber-farbigem Glaswollisolierpaket in einer Gesamtdicke von ca. 120 mm Dicke,
- einem originalen Seitenwandpaneel des A320-Flugzeugtyps, das mit einem originalen Halterungssystem an der Rumpfstruktur befestigt wurde (vgl. Abbildung 2.12).

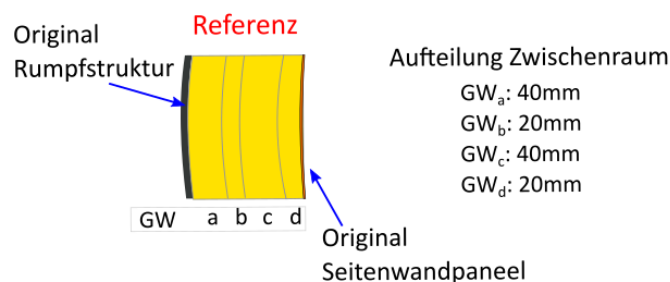


Abbildung 2.140: Schematische Darstellung des Referenz-Kabinenwandaufbaus für das Funktionsmuster zur Bestimmung von Schalldämmeigenschaften

b. Testplan für den Kabinenwand-Prototyp

Charakterisierung von Einzelkomponenten

Im Folgenden wird eine Übersicht über den Testplan zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften der im Kabinenwand-Prototyp verbauten Einzelkomponenten aufgeführt. Die daraus folgenden Ergebnisse sind in AP4.2 aufgeführt.

Tabelle 2.43: Testplan zur experimentellen Charakterisierung der Einzelkomponenten für die Prototypen

Titel	Testverfahren	Integrations- verfahren (AP5.2)	Definition Parameter für Nachweisführung
Rumpfstruktur mit Fenster	A	C	Frequenzabhängige Schalldämmeigenschaften
akustisches Metmaterial 1	A	B	
akustisches Metmaterial 2	A	B	
Aerogelmaterialien	B, C	E	Frequenzabhängige Schalldämme- sowie Absorptionseigenschaften sowie spezifischer Luftströmungswiderstand
Helmholtz-Resonatoren Komponenten im Fensterbereich	B	E	Frequenzabhängige Absorptionseigenschaften
Helmholtz-Resonator Komponenten im Nicht- Fenster-Bereich	B	E	

Charakterisierung von Kabinenwandaufbauten

Im Folgenden wird zunächst eine Übersicht der durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften des Prototyps aufgeführt. Anschließend erfolgt eine detaillierte Darstellung der einzelnen, auf unterschiedlichen Zielsetzungen basierenden Kabinenwandaufbauten. Die daraus folgenden Ergebnisse sind in AP5.3 aufgeführt.

Tabelle 2.44: Testplan zur experimentellen Charakterisierung des Kabinenwand- Prototyps

Versuch Nr.	Titel	Testverfahren	Integrations- verfahren (AP5.2)	Definition Parameter für Nachweisführung
1	Prototyp	A	C sowie D	Frequenzabhängige Schalldämmeigenschaften
2	Referenz	A	C sowie D	
3	Referenz - masseäquivalent zu Prototyp	A	C	
4	Referenz mit abgedeckten Fenstern	A	C	
5	Rumpfstruktur mit Glaswolle ohne Seitenwandpaneel	A	C	
6	Prototyp mit abgedeckten Fenstern	A	C	
7	Integration Aerogel	A	C	

Erläuterungen zu Versuch Nr. 1

Zielsetzungen

- Nachweis, dass der entwickelte Luftkanal in eine originale Flugzeugkabinenwand am Beispiel eines A320 Kabinenabschnitts integrierbar ist.
- Messergebnisse zum Schalldämmmaß im Frequenzbereich $< 1000 \text{ Hz}$ für den gesamten neuartigen Kabinenwandaufbau.
- Vergleich des Kabinenwand-Gesamtschalldämmmaßes mit Schalldämmmaßen der einzelnen im Luftkanal eingebauten Schallminderungselemente (PAMS, Helmholtz-Resonatoren) zwecks Analyse ihrer Wirksamkeiten in der Kabinenwand.

Kabinenwandaufbau des Prototyps besteht aus

- einem Ausschnitt einer originalen, zwei Spantfelder breiten A320-Rumpfstruktur mit Fensterbereich,
- originalen Fensterelementen,
- einer Primärisolierung aus einem in Terul 18 Folie eingewickelter amber-farbigem Glaswollisolierringpaket von ca. 40 mm Dicke,
- einem Luftkanal, der im Fensterbereich in zwei Teilstränge aufgespalten ist,
- einer Sekundärisolierung aus 20 mm dicker Glaswolle, die in Terul 18 Folie eingewickelt ist
- einem originalen Seitenwandpaneel des A320-Flugzeugtyps, das mit einem originalen Halterungssystem an der Rumpfstruktur befestigt wurde (vgl. S. 54).

Dieser Aufbau ist in Abbildung 2.141 schematisch nur für den Bereich unterhalb der Fenster dargestellt.

Der Luftkanal wurde im Wandbereich außerhalb der Fenster in einem Abstand von 65 mm zur Rumpfstruktur positioniert. Im Fensterbereich war aufgrund der Formgebung des Seitenwandpaneels der Abstand zur Rumpfstruktur geringer (vgl. S. 94)

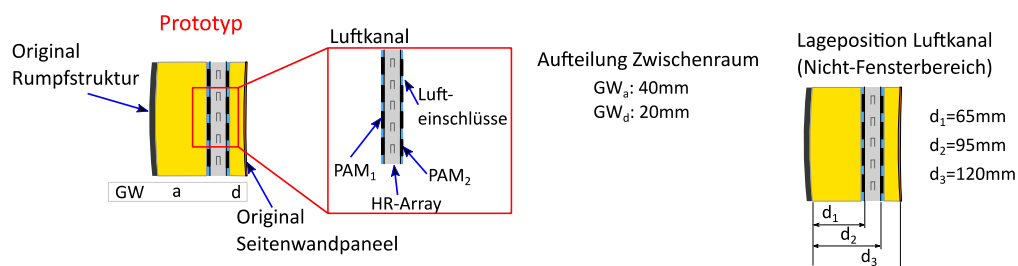


Abbildung 2.141: Schematische Darstellung des Prototyp-Kabinenwandaufbaus zur Bestimmung der Schalldämmeigenschaften

Erläuterungen zu Versuch Nr. 2

Zielsetzungen

- Messergebnisse zum Schalldämmmaß eines Referenz-Kabinenwandaufbaus mit zwei Fenstern im Frequenzbereich $< 1000 \text{ Hz}$ mit nur in Terul18-Folie eingewickelter Glaswollisolation im Zwischenraum.
- Aufbau eines dem Stand der Technik möglichst nahekommenden Referenz-Kabinenwandaufbaus eines A320-Flugzeugs

- Ermittlung von dem Stand der Technik zu erwartenden Schalldämmeigenschaften, welche im direkten Vergleich mit ermittelten Schalldämmcharakteristiken aus Versuch Nr. 1 (Prototyp mit integriertem Luftkanal) als Mindestanforderungen zu erreichender Dämmeigenschaften verwendet wurden.

Kabinenwandaufbau des Prototyps besteht aus

- einem Ausschnitt einer originalen, zwei Spantfelder breiten A320-Rumpfstruktur mit Fensterbereich,
- originalen Fensterelementen,
- zwei Primärisolierungen jeweils in Terul 18 Folie eingewickelter amber-farbigen Glaswollisoliertpaket von ca. 40 mm bzw. ca. 20 mm Dicke,
- einer Sekundärisolierung aus 20 mm dicker Glaswolle, die in Terul 18 Folie eingewickelt ist
- einem originalen Seitenwandpaneel des A320-Flugzeugtyps, das mit einem originalen Halterungssystem an der Rumpfstruktur befestigt wurde (vgl. S. 54).

Dieser Aufbau ist in Abbildung 2.142 dargestellt.

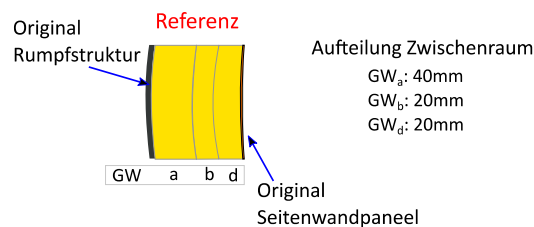


Abbildung 2.142: Schematische Darstellung des Referenz-Kabinenwandaufbaus zur Bestimmung von Schalldämmeigenschaften

Erläuterungen zu Versuch Nr. 3

Zielsetzungen

- Messergebnisse zum Schalldämmmaß eines zum Prototyp massenäquivalenten Referenz-Kabinenwandaufbaus mit zwei Fenstern im Frequenzbereich < 1000 Hz mit ausschließlich in Terul18-Folie eingewickelter Glaswollisolierung im Zwischenraum.

Kabinenwandaufbau des Prototyps besteht aus

- denselben Komponenten, wie sie bereits bei Versuch Nr. 2 aufgeführt wurden.
- zusätzliche Massen aus Schwergummi, welche zur Erhöhung der Masse des Gesamtwandaufbaus etwa gleichmäßig verteilt auf dem Seitenwandpaneel montiert wurden

Dieser Aufbau ist in Abbildung 2.143 dargestellt.

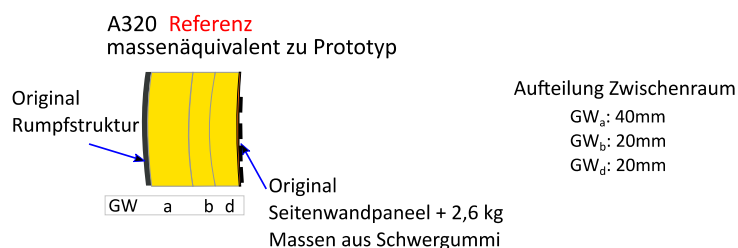


Abbildung 2.143: Schematische Darstellung des Referenz-Kabinenwandaufbaus mit zusätzlich auf dem Seitenwandpaneel fixierten Massen zur Bestimmung von Schalldämmeigenschaften

Erläuterungen zu Versuch Nr. 4

Zielsetzungen

- Messergebnisse zum Schalldämmmaß eines Referenz-Kabinenwandaufbau mit Fenster und stark gedämmten Fenstern im Frequenzbereich < 1000 Hz bei ausschließlich in Terul18-Folie eingewickelter Glaswollisolierung im Zwischenraum.
- Dämmung der Schallnebenwege durch die Fenster zur Bestimmung deren Einflusses auf die Gesamtschalldämmeigenschaften der Referenz Kabinenwand

Kabinenwandaufbau des Prototyps besteht aus

- denselben Komponenten, wie bereits bei Versuch Nr. 2 aufgeführt wurden,
- zusätzlich wurden die Fenster mit einer Kombination aus Steinwollschicht und Schwergummimatte abgedeckt

Dieser Aufbau ist in Abbildung 2.144 dargestellt.



Abbildung 2.144: Darstellung Seitenwandpaneel mit mit Steinwolle und Schwergummi abgedeckten Fenstern

Erläuterungen zu Versuch Nr. 5

Zielsetzungen

- Messergebnisse zum Schalldämmmaß eines Kabinenwandaufbaus ohne Seitenwandpaneel im Frequenzbereich < 1000 Hz (Kabinenwandaufbau mit Fenster).
- Generierung von Messdaten zur Validierung eines numerischen 3D-Modells des Projektpartners Novicos.

Kabinenwandaufbau des Prototyps besteht aus:

- Der Versuchsaufbau entspricht den Erläuterungen zu Versuch Nr. 2 jedoch ohne Seitenwandpaneel

Erläuterungen zu Versuch Nr. 6

Zielsetzungen

- Messergebnisse zum Schalldämmmaß im Frequenzbereich < 1000 Hz für einen Kabinenwand-Prototyp ohne Einfluss der Fenster im Vergleich mit Fenstereinfluss
- Dämmung der Schallnebenwege durch die Fenster zur Bestimmung deren Einflusses auf die Gesamtschalldämmeigenschaften des Kabinenwand-Prototyps

Kabinenwandaufbau des Prototyps besteht aus

- denselben Komponenten, wie bereits bei Versuch Nr. 1 aufgeführt wurden,

- zusätzlich wurden die Fenster mit einer Kombination aus Steinwollschicht und Schwergummimatte abgedeckt

Erläuterungen zu Versuch Nr. 7

Zielsetzungen

- Messergebnisse zum Schalldämmmaß im Frequenzbereich < 1000 Hz für einen Kabinenwandaufbau mit Fenstern, bei welchem die Primärisolierung durch Aerogelmaterialien in Vliesmattenform ausgetauscht wurden.

Kabinenwandaufbau des Prototyps besteht aus

- einem Ausschnitt einer originalen, zwei Spantfelder breiten A320-Rumpfstruktur mit Fensterbereich,
- originalen Fensterelementen,
- einer Primärisolierung aus in Terul18 Folie eingewickelter Aerogelmaterialien in Vliesmattenform in der Dicke von ca. 37 – 40 mm,
- einer Sekundärisolierung aus 20 mm dicker Glaswolle, die in Terul 18 Folie eingewickelt ist
- einem originalen Seitenwandpaneel des A320-Flugzeugtyps, das mit einem originalen Halterungssystem an der Rumpfstruktur befestigt wurde (vgl. S. 54).

Dieser Aufbau ist in Abbildung 2.145 dargestellt.

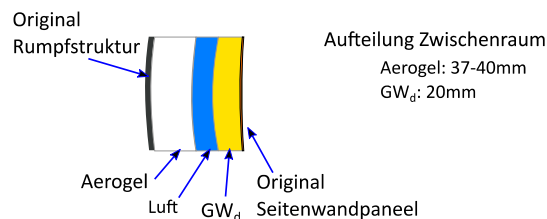


Abbildung 2.145: Schematische Darstellung des Kabinenwandaufbaus mit Aerogel als Glaswollersatz für die Primärisolierung

c. Testverfahren

Schalldämmmaßmessungen in Akustik-Prüfständen

Schalldämmmaßmessungen wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 15186-1 mit der in Tabelle 2.45 aufgeführten Messtechnik durchgeführt. Eine Prinzipsskizze des Messaufbaus ist dem Anhang A zu entnehmen.

Tabelle 2.45: Verwendete Messgeräte für Schalldämmmaßmessungen

Messtechnik in Hallraum (Anregung)		Messtechnik in Freifeldumgebung (Empfänger)	
Tongenerator	Verstärker + Generator PA1000 (Hersteller Sinus)	Schallintensitätsmessequipment	Type 3599 (Hersteller: Brüel&Kjaer AG)
Mikrofon	½"-Mikrofon Type 4966 (Hersteller: Brüel&Kjaer AG)	Lan-XI Modul	Type 3050-A-06 (Hersteller: Brüel&Kjaer AG)
Lautsprecher		Frontpanel für LAN-XI Modul	Type UA-2104-031 (Hersteller: Brüel&Kjaer AG)
Kabinen-demonstrator (KKS-Labor)	Qohm omnidirectional Sound Source (Hersteller: Qsources)		
Akustiklabor	Omnipower Schallquelle Type 4292-L (Hersteller: Brüel&Kjaer AG)		

Messungen im Impedanzrohr (Absorption- sowie Schalldämmmaß)

Messungen im Impedanzrohr wurden nach der ASTM E2611-09 bzw. DIN EN ISO 10534 durchgeführt. In Tabelle 2.46 wird das dafür verwendete Messequipment aufgelistet.

Tabelle 2.46: Verwendete Messgeräte für Impedanzrohrmessungen

Messtechnik	
Impedanzrohr	Type 4206-T (Hersteller: Brüel&Kjaer AG)
LAN-XI Modul	Type 3160-A-042 (Hersteller: Brüel&Kjaer AG)

Messungen Strömungswiderstände

Luftströmungswiderstände, durch z.B. Glaswollisolierungsmaterial, wurden anhand der ISO9053 mit dem in Tabelle 2.47 aufgeführten Equipment ermittelt. Im Anhang A ist eine Prinzipsskizze des Versuchsaufbaus zu sehen.

Tabelle 2.47: Verwendete Messgeräte zur Bestimmung von Strömungswiderständen

Messtechnik	
Messapparatur	Nor1517A (Hersteller: Norsonic GmbH)
Schalllevelmessgerät	Nor140 (Hersteller: Norsonic GmbH)

Messungen von Vibrationseigenschaften (Laservibrometer)

Zur Bestimmung von Schwingungseigenschaften, z.B. für die Modalanalyse der Rumpfstruktur, die im Funktionsmuster verwendet wurde (siehe AP4.2), wurde das Laservibrometer PSV-I-500-1D des Herstellers Polytec GmbH eingesetzt.

AP 5.2: Integration Funktionsmuster bzw. Prototypen in Demonstratoren

A. Integration Funktionsmuster im Akustiklabor

Das Funktionsmuster wurde in dem kleinen Transmissionsfenster (max. Abmessungen 100 cm x 120 cm) im Akustiklabor eingebaut. Detailliertere Angaben zur Prüfumgebung des kleinen Transmissionsfensters wurden bereits in AP1.2 aufgeführt. Zur Aufnahme des Funktionsmusters ist im kleinen Transmissionsfenster ein Prüffensteradapter eingebaut, welcher geometrisch auf die Kontur einer A320-Rumpfstruktur abgestimmt ist (Abbildung 2.146). Der im Prüffensteradapter, auf moosgummiartiges Material gelagerter Ausschnitt einer A320 Rumpfstruktur, wurde über einen Klemmmechanismus des Prüffensteradapters umlaufend auf einer Breite von ca. 1 cm fixiert. Schlitzte wurden mit dem Klebeband und Schwergummistreifen abgedichtet. Die Integration des Funktionsmuster bzw. des Seitenwandpaneels erfolgte mit einem, aus einem im A320-Flugzeug nachgebauten, Halterungssystem (Abbildung 2.12 a). Nach Einbau des Funktionsmusters wurden vorhandene Schlitzte mit Basotect-Schaum, Steinwollisolierung bzw. Schwergummistreifen und Gewebeklebeband abgeklebt (Abbildung 2.147).

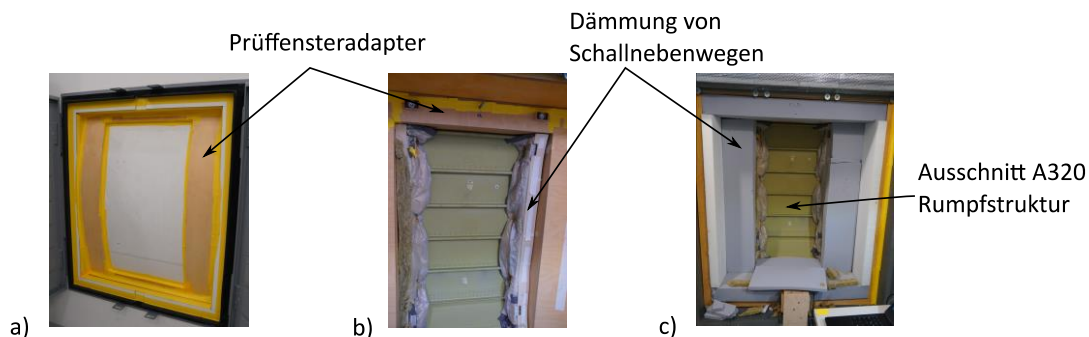


Abbildung 2.146: a) Prüffensteradapter zur Aufnahme des Funktionsmusters in das 1,0m x 1,2m große Transmissionsfenster im Akustikprüfstand aus der Sicht des Hallraums, b) ... aus Sicht des Freifeldraums, c) aufgebaute Dämmmaßnahmen zur Reduzierung von Schallnebenwegen



Abbildung 2.147: Ansicht eines Funktionsmusters in einem Transmissionsfenster: eingebauter Luftkanal (links) und vollständiges Funktionsmuster (Sicht auf Seitenwandpaneel - rechtes Bild)

B. Integration von akustischen Metamaterialien zur individuellen Schalldämmmaßmessung im Akustiklabor

Für individuelle Schalldämmmaßmessungen gefertigter akustischer Metamaterialien wurde ein spezieller Prüffensteradapter hergestellt. Der Prüffensteradapter reduziert die deutlich größere Prüffensteröffnung passgenau auf die gefertigten akustischen Metamaterialien. Die Aufnahmeöffnung für die akustischen Metamaterialien beträgt ca. 1,0 m x 0,5 m. Freifeldraumseitig wurde der Adapter mit 10 cm Dicken Bastotectplatten gedämmt (siehe Abbildung 2.148). Die akustischen Metamaterialien wurden mit Klebeband auf die Aussparung im Prüffensteradapter montiert.

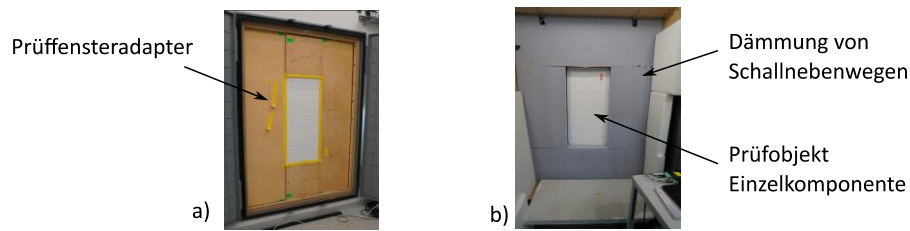


Abbildung 2.148: Prüffensteradapter zur Aufnahme von akustischen Metamaterialien zwecks individueller Charakterisierung ihrer Schalldämmeigenschaften.

C. Integration des Kabinenwand-Prototyps im Akustiklabor

Zur Aufnahme des Prototyps im großen Transmissionsfenster wurde aus Projektmitteln ein ein- bzw. ausfahrbarer Prüffensteradapter angefertigt. Dieser Prüffensteradapter ist passgenau für die Aufnahme des in Abbildung 2.149 a) dargestellten Ausschnitts einer A320 Rumpfstruktur angepasst worden. Freie Flächen des Prüffensteradapters wurden mit Schwergummistreifen (vgl. auch Abbildung 2.130), sowie Glaswollisolierpaketen und einer speziell angefertigten Basotectumrandung, letzteres dargestellt in Abbildung 2.149 c), zur Dämmung von Schallnebenwegen abgedeckt. Zur Befestigung des Seitenwandpaneels an der Rumpfstruktur wurde ein originales Halterungssystem eines A320 Flugzeug, dargestellt in Abbildung 2.12 b), verwendet.

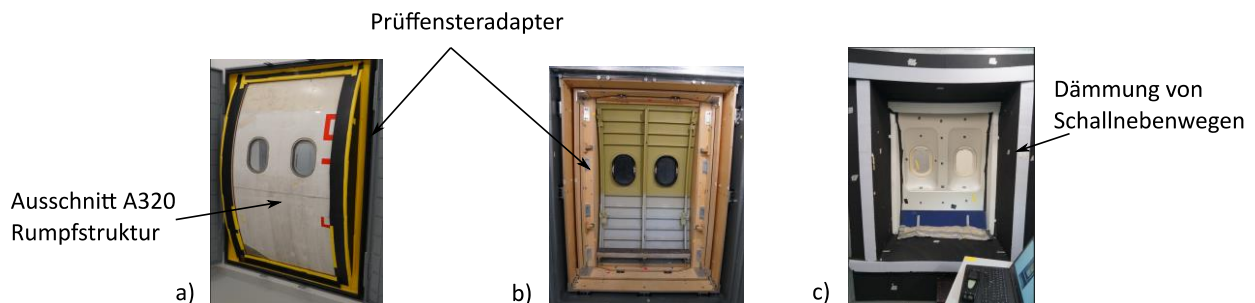


Abbildung 2.149: Ansicht Prüffensteradapter zur Aufnahme des Prototyps in großem Transmissionsfenster im Akustikprüfstand aus der Sicht des Hallraums a), des Freifeldraums b) sowie Darstellung von Dämmmaßnahmen zur Reduzierung von Schallnebenwegen c)

In Abbildung 2.150 wird der fertiggestellte Prototyp bzw. zur besseren Darstellung nur Teile des Prototyps gezeigt.

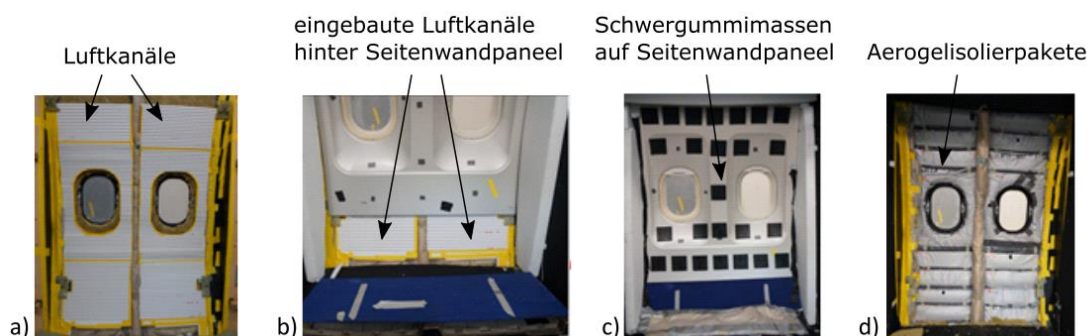


Abbildung 2.150: Fertiggestellter Kabinenwand-Prototyp: a) Ansicht der eingebauten Luftkanäle, b) Ansicht eingebauter Luftkanäle hinter eingebautem Seitenwandpaneel, c) bestmögliche homogene Verteilung von Schwergummimassen auf dem Seitenwandpaneel, d) Aerogelisolierpakete als Primärisolierung

D. Integration des Kabinenwand-Prototyps in die Kabine des A320-Rumpf-abschnitts der Klima – Akustikkammer

Der Kabinenwand-Prototyp wurde ebenfalls zur Technologiedemonstration in die Kabine des A320-Rumpfabschnitts der Klima-Akustikkammer aufgebaut. Im Gegensatz zu den definierten Messbedingungen im Akustiklabor gab es in der A320-Kabine besondere Anforderungen an die Dämmung von Schallnebenwegen. Zur Vermeidung von Einflüssen abgestrahlter Schallleistungen benachbarter Seitwandpaneelfelder wurde in der A320-Kabine vor dem Kabinenwand-Prototyp ein akustisch sehr weitgehend abgeschirmter Raum mit schallabsorbierenden bis zu 20 cm dicken Basotectplatten, sowie 4-lagigen Moltonbühnenvorhängen errichtet. Zusätzlich wurde der Schallnebenweg durch die Fußbodenpaneele mit einer 6 mm Dicken Schwergummimatte und darauf positionierte Basotectplatten gedämmt. Ein weiterer möglicher Schallnebenweg bestand durch das Gepäckablagefach an der Decke. Das Gepäckablagefach über den Sitzen wurde mit Steinwolle und Schwergummimatten befüllt. Zur Vermeidung von Reflektionen wurde die Unterseite der Gepäckablagefach mit Glaswollisierpaketen bedeckt (siehe Abbildung 2.151 b)).

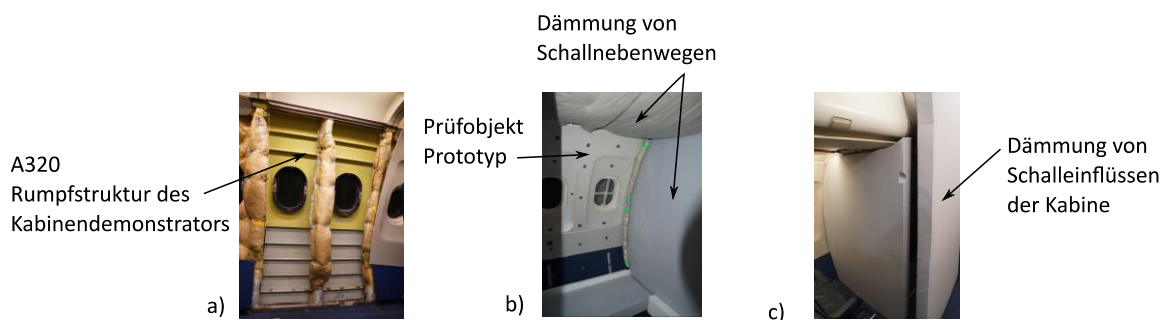


Abbildung 2.151: Integrierter Kabinenwand-Prototyp in die Kabine des A320-Rumpfabschnitts der Klima-Akustikkammer für akustische Charakterisierung. Ansicht der Prüfumgebung a), Dämmmaßnahmen in der Kabine zur Reduzierung von Schallnebenwegen b) und c)

In Abbildung 2.152 wird der in die Kabinenwand integrierte Prototyp zwecks Ansicht der integrierten Luftkanäle ohne Dado-Paneel gezeigt sowie ein Teilaufbau einer Kabinenwand mit Aerogelpaketen anstelle der üblichen Glaswollpakete als Primärisolierung.



Abbildung 2.152: Darstellung des integrierten Kabinenwand- Prototyps, hier ohne Dado-Paneel zwecks Ansicht der integrierten Luftkanälen (links), Ansicht eines Teilaufbaus einer-Kabinenwand mit Aerogelisolierpaketen als Primärisolierung (rechts)

E. Integration des Kabinenwand-Prototyps in die Kabine des A320-Rumpf-abschnitts der Klima-Akustikkammer für hygrothermische Messungen

Der Kabinenwand-Prototyp für die hygrothermischen Messungen wurde in die Kabine des A320 Rumpfabschnitts der Klima-Akustikkammer eingebaut. Zur Isolierung des Kabinenvolumens wurde der Bereich vor dem Prototyp mit drei verschiedenen Platten aus Basotect-Dämmmaterial umgeben. Innerhalb des entstehenden Volumens wurde ein Heizer mit einem Ventilator platziert, um die Anwesenheit eines Passagiers zu simulieren. Eine Darstellung des Messaufbaus ist in Abbildung 2.153 zu sehen.

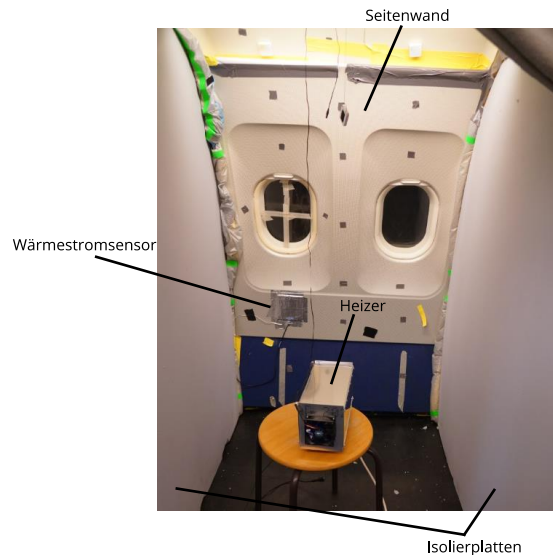


Abbildung 2.153: Foto des Messaufbaus im Inneren der A320 Kabine in der Klima-Akustikkammer

Die Integration der beiden Luftkanäle im Inneren des Prototyps mit dem Lüftungssystem der Klima-Akustikkammer für die Kabine ist in Abbildung 2.154 dargestellt. Konventionell wird die Luft, die zur Klimatisierung der Kabine verwendet wird, von der Hauptzuleitung durch den Riser Duct und schließlich durch zwei verschiedene Auslässe in die Kabine geleitet. Die Riser Ducts sind in jedem zweiten Spant positioniert, d.h. jeder Auslass deckt die Strecke ab, die zwei Fenstern entspricht. Im Gegensatz dazu sind beim Prototyp die Luftkanäle an jedem Fenster positioniert. Es war daher notwendig, das Luftkanalsystem so zu ändern, dass eine doppelte Luftzufuhr von der Zuleitung aus eingefügt und zu jedem Luftkanal geleitet werden konnte. Es wurden zwei Gebläsesteuerungen installiert, um den Luftstrom in jedem einzelnen Luftkanal zu regulieren.

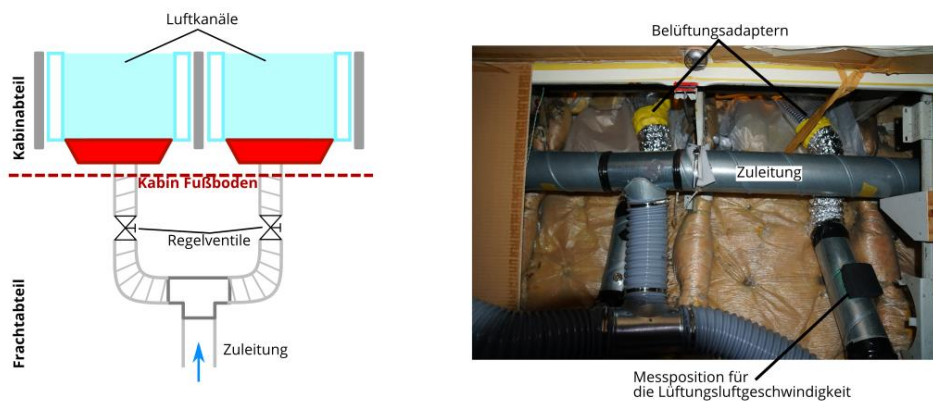


Abbildung 2.154: Darstellung der Integration des Prototyps mit dem Kabinenbelüftungssystem der Klima-Akustikkammer: Skizze des Systems zwischen Zuleitung und Luftkanälen (links); Foto zur Luftführung im Frachtraum (rechts).

Die Sensoren wurden, wie bereits bei der Vorstellung des Testplans in AP 5.1 angekündigt, an verschiedenen Stellen des Prototyps angebracht. Insbesondere in Abbildung 2.155 sind einige Fotos der an verschiedenen Stellen positionierten Sensoren zu sehen.

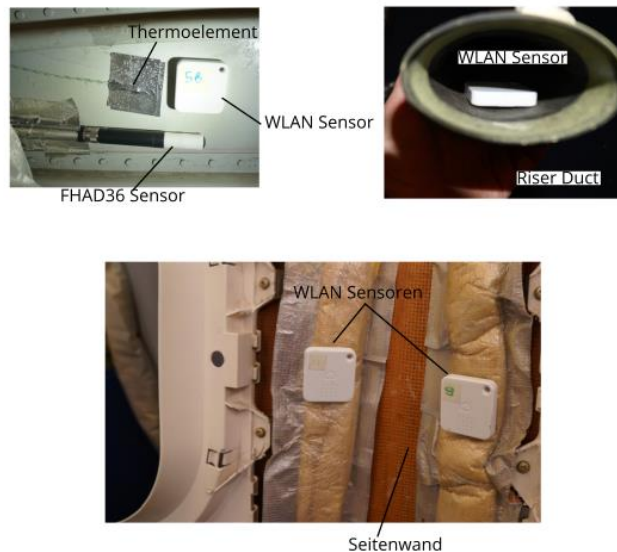


Abbildung 2.155: Fotos der im Wandaufbau des Prototyps installierten Sensoren, beginnend von links im Uhrzeigersinn: WLAN-Sensor, Thermoelement und FHAD36-Sensor installiert an der Rumpfstruktur am Messpunkt unterhalb des linken Fensters; WLAN-Sensor im Steigrohr; WLAN-Sensoren installiert an der Seitenwand.

F. Integration des Kabinenwand-Funktionsmusters in das Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer

Das Funktionsmuster wurde für hygrothermische Messungen in das Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer installiert. Die originale Rumpfstruktur-Komponente ist an dem Adapter des Transmissionsfensters befestigt, sodass dessen Außenseite in thermischem Kontakt zum Innenraum der Klima-Akustikkammer steht. Als zweites wurden die Primärisolierung und der Luftkanal eingebaut. Schließlich wurde die Seitenwand über ein Halterungssystem an der Rumpfstruktur montiert. Ein sogenannter Kabinensimulationskasten, wurde verwendet, um ein kleines „Kabinenvolumen“ am kabinenseitigen Bereich des Funktionsmusters abzugrenzen und Randbedingungen zu kontrollieren, die die Kabinenbedingungen simulieren. Im Inneren des Kabinensimulationskastens sind ein Befeuchter und ein Heizer eingebaut, um die Innenraumbedingungen der Kabine zu realisieren. Die in den Luftkanal geleitete Luft stammt aus einem Klimatisierungsgerät für die Klima-Akustikkammer, da ein Luftreservoir mit Raumtemperatur und niedriger relativer Luftfeuchtigkeit ähnlich den Kabinenbedingungen im Reiseflug benötigt wurde. Einige Fotos des Aufbaus sind in Abbildung 2.156 zu sehen.



Abbildung 2.156: a) Darstellung des Versuchsaufbaus für hygrothermische Messungen. b) Rumpfstruktur c) Primärisolierung d) Luftkanal e) Seitenwand

G. Prüflingeinbauweisen für Impedanzrohrversuche

Die Einbauweise von Prüflingen im Impedanzrohr war vom Prüfling abhängig. In Abbildung 2.157 werden exemplarisch drei unterschiedliche Prüflingsarten gezeigt. In Abbildung 2.157 a) wird ein Helmholtz-Resonator aus Basotect gezeigt, welcher mit einer sehr weichen gummiartigen, punktuellen Lagerung im Impedanzrohr positioniert wurde. In Abbildung 2.157 b) ist ein mikroperforierter Absorber aus Aluminium zu sehen, welcher über Halterringe in Position gehalten wird. In Abbildung 2.157 c) ist eine Materialprobe aus Glaswolle zu sehen, welche keine gesonderteten Hilfsmittel zur Befestigung benötigte.

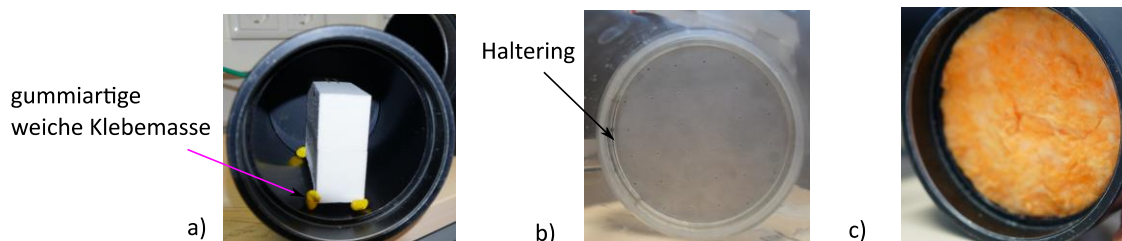


Abbildung 2.157: Darstellung unterschiedlicher Einbaumethoden für Proben zur Charakterisierung im Impedanzrohr: a) ein Helmholtz-Resonator wurde mit einer gummiartigen, weichen Klebemasse befestigt, b) ein mikroperforierter Absorber aus Aluminium mit einem Haltering sowie c) Glaswollisolierung ohne Hilfsmittel zur Befestigung

H. Messaufbau für Wasserdampfpermeabilitätsmessungen an Folien

Der Einbau von Folienproben zur Messung der Wasserdampfpermeabilität wurde nach DIN ISO EN 12572 (19) durchgeführt. Drei Behälter wurden mit Silica Gel gefüllt, einem Trockenmittel, das eine niedrige relative Luftfeuchtigkeit im Behälter ermöglicht. Die Folien wurden dann auf die jeweiligen Behälter gelegt und versiegelt, so dass ein Dampfaustausch nur über die Oberfläche der Folie stattfinden konnte. Die drei Behälter wurden im KKS-Labor der HAW Hamburg in eine Klimakammer gestellt, wo Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit eingestellt und geregelt werden konnten. Mit einer Präzisionswaage wurde das Gewicht der Behälter in zeitlichen Abständen gemessen, um eine Gewichtszunahme durch die Ansammlung von Feuchtigkeit im Silica Gel zu ermitteln. Ein Foto des Messaufbaus ist in

Abbildung 2.158 zu sehen.



Abbildung 2.158: Messaufbau im Innenraum einer Klimakammer für Wasserdampfpermeabilitätsmessungen an Folien.

AP 5.3: Durchführung von Messungen

A. Schwerpunkt hygrothermische Messungen

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Ergebnisse der hygrothermischen Messungen an Funktionsmuster und Prototyp vorgestellt. Die Ergebnisse entsprechen den im Versuchsplan in AP 5.1 dargestellten Experimenten und die Versuchsaufbauten wurden in AP 5.2 vorgestellt. Die Messungen wurden durchgeführt, um folgende Ziele zu erreichen:

- Analyse der Profile von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Partialdampfdruck für verschiedene Konfigurationen.
- Vergleich zwischen dem Funktionsmuster/Prototyp und der Referenzwand bei sonst gleichen Voraussetzungen.
- Validierung des in AP 1.2 vorgestellten numerischen Modells.
- Analyse des Wärmeflusses durch den Kabinenwand-Prototyp und durch die Referenzwand.

a. Ergebnisse Kabinenwand-Funktionsmuster

Die in Abbildung 2.159 dargestellten Ergebnisse zeigen die Profile der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit im Funktionsmuster und in der Referenzwand am Ende der 120-minütigen Messperiode, um den hygrothermischen Zustand während des Fluges unter simulierten Reiseflugbedingungen zu beurteilen. Die Grafik zeigt, dass der Luftkanal einen Anstieg der Gesamttemperatur innerhalb der Doppelwand und eine Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit in einem Abstand von mehr als 50 Prozent von der Wand verursacht. Der Hauptvorteil besteht darin, dass der Temperaturabstand zum Taupunkt vergrößert wurde, wodurch der Kondensationseffekt im größten Teil der Wand verringert wird.

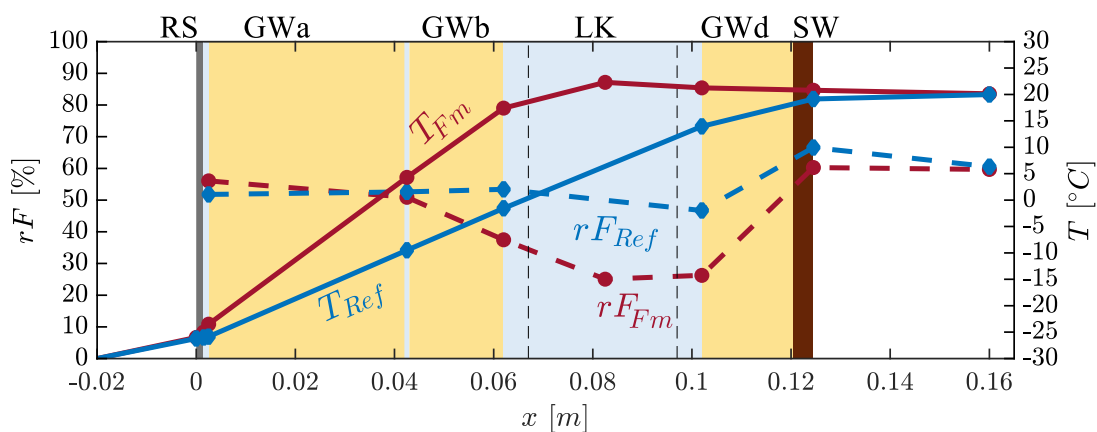


Abbildung 2.159: Messergebnisse zum Vergleich der Wandverläufe vom Temperatur- und relativer Luftfeuchtigkeit bei Funktionsmuster (Index: Fm) und Referenz (Index: Ref).

Der Partialdampfdruck p_d ist ein Parameter zur Beurteilung der absoluten Feuchte. Für den Referenzfall ist in Abbildung 2.160 zu erkennen, dass $p_{d,Ref}$ in Richtung der Struktur kontinuierlich abnimmt. Für das Funktionsmodell wurde gemessen, dass im Bereich des Luftkanals eine Inversion des Gradienten von $p_{d,LK}$ auftritt. Das Fick'sche Diffusionsgesetz besagt, dass Gasbestandteile (in diesem Fall gasförmige Wassermoleküle) in Richtung der niedrigsten Konzentration (hier durch p_d dargestellt) diffundieren. Hiermit wird deutlich, dass die Belüftung in Kombination mit einer diffusionsoffenen Folie eine wichtige Rolle dabei spielt, dem Feuchtigkeitsstrom in Richtung der Rumpfstruktur entgegenzuwirken.

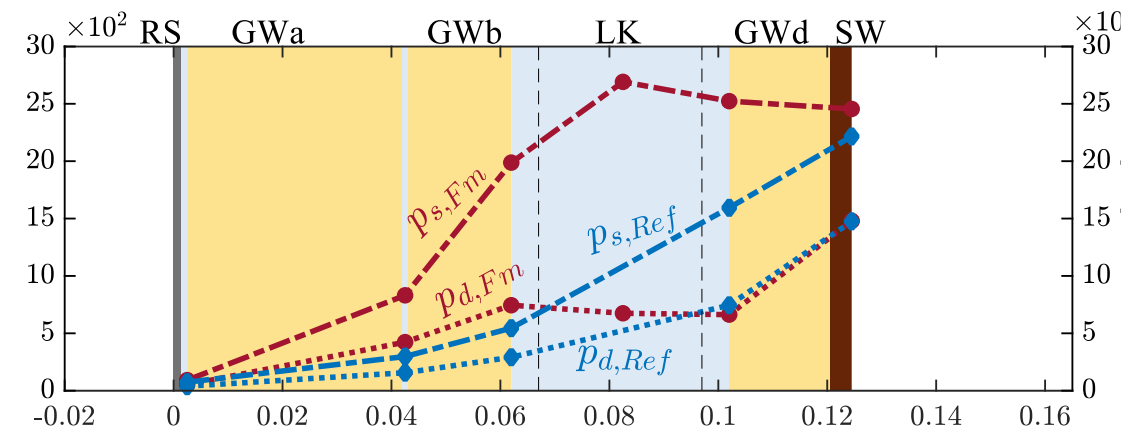


Abbildung 2.160: Messergebnisse zum Vergleich der Wandverläufe von Sättigungsdruck und Dampfpartialdruck bei Funktionsmuster (Index: Fm) und Referenz (Index: Ref).

Abbildung 2.161 zeigt den Verlauf der gemessenen relativen Feuchte an der Innenseite des Glaswollpakets GW_b für die beiden Konfigurationen während der gesamten Messzeit. Es ist zu erkennen, dass in der Referenzwand eine kontinuierliche Zunahme der Feuchtigkeitsansammlung auf der Oberfläche des Blankets zu verzeichnen ist, während im Funktionsmuster aufgrund der Anwesenheit des Luftkanals die relative Feuchte allmählich abnimmt.

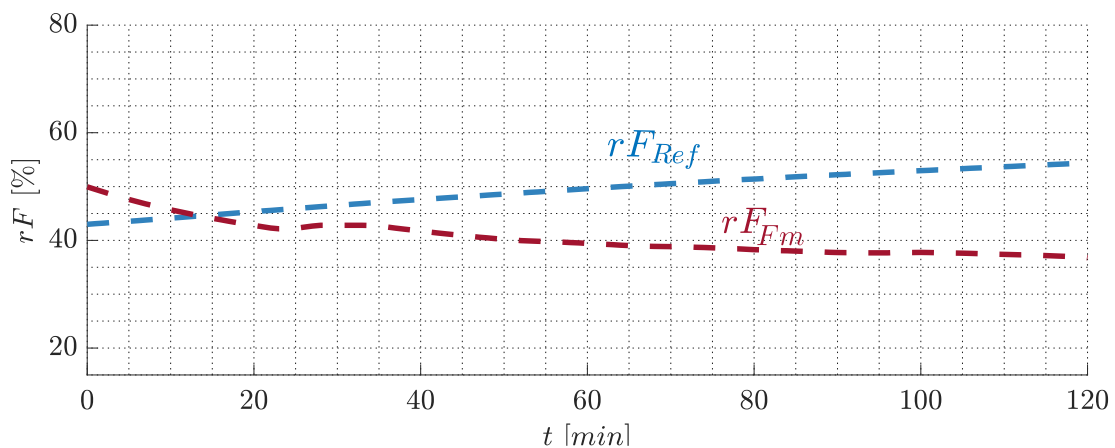


Abbildung 2.161: Experimentelle Ergebnisse der im Laufe der Zeit gemessenen zeitlichen Entwicklung der relativen Luftfeuchtigkeit an der Innenseite des Glaswollpakets GW_b , im Vergleich von Funktionsmuster (Index: Fm) und Referenz (Index: Ref).

Die Erhöhung der Oberflächenseitenwandtemperatur um ca. 2°C , wie in der Abbildung 2.162 gezeigt ist, ist eine weitere für die Passagiere spürbare Verbesserung, die durch die Integration des Luftkanals erreicht wurde.

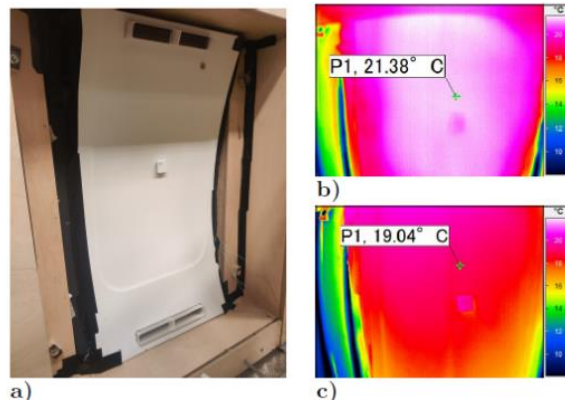


Abbildung 2.162: Infrarotbilder der Seitenwand a) für das Funktionsmuster b) und für die Referenzwand c).

Das in AP 1.2 vorgestellte numerische Modell wurde mit den aus den Funktionsmustermessungen gewonnenen experimentellen Ergebnissen validiert. Abbildung 2.163 zeigt einen Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen. Es ist zu erkennen, dass die gemessene Temperatur durch das Modell gut vorhergesagt wurde. Auch der allgemeine Trend der relativen Luftfeuchtigkeit innerhalb der Doppelwand wurde vom Modell gut erfasst, obwohl die Werte im Bereich des lokalen Luftkanals erwartungsgemäß deutlich niedriger sind als in den angrenzenden Bereichen. Zu beachten ist, dass die im numerischen Modell berechnete Feuchteverteilung innerhalb der Glaswolle-Dämmung einen sehr steilen Anstieg in Richtung der Folienhülle zeigt, die die einzelnen Glaswollepakete umschließt. Da die Modellierungsergebnisse die entsprechenden Messwerte hinreichend gut widerspiegeln, sind weitere theoretische Untersuchungen möglich.

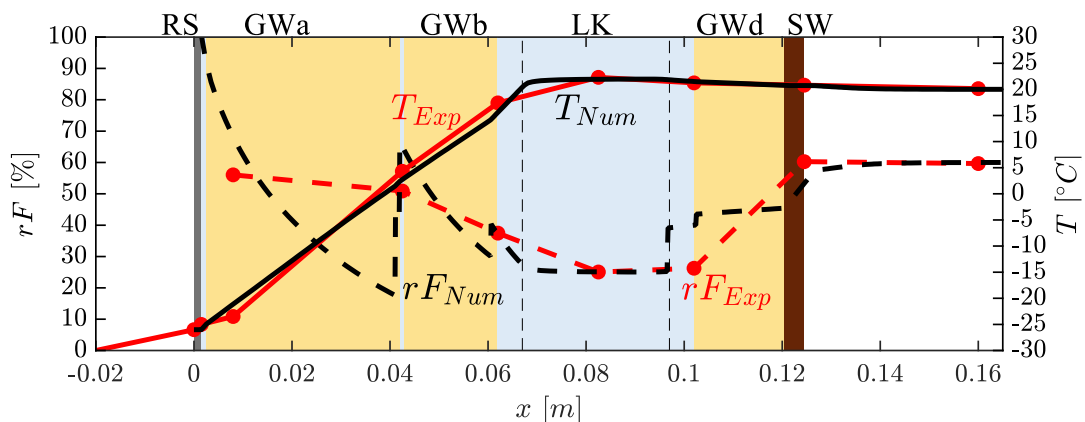


Abbildung 2.163: Vergleich zwischen experimentellen (Exp) und numerischen (Num) Profilen für Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit innerhalb der Wand des vermessenen Funktionsmusters

b. Ergebnisse Kabinenwand-Prototyp

Der Vergleich der Profile für die gemessenen hygrothermischen Größen innerhalb der Wand des Kabinenwand-Prototyps ist unten in Abbildung 2.164 dargestellt, wobei die Messposition unterhalb des linken Fensters der Rumpfstruktur, wo kein Luftkanal, sondern nur Glaswolle eingebaut war, als Referenz diente. In Abbildung 2.164 ist der Anstieg der Temperatur und die Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit im Inneren der Kabinenwand aufgrund der Anwesenheit des Luftkanals zu erkennen. An der Rumpfstruktur ist jedoch zu erkennen, dass die von dem in der Referenzwandkonfiguration verwendeten Sensor gemessene Temperatur höher ist als die im Prototyp gemessene. Betrachtet man außerdem den entsprechenden Wert der relativen Luftfeuchtigkeit für denselben Ort, so lässt sich ableiten, dass sich in der Referenzwand eine übermäßige

Ansammlung von Feuchtigkeit in Form von Eis gebildet hat, die aufgrund ihres geringen Wärmeleitwertes die Isolationseigenschaften der Wand und am Sensor lokal erhöht hat, was zur Messung einer höheren Temperatur geführt hat.

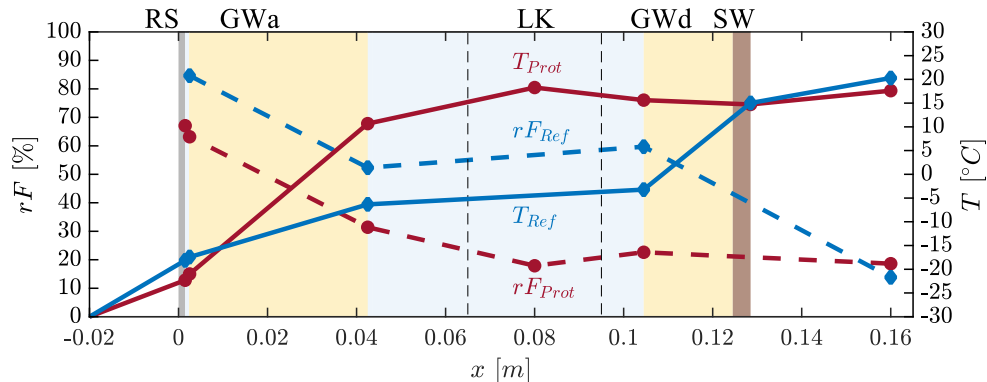


Abbildung 2.164: Messergebnisse zum Vergleich der Wandprofile von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit zwischen Kabinenwand-Prototyp (Index: Prot) und Referenz (Index: Ref).

Noch deutlicher als bei den Ergebnissen für das Funktionsmuster ist in Abbildung 2.165 zu erkennen, wie sich der Abstand zwischen dem Wasserdampfpartialdruck und dem Sättigungswert durch den Einbau des Luftkanals vergrößert hat. Messungen der Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedener Folientypen, über die im Kapitel für AP 4.2 berichtet wird, haben gezeigt, dass das für die Wände des Luftkanals verwendete Material im Gegensatz zu den Angaben des Herstellers einen hohen Dampfdurchlasswiderstand aufweist. Daraus lässt sich ableiten, dass der in Abbildung 2.165 beobachtete Austrocknungseffekt hauptsächlich auf einen thermischen Effekt zurückzuführen ist, und es ist daher anzunehmen, dass sich dieser Effekt bei Verwendung einer dampfdurchlässigeren Folie noch weiter verstärken kann.

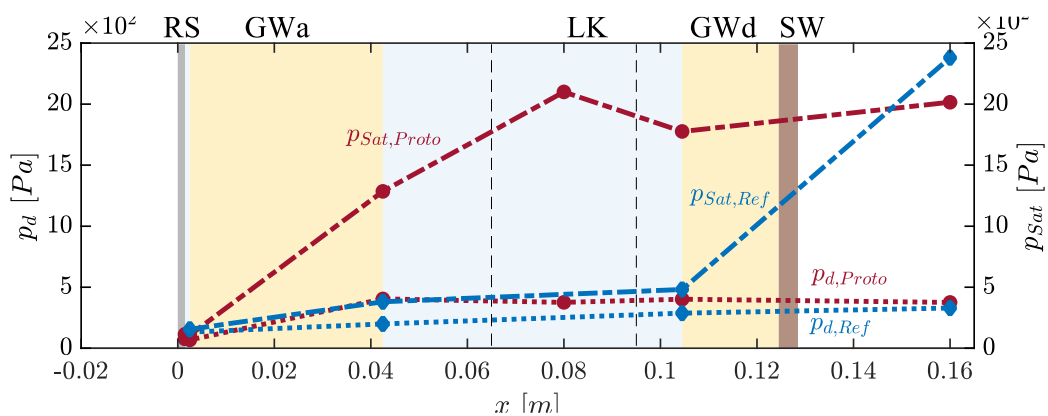


Abbildung 2.165: Messergebnisse zum Vergleich der Wandprofile von Sättigungsdruck und Dampfpartialdruck zwischen Kabinenwand- Prototyp (Index: Proto) und Referenz (Index: Ref).

Die Versuchskampagnen am Prototyp ergaben eine Wärmebilanzkomponente, die beim Funktionsmuster nicht berücksichtigt wurde. In Abbildung 2.166 a) ist ein Schema der verschiedenen Wärmeströme innerhalb des Prototyps dargestellt. Im unteren Teil der Kabinenwand ist der Wärmestrom durch die Seitenwand ($\dot{Q}_K$) aufgrund der erhöhten Wärmeenergie im Luftkanal in Richtung der Kabine gerichtet. Entlang des Luftkanals findet aber auch aufgrund der Außentemperatur ein Wärmestrom ($\dot{Q}_R$) nach außen statt, was zu einer Absenkung der Lufttemperatur im Luftkanal selbst führt. Dieser Verlust an Wärmeenergie führt daher zu einer Umkehrung des Wärmestroms ($\dot{Q}_K$) an der Spitze der Kabinenwand. Abbildung 2.166 b) zeigt die Temperaturprofile an zwei Positionen, unterhalb und oberhalb des Fensters. Es ist zu erkennen, dass bei den verwendeten Versuchsbedingungen die Temperatur im Inneren des Luftkanals aufgrund des Wärmeaustauschs mit der äußeren Umgebung um etwa 5°C sinkt. In Abbildung 2.166 c) sind die zeitlichen Entwicklungen der gemessenen Wärmeströme auf der Oberfläche der Seitenwand für die beiden Konfigurationen Prototyp und Referenzwand während der gesamten Messzeit dargestellt. Es ist zu erkennen,

dass in der Referenzwand der Wert von $\dot{Q}_{Ref}$ einen negativen Wert hat, was bedeutet, dass ein Wärmestrom aus der Kabine nach außen fließt, während im Prototyp ein positiver Wert gemessen wurde, was auf das Vorhandensein einer Wärmequelle im Inneren der Kabinenwand zurückzuführen ist.

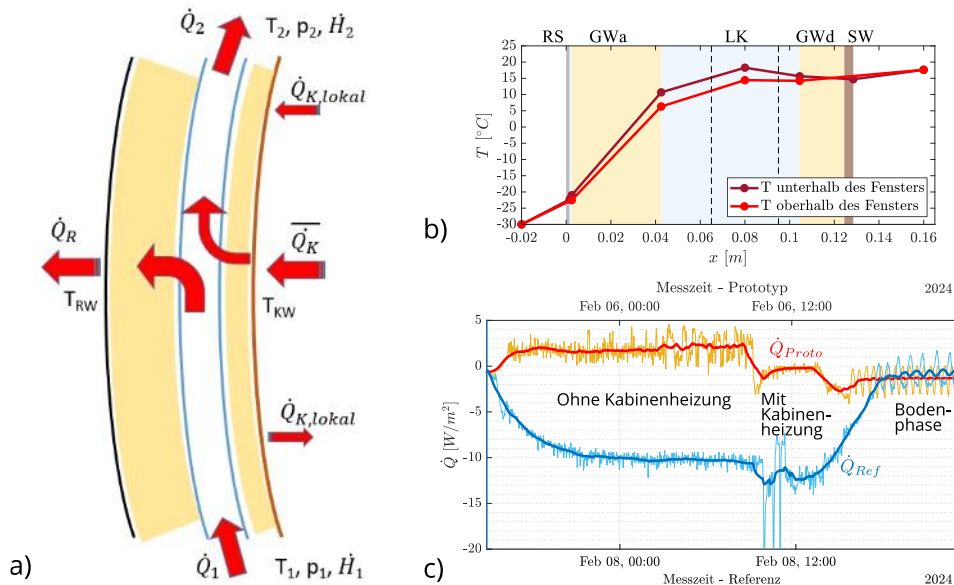


Abbildung 2.166: a) Schematisierung der Wärmeströme innerhalb der Kabinenwand-Prototyps (Indizes: K=Kabine, KW=Kabinenwand R=Rumpfstruktur, 1=Einlass, 2=Auslass); b) Temperaturprofile innerhalb des Prototyps für zwei Messpositionen, unterhalb des Fensters und oberhalb des Fensters; c) an der Seitenwand gemessene Temperaturströme für den Kabinenwand-Prototyp (Index: Proto) und für die Referenzwand (Index: Ref).

Abbildung 2.167 zeigt die Infrarotbilder des Messaufbaus während der hygrothermischen Messungen der beiden Konfigurationen. In Abbildung 2.167 a), die das thermische Profil der Referenzwand zeigt, ist aufgrund der höheren Temperatur im Riserduct sein Wärmebild neben dem zentralen Spant und der Outlets am oberen Ende der Seitenwand zu erkennen. In Abbildung 2.167 b) ist stattdessen die Temperaturverteilung auf dem Seitenwandpaneel des Kabinenwand-Prototyps dargestellt. Die Temperaturen, die gleichmäßiger sind als bei der Referenzwand, zeigen dennoch niedrigere Werte. Das liegt an der allmählichen Abkühlung des durch die umgebenden Isolierwände des Versuchsaufbaus eingeschlossenen Kabinenraums, der durch die aus dem Luftkanal des Kabinenwand-Prototyps kommende Luft klimatisiert wird. Die Abkühlung der Lüftungsluft durch den Wärmestrom nach außen, der wegen der relativ großen Seitenfläche des Luftkanals höher ist als bei der Referenzwand mit dem Riserduct deutlich kleinerer Oberfläche, führte bei den eingestellten Versuchsbedingungen zu einem allmählichen Absinken der Temperatur in dem Kabinenraum und damit zu einer geringeren Oberflächentemperatur auf dem Seitenwandpaneel. Dieser Temperaturunterschied in der Kabine ist in den Temperaturprofilen in Abbildung 2.164 zu sehen. Der beschriebene zusätzliche Beitrag zur Kabinenkühlung bietet einen potenziellen Effizienzvorteil für ein Flugzeug während der Reiseflugphase, da weniger Kühlluft aus den Klimapacks zur Kabinenkühlung benötigt wird und somit der Zapflustrom aus den Triebwerken reduziert kann bei gleichzeitig entsprechender Erhöhung des rezirkulierten, wärmeren Luftanteils aus der Kabine. Weniger Triebwerkszapflust bedeutet mehr Energie für den Triebwerksschub und damit eine Einsparung von Treibstoff.

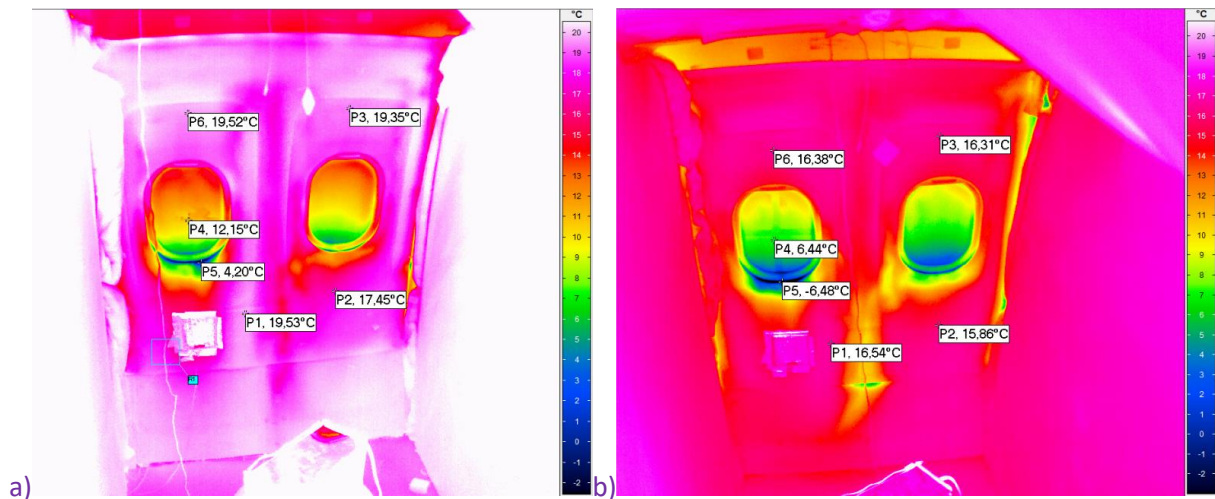


Abbildung 2.167: a) Infrarotbild des Messaufbaus in der Konfiguration Referenzwand; b) Infrarotbild des Messaufbaus in der Konfiguration Kabinenwand-Prototyp.

Wie im Testplan des Prototyps beschrieben, wurde als letzte Konfiguration in der Kabine des A320-Rumpfabschnitts der Klima-Akustikkammer eine Referenzwand aufgebaut, bei der die beiden Glaswolldecken GW_a und GW_b durch eine Schicht aus Aerogel-Isoliermaterial ersetzt wurden. Ein Foto des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 2.168 a) zu sehen. Vergleiche zwischen den gemessenen Temperaturprofilen in Versuch Nr. 2 (Referenzwand mit Glaswolle) und Versuch Nr. 3 (Kabinenwand mit Aerogel) sind in Abbildung 2.168 b) bis Abbildung 2.168 c) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Aerogel-Material in den Messpositionen oberhalb und unterhalb der Fenster eine bessere Wärmedämmung bietet:

- Die Temperaturen sind im größten Teil der Doppelwand höher als in der Referenzwand
- Der Unterschied zwischen den gemessenen Temperaturprofilen oberhalb und unterhalb der Fenster ist geringer als bei den entsprechenden in der Referenzwand.

Dieser Unterschied in den Temperaturverläufen zwischen den beiden Konfigurationen lässt sich nicht ausschließlich durch die geringere Wärmeleitfähigkeit des Aerogel-Materials erklären, sondern möglicherweise auch durch die Installationsmethode.

Herkömmlicherweise werden die Glaswolle-Decken über den Springern angebracht und mit Pins an den Spanten befestigt. Dadurch wird zwar eine gleichmäßige Abdeckung der Rumpfstruktur erreicht, aber die fehlende Steifigkeit der Decken führt zu einem ungleichmäßigen Sitz an der Rumpfstruktur. Dies kann zu einem Luftaustausch zwischen dem mittleren Bereich in der Doppelwand und dem äußeren Bereich führen, der an die Rumpfstruktur angrenzt. Dieser Luftaustausch erhöht möglicherweise durch Konvektion den Gesamtwärmestrom nach außen und verringert wahrscheinlich so die Wirksamkeit der Dämmung bei der Glaswollisolierung. Bei Versuch Nr. 3 wurden jedoch einzelne Aerogel-Pakete zwischen den einzelnen Stringern eingebaut, so dass der Luftspalt zwischen den Aerogelpaketen und der Rumpfstrukturhaut minimal klein war. Dieser Effekt ermöglichte die in den Versuchsergebnissen festgestellte erhebliche Verbesserung der Wärmedämmung, die sich mit den Materialeigenschaften allein nicht erklären lässt.

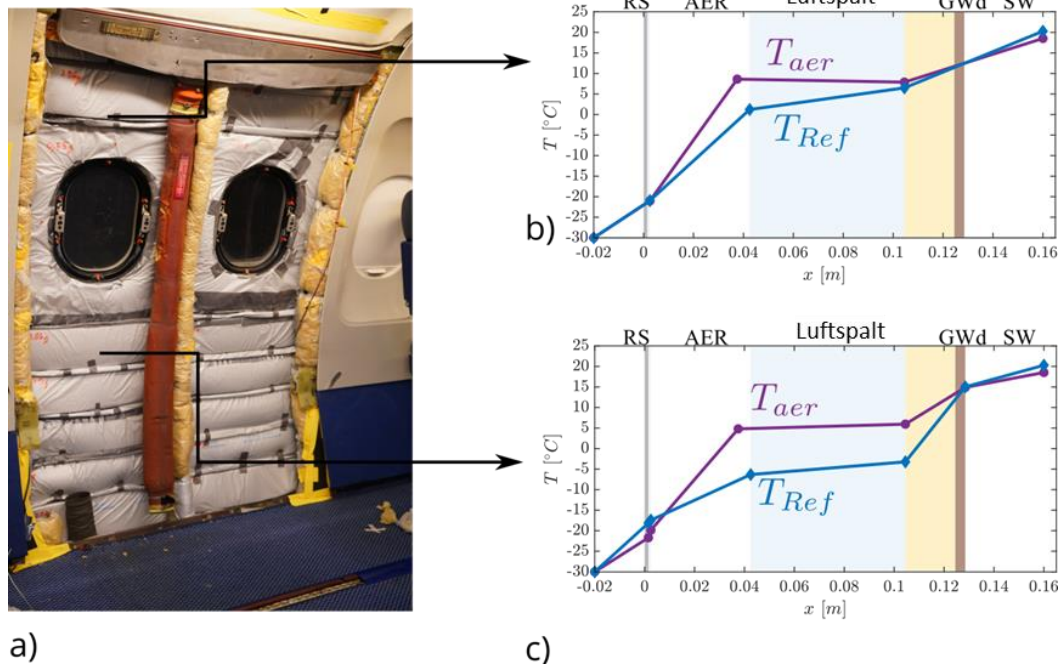


Abbildung 2.168: Messergebnisse zum Vergleich der Temperatur Profile zwischen Referenzwand mit Aerogel als Primärisolierung (Index: Aer) und konventionelle Referenzwand (Index: Ref). a) Foto des Messaufbaus ohne Seitenwandpaneel mit der Aerogel Primärisolierung im Blick; b) Temperaturprofile gemessen über dem Fenster; c) Temperaturprofile gemessen unter dem Fenster

B. Schwerpunkt Akustik

a. Ergebnisse Kabinenwand-Funktionsmuster

Die Messergebnisse zum Funktionsmuster beziehen sich auf den in AP5.1 aufgeführten Testplan. Die auf den in AP5.1 dokumentierten Zielsetzungen basierenden und ermittelten Messergebnisse des untersuchten Funktionsmusters werden in Abbildung 2.169 dargestellt.

In der Farbe Blau wird die Referenzmessung dargestellt, welche stellvertretend für eine zurzeit im Flugzeug, den Stand der Technik repräsentierende, eingebaute Kabinenwandkonfiguration steht und hier als Vergleichsobjekt gilt, dessen akustische Eigenschaften es mit dem Funktionsmuster mindestens zu erreichen bzw. zu übertreffen gilt. In der Farbe Rot werden in Abbildung 2.169 die Messergebnisse des Funktionsmusters visualisiert. Die Messergebnisse zeigen höhere Schalldämmmaßeigenschaften des Funktionsmusters gegenüber dem Referenz Wandaufbau ab ca. 400 Hz. Unter Berücksichtigung der Messergebnisse aus AP4.2, der Einzelkomponentenmessungen, von im Funktionsmuster eingebauten akustischen Metamaterialien und Helmholtz-Resonatoren lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Das akustische Metamaterial mit einer eingestellten Anti-Resonanzfrequenz bei ca. 212 Hz hat gegenüber dem Referenz Wandaufbau keinen signifikanten Mehrwert für die Gesamtschalldämmung. Ein möglicher Grund könnte in der vermuteten Dämmwirkung, der durch Spanten und Stringer versteiften Rumpfstruktur, liegen. Dieser vermutete Versteifungseffekt, auf dessen Wirken eine Steigung >18db/Oktave im Frequenzbereich <300 Hz hindeutet, könnte eine dominierendere Dämmwirkung als das akustische Metamaterial haben.
- Das akustische Metamaterial mit einer eingestellten Anti-Resonanzfrequenz bei ca. 400 Hz konnte zur Gesamtschalldämmmaßerhöhung gegenüber dem Referenz Wandaufbau beitragen.
- Die Wirkungen der akustischen Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken können im Bereich um die 500 Hz an einer Anhebung der Schalldämmmaßkurve gegenüber dem Referenz Wandaufbau erkannt werden. Zur Bestimmung des Anteils der Wirkung der Helmholtz-Resonatoren an der Gesamtschalldämmmaßerhöhung wurden in einer weiteren Messung, dargestellt in der Farbe Orange in Abbildung 2.169, die Helmholtz-Resonatoren deaktiviert. Die Messergebnisse zeigen, dass die Helmholtz-Resonatoren mit Biegebalken in den Messergebnissen einen signifikanten, breitbandigen Beitrag zur Gesamtschalldämmmaßerhöhung haben.

Das Funktionsmuster wurde um ca. $3,6 \text{ kg/m}^2$ schwerer als der Referenz-Wandaufbau. Anhand der Messergebnisse *Funktionsmuster ohne HR* in Abbildung 2.169 kann jedoch, aufgrund der nahezu übereinstimmenden Schalldämmmaßkurven, außerhalb des Wirkungsbereichs des akustischen Metamaterials bei ca. 400Hz, erkannt werden, dass durch den Massezuwachs kein nennenswerter Schalldämmmaßzuwachs zu erkennen ist. Aus dieser Erkenntnis wird abgeleitet, dass die Erhöhung des Gesamtschalldämmmaßes des Funktionsmusters (Rot) auf die Resonanzeffekte eingebauter Schallisolationsmaßnahmen zurückzuführen sind. Darüber hinaus zeigen Erkenntnisse aus den im Verlauf des Abschlussberichts aufgeführten Messergebnissen des Prototyps, dass ein möglicher Einfluss einer Masse Erhöhung sich im Wesentlichen im Frequenzbereich < 300 Hz, beim Kabinenwand-Prototyp, auswirkt. Im Resultat konnte in einem ersten Versuch mit dem Funktionsmuster eine breitbandigere Schalldämmmaßerhöhung erreicht werden, welche allerdings noch keine Steigerung von bis +5 dB, wie es in der Zielsetzung dieses Projekts angestrebt wurde, erreicht.

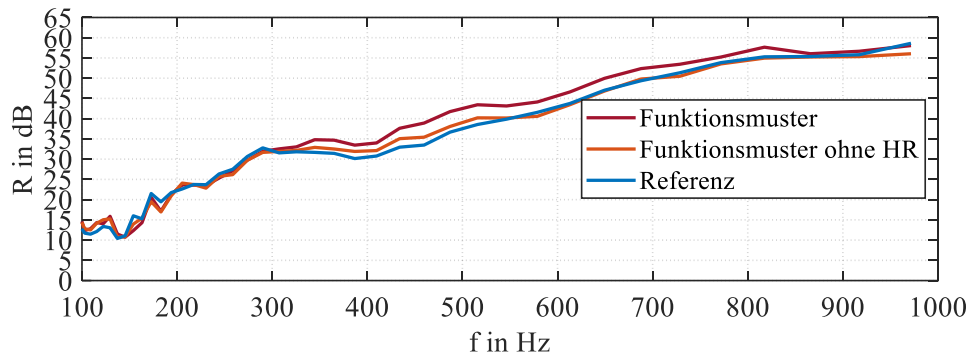


Abbildung 2.169: Messergebnisse aus Schalldämmmaßmessungen am Funktionsmuster (AP5.1 – Testplan Funktionsmuster Versuch Nr.1), sowie am Funktionsmuster mit deaktivierten Helmholtz-Resonatoren und Referenz Wandaufbau (AP5.1 – Testplan Funktionsmuster Versuch Nr.4) (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

Messergebnisse unterschiedlicher Luftkanalpositionen innerhalb des Kabinenwand-Funktionsmusters mit Blick auf kritische Wandabstände der verwendeten akustischen Metamaterialien

Die Messergebnisse zur Bestimmung möglicher Auswirkungen auf das Gesamtschalldämmmaß sich unterscheidender Luftkanalpositionen im Zwischenraum des Funktionsmusters werden in Abbildung 2.170 gezeigt. Für einen übersichtlicheren Vergleich von numerischen Simulationsergebnissen aus AP1.2 und Ergebnissen aus Funktionsmustermessungen werden in Abbildung 2.170 zusätzlich die, bereits in Abbildung 2.47 vorgestellten, numerischen Ergebnisse erneut gezeigt.

Qualitativ zeigen die Messergebnisse der Varianten Luftkanal in Position 1 bzw. in Position 2 in der Kabinenwand die bereits numerisch abgeschätzten Zu- bzw. Abnahmen im Gesamtschalldämmmaß beider Varianten. Numerisch abgeschätzte Einflüsse der Luftkanalposition bzw. der akustischen Metamaterialien innerhalb der Kabinenwand auf das Gesamtschalldämmmaß konnten über Messungen nachgewiesen werden. Außerhalb der am effektivsten wirkenden Schalldämmbereiche der akustischen Metamaterialien, den Bereichen um deren ausgelegten Anti-Resonanzfrequenzen, zeigen die Messergebnisse nahezu gleiche Schalldämmmaßniveaus, also Bereiche $< \text{ca. } 150 \text{ Hz}$ bzw. $> \text{ca. } 450 \text{ Hz}$, sodass Messabweichungen durch Montageunsicherheiten beim Einbau des Funktionsmusters in das Messfenster des Akustiklabors vernachlässigt werden können.

Es konnte gezeigt werden, dass die Berücksichtigung von kritischen Wandabständen bei der Auslegung von akustischen Metamaterialien in einer Doppelwand notwendig und messtechnisch erfassbar sind.

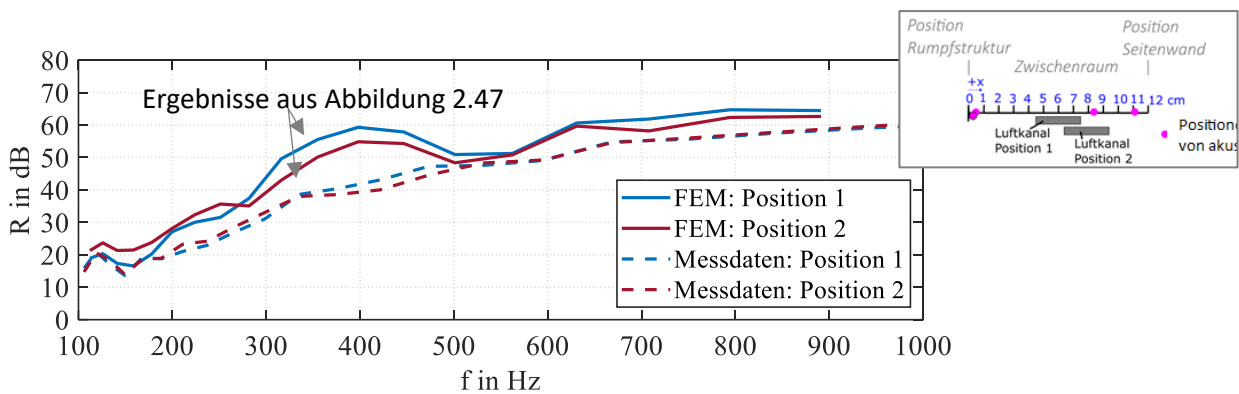


Abbildung 2.170: Messergebnisse aus Schalldämmmaßmessungen am Funktionsmuster bei unterschiedlichen Einbaupositionen des Luftkanals zur Darstellung des Einflusses kritischer Wandabstände der verwendeten Metamaterialien auf das Gesamtschalldämmmaß des Funktionsmusters (AP5.1 – Testplan Funktionsmuster)

Validierung des verwendeten numerischen Modells zur Berechnung der Schalldämmmaße des Kabinenwand-Funktionsmusters

Zum Eignungsnachweis des in AP1.2 eingeführten, vereinfachten akustischen Modells, als Auslegungsunterstützung des Funktionsmusters, werden in Abbildung 2.171 das numerisch bzw. messtechnisch ermittelte Einfügedämmmaß bestimmt und verglichen. Das Einfügedämmmaß beschreibt Erhöhungen bzw. Verringerungen von Schalldämmmaßeigenschaften, hier des Funktionsmusters, gegenüber einer Vergleichsgröße, hier einem Referenzwandaufbau. In Abbildung 2.171 sind am Beispiel des numerisch ermittelten Einfügedämmmaßes, bezeichnet mit FEM, die Wirkungen der akust. Metamaterialien bzw. der Helmholtz-Resonatoren an den Schalldämmmaßspitzen bei ca. 210 Hz, ca. 400 Hz bzw. ca. 600 Hz zu sehen. Im Wirkungsbereich bei ca. 210 Hz des einen akustischen Metamaterials ist in dem messtechnisch ermittelten Einfügedämmmaß kein nennenswerter Vorteil zu erkennen. Offensichtlich beschreibt das vereinfachte numerische Modell nicht alle in der Realität auftretenden Wirkungen auf das Schalldämmmaß wie z.B. die Steifigkeitseigenschaften stark verrippter Strukturen. Im Bereich des anderen akustischen Metamaterials, ca. 400 Hz, lässt sich eine leichte Verschiebung des Schalldämmmaßmaximums zu höheren Frequenzen erkennen, was möglicherweise mit undefinierten Verhältnissen des in der Funktionsmusterwand eingebauten Metamaterials begründet werden kann. Im umgesetzten Versuchsaufbau kam es zu einer Ausdehnung der Glaswollisoliertpakete und damit zu einer möglichen, nicht quantifizierbaren Flächenpressung auf die akustischen Metamaterialien. Eine Flächenpressung auf akustische Metamaterialien könnte zum einen den Schwingungsfreiheitsgrad der streifenförmigen Massen begrenzen, sowie zu einer Vorspannung der Folie der akustischen Metamaterialien und somit zu einer Frequenzverschiebung führen. Mögliche Einflüsse auf die Folien bzw. Membranspannung auf die Wirkung von akustischen Metamaterialien wurden von der HAW in (5) veröffentlicht.

Die Wirkung der Helmholtz-Resonatoren zeigt sich in dem gemessenen Einfügedämmmaß anhand einer Plateaubildung im Bereich ca. 600 Hz. Als Gesamtfazit lässt sich feststellen, dass mit einem vereinfachten Modell, das komplexere reale Bedingungen und Wirkungen wie Verspannungen, Reibung, Steifigkeiten inhomogener Strukturen etc. nicht erfasst, numerische Schalldämmcharakteristiken berechnet werden können, die im Bereich der Auslegungsfrequenzen der Schallisolationselemente quantitativ etwa in der Größenordnung gemessener Werte liegen. Bereiche außerhalb bzw. zwischen den Auslegungsfrequenzen zeigen etwas höhere gemessene Schalldämmmaße auf.

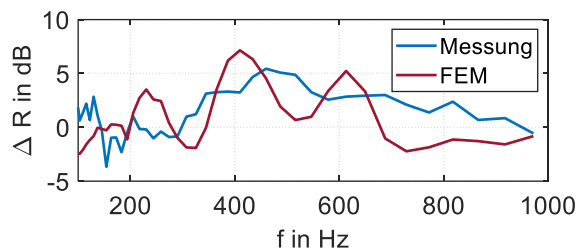


Abbildung 2.171: Vergleich der mit dem numerischen Modell für das Funktionsmusters berechneten Schalldämmmaße mit entsprechenden Messdaten, die als Einfügeschalldämmmaße umgerechnet und dargestellt sind. Darstellung in 1/12-Oktavspektren

b. Ergebnisse Kabinenwand-Prototyp

Die Messergebnisse zum Prototypen beziehen sich auf den in AP5.1 Tabelle 2.44 aufgeführten Testplänen.

Messergebnisse zum Schalldämmmaß des in die Kabine des A320-Rumpfabschnitts der Klima-Akustikkammer eingebauten Kabinenwand-Prototyps

Vorstudie: Auswirkungen der A320 Kabinenfenster auf das Gesamtschalldämmmaß der Kabinenwand

In einer Vorstudie für die Auslegung des Prototyps wurden die Auswirkungen eines Flugzeugkabinenfensters auf das Gesamtschalldämmmaß der originalen Kabinenwand des A320-Rumpfabschnitts in der Klima-Akustikkammer untersucht. In Abbildung 2.172 werden die Messergebnisse für einen herkömmlichen Kabinenwandaufbau mit Standard-Fensterkonfiguration im Vergleich zu den Ergebnissen aus einer zweiten Messung, bei der die Fenster mit einer Schwergummiplatte abgedeckt waren, dargestellt. Die Messergebnisse in Abbildung 2.172 zeigen, dass die Fenster einer A320-Kabine etwa ab einer Frequenz >800 Hz akustisch transparent werden.

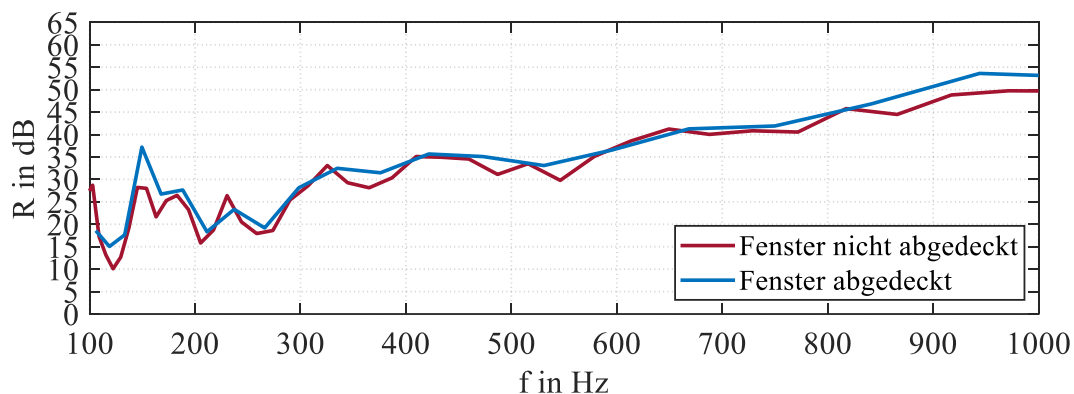


Abbildung 2.172: Schalldämmmaße der originalen Kabinenwand des A320-Rumpfabschnitts in der Klima-Akustikkammer mit und ohne Schalltransmission durch die Kabinenfenster. (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

Messergebnisse Kabinenwand-Prototyp

In Abbildung 2.173 werden die gemessenen Ergebnisse zu den Versuchen Nr. 1 (Prototyp) bzw. Nr. 2 (Referenz) aus dem Testplan Tabelle 2.44 aus AP5.1. aufgeführt.

Die Messergebnisse in Abbildung 2.173, die in dem A320-Rumpfabschnitt der Klima-Akustikkammer gewonnen wurden, zeigen, dass mit dem ausgelegten Prototyp, in einem breitbandigen Frequenzspektrum von ca. 450 Hz bis ca. 950 Hz, eine Schalldämmmaßerhöhung gegenüber einem Referenzwandaufbau erreicht werden konnte. Im genannten Frequenzbereich konnte eine frequenzabhängige Schalldämmmaßerhöhung von bis zu 5 dB erreicht werden. Im Frequenzbereich <400 Hz konnten trotz der Verringerung der Glaswollisolierungsschichtdicke im Kabinenwand-Prototyp gegenüber dem Referenzwandaufbau gleichwertige Schalldämmmaße erreicht werden.

Die Schalldämmeigenschaften des Kabinenwand-Prototyps wurden ein zweites Mal im Akustiklabor vermessen, wo Schallnebenwege im Vergleich zum Einbaumfeld der A320-Kabine in der Klima-Akustikkammer noch deutlich stärker vermieden werden können.

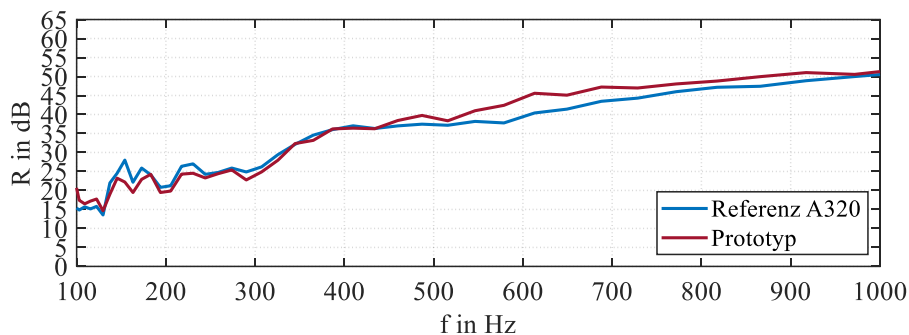


Abbildung 2.173: Gemessene Schalldämmmaße des Kabinenwand-Prototyps im Vergleich zum A320-Referenzwandaufbau der A320-Kabine in der Klima-Akustikkammer (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

Messergebnisse zum Schalldämmmaß des im Akustiklabor eingebauten Kabinenwand-Prototyps

In Abbildung 2.174 werden die Messergebnisse des Prototyps aus dem in AP5.1 in Tabelle 2.44 beschriebenen Testplan gezeigt.

Die Ergebnisse in Abbildung 2.174 zeigen, dass mit dem Prototyp im Frequenzbereich 400 Hz bis 1000 Hz eine breitbandige Schalldämmmaßerhöhung gegenüber einem, dem Stand der Technik entsprechenden, Referenzwandaufbau erreicht werden konnte. Im Vergleich zu den zuvor gewonnenen Messergebnissen des Prototyps, eingebaut in der A320-Kabine der Klima-Akustikkammer (Abbildung 2.173), konnte im Akustiklabor aufgrund besser kontrollierbarer Schallnebenwege in einem deutlich breitbandigeren Bereich eine Schalldämmmaßerhöhung bis zu 5 dB gemessen werden. Darüber hinaus ist den Messergebnissen in Abbildung 2.174 zu entnehmen, dass der Prototyp auch im Frequenzbereich der beginnenden Schalldurchlässigkeit der Flugzeugfenster ab ca. 800 Hz, vgl. mit Abbildung 2.172 bzw. Abbildung 2.175, eine höhere Schalldämmung bewirkt.

Im Frequenzbereich <400 Hz erreichte der Kabinenwand-Prototyp trotz Entnahme von einer Glaswollisolierschicht eine zum Referenzwandaufbau vergleichbare Schalldämmung, so wie es analog auch schon beim Funktionsmuster im Vergleich zu seiner Referenz festgestellt werden konnte.

Der Kabinenwand-Prototyp ist gegenüber einem Referenzwandaufbau um ca. 2,6 kg/m² schwerer geworden. Zur Bewertung des Einflusses der zusätzlich eingebrachten Masse auf sein Gesamtschalldämmmaß sind in Abbildung 2.174 zum Vergleich die gemessenen Schalldämmmaße eines massenäquivalenten Referenzwandaufbaus, bei dem eine entsprechende Menge von Einzelmassen zusätzlich auf das Seitenwandpaneel aufgebracht wurden, dargestellt. Die Messergebnisse zeigen, dass der masseäquivalente

Referenzwandaufbau im Frequenzbereich 200 - 350 Hz erhöhte Schalldämmmaßwerte gegenüber Prototyp und Standard-Referenz aufweist. Im Frequenzbereich, für den die Schallisolationselemente ausgelegt wurden, übersteigen die gemessenen Schalldämmmaße des Prototyps die Messergebnisse der massenäquivalenten Referenz. Es zeigt sich, dass ein Einsatz von resonanten, wohl dimensionierten Schallisolationselementen in einer Flugzeugkabinenwand dort im gewählten Frequenzbereich im Vergleich mit einer Kabinenwand äquivalenter Massebelegung zu einer deutlich höheren Schalldämmung führt.

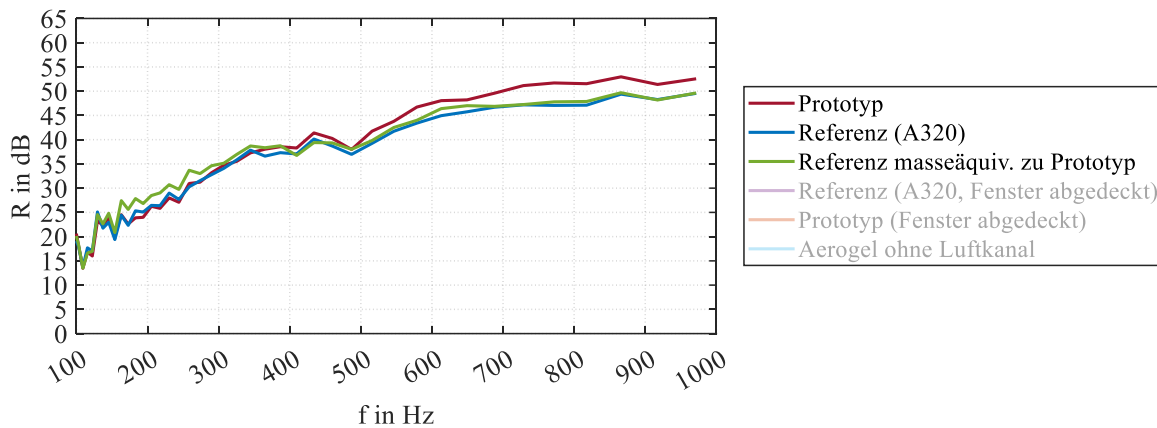


Abbildung 2.174: Schalldämmmaße des im Akustiklabor vermessenen Kabinewand-Prototyps (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

Im Folgenden werden die im Akustiklabor gewonnenen Erkenntnisse über die Einflüsse der Kabinenfenster einer A320-Seitenwand auf dessen Schalldämmmaß diskutiert. Die A320-Seitenwand wurde dafür sowohl in Referenz- als auch in Prototypkonfiguration aufgebaut. Die Ergebnisse der Schalldämmmaßmessungen für die A320-Seitenwand in Referenzkonfiguration mit akustisch wirksamen Fenstern (blaue Kurve) und Fenstern, die mit Steinwolle und Schwergummiplatten abgedeckt wurden (violette Kurve), sind in Abbildung 2.175 aufgeführt. Der Vergleich der gemessenen Schalldämmmaßkurven in Abbildung 2.175 zeigt, dass das Fenster in diesem Versuchsaufbau bereits ab einer Frequenz ca. 650 Hz akustisch transparent wird. Im Frequenzbereich um 500 Hz bricht das gemessene Schalldämmmaß des Referenzwandaufbaus mit abgedeckten Fenstern (violette Kurve) weniger stark ein, als das entsprechende Schalldämmmaß des gleichen Referenzwandaufbaus, bei dem die Fenster nicht abgedeckt sind (blaue Kurve). Die Ursache für den Einbruch bei 500 Hz konnte aus Zeitgründen nicht abschließend nachgewiesen werden. Denkbar ist jedoch, dass der im Akustiklabor verwendete A320-Rumpfstrukturausschnitt mit seinen mechanischen Eigenschaften im Fensterbereich sich etwas von dem A320-Rumpfabschnitt in der Klima-Akustikkammer unterscheiden könnte. Dafür spricht, dass bei einer Vergleichsmessung in der A320-Kabine der Klima-Akustikkammer (Abbildung 2.172 und 2.173, Referenzwandaufbau), dieser Schalldämmeinbruch bei ca. 500 Hz nicht zu sehen ist und dass, wie zuvor schon beschrieben, unterschiedliche Grenzfrequenzen für die akustische Transparenz der Fenster beim Vergleich der Messergebnisse beider Wandstrukturen auftraten (Akustiklabor: > 650 Hz, Klima-Akustikkammer: > 800 Hz).

In Abbildung 2.175 zeigt sich im Frequenzbereich <300 Hz eine höhere Schalldämmung des Versuchsaufbaus mit abgedeckten Fenstern. Diese Erhöhung ist auf die Masse der Fensterabdeckung zurückzuführen, welche sich aus Steinwolle und Schwergummimaterial zusammensetzt.

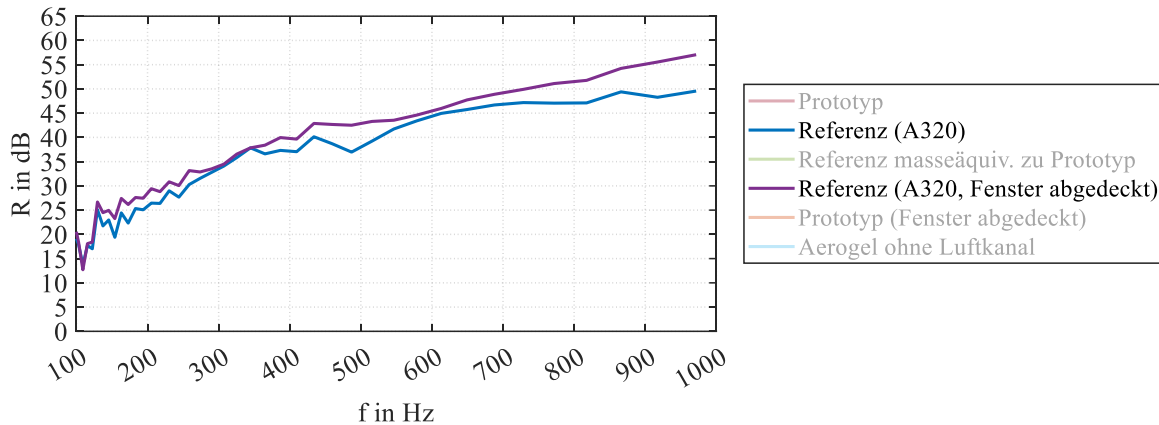


Abbildung 2.175: Messergebnisse zur Untersuchung des Einflusses der Fenster auf das Gesamtschalldämmmaß bei einer, dem Stand der Technik entsprechenden, im Akustiklabor aufgebauten Flugzeugwand (Referenz) (Darstellung in 1/12-Oktavspektren)

Zur Potenzialabschätzung einer zusätzlichen Schallisolation bei dem Kabinenwand-Prototyp, wenn, wie im Kapitel zu AP1.1 (vgl. Abbildung 2.9) vorgeschlagenen, der Flugzeugrumpf fensterlos gebaut werden würde und in der Kabine für den Blick nach außen Livebild-Fenstermonitore eingesetzt würden, wurden Schalltransmissionsmessungen am Kabinenwandprototyp durchgeführt, bei dem die Fenster mit Schwergummiplatten und Steinwolle abgedeckt waren. Die Messergebnisse werden in Abbildung 2.176 zusammen mit den bereits in Abbildung 2.174 beschriebenen Messergebnissen des Prototyps bzw. des zum Prototyp massenäquivalenten Referenzwandaufbaus in Relation gesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass für den experimentell dargestellten Fall einer fensterlosen Kabinenwand mit integriertem Luftkanal bei einer Frequenz von ca. 1000 Hz eine Schalldämmmaßerhöhung bis zu >10 dB gegenüber einem Referenzwandaufbau möglich wären.

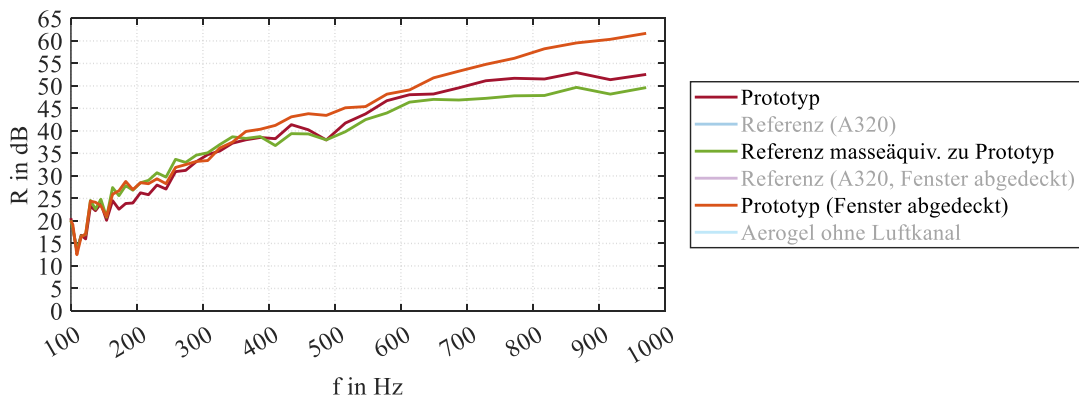


Abbildung 2.176: Messergebnisse zur Abschätzung des Schalldämpfpotentials eines Kabinenwandaufbaus mit Luftkanal (Prototyp) mit bzw. ohne Fenster

In

Abbildung 2.177 wird die Wirkung von Aerogelmaterialien aus der Herstellung des Projektpartners DLR analysiert, die in eine A320-Kabinenwand eines standardgemäßen Wandaufbaus integriert wurden. Die in herkömmlichen Kabinenwandaufbauten verwendete Primärisolierung aus Glaswolle wurde dabei durch eine thermisch äquivalent wirkende dünnere Aerogelschicht ersetzt. Aus den Messergebnissen in

Abbildung 2.177 ist zu entnehmen, dass mit dem neuartigen Isolationsmaterial aus Aerogel tendenziell gleichwertige und in bestimmten Frequenzbereichen erhöhte Schalldämmeigenschaften im Vergleich zu einem herkömmlichen Kabinenwandaufbau mit Glaswollisolierung erreicht werden konnten. Sehr schmalbandig ergeben sich Schalldämmmaßvorteile, z.B. bei ca. 600 Hz und 800 Hz, gegenüber den entsprechenden Werten aus einer Messung eines Kabinen-Referenzwandaufbaus. Der Kabinenwandaufbau mit Aerogelmaterialien wurde allerdings um ca. 4 kg/m^2 schwerer als der Referenzwandaufbau mit

Glaswolle. Als Erkenntnis lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass die verwendeten neuartigen Aerogelmaterialien, die gegenüber einer herkömmlichen Glaswollisolation nur in einigen Frequenzbereichen eine Schalldämmmaßerhöhung bewirken und sonst etwa akustisch gleichwertig sind, für einen großflächigen Einsatz für eine Kabinenwandisolation aufgrund des damit verbundenen erheblichen Massezuwachses nicht attraktiv genug erscheinen. Die schallisolierenden Eigenschaften des Kabinenwand-Prototyps ohne Aerogel mit deutlich geringer Flächenmasse sind der Aerogelisolierung überlegen. Denkbar wäre, Aerogelisoliermaterialien ggf. in besonders platzkritischen, kleineren Bereichen, wie z.B. im Fensterbereich einzusetzen, weil deren thermische Isolierung im Vergleich zur Glaswolle wirksamer ist und damit Bauraum eingespart werden könnte.

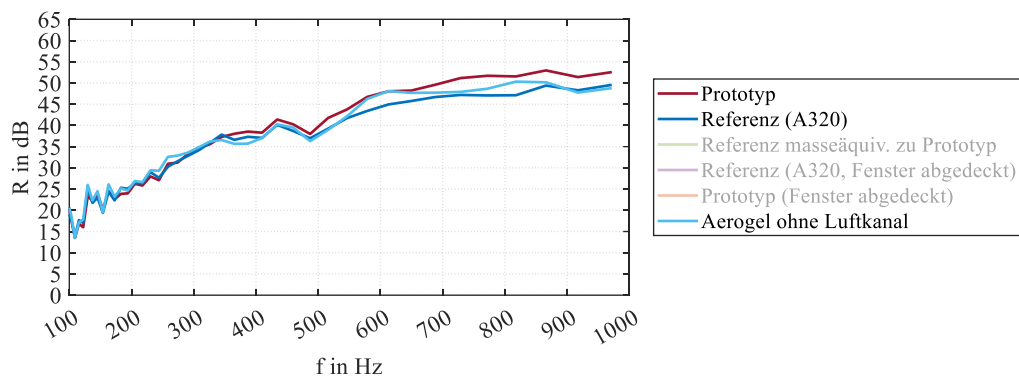


Abbildung 2.177: Experimentell ermittelte Schalldämmmaße verschiedener Kabinenwandkonfigurationen zum Vergleich der akustischen Isolierfähigkeit von Aerogel als Primärisoliermaterial:

Kabinenwand-Prototyp mit Luftkanal und Glaswollisolation (rote Kurve)

Referenz-Wandaufbau mit Glaswoll-Primärisolierung (dunkelblaue Kurve)

Referenz-Wandaufbau mit Aerogel-Primärisolierung anstelle von Glaswolle (hellblaue Kurve)

2.4 Ausblick und Potentiale

Nachdem in diesem Vorhaben nachgewiesen wurde, dass die dem heutigen Stand der Technik entsprechende Kabinenwandisolation für Verkehrsflugzeuge mit Hilfe eines multifunktionalen Luftkanals in Bezug auf eine niederfrequente Schallisolation < 1000 Hz und geringere Feuchtekondensation/Eisbildung innerhalb der Kabinenwand deutlich verbessert werden kann, müssen noch weitere Entwicklungsschritte unternommen werden, um den bisher erreichten Technologiereifegrad 5 zu höheren Reifegraden zu führen. Folgende Kerngebiete sind dabei zu bearbeiten:

1. *Weitere Gewichtsreduktion des Luftkanals*

Bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens konnten nur relativ niederschwellig verfügbare Materialien und für eine Hochschule umsetzbare Fertigungsverfahren eingesetzt werden, die aber mit Blick auf eine bestmögliche Leichtgewichtigkeit noch Wünsche und Möglichkeiten offen ließen, die mit industriellen Mitteln aber durchaus erfüllbar erscheinen:

- a. Einsatz von akustischen Metamaterialien mit Punktmassen und kleinen Einheitszellen.
Hierfür wird ein Fertigungsverfahren benötigt, um eine nicht unerhebliche Vielzahl von kleinräumigen Massen („Punktmassen“) in überschaubar kurzer Zeit auf eine Trägerfolie aufzubringen.
- b. Leichtbaumaterialien für Helmholtz-Resonatoren.
Insbesondere die für die additive Fertigung verfügbaren Materialien könnten durch leichtere ersetzt werden.

2. *Entwicklung von Fertigungsverfahren für eine kostengünstige Produktion*

- a. Akustische Metamaterialien
- b. Helmholtz-Biegebalken-Resonatoren, Helmholtz-Resonatoren
- c. Fügetechniken für den Zusammenbau des Luftkanals
- d. Einbautechniken für eine Integration des Luftkanals in eine Flugzeugseitenwand
- e. Luftführungsadapter für eine Zuluft-Verbindung klimatisierter Luft in den Luftkanal
- f. Luftkanalverzweigungen
- g. Kabinenluftauslässe einschließlich Strömungsblenden

3. *Verwendung/Entwicklung von Materialien, die allen Anforderungen für den Einbau in ein Flugzeug genügen.*

Hierbei sollen die Materialien insbesondere feuerfest bzw. schwer entflammbar und selbstverlöschend sein und dabei keine toxischen Gase emittieren. Darüber hinaus sollen die Materialien für erforderliche industrielle Produktionsverfahren geeignet sein (Halbzeugfertigung, Fügeverfahren, um z.B. bei akust. Metamaterialien Punktmassen auf Trägerfolien zu applizieren).

- a. Wasserdampfdurchlässige und wasserdampfundurchlässige Folien als Träger für akustische Metamaterialien
- b. Materialien für Punktmassen
- c. Leichtbaumaterialien für Helmholtz-Resonatoren, die z.B. für additive Fertigungsverfahren geeignet sind

4. *Anpassung von Systemarchitekturen, um den erforderlichen Einbauraum für den Luftkanal in der Kabinenwand zu gewährleisten*

Gemäß der Arbeitsergebnisse von AP 1.1 sollten die dargestellten Vorschläge zur Anpassung der Systemarchitekturen, die gegenwärtig zum Teil einen Bauraum im Bereich der Kabinenseitenwand beanspruchen, weiterentwickelt werden.

3. Veröffentlichungen

- DAGA 2023, Hamburg
05.-09. März 2023**
- **C.Wischmann, D.Usai, W.Gleine**, *Mögliche Potentiale mikroperforierter Absorber in einer neuartigen Flugzeugkabinenwand*, DAGA 2023, Hamburg, 05.-09. März 2023
 - **D.Usai, C.Wischmann, W.Gleine**, *Hygrothermische Isolationseigenschaften einer neuartigen Flugzeugkabinenwand mit akustischen Schallreduktionselementen*, DAGA 2023, Hamburg, 05.-09. März 2023
 - **W.Gleine, F.Langfeldt, H.Hoppen, C.Wischmann**, *Resonante Schallminderungselemente und Einbaukonzepte für eine niederfrequente, breitbandige und leichtgewichtige Schallisolation in zukünftigen Flugzeugkabinenwänden*, DAGA 2023, Hamburg, 05.-09. März 2023
- DAGA 2024, Hannover
18.-22. März 2024**
- **Christiane Gillner, Boris Dilba, Christian Wischmann, Daniele Usai, Wolfgang Gleine, Adam Dzierbinski, Pascal Vöpel, Kai Steffens, Danny Bialuschweski, Barabara Milow, Sören Keuchel, Olgierd Zaleski**, *Numerische Untersuchung eines neuartigen Kabinenwandkonzeptes*, DAGA 2024, Hannover, March 18-21 (2024)

4. Literaturverzeichnis

1. **Langfeldt, F., Gleine, W. und Estorff, O. von.** *Analytical model for low-frequency transmission loss calculation of membranes loaded with arbitrarily shaped masses.* s.l. : Journal of Sound and Vibration, 2015. S. pages 315-329. Bd. Volume 349.
2. **Langfeldt, F., Gleine, W. und Estorff, O. von.** *Low-frequency noise protector concepts for aircraft with counter-rotating open rotor engines.* Feb. 24th-25th Hamburg, Germany 2015 : s.n., AST 2015.
3. —. *Untersuchung von akustischen Membran-Metamaterialien mit einstellbaren akustischen Eigenschaften.* Nürnberg, Germany : DAGA 2015, March 16th-19th 2015.
4. **Langfeldt, F., et al.** *Noise-shield with membrane-type metamaterials for low-frequency sound insulation. Part I: Analytical investigation of the multi-layered assembly.* Oldenburg, Germany : DAGA 2014, March 10th-13th 2014.
5. **Langfeldt, F., et al.** *A membran-type acoustic metamaterial with adjustable acoustic properties.* s.l. : Journal of Sound and Vibration 373, (2016) 1-18.
6. **Langfeldt, F., et al.** *Perforated membran-type acoustic metamaterials.* S. 1457-1462. physics letters A381 (2017).
7. **Peiffer, A., Grünewald, M. und Lempereur, P.** *Comment on A lightweight yet sound-proof honeycomb acoustic metamaterial.* Appl. Phys. Lett. 106 (2015) 171905; Appl. Phys. Lett. 107 (2015) 216101.
8. **Hoppen, Hannah, et al.** *Gekoppelter Helmholtz-Resonator mit schwingfähigem mechanischem Resonator.* DAGA 2019 Rostock. 18.-21. März 2019.
9. **Langfeldt, F. und Gleine, W.** *Improved sound transmission loss of glass wool with acoustic metamaterials, 26rd International Congress on Sound and Vibration.* Montreal : s.n., 07.-11. July 2019.
10. **Hoppen, H., et al.** *Aircraft side wall with improved low-frequency sound insulation using a lining panel with Helmholtz resonators, 26rd International Congress on Sound and Vibration.* Montreal : s.n., 7.-11. July 2019.
11. **Langfeldt, Felix und Gleine, Wolfgang.** *Design of acoustic partitions with thin plate-like acoustic metamaterials, 23rd International Congress on Acoustics.* Aachen, Germany : Deutsche Gesellschaft für Akustik, 9.-13. Sept. 2019. S. 4892-4899.
12. **Ischdonat, N., et al.** *Possibilities and chances for integrations of functionalities into cabin lining components based on sandwich panels with polycyanurate matrix and nap-cores.* Hamburg : International Workshop on Aircraft System Technologies, 2015. AST 2015.
13. **Agency, European Union Aviation Safety.** *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS-25.* 15 December 2020.
14. **Schmidt, Dietrich und Jóhannesson, Gudni.** *Model for the Thermal Performance of a Double Air Gap Wall Construction.* s.l. : Nordic Journal of Building Physics Vol. 2, 2001.
15. **GmbH, COMSOL Multiphysics.** *Heat Transfer Module User's Guide.* 2021.
16. **GmbH Hutchinson Aerospace.** *Patent DE 10 2015 121 877 A1.*
17. **Wörner, Mario.** *Wärme- und Stofftransport in einer Flugzeugkabine unter besonderer Berücksichtigung des Feuchtetransportes.* Technischen Universität Hamburg-Harburg : s.n., 2006.

18. **Joos, Andreas.** *Untersuchungen des mit Phasenwechsel verbundenen instationären Transports von Wasser in Isolierungen.* Technischen Universität Hamburg-Harburg : s.n., 2011.
19. **12572, DIN EN ISO.** *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Verfahren mit einem Prüfgefäß.*
20. **Langfeldt, Felix und Gleine, Wolfgang.** *Plate-type acoustic metamaterials with strip masses.* s.l. : Journal of the Acoustical Society of America , 2021. S. 3727-3738. Bd. 149.
21. **GmbH, Comsol Multiphysics.** *Acoustics Module User's Guide.* [Online] Comsol. [Zitat vom:] <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.aco/AcousticsModuleUsersGuide.pdf>.
22. **3A Composites GmbH.** [Online] [Zitat vom:] <https://www.display.3acomposites.com/de/forex.html>.
23. **Hoppen, Hannah und Gleine, Wolfgang.** *Abschlussbericht für das LuFo V-2 Vorhaben Flight-LAB Flugtest im Labor.* s.l. : Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2020.
24. **Hoppen, Hannah, et al.** *Helmholtz resonator with two resonance frequencies by coupling with a mechanical resonator.* s.l. : Journal of Sound and Vibration, 2023. Bd. 559.
25. —. *Optimierung eines Helmholtz-Resonators mit integriertem Biegebalken für Anwendung in Doppelwänden.* Hannover : Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2020. S. 1055-1058.
26. **Wischmann, Christian, Gleine, Wolfgang und Usai, Daniele.** *Mögliche Potentiale mikroperforierter Absorber in einer neuartigen Flugzeugkabinenwand.* s.l. : Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., DAGA 2023. Bd. 49. Jahrestagung für Akustik.
27. **Langfeldt, Felix und Gleine, Wolfgang.** *Plate-type acoustic metamaterials with strip masses.* [Hrsg.] Acoustical Society of America JASA. 02. 06 2021, Journal of the Acoustic Society of America 149(6), June 2021, S. 3727-3738. <https://doi.org/10.1121/10.0005112>.
28. **Liu, Z., et al.** *Acoustic properties of multilayer sound absorbers with a 3D printed micro-perforated panel.* s.l. : Journal Applied Acoustics, 2017. S. 25-32. Bd. Volume 121.
29. **Sakagami, K., Morimoto, M. und Yairi, M.** *A note on the effect of vibration of a microperforated panel on its sound absorption characteristics.* s.l. : Journal Acoustical Science and Technology 26, 2005. S. 204-207.
30. **Langfeldt, Felix, Hoppen, Hannah und Gleine, Wolfgang.** *Resonance frequencies and sound absorption of Helmholtz resonators with multiple necks.* *Applied Acoustics* 145 (2019) 314-319. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.10.021>, 0003-682X 2018 Elsevier Ltd..
31. **Scheffel, Jan.** *Industrielle Fertigung eines Erstmusters eines akustischen Metamaterials mit Streifenmassen.* 2023. SG PPL Biolink GmbH, Brunnenweg 38, 83666 Waakirchen.
32. **Langfeldt, F., Hoppen, H. und Gleine, W.** *Broadband low-frequency sound transmission loss improvement of double walls with Helmholtz resonators.* s.l. : Journal of Sound and Vibration, 2020. Bd. 476 (2020) 115309. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115309>.
33. **Langfeldt, F. und Gleine, W.** *Tieffrequente Luftschalldämmung mit akustischen Membran-Metamaterialien.* München : DAGA 2018, 19.-22. März 2018.
34. —. *Ein Konzept für eine Doppelwand mit reduzierter Luftschichtsteifigkeit.* München : DAGA 2018, 19.-22. März 2018.
35. **Hoppen, H., Gleine, W. und Estorff, O. von.** *Verbesserte tieffrequente Absorptionseigenschaften von strukturierten Glaswollisolierungen.* München : DAGA 2018, 19.-22. März 2018.

36. **Langfeldt, F., et al.** *Akustische Eigenschaften von durchlochten Membran-Metamaterialien*. Kiel : DAGA 2017, 06.-09. März 2017.
37. **Hoppen, H., Gleine, W. und Estorff, O. von.** *Untersuchungen zur Verbesserung der akustischen Eigenschaften im tieferen Frequenzbereich von Glaswollpaketen für Flugzeugkabinenisolierungen*. Kiel : DAGA 2017, 06.-09. März 2017.
38. **Langfeldt, F. und Gleine, W.** *Einfluss von Nebenwegen auf die Schalldämmung von akustischen Metamaterialien*. Rostock : DAGA 2019, 18.-21. März 2019.
39. **Langfeldt, F., et al.** *A membran-type acoustic metamaterial with adjustable acoustic properties*. s.l. : Journal of Sound and Vibration, 2016. Bde. 373 (2016) 1-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.03.025>.

Anhang A. Ergänzende Angaben zu angewandte Testverfahren aus AP5.1

Schalldämmmaßmessungen

Schalldämmmaßmessungen wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 15186-1 durchgeführt. Eine Prinzipskizze des Messaufbaus wird in Abbildung 4.1 gezeigt.

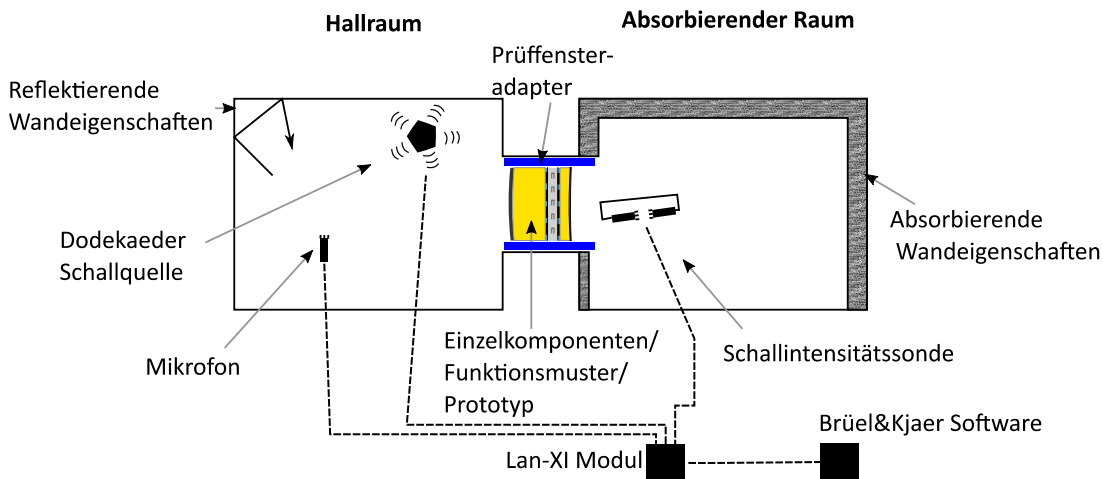


Abbildung 4.1: Prinzipskizze zur Schalldämmmaßmessung

Impedanzrohrmessungen

Impedanzrohrmessungen wurden nach der ASTM E2611-09 bzw. DIN EN ISO 10534 durchgeführt. Ein Schema vom Versuchsaufbau wird in Abbildung 4.2 gegeben.

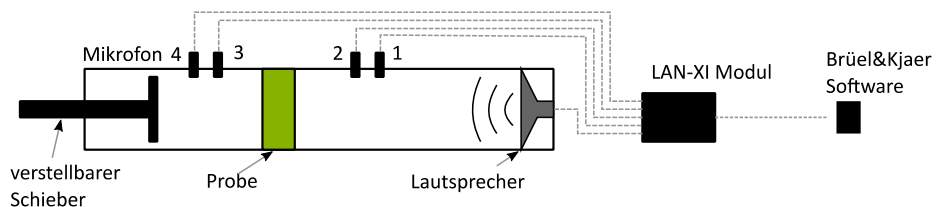


Abbildung 4.2: Versuchsaufbau für Impedanzrohrmessungen

Messung von Strömungswiderständen

In Abbildung 4.3 wird das verwendete Messgerät zur Bestimmung von Strömungswiderständen in porösen Materialien, wie z.B. Glaswolle, gezeigt.

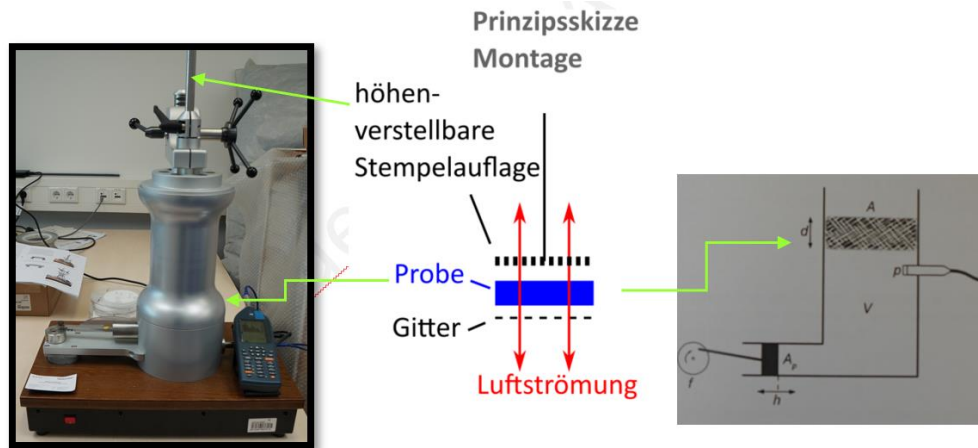


Abbildung 4.3: Darstellung des verwendeten Messgeräts zur Bestimmung von Luftströmungswiderständen durch poröse Materialien

Versuchsaufbau zur detaillierten Messung von Oberflächentemperaturen an Bauteilen und Funktionsmuster

In Abbildung 4.4 ist der verwendete Versuchsaufbau zur detaillierten Messung der Oberflächentemperaturen einer Rumpfstruktur dargestellt, die mit ihrer Außenseite in thermischem Kontakt mit temperierter Luft in der Klima-Akustikkammer steht und in das Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer eingebaut wurde. Analoge Messungen wurden auch mit vollständigen Kabinenwandaufbauten (Funktionsmuster) durchgeführt.

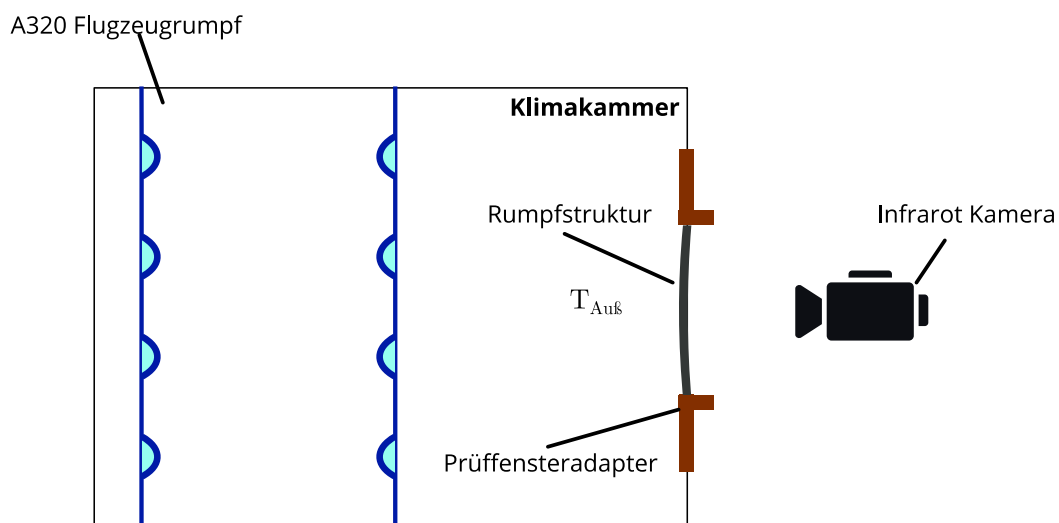


Abbildung 4.4: Schema des Versuchsaufbaus zur Messung von detaillierten Oberflächentemperaturen an der Innenseite einer Rumpfstruktur

Versuchsaufbau für hygrothermische Messungen an einem Kabinenwand-Funktionsmuster

In

Abbildung 4.5 ist der Versuchsaufbau zur Bestimmung von hygrothermischen Eigenschaften innerhalb der Wandstruktur des Kabinenwand-Funktionsmusters dargestellt. Zur Simulation der in einem Reiseflug herrschenden typischen Temperaturbedingungen an der Außenwand eines Flugzeugrumpfes wurde der Innenraum der Klima-Akustikkammer auf -30°C abgekühlt. Das in dem Transmissionsfenster der Klima-Akustikkammer eingebaute Kabinenwand-Funktionsmuster, dessen außenseitige Rumpfstruktur in thermischem Kontakt mit dem Klimakammer-Innenraum gebracht wurde, stand an seiner Innenseite (Kabinenwandpaneel) in Kontakt mit einem einstellbaren Kabinenklima, das in einer abgeschlossenen Umgebung (selbstgebauter Kabinensimulationskasten) durch eine Heizung oder Luftbefeuchtung realisiert werden konnte. Eine durch ein Klimaaggregat der Klima-Akustikkammer einstellbare konditionierte Luftströmung, die durch den im Kabinenwand-Funktionsmuster eingebauten Luftkanal floss, simulierte während der hygrothermischen Messungen den Betrieb des Luftverteilungssystems einer Flugzeugklimaanlage.

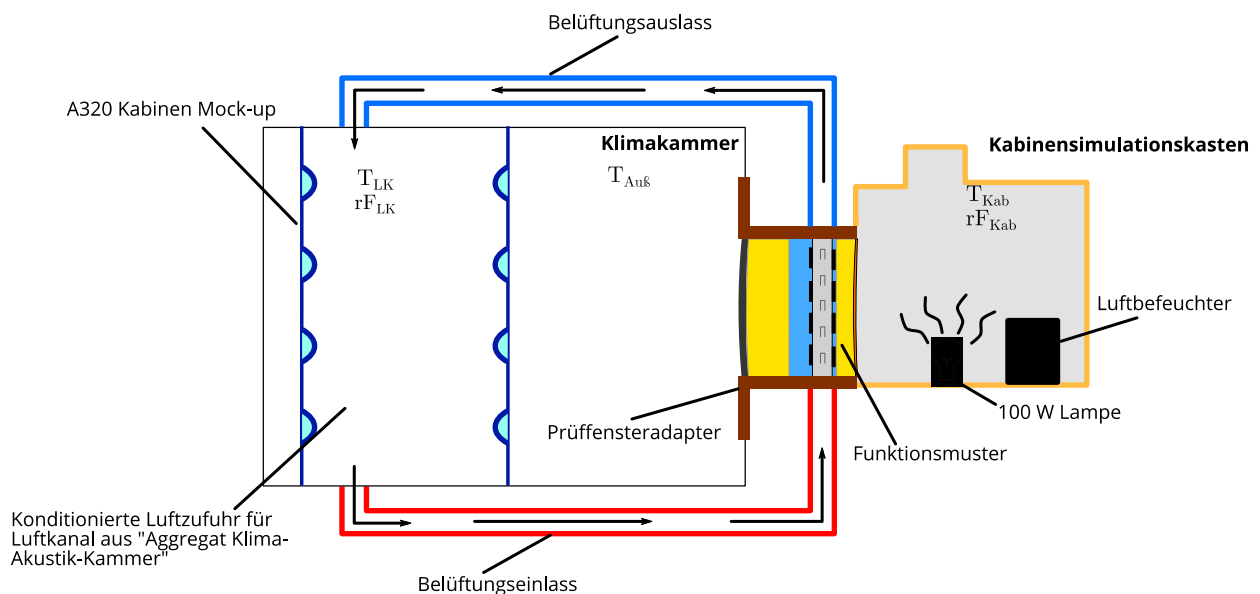


Abbildung 4.5: Messaufbau zur hygrothermischen Charakterisierung des Kabinenwand-Funktionsmusters

Versuchsaufbau zur hygrothermischen Charakterisierung des Kabinenwand-Prototyps

Abbildung 4.6 ist der Versuchsaufbau zur hygrothermischen Charakterisierung des Kabinenwand-Prototyps dargestellt. Der Kabinenwand-Prototyp wurde in die Kabinenwand des A320-Rumpfabschnitts der Klima-Akustikkammer eingebaut.

Für hygrothermische Messungen konnten realitätsnahe thermische Bedingungen und zugehörige Feuchteparameter entsprechend denen eines typischen Reiseflugs eingestellt werden. Für die Versuche wurde die Rumpfaußenwand durch die kühlbare Klimakammerluft auf -30°C abgekühlt, während der Innenraum der Kabine mit einer Klimatisierung näherungsweise realitätsnahe konitioniert werden konnte.

Für akustische Messungen wurde keine Klimatisierung im Innen- und Außenbereich der Kabine benötigt. Allerdings wurde eine schallabgeschirmende Messkammer mit schallabsorbierenden Materialien rings um den Wandbereich des Kabinenwand-Prototyps bzw. seiner Referenz herum aufgebaut, um Transmissionsmessungen störende Schallwellen fernzuhalten, die von anderen Seitenwand-, Decken- oder Fußbodenflächen von innen auf den Kabinenwand-Prototyp eingestrahlt und von dessen Oberfläche wieder reflektiert werden und sich so dem zu messenden Schallfluss durch die Kabinenwand überlagern können.

Die Kabinenbelüftung, die während der akustischen Messungen abgeschaltet war, wurde, wie in Abbildung 2.154 dargestellt ist, an den Luftkanal angeschlossen und für die hygrothermischen Messungen entsprechend den gewünschten Versuchsbedingungen konditioniert.

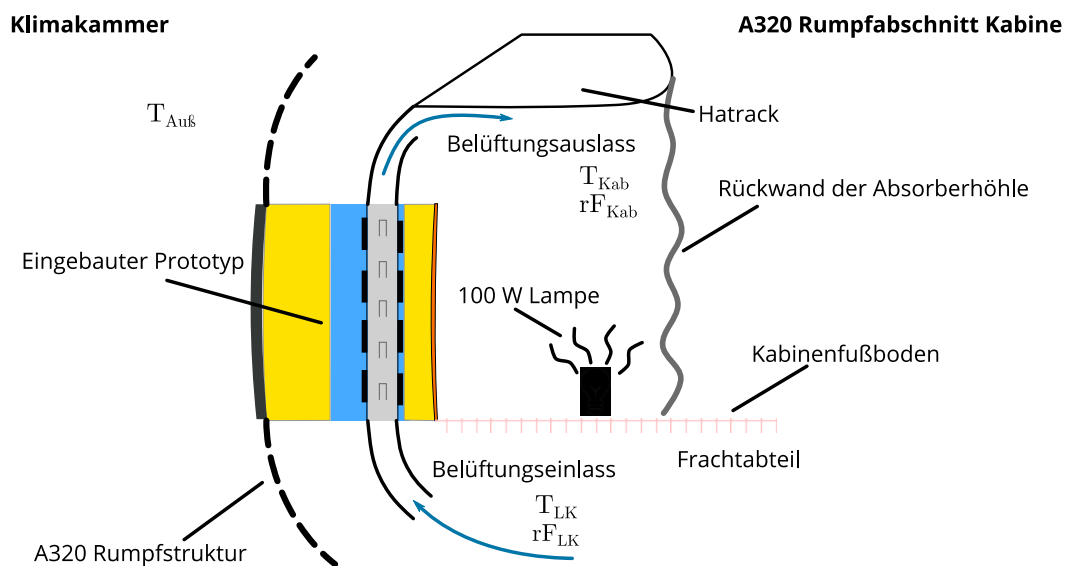


Abbildung 4.6: Messaufbau zur hygrothermischen und akustischen Charakterisierung des Kabinenwand-Prototyps.

Anhang B. Anhang Materialdatenblätter

Polyamid PA12



e-Manufacturing Solutions

PA 2200 Balance 1.0
PA12
EOS GmbH - Electro Optical Systems

Produkttext

Das weißliche Feinpulver PA 2200 auf der Basis von Polyamid 12 bietet mit seinem sehr ausgewogenen Eigenschaftsprofil breitgefächerte Anwendungsmöglichkeiten. Laser-gesinterte Bauteile aus PA 2200 besitzen ausgezeichnete Materialeigenschaften:

- hohe Festigkeit und Steifigkeit
- gute Chemikalienbeständigkeit
- hohe Langzeitstabilität
- gute Trennschärfenauflösung und Detailtreue
- vielfältige Nachbehandlungsmöglichkeiten (z. B. Metallisierung, Einbrennklarerung, Gleitschleifen, Tauchhärten, Belichtung, Pulverbeschichtung, Beflockung)
- biokompatibel nach EN ISO 10993-1 und USP/level VI/121 °C
- zertifiziert für Lebensmittelkontakt gemäß der EU-Kunststoff-Direktive 2002/72/EC (Ausn.: hochalkoholische Genussmittel)

Typische Anwendungen des Werkstoffes sind voll funktionstfähige Bauteile höchster Qualität. Auf Grund der ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften des Materials findet es häufig Einsatz als Substitutionswerkstoff für übliche Spritzgusswerkstoffe. Desweiteren erlauben die Biokompatibilität des Materials die Anwendung z. B. in der Prothetik, sowie die hohe Verschleißfestigkeit die Realisierung beweglicher Bauteilverbindungen.

120 µm Schichtdicke

Die Stärke des PM-Parameterseil "Balance" ist seine Ausgewogenheit. Er bietet bei 120 µm Schichtdicke eine optimale Balance zwischen Fertigungskosten, Mechanik, Oberflächenqualität und Genauigkeit. Er eignet sich so für Bauteile unterschiedlichster Geometrien, Größen und Anforderungen.

Mechanische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
	4,4	KJ/m ²	ISO 180/1A
120d Kerbschlagzähigkeit (+23°C)	75	-	ISO 7619-1

3D-Daten

Die Eigenschaften von Bauteilen aus generativen Verfahren (wie Lasersintern, Stereolithographie, Fused Deposition Modeling, 3D-Drucken) sind durch den schichtweisen Aufbau teilweise von der Richtung abhängig. Dies muss bei der Konstruktion und Orientierung des Bauteils berücksichtigt werden.

3D-Daten	Wert	Einheit	Prüfnorm
Die Eigenschaften von Bauteilen aus generativen Verfahren (wie Laserschneiden, Zerschnitttechnologie, 3D-Drucken) sind durch den schwächeren Aufbau teilweise von der Richtung abhängig. Dies muss bei der Konstruktion und Orientierung des Bauteils berücksichtigt werden.			
Zugmodul			ISO 527
X-Richtung	1650	MPa	
Y-Richtung	1650	MPa	
Z-Richtung	1650	MPa	
Zugfestigkeit			ISO 527
X-Richtung	48	MPa	
Y-Richtung	48	MPa	
Z-Richtung	42	MPa	
Bruchdehnung			ISO 527
X-Richtung	18	%	
Y-Richtung	18	%	
Z-Richtung	4	%	
Charpy-Schlagzähigkeit (+23°C, X-Richtung)	53	KJ/m²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (+23°C, X-Richtung)	4,8	KJ/m²	ISO 179/1eA
Glasmodul (23°C, X-Richtung)	1500	MPa	ISO 178

Thermische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Schmelztemperatur (20°C/min)	176	°C	ISO 11357-1/-3
Vicat-Erweichungstemperatur (50°C/h 50N)	163	°C	ISO 306

Stand: 2016-03-30 Quelle: www.materialdatacenter.com
Die Angaben entsprechen unserem Kenntnis- und Erfahrungsstand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung. Sie bilden allein keine ausreichende Grundlage für eine Bauteilumgebung, bestimmte Eigenschaften des Produktes oder eines Bauteils oder die Eignung des Produktes oder von Bauteilen für eine spezifische Anwendung. Eine konkrete Anwendung ist verantwortlich. Dies gilt auch hinsichtlich der Wahrung von möglichen Schutzrechten sowie bestehender Gesetze und Bestimmungen. Im Rahmen der kontinuierlich von EOS betriebenen Entwicklungs- und Verbesserungsprozesse können sich die Angaben ohne Vorankündigung ändern.

Seite: 1/2

PA 2200 Balance 1.0
PA12
EOS GmbH - Electro Optical Systems

Brennbarkeit	UL 94
Prüfung besanden, HB	0,5 mm
Prüfung besanden, HB	1,6 mm
Prüfung besanden, HB	3,2 mm

Andere Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Dichte (lasersintern)	930	kg/m ³	EOS Methode
Pulverfarbe (laut Sicherheitsdatenblatt)	Weiß	-	-

Markenname

Verarbeitungsmethoden

Lasersintern, Rapid Prototyping

Chemikalienbeständigkeit

Allgemeine Chemikalienbeständigkeit

Zertifizate

FDA-Zulassung nach USP Biological test (Classification VI/121 °C)

Stand: 2016-03-30 Quelle: www.materialdatacenter.com
Die Angaben entsprechen unserem Kenntnis- und Erfahrungsstand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung. Sie bilden allein keine ausreichende Grundlage für eine Bauteilumgebung, bestimmte Eigenschaften des Produktes oder eines Bauteils oder die Eignung des Produktes oder von Bauteilen für eine spezifische Anwendung. Eine konkrete Anwendung ist verantwortlich. Dies gilt auch hinsichtlich der Wahrung von möglichen Schutzrechten sowie bestehender Gesetze und Bestimmungen. Im Rahmen der kontinuierlich von EOS betriebenen Entwicklungs- und Verbesserungsprozesse können sich die Angaben ohne Vorankündigung ändern.

Seite: 2/2

Eigenschaften	Zertifikat	Einheit	ROHACELL® 31 HF	ROHACELL® 51 HF	ROHACELL® 71 HF
Rohdichte	ISO 845	kg/m³	32	52	75
Druckfestigkeit	ISO 844	MPa	0.4	0.9	1.5
Zugfestigkeit	ISO 527-2	MPa	1.0	1.9	2.8
Schubfestigkeit	DIN 53 294	MPa	0.4	0.8	1.3
E-Modul	ISO 527-2	MPa	36	70	92
Schubmodul	DIN 53 294	MPa	13	19	29
Reißdehnung	ISO 527-2	%	3.5	4.0	4.5
Wärmeform- beständigkeit	DIN 53 424	°C	180	180	180
Standardplatte					
Stärke		mm	4 bis 85	1 bis 70	4 bis 60
Länge x Breite		mm	2500 x 1250	2500 x 1250	2500 x 1250

Elektr. Eigenschaften

Dielektr. Konstante	2.5 GHz		1.050	1.057	1.075
	5.0 GHz		1.043	1.065	1.106
	10.0 GHz		1.046	1.067	1.093
	26.5 GHz		1.041	1.048	1.093
Dielektrizitätsverlust	2.5 GHz		< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002
	5.0 GHz		0.0016	0.0008	0.0016
	10.0 GHz		0.0017	0.0041	0.0038
	26.5 GHz		0.0106	0.0135	0.0155

Datenblatt **ROHACELL® HF**

Beiden angegebenen Werten handelt es sich um Richtwerte für die nominale Rohdichte.

Die Angaben in dieser Publikation stützen sich nach unseren Kenntnissen auf den neuesten Stand von Technik und Wissenschaft. Für die Richtigkeit der Angaben und für die Resultate, die sich aus deren Gebrauch ergeben, kann jedoch keine Garantie übernommen werden. Keine der Angaben ist dazu bestimmt, bestehende Patentrechte zu verletzen oder eine Patentverletzung zu empfehlen.