

**Masterarbeit**

**Tom Ziegner**

**Quantifizierung und Minimierung von Schallleistungsbeiträgen in der VIP-Flugzeugkabine und Prognose des Kabinenpegels anhand eines Schallleistungsmodells**

*Fakultät Technik und Informatik*

*Department Fahrzeugtechnik und  
Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science*

*Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*

**Tom Ziegner**

**Quantifizierung und Minimierung von  
Schallleistungsbeiträgen in der  
VIP-Flugzeugkabine und Prognose des  
Kabinenpegels anhand eines  
Schallleistungsmodells**

Minimal gekürzte Fassung der  
Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Flugzeugbau  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
Lufthansa Technik AG  
Weg beim Jäger 193  
22335 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Benedikt Plaumann  
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Tjerk Christoph Tews

Abgabedatum: 28.05.2023

# Zusammenfassung

**Tom Ziegner**

## Thema der Masterarbeit

Quantifizierung und Minimierung von Schallleistungsbeiträgen in der VIP-Flugzeugkabine und Prognose des Kabinenpegels anhand eines Schallleistungsmodells

## Stichworte

Akustik, Flugzeug, VIP-Kabine, Schallintensitätsmessungen, Schallleistung, Schallleistungsmodell, Lautstärke, Minimierung, Prognose

## Kurzreferat

VIP-Kabinen haben im Vergleich zu Standard-Kabinen von Linienfluggesellschaften besonders spezielle Anforderungen. Die damit einhergehende Auslegung eines Schallisoliertungspaketes für einen spezifizierten Schalldruckpegel in der Kabine ist eine besondere technische und wirtschaftliche Herausforderung. Da Standard-Kabinen in Bezug auf akustische Zusammenhänge deutlich besser erforscht sind als VIP-Kabinen werden in dieser Arbeit grundlegende Untersuchungen durch die Messung von Schallintensitäten in einem Demonstrator sowie im Flug unter realen Bedingungen angestellt. Die Ergebnisse der Messungen werden verwendet, um dominante Schallpfade zu identifizieren und ein Schallleistungsmodell zu entwickeln, welches den Schalldruckpegel in der Kabine berechnet. Dominante Schallpfade können innerhalb des Modells minimiert werden, wodurch ersichtlich wird, welche Aufwände notwendig sind, um den Schalldruckpegel in der Kabine zu reduzieren. Die Anpassung aller Schallpfade in die Kabine auf ähnliche prozentuale Beiträge resultieren in Kosten- und Gewichtseinsparungen. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden für eine effizientere Auslegung zukünftiger Schallisoliertungspakete von VIP-Kabinen dienen.

**Tom Ziegner**

## Title of the Masterthesis

Quantification and minimization of sound power contributions in the VIP aircraft cabin and prediction of cabin noise using a sound power model.

## Keywords

Acoustics, aircraft, VIP cabin, sound intensity measurements, sound power, sound power model, noise, minimization, prediction

## Abstract

VIP cabins have particularly special requirements compared to standard cabins of commercial airlines. The related design of a sound insulation package for a specified sound pressure level in the cabin is a special technical and economical challenge. Since standard cabins are far better analyzed in research than VIP cabins in terms of acoustic correlations, basic investigations are carried out in this thesis by measuring sound intensities in a demonstrator as well as in flight under real conditions. The results of the measurements are used to identify dominant sound paths and to develop a sound power model that calculates the sound pressure level in the cabin. Dominant sound paths can be minimized within the model, showing the effort required to reduce the sound pressure level in the cabin. Adjusting all sound paths into the cabin to similar percentage contributions results in cost and weight savings. The results of this work will support a more efficient design of future sound insulation packages for VIP cabins.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	VII
Liste der verwendeten Formelzeichen .....	VIII
1 Einleitung .....	1
2 Stand der Technik.....	2
2.1 Akustik im Flugzeug.....	2
2.1.1 Schallquellen .....	2
2.1.2 Flughöhe und -geschwindigkeit .....	4
2.1.3 Schalldämmmaßnahmen.....	6
2.1.4 VIP-Flugzeugkabinen .....	10
2.1.5 Aspekt der Wirtschaftlichkeit.....	12
2.2 Berechnungsverfahren zur Vorhersage von Schalldruckpegeln und Schallleistungsbeiträgen in der Kabine .....	13
3 Akustische Grundlagen .....	18
3.1 Kenngrößen.....	19
3.2 Bewertung von Lautstärke .....	20
3.3 Schallquellen, Schallausbreitung und Absorption .....	22
3.4 Schalltransmission und Schall in geschlossenen Räumen.....	23
3.5 Körperschall und Schallabstrahlung.....	25
4 Methodik und Vorgehensweisen .....	27
4.1 Methodik der Ausarbeitung .....	27
4.2 Spezifische Methodik zur Bestimmung des Schallleistungspegels aus Intensitätsmessungen .....	29
4.2.1 Grenzwerte und Genauigkeitsklassen.....	30
4.2.2 Richtcharakteristik der Intensitätssonde.....	32
5 Quantifizierung von Schallleistungsbeiträgen durch Intensitätsmessungen .....	33
5.1 Intensitätsmessungen HCAT .....	33
5.1.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung HCAT .....	33
5.1.2 Darstellung der Ergebnisse HCAT .....	37

6	Überführung der Messergebnisse in ein Schallleistungsmodell .....	47
6.1	Anforderungen an ein Schallleistungsmodell .....	47
6.2	Modellierung und Funktionen des Modells .....	47
6.2.1	Funktionen des Modells .....	48
6.2.2	Ablaufplan der Modellbedienung.....	49
6.2.3	Berechnungen im Modell .....	54
6.3	Vereinfachungen, Wirtschaftlichkeit und Fehlereinflüsse .....	56
6.3.1	Vereinfachungen und Wirtschaftlichkeit .....	56
6.3.2	Fehlereinflüsse .....	57
7	Minimierung von Schallleistungsbeiträgen anhand des Schallleistungsmodells.....	58
7.1	Exemplarische Minimierung mit der Testreihe HCAT M2 .....	58
7.1.1	Iterationen 1-3: Zwischenergebnis der Minimierung .....	59
7.1.2	Iterationen 4-6: Zwischenergebnis der Minimierung .....	61
7.1.3	Iterationen 7-9: Ergebnis der Minimierung .....	61
8	Diskussion.....	64
8.1	Identifizierung dominanter Schallpfade durch Intensitätsmessungen .....	64
8.2	Schalldruckpegelberechnung und Minimierung im Schallleistungsmodell .....	67
9	Fazit und Ausblick .....	69
	Literaturverzeichnis.....	70
	Anhang .....	75

Absichtlich leer

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Veränderung des Geräuschpegels in der Kabine während des Starts, Steigfluges und Reisefluges (A: Start Rollvorgang, B: Abheben von der Bahn, C: Reiseflug – stabiler Horizontalflug) [9] .....	3
Abbildung 2: Abweichungen vom OASPL für verschiedenen FLs relativ zu Messungen auf FL 270 [10].....	5
Abbildung 3: Abweichungen vom OASPL zwischen höheren und niedrigeren Geschwindigkeiten für verschiedene Flughöhen [10] .....	6
Abbildung 4: Querschnitt eines typischen Seitenwandaufbaus, modifiziert [11].....	8
Abbildung 5: Skin Damping auf Flugzeugrumpfstruktur [14] .....	9
Abbildung 6: a) Einzelter Vibrationsdämpfer b) Vibrationsdämpfer im eingebauten Zustand.	9
Abbildung 7: Beispielhafte VIP-Flugzeugkabine [18] .....	10
Abbildung 8: a) A320 STD-Kabine Linienfluggesellschaft, modifiziert [20] b) A319ACJ VIP-Kabine, modifiziert [21].	11
Abbildung 9: Gängige Analyseverfahren und deren typische Anwendungsbereiche [33].....	14
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Subsysteme und des Leistungsaustausches für eine Doppelwand [41] .....	16
Abbildung 11: Bezeichnung der Panels mit jeweiligen Schallbeiträgen und resultierende eingebrachte Leistung bei Konfiguration D [42].....	17
Abbildung 12: Hörfäche des menschlichen Ohres und dessen Begrenzungen [43] .....	18
Abbildung 13: a) Oktavleiter und b) Terzschritte in einer Oktave [43] .....	19
Abbildung 14: Bewertungskurven A, B, C, D [43] .....	21
Abbildung 15: a) Schallausbreitung in geschlossenen Räumen, b) Schallpegel in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schallquelle (qualitativ) [43] .....	22
Abbildung 16: Schallenergiebilanz an einer Wand [43] .....	24
Abbildung 17: Messanordnung zur Bestimmung des Dämmmaßes der Trennwand zwischen zwei Räumen .....	25
Abbildung 18: Allgemeine Methodik .....	27
Abbildung 19: Reduktion des Schallintensitätspegels in Abhängigkeit vom Winkel zur Quelle [50] .....	32
Abbildung 20: Schematische Darstellung vom Rumpfausschnitt im HCAT sowie dem Messbereich und Messaufbau .....	34
Abbildung 21: Definierte Segmente (Panels) der Messfläche .....	35
Abbildung 22: Messdurchführung, a) Testreihe M6, b) Testreihe M2 .....	37
Abbildung 23: Gemessene Intensitätspegel Testreihe M1 und M2 für Panel 1-3.....	42

Abbildung 24: Gemessene Intensitätspegel Testreihe M1 und M2 für Panel 4-5.....	43
Abbildung 25: Gemessene Intensitätspegel Testreihe M6 und M7 für Panel 6-8.....	44
Abbildung 26: Visualisierung der Funktionen und Hauptkomponenten des Schallleistungsmodells.....	48
Abbildung 27: Die drei Elementarbausteine der Datenverarbeitung, modifiziert [52] .....	50
Abbildung 28: Programmablaufplan Schallleistungsmodell .....	50
Abbildung 29: Unterprogramm Segmente/Panel .....	50
Abbildung 30: Unterprogramme Intensitätspegel und Geschwindigkeiten .....	51
Abbildung 31: Unterprogramm Absorption .....	52
Abbildung 32: Unterprogramm Minimierung .....	53
Abbildung 33: Ausgabe Schallleistungsmodell Hauptfunktion 1 .....	58
Abbildung 34: Minimierungsvorschlag und Beispiele zur möglichen Optimierung aus dem Schallleistungsmodell .....	59
Abbildung 35: Zwischenergebnis nach Iterationen 1-3 .....	60
Abbildung 36: Zwischenergebnis nach Iterationen 4-6 .....	61
Abbildung 37: Endergebnis nach Iterationen 7-9.....	62
Abbildung 38: Gemessener, berechneter und minimierter Schalldruckpegel für Testreihe HCAT M2.....	64

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geräuschquellen und jeweilige Charakteristiken, modifiziert [11].....	4
Tabelle 2: Genauigkeitsklassen bei Messungen gemäß [47].....	31
Tabelle 3: Verwendetes Messequipment .....	36
Tabelle 4: Testreihen Intensitätsmessung.....	36
Tabelle 5: Überprüfung der Kriterien zur Bestimmung einer GK für Testreihen M1, M2, M6, M7 .....	38
Tabelle 6: Druck-Intensitäts-Indikator $FpI, i$ einzelner Segmente Testreihe M1 und M2 .....	39
Tabelle 7: Druck-Intensitäts-Indikator $FpI, i$ einzelner Segmente Testreihe M6 und M7 .....	40
Tabelle 8: Intensitätspegel dB SIL 3 für alle Segmente der Testreihen M1, M2, M6, M7 .....	41
Tabelle 9: Schallleistungspegel und GKs für Frequenzbänder der Testreihen M1, M2, M6 und M7.....	44
Tabelle 10: Schallleistungsbeiträge Testreihe M1 und M2 in %.....	45
Tabelle 11: Prozentuale Beiträge der Segmente zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel bei unterschiedlichen Iterationsschritten .....	63

## Abkürzungsverzeichnis

BEM	Boundary Element Methode
CAD	Computer Aided Design
dB	Dezibel
DP	Design Prinzipien
ECS	Environmental Control System
FEM	Finite-Elemente-Methode
FL	Flight Level
GK	Genauigkeitsklasse
HCAT	Hamburg Centre of Aviation Training-Lab
MKS	Mehrkörpersimulation
OASPL	A-weighted overall sound/surface pressure level
N/A	Not Applicable
RDC	Rapid Decompression
SEA	Statistische Energieanalyse
SIL	Speech-Interference-Level
STL	Sound Transmission Loss
TAS	True Airspeed
TBL	Turbulent Boundary Layer

## Liste der verwendeten Formelzeichen

$A$	Absorptionsfläche
$\bar{A}$	Äquivalente Absorptionsfläche
$\bar{A}_{ges}$	Gesamtabsorption
$F_{pI,i}$	Schalldruck-Intensitäts-Indikator für ein Segment
$F_{M,pI}$	Schalldruck-Intensitäts-Indikator für die gesamte Messfläche
$F_{+/-}$	Indikator zur Kennzeichnung negativer Teilschallleistungen
$I, I_0$	Intensität
$I_{ni}$	Intensität normal zur Teilfläche $i$
$K$	Systematisches Fehlermaß
$K_0$	Korrekturpegel
$L_A$	A-bewertete Schalldruckpegel
$L_D$	Arbeitsbereich
$L_I$	Schallintensitätspegel
$\Delta L_{Okt}, \Delta L_{Tz}$	frequenzabhängiger Dämpfungspegel
$L_P$	Schalldruckpegel
$L_{SIL}$	Sprach-Störschallpegel
$L_W$	Schallleistungspegel
$P,$	Schallleistung
$P'$	Längenbezogene Schallleistung eines Linienstrahlers
$P_L$	direkte Luftschallabstrahlung (Luftschallleistung)
$P_K$	indirekte Luftschallabstrahlung (Körperschallleistung)
$R$	Schalldämmmaß
$S$	Fläche
$T$	Nachhallzeit
$T, T_0$	Temperatur in Kelvin
$Z$	Schallkennimpedanz
$c, c_0$	Schallgeschwindigkeit
$c_f$	Reibungskoeffizient der Flugzeugaußenhaut
$d_0$	Durchmesser
$f$	Frequenz
$m$	Masse
$m''$	flächenbezogene Masse
$p, p_0$	Schalldruck
$\bar{p}^2$	Mittlerer quadratischer Druck

$q$	dynamischer Druck
$r$	Abstand, Radius
$r_H$	Hallradius
$s$	Standardabweichung
$u$	Fluggeschwindigkeit
$v$	Schallschnelle
$\delta_{pI0}$	Druck-Restintensitäts-Abstand
$\lambda$	Wellenlänge
$\rho, \rho_0$	Dichte
$\tau$	Transmissionsgrad
$\tau_w$	Schwerspannungen an der Wand
$\sigma$	Abstrahlgrad
$\sigma'$	Abstrahlmaß
$\omega$	Kreisfrequenz

## 1 Einleitung

Die Akustik in einem Flugzeug beeinflusst in hohem Maße das Komfortempfinden der Passagiere und der Besatzung sowie die Möglichkeiten der Kommunikation. Allgemein bezieht sich Komfort auf einen psychologischen Zustand des subjektiven Wohlbefindens, der unter optimalen Bedingungen hervorgerufen wird [1]. Die Steigerung dieses Komforts durch die Verbesserung von Lärmschutzmaßnahmen in der Flugzeugkabine ist für VIP-Flugzeuge somit eine wichtige Aufgabe für die Sicherstellung der Kundenzufriedenheit. Die Umsetzung der Optimierung ist jedoch eine Herausforderung, da Flugtestprogramme mit einem hohen finanziellen Aufwand einhergehen und Umweltsimulationen am Boden aufgrund der fehlenden Strömungsgeräusche und Triebwerksvibrationen nicht immer repräsentativ sind. Eine kostengünstigere und effizientere Lösung ist der Einsatz von validierten und robusten Prognosewerkzeugen. Dieser Ausarbeitung wird aufzeigen, dass sich Prognosewerkzeuge zur Optimierung von Lärmschutzmaßnahmen im Hinblick auf Gewicht und Materialkosten verwenden lassen. [2]

Der Kooperationspartner Lufthansa Technik ist weltweit führender Anbieter für Wartungs-, Reparatur- und Überholungsservices in der zivilen Luftfahrtbranche [3]. Das Segment Special Aircraft Services befasst sich mit der Neuausstattung, Umrüstung, Wartung und Überholung von VIP-, Regierungs- und Businessjets [4]. Allgemein werden Flugzeuge von den Herstellern für die Beförderung von Passagieren durch Fluggesellschaften in standardisierten Kabinen konzipiert. Im Gegensatz dazu haben VIP-Kabinen sehr individuelle Anforderungen in Bezug auf die Ausstattung und das Design. Die Integration dieser speziellen Kabinen in ein dafür nicht ausgelegtes Flugzeug bringt besondere Herausforderungen für das Lufthansa Technik Completion Center mit sich. Für die Umsetzung der Kundenwünsche sind somit kreative Lösungen notwendig, auch in Bezug auf die Akustik im Flugzeug. VIP-Kunden haben neben den speziellen Anforderungen an die Kabine auch operationelle Anforderungen, wie die Reichweite des Flugzeuges. Die konkurrierenden Aspekte Reichweite, eingebautes Gewicht sowie verfügbare Bauräume müssen in allen Bereichen der Flugzeugausrüstung berücksichtigt werden. [5]

Da der Fokus dieser Ausarbeitung auf VIP-Kabinen liegt und nicht auf den deutlich besser erforschten und bereits signifikant optimierten Standard-Kabinen, werden zuerst grundlegende Untersuchungen in Bezug auf die dominanten Schallpfade in der Kabine angestellt, bevor ein Prognosewerkzeug entwickelt werden kann. Konzepte der Schallisolation werden kundenspezifisch erarbeitet und haben deshalb eine hohe Komplexität sowie Variation in Bezug auf die verwendeten Maßnahmen, Materialien und den gesamten Auslegungsprozess. Das übergeordnete Ziel dieser Ausarbeitung liegt darin, die Schallbeiträge unterschiedlicher Schallpfade in der Kabine durch Intensitätsmessungen zu quantifizieren und in ein Modell zu überführen, damit im letzten Schritt die Optimierung beziehungsweise Minimierung von Schallbeiträgen mit Hilfe dieses Modells durchgeführt werden kann. Die Erkenntnisse sollen die akustische Auslegung von VIP-Unikatfertigungen und die Optimierung des Akustikkonzeptes vereinfachen. Die Übertragung der Erkenntnisse auf Serienflugzeuge wird zu deren Optimierung beitragen und bestehende Konzepte hinterfragen.

## 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik für die Themengebiete Flugzeugakustik, Auslegungsprozess bei Lufthansa Technik und verschiedene Berechnungsverfahren für die Vorhersage von Schalldruckpegeln erläutert. Diese Aspekte gilt es nachzuvollziehen, damit die Erläuterungen in den nachfolgenden Kapiteln und die Abgrenzung zwischen bestehenden und neuen Forschungsgegenständen verständlich werden.

### 2.1 Akustik im Flugzeug

Die Akustik im Flugzeug hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab, welche in den folgenden Abschnitten erläutert werden. Diese beziehen sich auf die unterschiedlichen Schallquellen im Flugzeug sowie den Zusammenhang zwischen Flughöhe und -geschwindigkeit. Im Abschnitt Schalldämmmaßnahmen wird erklärt, wie und mit welchen Mitteln die Lautstärke in der Kabine verändert werden kann. Besonderheiten der VIP-Kabine müssen berücksichtigt werden, da dies eine besondere Problemstellung im Vergleich zu Standard-Kabinen ist. In diesem Zusammenhang wird auch die Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf die kontrahierenden Aspekte Gewicht, Kosten, Bauraum und Performance betrachtet.

#### 2.1.1 Schallquellen

Die Lautstärke beziehungsweise die Geräuschkulisse in der Kabine wird durch verschiedene interne sowie externe Quellen beeinflusst. Das dabei entstehende Geräusch ist die Überlagerung von Geräuschen der Einzelquellen. Externe Quellen sind Triebwerke sowie Lärm, dessen Ursprung in der Aerodynamik des Flugzeuges liegt. Dieser wird vor allem durch die turbulente Grenzschicht (TBL – *Turbulent Boundary Layer*) oder Geräusche von Anbauten, wie Antennen, beeinflusst. Im Rahmen dieser Ausarbeitung sind ausschließlich Mantelstromtriebwerke von Bedeutung. Auf die Besonderheiten von Turboprop-Flugzeugen wird deswegen nicht eingegangen. Triebwerkslärme entstehen durch den Fan, den Abgasstrahl und die Druckstöße bei der Vermischung des Abgasstrahls mit dem Nebenstrom. Die TBL ist über der Rumpfoberfläche durch einen schwankenden Druck gekennzeichnet, welcher die Außenhaut des Flugzeuges anregt. [6] [7]

Geräusche von externen Quellen werden über Luftschall- und Körperschallpfade übertragen [8]. Während beim Start und im Steigflug der Triebwerkslärme als externe Schallquelle aufgrund der hohen Drehzahl dominiert, stellt während des Reisefluges die TBL wegen der höheren Fluggeschwindigkeit und der reduzierten Drehzahl des Triebwerks die Hauptlärmquelle dar, wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist [9].

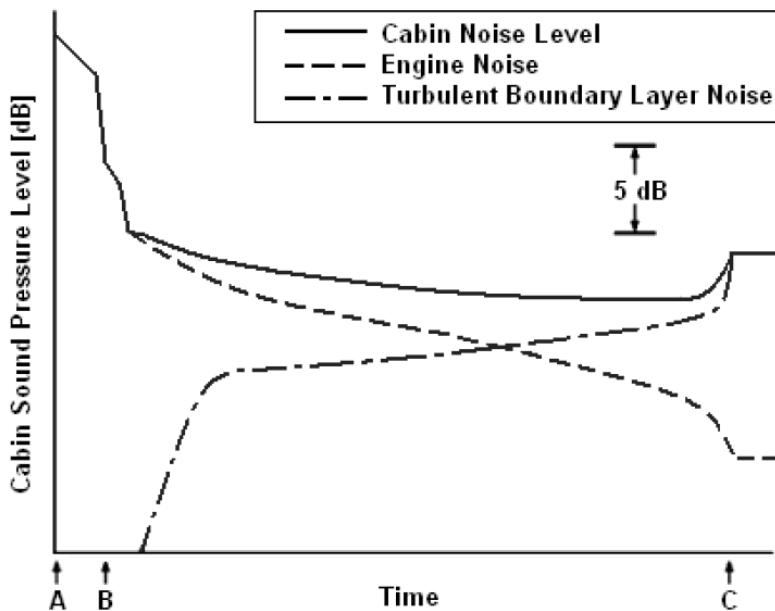


Abbildung 1: Veränderung des Geräuschpegels in der Kabine während des Starts, Steigfluges und Reisefluges (A: Start Rollvorgang, B: Abheben von der Bahn, C: Reiseflug – stabiler Horizontalflug) [9]

Abbildung 1 zeigt den Schalldruckpegel in der Kabine für eine bestimmte Messposition im Flugzeug im Verlauf verschiedener Flugphasen. Dies ist zu berücksichtigen, da die Beiträge zum Gesamtpiegel von externen Quellen im hinteren Teil der Kabine aufgrund der Abstrahlcharakteristik von Strahltriebwerken und der zunehmenden Dicke der TBL ansteigen [10]. Der Unterschied zwischen einer Messposition im vorderen Bereich der Kabine zu einer Messposition im hinteren Bereich liegt bei 3-4 dB (A) [10]. Entweder haben Quellen Frequenzen, welche sich über ein breites Spektrum verteilen (zum Beispiel TBL) und eine zufällige Phasenlage zueinander haben oder sie besitzen eine konstante Frequenz (zum Beispiel hydraulische Pumpen), abhängig von einer bestimmten Drehgeschwindigkeit. Interne Schallquellen sind die Klimaanlage, hydraulische sowie elektrische Systeme und Geräte in der Kabine. Die folgende Tabelle fasst die internen und externen Quellen zusammen und charakterisiert diese nach Frequenzcharakteristik und Schallpfaden. [11]

Tabelle 1: Geräuschquellen und jeweilige Charakteristiken, modifiziert [11]

Quelle	Frequenz-Charakteristik	Schallpfad
<b>A. Antriebssystem</b>		
Abgasstrahl	Breitbandig	Luftschall: Rumpf-Seitenwand
Fan	Diskret	Luftschall: Rumpf-Seitenwand
Triebwerksvibrationen	Diskret	Körperschall: Triebwerkshalterungen
Vibrationen der Tragflächen	Diskret	Körperschall: Struktur-Tragflächen
<b>B. Aerodynamik</b>		
TBL	Breitbandig	Luftschall: Rumpf-Seitenwand
Strömungstrennung und Strömungsstörung	Breitbandig	Luftschall: Rumpf-Seitenwand
Luftverwirbelungen	Breitbandig	Luftschall: Rumpf-Seitenwand
<b>C. Interne Quellen</b>		
Hydraulische Systeme	Diskret	Körperschall: Kabinenboden
Elektrische Systeme	Diskret	Körperschall: Kabinenboden; Luftschall: Kabine
Klimaanlage	Diskret	Luftschall: Luftauslässe
Hilfstriebwerk	Diskret	Körperschall: Halterungen

Spezifisch für einzelne Flugzeugtypen und Konfigurationen müssen weitere Schallquellen und Schallpfade berücksichtigt werden. Quellen diskreter Frequenzen haben eine bestimmte Frequenz, erzeugen in der Regel aber das Vielfache dieser Grundfrequenz. Wenn eine Pumpe beispielsweise eine diskrete Frequenz von 200 Hz aufweist und somit ein Peak im Geräuschspektrum zu sehen ist, sind weitere Peaks bei 100 Hz oder 400 Hz zu sehen. Wichtig zu erwähnen ist, dass Strömungstrennungen, wie beim Cockpit und Strömungsstörungen, beispielsweise durch Antennen, hohe Schalldruckpegel erzeugen können, die jedoch oft nur lokal auftreten. [11]

### 2.1.2 Flughöhe und -geschwindigkeit

Im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms IV Projekt SIMKAB wurden Messungen an einem Airbus A320 des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums durchgeführt, um die verschiedenen Lärmquellen und ihre jeweiligen Übertragungswege zu untersuchen. In diesem Zusammenhang wurden auch die Auswirkungen von Flughöhe und Geschwindigkeit auf den Schalldruckpegel in der Kabine erforscht.

Die folgende Abbildung zeigt Ergebnisse aus Messungen für die Ermittlung des Einflusses der Flughöhe. Die dokumentierten Messbedingungen des Testfluges befinden sich in Anhang A1. Die Angabe OASPL steht für *A-weighted overall sound/surface pressure level* (A-bewerteten Schalldruckpegel) und das *Flight Level* (FL) gibt die Flughöhe in hundert Fuß an (FL400 = 40.000 Fuß). Die Geschwindigkeit TAS (*True Airspeed*) beschreibt die tatsächliche

Fluggeschwindigkeit gegenüber der umgebenden Luft und berücksichtigt somit auch Windrichtung und Windgeschwindigkeit. [10]

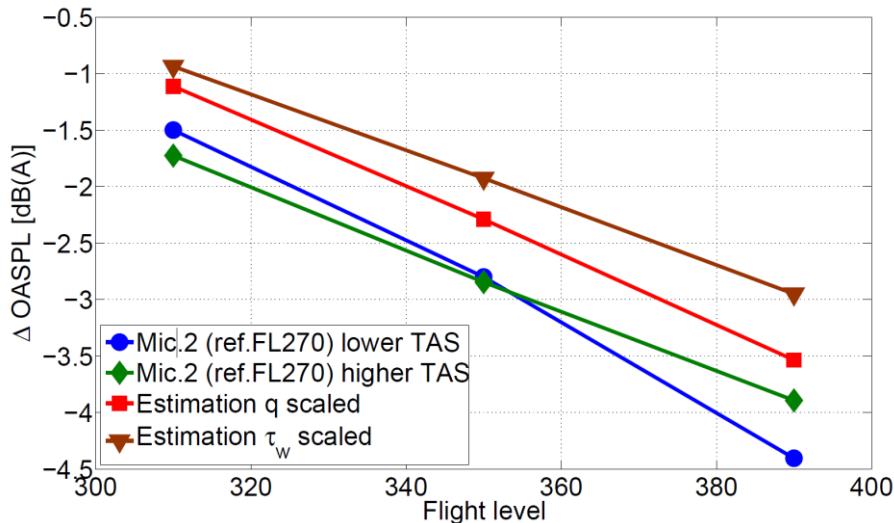


Abbildung 2: Abweichungen vom OASPL für verschiedene FLs relativ zu Messungen auf FL 270 [10]

Messposition 2 liegt am vorderen Ansatz der Tragfläche auf Höhe der Triebwerke. Der gemessene Schalldruckpegel (blaue und grüne Linien) in der Kabine sinkt mit höheren FL, da die Luftdichte bei höheren FL geringer ist als bei niedrigeren FL und somit der Einfluss der TBL reduziert wird. Dieser Zusammenhang wird auch durch die grob abgeschätzten Schalldruckpegel (rote und dunkelrote Linien) nach dem „Efimtsov Model“ deutlich, bei dessen Berechnungen die Luftdichte und Fluggeschwindigkeit entscheidende Faktoren sind. Nach diesem Modell wird die Rumpfanregung in Abbildung 2 vorhergesagt und durch den dynamischen Druck  $q$  oder Scherspannungen an der Wand  $\tau_w$  skaliert. Die Abweichung des gemessenen Schalldruckpegels zwischen FL 270 und FL 390 beträgt 4 dB(A) für geringere (ca. 756 km/h) und 4,5 dB(A) für höhere (ca. 850 km/h) Fluggeschwindigkeiten. [10]

Der dynamische Druck und die Scherspannungen an der Wand sind aerodynamische Größen und berechnen sich nach [11] wie folgt:

$$q = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (2.1)$$

$$\tau_w = qc_f \quad (2.2)$$

Dabei gibt  $\rho$  die Dichte und  $c_f$  den Reibungskoeffizienten der Flugzeugaußenhaut an. Diese Formeln werden benötigt, um den mittleren quadratischen Druck  $\bar{p}^2$  zu berechnen. Für die folgende Berechnung vom mittleren quadratischen Druck sind die Koeffizienten für die Proportionalität von Fluggeschwindigkeit und Dichte mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Folgende Beziehung wird typischerweise verwendet. [11]

$$\sqrt{\bar{p}^2} = 2,6 \cdot \tau_w \quad (2.3)$$

Das Verhältnis zwischen den Schalldruckpegeln außerhalb des Flugzeugs und in der Kabine hängt von den Übertragungseigenschaften der Rumpfstruktur, also dem Schallpfad, ab. Dabei

sind vor allem die Aspekte Impedanz und Verbindungsart der Struktur von Bedeutung. Die Impedanz wird durch die Masse, Steifigkeit sowie Dämpfung bestimmt. [11]

Während des beschriebenen Testflugs wurde ebenfalls der Einfluss der Fluggeschwindigkeit untersucht. Die Ergebnisse werden in der folgenden Abbildung dargestellt. Die grüne Kurve („Kulite“) zeigt dabei den Mittelwert gemessener Spektren des Oberflächendrucks an Fenstern bei 30 Messpositionen (Siehe Anhang A2).

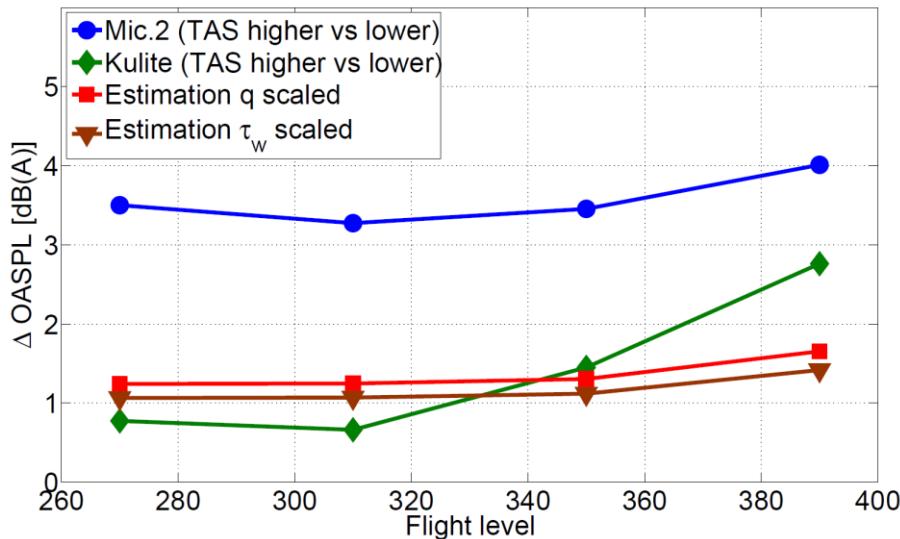


Abbildung 3: Abweichungen vom OASPL zwischen höheren und niedrigeren Geschwindigkeiten für verschiedene Flughöhen [10]

Allgemein steigt der Schalldruckpegel in der Kabine mit zunehmender TAS. Der gemessene Schalldruckpegel in der Kabine (blaue Kurve) steigt bei einer Erhöhung der TAS von 10 % um 3-4 dB(A) an. Die horizontale Achse im Diagramm zeigt das FL. Es wird ersichtlich, dass der Deltawert resultierend aus den höheren und niedrigeren TAS relativ unabhängig vom FL ist. Das heißt, eine Erhöhung der TAS um 10 % tritt für alle FL auf.

### 2.1.3 Schalldämmmaßnahmen

Für die Verringerung des Schalldruckpegels in der Kabine ist es maßgeblich, die bedeutendsten Quellen und Schallpfade zu identifizieren und entsprechende Schalldämmmaßnahmen zu ermitteln. Diese Maßnahmen können entweder die Quelle selbst betreffen (zum Beispiel leisere Triebwerke) oder den Schallpfad, über den der Schall übertragen wird. Wenn es lediglich eine einzige dominante Quelle und einen einzigen Schallpfad gibt, ist die Identifizierung entsprechend simpel. In modernen Flugzeugen ist dies aber nicht der Fall, da die offensichtlichen Quellen und jeweiligen Schallpfade bereits durch Schalldämmmaßnahmen bearbeitet wurden. Dadurch entsteht das Problem, dass viele verschiedene Quellen und Schallpfade mit ähnlichen Beiträgen den Schalldruckpegel in der Kabine bestimmen und die Identifizierung und Minimierung somit komplizierter werden. Im Rahmen der Auslegung müssen die am besten geeigneten Methoden ausgewählt werden, um die Anforderungen an Gewicht, Bauraum, Performance und Sicherheit einzuhalten. [11]

Schalldämmmaßnahmen lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: aktive und passive Methoden. Passive Methoden sind in der Lage, die im Flugzeugrumpf erzeugten oder übertragenen Geräuschpegel durch Absorptions-, Reflexions- oder Übertragungseigenschaften verschiedener Werkstoffe und Bauweisen zu verringern. Dies beinhaltet die Veränderung von Masse, Steifigkeit und Dämpfung der Struktur, die Modifikation der Seitenwände, Decken und Bodenaufbauten, das zusätzliche Hinzufügen von Absorption in die Kabine sowie die Verwendung von Schwingungsdämpfern (zum Beispiel für die Triebwerksaufhängungen) oder von Schalldämpfern für Luftauslässe. [11] [12]

Aktive Methoden reduzieren den Geräuschpegel, indem wahrgenommene Pegel durch die Erzeugung von geeigneten Impulsen verändert werden. Ein Computer verwendet dabei Mikrofone als Sensoren, deren Signale als Eingangsparameter in eine Software gespeist werden. Dadurch wird das Schallfeld in der Kabine analysiert und es wird ein sekundäres Schallfeld erzeugt, welches in Gegenphase zum ursprünglichen Schallfeld steht und über Lautsprecher als Sekundärquelle ausgestrahlt wird. Diese Methode ist besonders nützlich als Maßnahme gegen ein spezifisches Geräusch mit einer bestimmten Frequenz. Zudem existiert die strukturelle akustische Steuerung, welche einen sekundären strukturellen Input hat, entweder in Form von mechanischen „Shakern“ oder piezoelektrischen keramischen Aktoren, die direkt an der Rumpfstruktur angebracht werden und somit die Schwingungen der Struktur verändern bzw. aufheben, wodurch die Schallübertragung reduziert wird. [12] [13]

Im Vergleich zu aktiven Methoden werden passive Methoden in der Luftfahrt häufiger verwendet. Die Performance solcher Systeme ist bekannt, da sie schon sehr lange in realen Umgebungen genutzt werden. Durch passive Methoden wird das Gewicht von Flugzeugen aufgrund der Größe der zu isolierenden Oberfläche jedoch erhöht. Bei passiven Methoden steht vor allem die Verwendung von effizienten Materialien mit hohem Schallübertragungsverlust bei geringerem Gewicht sowie die Verbesserung des Auslegungsprozesses im Vordergrund, sodass die zu isolierende Fläche reduziert und nur die dominanten Schallpfade behandelt werden, wodurch ebenfalls das Gewicht reduziert wird. Durch aktive Methoden kann das Gewicht für spezifische Maßnahmen, deutlich reduziert werden, jedoch sind die Design Methoden noch weitgehend unbekannt und die Zuverlässigkeit eines solchen Systems ist aufgrund der geringen Datenlage aus dem Betrieb in Flugzeugen noch nicht ausreichend belegt. Der Fokus dieser Ausarbeitung liegt auf passiven Methoden. Deswegen wird auf aktive Methoden in dieser Ausarbeitung nicht eingegangen. Die generellen, passiven akustischen Wirkmechanismen im Flugzeugbau werden im Folgenden erläutert. [12]

### **Masse und Entkopplung**

Die Veränderung der Masse von Bauteilen und die Strukturentkopplung werden anhand von Seitenwandaufbauten der Flugzeuge und den jeweiligen Panels erläutert. In Flugzeugen besteht der generelle Seitenwandaufbau aus der äußeren Flugzeugstruktur, offenporigem Material und einer Oberflächenverkleidung. Aus akustischer Sicht ergibt sich somit eine Doppelwand, gefüllt mit Luft und offenporigem Material. Zudem gibt es Vibrationsdämpfer,

welche die Struktur von der Oberflächenverkleidung entkoppeln. In der folgenden Abbildung wird der generelle Aufbau dargestellt.

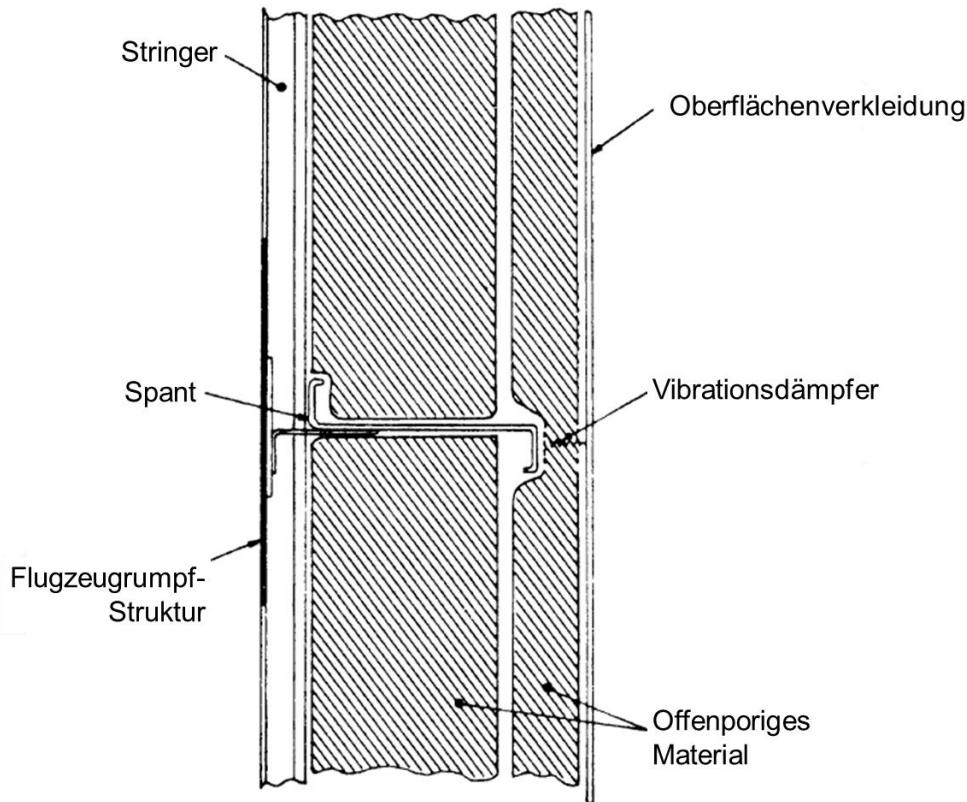


Abbildung 4: Querschnitt eines typischen Seitenwandaufbaus, modifiziert [11]

Als offenporiges Material werden Glasfasermatten unterschiedlicher Dicke und Dichte, abhängig vom Anwendungsfall, verwendet. Die Dicke wird durch den verfügbaren Bauraum begrenzt, welcher von der Tiefe der Spanten und den verwendeten Kabinenkomponenten abhängt. Das Gewicht der Oberflächenverkleidung wird auf Grundlage des Mindestgewichts für die erforderliche Steifigkeit gewählt. Um den Schallübertragungsverlust (*Sound Transmission Loss – STL*) bei begrenztem Bauraum stärker zu erhöhen und auch niedrigere Frequenzen zu behandeln, werden mit Metall versehene Vinylfolien, auch *Masselayer* genannt, in die Seitenverkleidung eingebracht. Eine zusätzliche Lärmreduzierung kann durch die Veränderung der Dämpfung oder Steifigkeit der Rumpfstruktur über das Anbringen von viskoelastischem Klebeband mit Aluminiumbeschichtung (*Skin Damping*) erreicht werden. [11]



Abbildung 5: Skin Damping auf Flugzeugrumpfstruktur [14]

In Abbildung 5 ist Skin Damping im eingebauten Zustand an der Flugzeugrumpfstruktur dargestellt. Die Verbindung zwischen der Rumpfstruktur und der Oberflächenverkleidung wird durch Vibrationsdämpfer hergestellt, die eine gute Isolierung ab niedrigen Frequenzen aufwärts aufweisen. Somit können Einflüsse von Triebwerksvibrationen reduziert werden [11]. Insgesamt wirkt sich das Vorhandensein von steifen Verbindungen zwischen Rumpfstruktur und Oberflächenverkleidung in der Kabine negativ auf den Geräuschpegel aus [15]. Beispielhaft sind in folgender Abbildung Vibrationsdämpfer dargestellt:

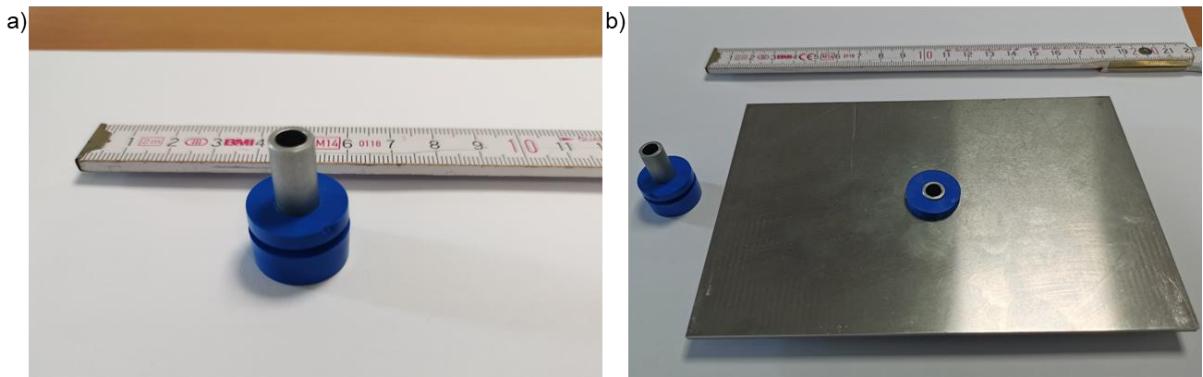


Abbildung 6: a) Einzelner Vibrationsdämpfer b) Vibrationsdämpfer im eingebauten Zustand

In der Abbildung ist ein einzelner Vibrationsdämpfer zu sehen, sowie der gleiche Vibrationsdämpfer im eingebauten Zustand. Für den Zusammenbau wird der blaue Vibrationsdämpfer durch die Aluminiumplatte gedrückt und am Spalt entsprechend der Dicke der Aluminiumplatte fixiert. Die Verbindung zum Anbauteil wird anschließend über den Metallstift hergestellt. Somit wird eine starre Verbindung zwischen zwei Teilen vermieden und Vibrationen werden abhängig von den Materialeigenschaften des Gummis gedämpft. Vibrationsdämpfer gibt es in verschiedenen Formen, Größen, Steifigkeiten und Dichten, resultierend in unterschiedlichen Materialeigenschaften für spezifische Anwendungsfälle in der Flugzeugkabine. Durch die Verwendung von Vibrationsdämpfern wurde in neueren Flugzeugen der Schalldruckpegel in der Kabine um ca. 5-6 dB(A) reduziert [16].

Diese Prinzipien lassen sich ebenfalls auf den Fußboden und die entsprechenden Panels übertragen. Fußbodenpanels liegen auf den Sitzschienen, welche wiederum auf den

Bodenbalken mit Niet- und Schraubverbindungen befestigt sind. Diese Bodenbalken sind konstruktionsbedingt steif an den Spanten des Flugzeugs angebracht. In dem Bereich zwischen den Spanten sorgen Träger oder Platten mit Löchern für die Übertragung der Schubkräfte aus dem Fußboden in die Rumpfstruktur. [17]

## Absorption

Der Schalldruckpegel in der Kabine hängt von den verwendeten Materialien und somit Absorptionseigenschaften der Innenverkleidung und des Fußbodens (es können unterschiedliche Teppiche verwendet werden) sowie der Einbauten wie Sitze, Schränke oder Wände ab. Herkömmliche Oberflächenmaterialien können nach ihrem Funktionsprinzip in Membran- und Resonanzabsorber sowie poröse Absorber unterteilt werden. Membranartige Verkleidungen absorbieren den Schall in einem schmalen Band des niederfrequenten Bereichs. Resonanzabsorber haben ebenfalls ein schmales Absorptionsband, können aber an unterschiedliche Frequenzbereiche, abhängig vom Anwendungsfall, angepasst werden. Es ist beispielsweise möglich, den durch Triebwerke verursachten Lärm mit Resonanzabsorbern zu reduzieren. Traditionell wurden in der Vergangenheit überwiegend poröse Absorber zur Minderung des Schalldruckpegels in der Flugzeugkabine eingesetzt. Diese sind im Frequenzbereich über 800 Hz sehr effektiv. [15]

### 2.1.4 VIP-Flugzeugkabinen

VIP-Flugzeugkabinen werden in Privat-, Geschäfts-, oder Regierungsflugzeuge installiert und zeichnen sich durch hohen Komfort, individuelles, teils luxuriöses Design und hohe Anforderungen an die Innenausstattung durch den Auftraggeber aus. Die Ausstattung sowie das Layout der Kabine werden durch den Kunden bestimmt. Aus diesem Grund sind die meisten VIP-Flugzeugkabinen Einzelanfertigungen. In der nachfolgenden Abbildung ist ein beispielhaftes Layout für eine Kabine mit VIP-Badezimmer, Schlafzimmer, Lounge und Büro sowie Gäste-Lounge, Essensbereich, Gästeschlafzimmern und einem Trainingsbereich dargestellt. [18]

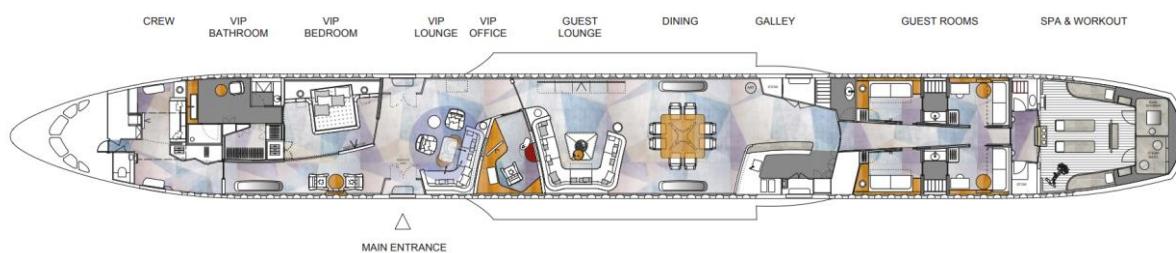


Abbildung 7: Beispielhafte VIP-Flugzeugkabine [18]

Die Umsetzbarkeit der Wünsche des Auftraggebers müssen vor dem Einbau nach luftrechtlichen Vorgaben geprüft werden. Offenes Feuer in der Bordküche (beispielsweise ein Gasherd) lässt sich auf Grund von Sicherheitsanforderungen beispielsweise nicht erfüllen. Nicht zugelassene Bauteile und Materialien müssen vor dem Einbau zertifiziert werden, zum Beispiel hinsichtlich des Brandverhaltens. Der Umbau eines Großraumflugzeuges (im englischen *Widebody*), wie der Boeing 747, zu einem exklusiven Flugzeug mit VIP-Kabine kostet den Kunden etwa 250 Millionen US-Dollar, abhängig von den Kundenwünschen. [19]

Neben der Aufteilung der Kabine in Räume unterscheiden sich VIP-Kabinen von Standard-Kabinen durch die verwendeten Komponenten in der Kabine. Ein Vergleich zwischen Standardkabine und VIP-Kabine ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

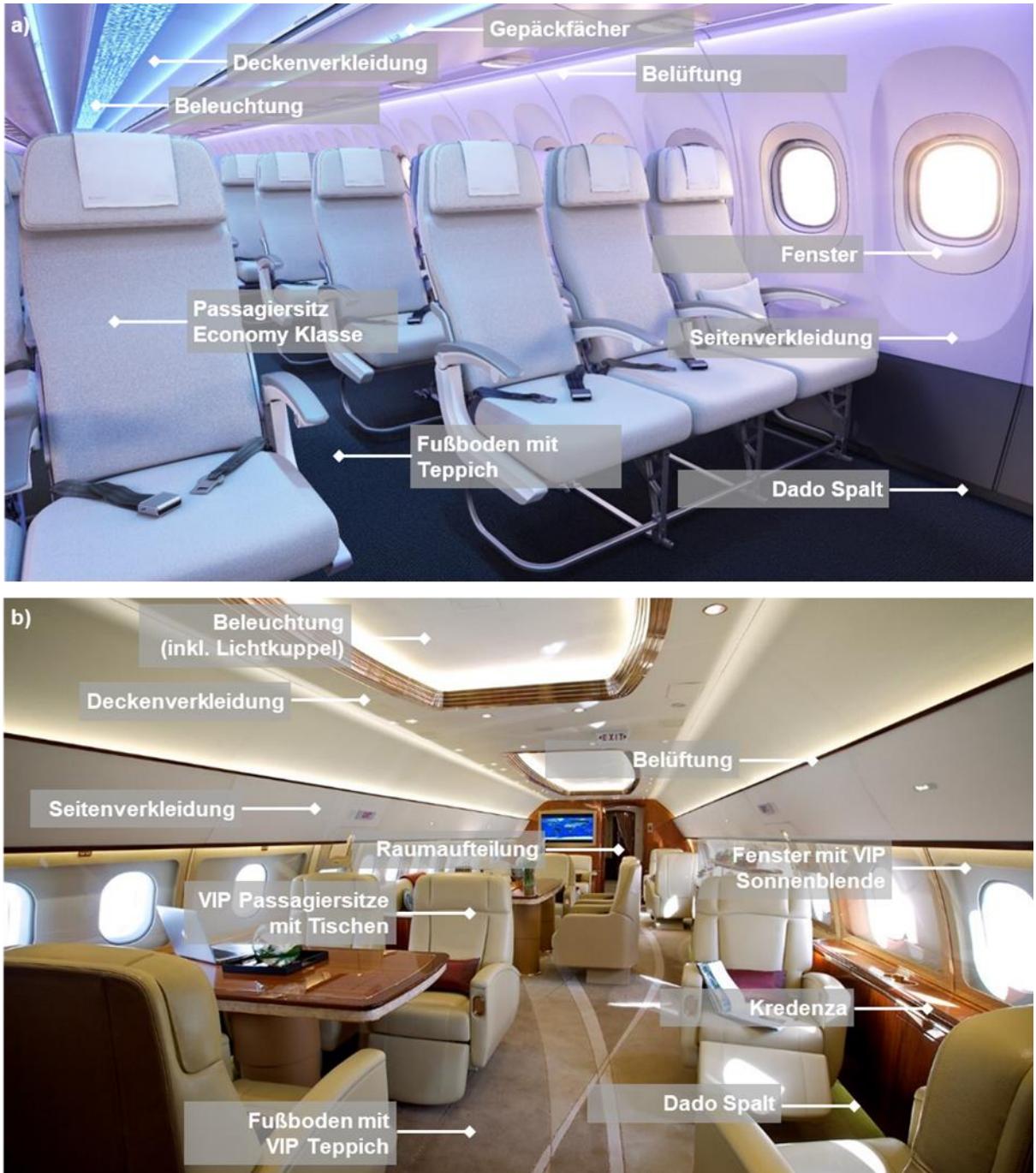


Abbildung 8: a) A320 STD-Kabine Linienfluggesellschaft, modifiziert [20] b) A319ACJ VIP-Kabine, modifiziert [21]

Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, werden in VIP-Kabinen spezielle, meist luxuriösere Sitze eingebaut und die Tische sind in überwiegend fest in die Kabine integriert, während Tische in einer Standardkabine ausgeklappt werden. Bodenaufbauten, inklusive Teppich, unterscheiden sich ebenfalls: In der Standardkabine muss der Aufbau praktikabel sein, das heißt geringes Gewicht, gute Wartbarkeit und außerordentliche Beschaffenheit gegen Flüssigkeiten aufweisen. Ein Teppich in der VIP-Kabine soll dagegen ansehnlich sein und muss die

akustischen Anforderungen bezüglich der Absorption sowie konstruktive Anforderungen erfüllen. Der Boden muss zum Beispiel aufgrund der zu verwendenden Komponenten wie Sitze und Tische teilweise um wenige Zentimeter angehoben werden. Decken und Seitenverkleidungen unterscheiden sich vor allem durch die verwendeten Oberflächen und den entsprechenden Materialien: In einer Standard-Kabine werden die Oberflächen von Sandwichpanels mit Polyvinylfluorid-Folien bezogen, da somit optisch ansprechende und leicht zu reinigende Passagierbereiche geschaffen werden können [22]. In VIP-Kabinen werden die Sandwichpanels im Gegensatz dazu mit hochwertigeren Leder- oder Stoff-Materialien bezogen. Im Seitenwandaufbau werden dickere oder hochwertigere Glaswollen und zusätzliche Masselayer für eine verbesserte Akustik im Flugzeug verwendet. Ein weiterer Faktor ist, dass in VIP-Kabinen keine Gepäckfächer verbaut sind und dies einen konstruktiv unterschiedlichen Aufbau von Seiten- und Deckenverkleidungen nach sich zieht. Die in der Seitenwand integrierten Fenster in VIP-Kabinen erhalten andere Sonnenblenden oder werden teilweise komplett abgedeckt. Wie auf dem Bild der VIP-Kabine zu sehen ist, werden teils großflächig Schränke bzw. Kredenzen im Bereich der Seitenwand verbaut. Diese sind in Standard-Kabinen in diesem Format nicht vorhanden. In die Seitenverkleidung ist das Belüftungssystem für die Kabine integriert. Die Luftzufuhr wird über den oberen Bereich in der Seitenverkleidung gewährleistet. Standard-Kabinen haben zusätzlich individuelle Luftauslässe für jeden Sitz, welche unterhalb der Gepäckfächer verbaut sind. Bei VIP-Kabinen sind Luftauslässe in die Deckenverkleidung oder individuell in speziellen Sitzen integriert. Die Beleuchtung ist bei VIP- und Standard-Kabinen kundenspezifisch angepasst, auffällig sind in VIP-Kabinen die großen Lichtkuppeln in der Deckenverkleidung. Der Dado-Spalt (Dado ist in der Architektur der unterste Teil einer Wand) muss sowohl in der Standardkabine als auch in der VIP-Kabine vorhanden sein, damit sich bei einem Druckabfall im Flugzeug das vor dem Dado-Spalt liegende Panel öffnen kann, um einen Druckausgleich zwischen der Kabine und dem von dem Druckabfall betroffenen Bereich zu beschleunigen [23]. Der Unterschied zwischen den Kabinen liegt lediglich bei der Verkleidung des Spaltes. Teilweise werden bei VIP-Kabinen zudem bestimmte Konstruktionen aus absorbierendem Material verbaut, welche den Schall geringfügig reduzieren können. Der Schalldruckpegel in der Kabine wird somit durch die veränderten Eigenschaften der im Raum befindlichen Elemente und eine angepasste Außenwandstruktur verändert.

### 2.1.5 Aspekt der Wirtschaftlichkeit

Die Auslegung eines passenden Schallisoliierungspaketes bedarf einer wirtschaftlichen Betrachtung. Die Aufgabe besteht darin, einen Kompromiss zwischen den konkurrierenden Faktoren des Gewichts, einer einfachen Installation, den Kosten und der akustischen Leistung einzugehen [24]. Wenn beispielsweise das Gewicht für ein Schallisoliierungspaket zu stark erhöht wird, wirkt sich dies auf die operativen Betriebskosten des Betreibers aus [25]. Zusätzlich sollte das Flugzeug aus Kostengründen äußerlich nicht verändert werden müssen, sodass ein Schallisoliierungspaket in eine bestehende Flugzeugkabine nachgerüstet werden kann [25].

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, können anstatt kostenintensiver Testflugprogramme Tools mit Simulationen zur Auslegung und Optimierung (Design-Änderungen) von Gewicht und Materialkosten für Schallisolierungspakte und deren Maßnahmen genutzt werden [2]. Die Abschätzung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses jeder Schalldämmmaßnahme ist der entscheidende Faktor einer schwierigen technologischen Bewertung [25]. Für die Simulation gibt es verschiedene Möglichkeiten und Verfahren, welche in Abschnitt 2.3 vorgestellt werden, bei denen die Wirtschaftlichkeit ebenfalls betrachtet werden muss. Der Fokus liegt dabei auf dem Reduzieren des Berechnungsaufwandes und dem Erstellen von Modellen in kurzer Zeit [26]. Somit können verschiedene Konfigurationen von Schallisolierungspaketen effizienter miteinander verglichen werden. Die Simulationszeit von Tragflächen-Turbulenzen zusammen mit einem Propeller kann nach [27] beispielsweise durch die Reduzierung der Genauigkeit der Simulation auf die wichtigsten Trends in den kritischen Regionen von 25 Tagen auf 25 Sekunden verringert werden. Die entsprechenden Vereinfachungen resultieren in Abweichungen von einer vollumfänglichen Simulation unter Einbeziehung jeglicher physikalischer Phänomene. Der Aspekt Modellierungsaufwand wird erneut in Abschnitt 6.3.1 aufgegriffen und in Bezug auf das Schallleistungsmodell erläutert.

## **2.2 Berechnungsverfahren zur Vorhersage von Schalldruckpegeln und Schallleistungsbeiträgen in der Kabine**

Zur Vermeidung von kostenintensiven Flugtestprogrammen für die Absicherung von akustischen Anforderungen an Flugzeuge werden verschiedene Prognose-Tools verwendet. Diese können gleichzeitig zur Optimierung von Strukturen und Schalldämmmaßnahmen im Hinblick auf Gewicht und Materialkosten eingesetzt werden. Ein Tool sollte die Auswirkung von Parametern aus der Konstruktion auf die Lärmübertragung korrekt wiedergeben können. Für die Modellierung eines Tools gibt es verschiedene Möglichkeiten mit entsprechenden Vor- und Nachteilen sowie Anwendungsbereichen. [2]

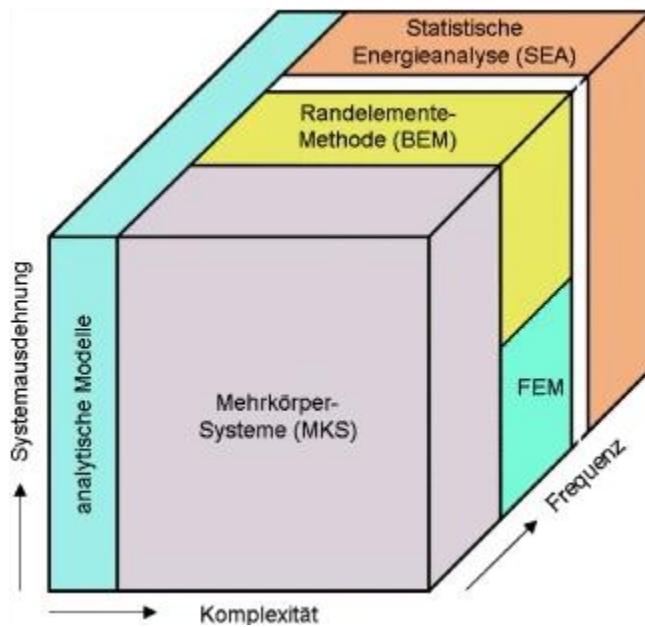


Abbildung 9: Gängige Analyseverfahren und deren typische Anwendungsbereiche [33]

Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird allgemein zwischen mathematisch-analytischen Modellen für sehr simple Systeme und vereinfachten Modellen des Realsystems für komplexere Systeme unterschieden. Für die computergestützte Modellierung von komplexen Systemen ist die Validität des Modells (Modell ist für bestimmte Aufgabenstellung aussagefähig), die Verifikation der Implementierung und die richtige Interpretation der Ergebnisse und entsprechenden Schlussfolgerungen sicherzustellen. Für niedrige Übertragungsfrequenzen kann die Mehrkörpersimulation (MKS) unter der Annahme von starren Körpern sowie linearen und nichtlinearen Koppelementen verwendet werden. Für höhere Frequenzen und räumlich ausgedehnte Strukturen wird die Finite-Elemente-Methode (FEM) aufgrund der steigenden Unzuverlässigkeit der Annahmen bei der MKS verwendet. Die FEM liefert ein lineares Gleichungssystem mit Eigenschwingungsformen und Eigenfrequenzen der Struktur als Lösung. Die BEM reduziert das betrachtete Problem im Vergleich zur FEM um eine Ordnung (von 3D zu 2D) durch die einfachere Betrachtung der Oberflächen eines Bezugsraums. Somit werden die Freiheitsgrade reduziert und die Aufbereitung des Rechennetzes aus CAD-Daten wird vereinfacht. Wenn die Frequenzen noch höher werden, die Anzahl der Schwingungsmoden stark zunimmt und eine exakte Betrachtung durch die FEM und BEM immer rechenaufwendiger wird, kann die statistische Energieanalyse (SEA) angewendet werden. Hierbei erfolgt die Vereinfachung der Problemstellung durch die statistische Mittelung über viele Eigenschwingungsformen. Es wird mit den Erwartungswerten der gespeicherten Energien und ausgetauschten Leistungen zwischen gekoppelten schwingungsfähigen Systemen (auch Subsysteme einer Gesamtbetrachtung genannt) gerechnet. Es wird keine exakte Berechnung der Schallwellen nach Betrag und Phase durchgeführt, sondern über möglichst große Frequenzbereiche (Terzen oder Oktaven) gemittelt.

Mit der SEA können die Energiepegel aller Subsysteme berechnet werden, wenn die Dämpfungs- und Kopplungsverlustfaktoren zwischen den Systemen und die eingespeiste Leistung (Anregung) bekannt sind. Die SEA kann dominante Schallpfade erkennen und ein

Systemverhalten durch Anpassungen optimieren. Aufgrund der Vereinfachungen sind die Unsicherheiten der Analyse im Vergleich zu anderen Verfahren größer. Problematisch ist bei der SEA, im Gegensatz zur Kopplung zwischen Lufträumen, die Bestimmung von Kopplungsverlustfaktoren zwischen steifen Strukturen, da der Energieaustausch bei höheren Frequenzen stark von geometrischen Details abhängt. Somit ist die Anwendung der SEA im Körperschallbereich weiterhin Gegenstand der Forschung. Da die FEM bis maximal 200 Hz und die SEA erst ab 500 Hz nutzbar ist, ergibt sich eine Lücke in diesem Frequenzbereich, welche durch geeignete Methoden zu schließen ist. [33]

Für industrielle akustische Vorhersagen werden traditionell entweder SEA oder FEM beziehungsweise BEM verwendet. Dabei eignet sich die SEA für Analysen von großen Strukturen wie Flugzeugen, welche eine ausreichend hohe modale Dichte aufweisen. Moden sind Querverteilungen, zu denen je eine Wellenart gehört [34]. Die Möglichkeit, Auswirkungen detaillierter Entwurfsänderungen genau vorherzusagen, wird durch die Detailtiefe der verfügbaren analytischen Formulierungen für die SEA Subsysteme begrenzt [2]. Zur Vermeidung dieses Problems wurden verschiedene, teils aus mehreren Methoden kombinierte Vorhersagemodelle entwickelt. Viele wissenschaftliche Artikel berücksichtigen nur bestimmte Bereiche der Flugzeugkabine und fokussieren sich auf den Beitrag eines Schallpfades. Somit ist eine Vorhersage des Schalldruckpegels allein auf Basis dieser Ansätze nicht möglich, es lassen sich lediglich Aussagen über Schalldämmmeigenschaften einzelner Schallpfade treffen. Durch die Literaturrecherche konnten dabei verschiedene Ansätze ermittelt werden. In [35] wird die vibro-akustische Modellierung von Flugzeugfenstern unterschiedlicher Charakteristiken untersucht. Das durch STL-Experimente validierte Modell kann verwendet werden, um Masse-Feder Resonanzen und strukturelle Modalresonanzen zu beschreiben. In den Artikeln [36], [37], [38], [39], [40], [17] wird die Möglichkeit zur SEA Modellierung von strukturell gekoppelten Flugzeug-Doppelwänden und einzelnen Panels aufgezeigt. Die Modelle werden durch Messungen an einem Transmissionsfenster zwischen einem Hallraum und einem Freifeldraum validiert. Es wurden verschiedenste Konfiguration und Materialien betrachtet. Allgemein können die unterschiedlichen Modellierungsansätze die gemessenen Werte abbilden und die SEA als zuverlässige Vorhersagemethode für die betrachteten Untersuchungsgegenstände bestätigen. Die Schallübertragung durch eine Doppelwand zwischen Hallraum und Freifeldraum kann in der SEA wie folgt dargestellt werden:

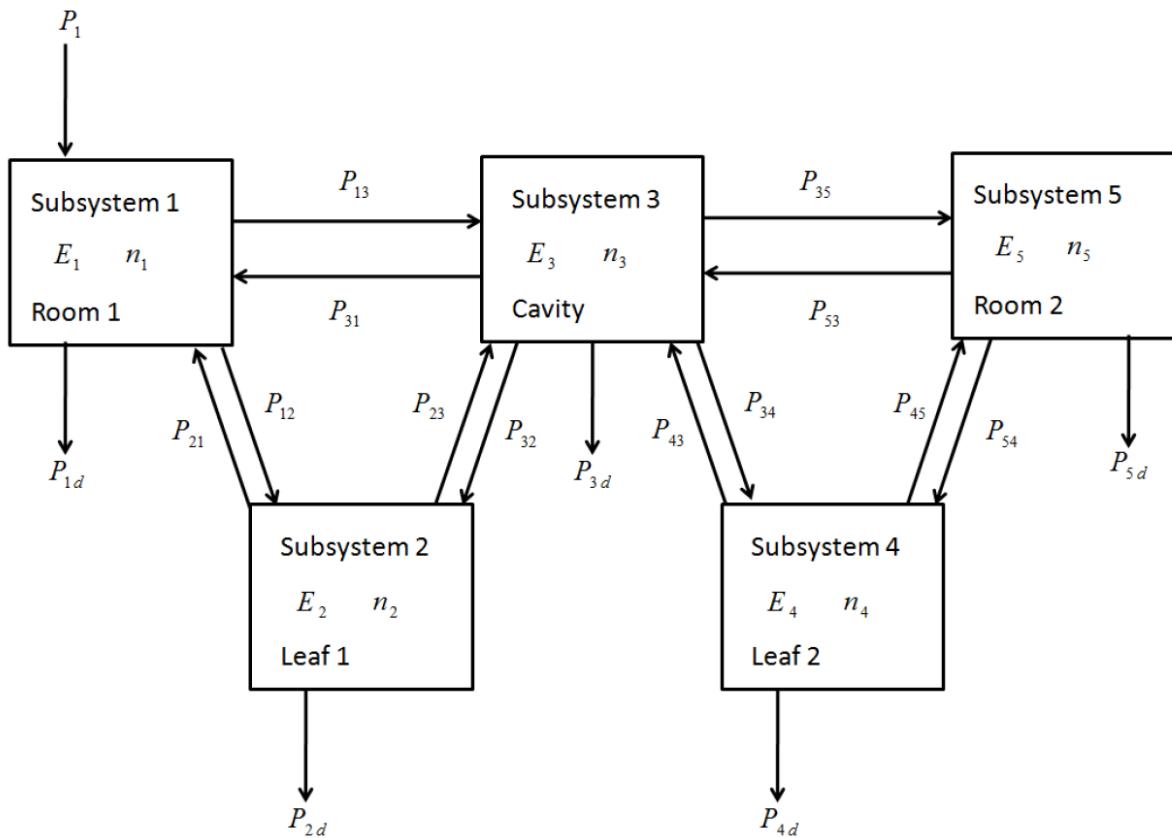


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Subsysteme und des Leistungsaustausches für eine Doppelwand [41]

In der Abbildung ist die Komplexität der SEA-Modellierung zu erkennen. Für die Modellierung müssen die eingebrachte Leistung im Hallraum und die Dämpfungs- und Kopplungsverlustfaktoren zwischen den Subsystemen bekannt sein.

Die Modellierung der Vorhersage des Schalldruckpegels in der Kabine resultierend aus unterschiedlichen Pfaden wird in der Wissenschaft ebenfalls untersucht. In [35] wird ein hybrides Vorhersagmodell mit der Software VAOne erstellt. Die Flugzeugrumpfstruktur wird als FEM und der Cargo- sowie Passagierbereich als SEA modelliert. Aus der FEM kann für jedes Subsystem die modale Dichte und der Kopplungsfaktor zwischen den verschiedenen Subsystemen bestimmt werden. Diese hybride Methode stellt sich für niedrige Frequenzbereiche als nutzbar heraus, die Simulationszeit ist jedoch hoch. Dabei wird erneut die Software VAOne verwendet. In Artikel [42] wird die SEA zur Vorhersage des Schalldruckpegels in unterschiedlichen Rumpfsektionen bei verschiedenen Kabinenkonfigurationen verwendet. Als Anregung wird dabei die TBL auf einer Flughöhe von 6000 m und einer Geschwindigkeit von 177 m/s (circa 640 km/h) simuliert. Somit wird der Vergleich zwischen den verschiedenen Konfigurationen möglich:

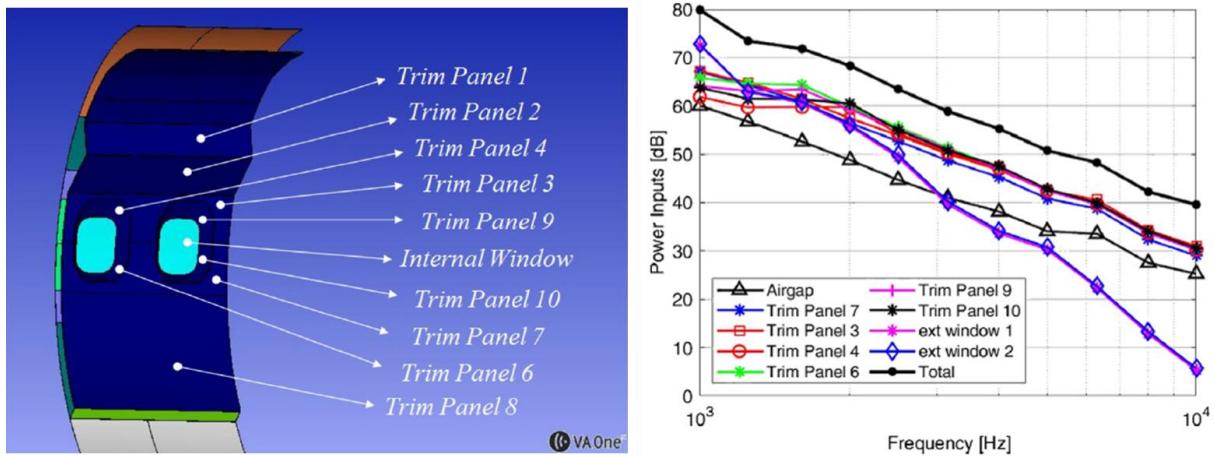


Abbildung 11: Bezeichnung der Panels mit jeweiligen Schallbeiträgen und resultierende eingebrachte Leistung bei Konfiguration D [42]

In der Abbildung sind die verschiedenen Schallpfade und die jeweiligen Beiträge dargestellt. Diese Schallpfade unterteilen sich in einen Luftspalt, verschiedene Panels und zwei Fenster. Bei Konfiguration D in Abbildung 11 ist die Kabine mit Sitzen und Gepäckfächern ausgestattet. Aus den einzelnen Beiträgen kann der Gesamtbeitrag (schwarze Kurve) für die Seitenwand berechnet werden. Die Validierung des Modells mit Daten aus einem Testflug wurde nicht vorgenommen.

### 3 Akustische Grundlagen

Dieses Kapitel erläutert die akustischen Grundlagen, welche zum Verständnis der weiteren Kapitel notwendig sind. Der Mensch kann ein Schallereignis durch einen physikalischen Zusammenhang wahrnehmen. Dabei nimmt das Ohr kleine Schwingungen auf, die in der umgebenden Luft durch eine Schallquelle und die resultierenden Druckschwankungen verursacht und durch Kompressibilität und Masse der Luft übertragen werden. Dieser Druck überlagert sich mit dem atmosphärischen Ruhedruck zu einem Wechseldruck und wird als Schalldruck  $p$  bezeichnet. Diese akustische Feldgröße ist ort- und zeitabhängig. Der wahrgenommene Schall hängt von den Faktoren Schallstärke, bestimmt durch den Schalldruck, sowie Klangfarbe, bestimmt durch die Frequenz  $f$ , ab und wird in folgender Abbildung dargestellt. Dabei wird als technisches Maß nicht der Schalldruck selbst, sondern der Schalldruckpegel  $L_p$  angegeben. Dieser ist eine logarithmierte Größe des Schalldrucks und wird in der Pseudoeinheit Dezibel [dB] angegeben. [34]

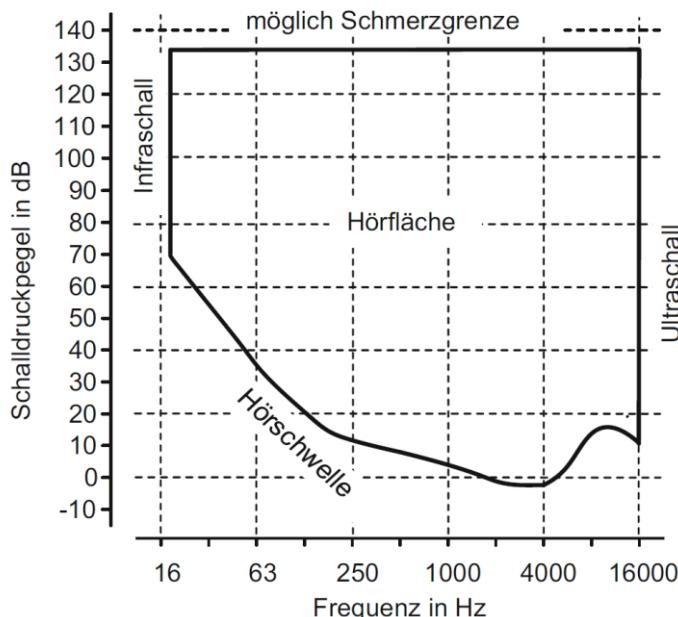


Abbildung 12: Hörläche des menschlichen Ohres und dessen Begrenzungen [43]

Der interessante technische Bereich für diese Ausarbeitung wird durch die Hörläche des Menschen bestimmt, welche etwa bei 16 Hz bis 16 kHz liegt. Die obere Frequenzgrenze schwankt in Abhängigkeit von Lebensalter und körperlicher Verfassung, die untere Frequenzgrenze bezieht sich auf einen 20-jährigen, gesunden Menschen. Mit zunehmendem Lebensalter nimmt die obere Grenze ab. Die Pegel-Skala wird durch die Hörschwelle (etwa 0 dB) und die Schmerzgrenze (etwa 140 dB) abgebildet. [34]

Die Fortpflanzung von Schall kann neben der Übertragung in Gasen (Luftschall) ebenfalls in festen Körpern (Körperschall) oder in Flüssigkeit (Flüssigkeitsschall) stattfinden. Während die Schallausbreitung in Gasen und Flüssigkeiten als Längswellen erfolgt, treten bei festen Körpern durch die größeren Schubspannungen andere Wellenformen auf. [43]

Bei der Messung der genannten Frequenzen, vor allem für die Ermittlung des Eindruckes der Zusammensetzung eines Geräusches, werden oft geringere Auflösungen verwendet. Das bedeutet, der Frequenzbereich wird in Intervalle unterteilt. Bei der Messung eines gleichen Schallereignisses werden Messungen somit reproduzierbar. Für größere Intervalle werden in der Akustik üblicherweise Filter mit konstanter relativer Bandbreite verwendet. Die Bandbreite ist dabei proportional zur Mittenfrequenz  $f_m$ . Die Bandbreite des Filters  $\Delta f$  berechnet sich aus der Differenz von oberer Durchlassgrenze  $f_o$  und unterer Durchlassgrenze  $f_u$ . Die Mittenfrequenz für Filter mit konstanter relativer Bandbreite berechnet sich aus:  $f_m = \sqrt{f_u f_o}$ . Mit zunehmender Mittenfrequenz nimmt die Bandbreite ebenfalls zu. Die wichtigsten Filter sind Oktav- und Terzfilter, deren Zusammenhang in der folgenden Abbildung erläutert wird. [34]

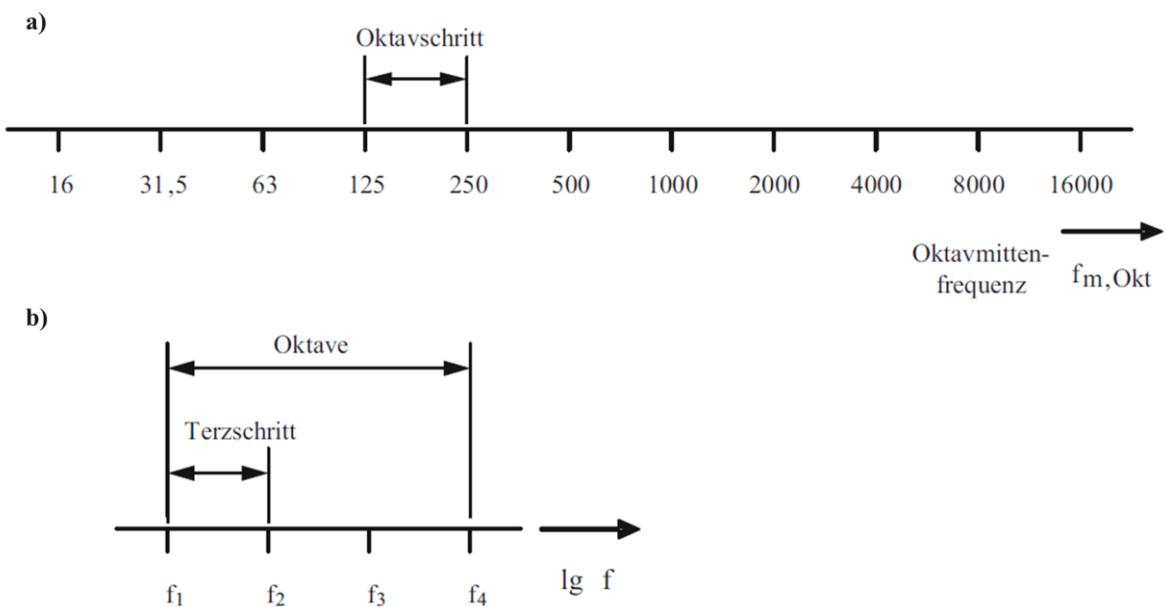


Abbildung 13: a) Oktavleiter und b) Terzschrifte in einer Oktave [43]

Durch die Verwendung von Filtern lässt sich der menschliche Hörbereich von 16 Hz bis 16 kHz logarithmisch aufteilen und die Darstellung wird übersichtlich. Die in Abbildung 13a dargestellte Einteilung ist die sogenannte Oktavleiter mit 10 Oktavschritten. Dabei entsprechen drei Terzschrifte einer Oktave (siehe Abbildung 13b).

### 3.1 Kenngrößen

Für ein besseres Verständnis dieser Ausarbeitung werden nach [34] die wichtigsten Kenngrößen der Akustik dargestellt. Der bereits erläuterte Wahrnehmungsbereich von Schall entspricht physikalisch betrachtet Schalldrücken zwischen  $p = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$  (Hörschwelle) bis  $p = 200 \text{ N/m}^2$  (Schmerzgrenze). Die logarithmierte Pegelskala berechnet sich aus dem Schalldruckpegel  $L_p [\text{dB}]$ .

$$L_p = 20 \cdot \log \left( \frac{p}{p_0} \right) = 10 \cdot \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (3.1)$$

Als Referenzdruck wird national und international  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$  verwendet. Dies entspricht in etwa der Hörschwelle. Zur Beschreibung der Bewegung des lokalen Mediums bei Schwingvorgängen und den damit verbundenen Dichteänderungen wird die Schallschnelle  $v$

verwendet. Die Schallschnelle wird benötigt um die Kenngröße der Intensität  $I$  zu berechnen. Diese beschreibt das Verhältnis der durch die Fläche  $S$  durchfließenden Schallleistung  $P$ , sowie der Fläche  $S$  selbst und berechnet sich aus dem Produkt von Schalldruck und Schallschnelle.

$$I(t) = p(t) \cdot v(t) \quad (3.2)$$

Die Schallintensität lässt sich ebenfalls als Pegel beschreiben, dem Schallintensitätspegel  $L_I$ . Die Bezugsgröße berechnet sich aus dem festgelegten Referenzdruck, Referenzdichte  $\rho_0$  und der Schallgeschwindigkeit  $c$ . Dabei ist  $\rho_0 c = 400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

$$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (3.3)$$

$$I_0 = \frac{p_0^2}{\rho_0 c} = 10^{-12} \frac{W}{m^2} \quad (3.4)$$

Die Schallleistung  $P$  und der dazugehörige Schallleistungspegel  $L_W$  sind weitere maßgebliche Kenngrößen der Akustik. Die Bezugsgröße der Schallleistung  $P_0$  berechnet sich aus der Bezugsgröße  $I_0$ .

$$L_W = 10 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (3.5)$$

$$P_0 = I_0 * 1 \text{ m}^2 = 10^{-12} \text{ W} \quad (3.6)$$

Die Kenngrößen werden bei der Berechnung von Schallleistungspegeln aus Intensitätsmessung sowie für die Erstellung eines Schallleistungsmodells benötigt.

## 3.2 Bewertung von Lautstärke

Der Zusammenhang zwischen der objektiven Größe des Schalldruckpegels und der subjektiven Größe der Lautstärke ist komplex, unter anderem aufgrund der Pegelabhängigkeit vom Frequenzgang der Ohrempfindlichkeit. Deswegen ist es äußerst kompliziert, eine Messtechnik zu entwickeln, die alle Ohreigenschaften berücksichtigt. Zudem gibt es bezüglich der verwendeten Messverfahren neben der bereits angesprochenen Reproduzierbarkeit von Messergebnissen, die Forderung, ein Ergebnis in einem einzigen Zahlenwert auszudrücken. Die Realisierung dieser Forderung wird praktisch durch eine frequenzabhängige Pegeländerung der Anzeige des Messgerätes umgesetzt. Diese Problematik wird durch verschiedene Bewertungskurven berücksichtigt, welche in der folgenden Abbildung dargestellt werden. [34] [43]

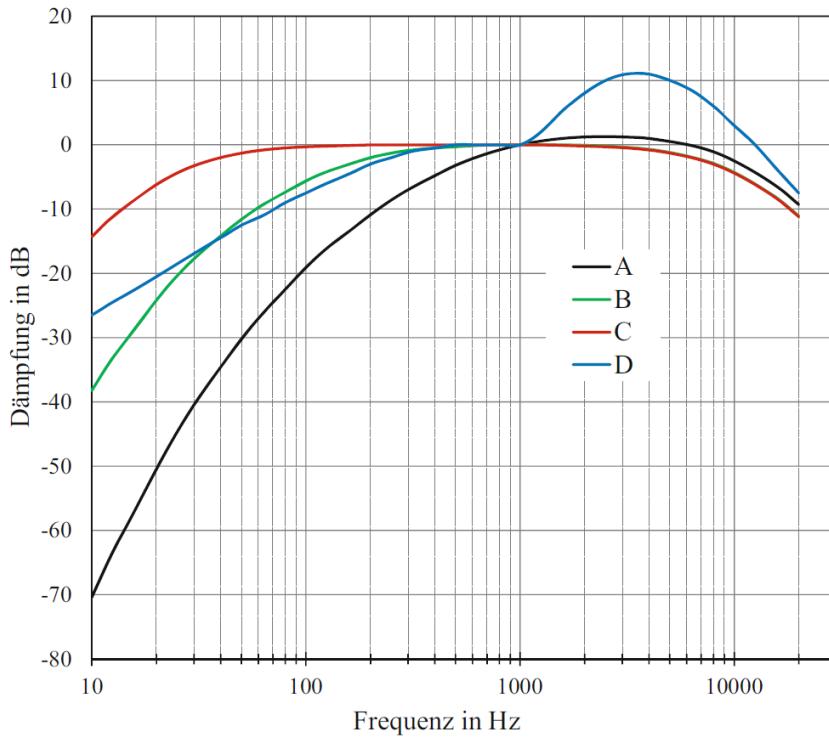


Abbildung 14: Bewertungskurven A, B, C, D [43]

Die Bewertungskurven B, C und D haben heutzutage keine große Bedeutung mehr und werden auch im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht benötigt. Unbewertete Kurven werden Z-Kurven genannt und sind durch dB(Z) gekennzeichnet. In Abbildung 14 würde die Z-Kurve für alle Frequenzen bei 0 dB liegen. International wird zur objektiven Feststellung der Lautstärke der A-bewertete Schalldruckpegel  $L_A$  gemessen. Wie in der Abbildung zu sehen ist, haben bei dieser Bewertungskurve die tiefen und sehr hohen Frequenzen einen wesentlich geringeren Anteil am Schalldruckpegel als die mittleren Frequenzen. Zu berücksichtigen ist, dass bei größeren Lautstärken die subjektive Wahrnehmung durch die Messung des A-bewerteten Pegels etwas unterbewertet ist. Die daraus entstehenden Unterschiede können bei breitbandigen Flugzeuggeräuschen bis zu 14 dB betragen. Aus einer vorhanden Terz- oder Oktavbandanalyse kann der A-bewertete Schalldruckpegel unter Einbeziehung des frequenzabhängigen Dämpfungspegel ( $\Delta L_{Okt}$  und  $\Delta L_{Tz}$ ) berechnet werden. [43]

$$L_A = 10 \log \left( \sum 10^{\frac{L_{Okt} + \Delta L_{Okt}}{10}} \right) \quad (3.7)$$

$$L_A = 10 \log \left( \sum 10^{\frac{L_{Tz} + \Delta L_{Tz}}{10}} \right) \quad (3.8)$$

Für die Bewertung des Geräuschkomforts in Flugzeugkabinen wird entweder der bereits erläuterte A-bewertete Schalldruckpegel verwendet oder der Sprach-Störschallpegel (*Speech-Interference-Level – SIL*) [44]. Aus der Anforderung, dass in Geschäftsflugzeugen häufig Besprechungen abgehalten werden, ist ein niedriger Sprach-Störschallpegel  $L_{SIL}$  ein elementarer Faktor. Er wird aus dem arithmetischen Mittelwert der Pegel von drei (SIL 3) oder vier Oktaven (SIL 4), bei Frequenzen von 0,5 kHz bis 4 kHz, im Hörbereich bestimmt. Dieser Frequenzbereich ist entscheidend für die Sprachverständlichkeit [45]. Der Sprach-Störschallpegel kann hilfreich sein, um akustische Verkleidungen oder Schallschutzmatten zu vergleichen. Durch die limitierte Frequenzbreite bei der Berechnung wird jedoch nicht die

Veränderung des Lärms und somit des Passagierkomforts durch niederfrequente Geräusche (Triebwerks- und Windgeräusche) erfasst [46]. Eine gute Verständlichkeit von Sprache ist zwischen 45 dB SIL (sehr leise und leichte Sprache) und 60 dB SIL (erzwungene, aber verständliche Sprache) gewährleistet. Bei größeren Werten nimmt die Verständlichkeit ab und bei 75 dB SIL würde Sprache aufgrund von Hintergrundgeräuschen unverständlich sein. [6]

### 3.3 Schallquellen, Schallausbreitung und Absorption

Ein Schallfeld mit einer bestimmten Schalldruckpegelverteilung resultiert aus einer oder mehreren Schallquellen. Das Schallfeld wird durch die Schallquelle selbst, deren geometrische Form und gegebenenfalls Richtcharakteristiken sowie den akustischen Eigenschaften der Umgebung bestimmt. Bei Schallquellen wird unter anderem zwischen Punktschallquellen sowie Linien- und Flächenschallquellen unterschieden. Außerhalb des Nahfelds im Fernfeld gilt für die Schallleistung von Punktschallquellen folgender Zusammenhang. [43]

$$P = I(r) \cdot 4\pi r^2 \quad (3.9)$$

Für eine Linienquelle (theoretisch unendlich langer, gerader Strahler) gilt unter der Voraussetzung einer verlustfreien Ausbreitung der Schallenergie:

$$P' = I(r) \cdot 2\pi r \quad (3.10)$$

$P'$  gibt die Schallleistung pro Länge in Watt pro Meter in Bezug auf die Entfernung zur Quelle an. Bei einer Linienschallquelle beträgt die Pegelabnahme bei einer Abstandsverdopplung 3 dB, bei einer Punktschallquelle beträgt diese 6 dB. Bei der Schallausbreitung in einem Raum kommt es wegen der Begrenzungen zusätzlich zu Reflexionen, wodurch sich das Schallfeld verstärkt, wie in folgender Abbildung zu sehen. [43]

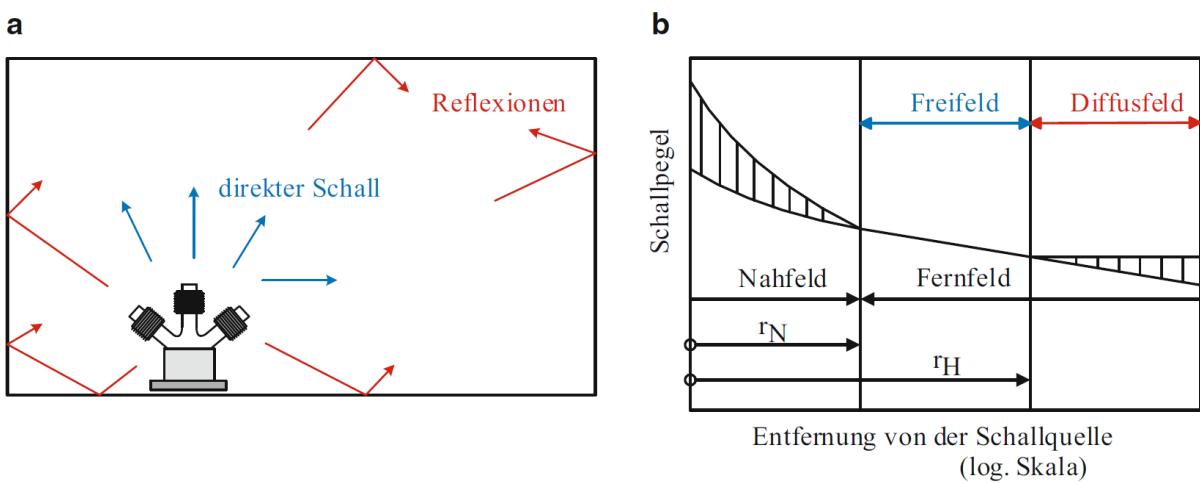


Abbildung 15: a) Schallausbreitung in geschlossenen Räumen, b) Schallpegel in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schallquelle (qualitativ) [43]

In unmittelbarer Umgebung eines Kugelstrahlers 0. Ordnung mit dem Durchmesser  $d_0$  baut sich ein Nahfeld auf, welches durch den größeren Wert des Kugelradius, berechnet durch  $r_{N1} = 1,5 \cdot \lambda$  oder  $r_{N2} = 1,5 \cdot d_0$ , begrenzt wird. Daran anschließend folgt das Fernfeld. Bis zum Kugelradius  $r_H$  (auch Hallradius genannt) gibt es eine Freifeldzone, in welcher der Schalldruckpegel um 6 dB pro Abstandsverdopplung abfällt. Anschließend folgt das Diffusfeld,

welches in einem geschlossenen Raum das dominierende Schallfeld ist. Durch Reflexionen ist der Schalldruckpegel unabhängig vom Ort und zudem größer als unter Freifeldbedingungen. In zu kleinen Räumen kann es dazu kommen, dass sich ein Freifeld aufgrund starker Reflexionen nicht ausbildet. Der Hallradius hängt von der Gesamtabsorption  $\bar{A}_{ges}$  des Raumes ab. [43]

$$r_H = 0,141 \sqrt{\bar{A}_{ges}} \quad (3.11)$$

Das Absorptionsvermögen eines Raumes setzt sich aus der Absorption der begrenzenden Wände, der Decke und des Bodens, inklusive aller im Raum enthaltenen Raumelemente sowie gegebenenfalls Personen zusammen. Für die Bestimmung der Gesamtabsorption werden die Absorptionen aller Einzelelemente, welche sich aus der Absorptionsfläche  $A$  und dem Absorptionsgrad  $\alpha$  (zur Berücksichtigung von Poren oder Resonanzabsorbern) ergeben, aufsummiert. Sollte es nicht möglich sein die Absorptionsfläche eines Raumelementes aufgrund des Fehlens von einer Bezugsfläche zu bestimmen, kann die äquivalente Absorptionsfläche  $\bar{A}$  angegeben werden. [43]

$$\bar{A}_{ges} = \sum_{i=1}^n \alpha_i A_i + \sum_{j=1}^m \bar{A}_j \quad (3.12)$$

In Bezug auf die Frequenz, wird die Gesamtabsorption frequenzabhängig in einem Oktavspektrum dargestellt oder als Mittelwert, welcher sich an einer Frequenz von etwa 500 Hz orientiert. Aus der Gesamtabsorption kann ebenfalls die Nachhallzeit berechnet werden. Die Nachhallzeit  $T$  gibt die Zeit an, die nach dem Abschalten der Schallquelle vergeht, bis die Schallenergie auf den millionsten Teil des Anfangswertes abgeklungen ist und der Pegel somit um 60 dB abgefallen ist [34]. Diese berechnet sich in einem mit Luft gefüllten Raum aus folgender Formel, auch Sabine'sche Nachhall-Formel genannt. [43]

$$T = 0,163 \frac{s}{m} \cdot \frac{V}{\bar{A}_{ges}} \quad (3.13)$$

Ebenso kann aus einer gemessenen Nachhallzeit auf die Gesamtabsorption zurückgeschlossen werden, wenn das Volumen  $V$  des Raumes bekannt ist. Der Wert von 0,163 s/m (Sekunden pro Meter) wurde speziell für das Medium Luft berechnet.

### 3.4 Schalltransmission und Schall in geschlossenen Räumen

An einer Wand wird die einfallende Energie in unterschiedliche Teilenergien aufgeteilt. Die von der Wand absorbierte Energie teilt sich in Körperschallenergie, transmittierte Energie und Dissipationsenergie auf. Dissipationsenergie wird vor allem vom vorderen Teil der Wand aufgenommen und in Wärme umgewandelt. Transmittierte Energie wird von der Wand durchgelassen und in den hinter der Wand liegenden Luftraum abgestrahlt. Körperschallenergie versetzt die Wand selbst in Erregung. Ein Teil der einfallenden Energie wird zudem als reflektierte Energie an den vor der Wand liegenden Luftraum zurückgegeben. Die Verhältnisse sind in folgender Abbildung dargestellt. Zu berücksichtigen ist, dass die Teilenergien von den Wandeigenschaften abhängen. [43]

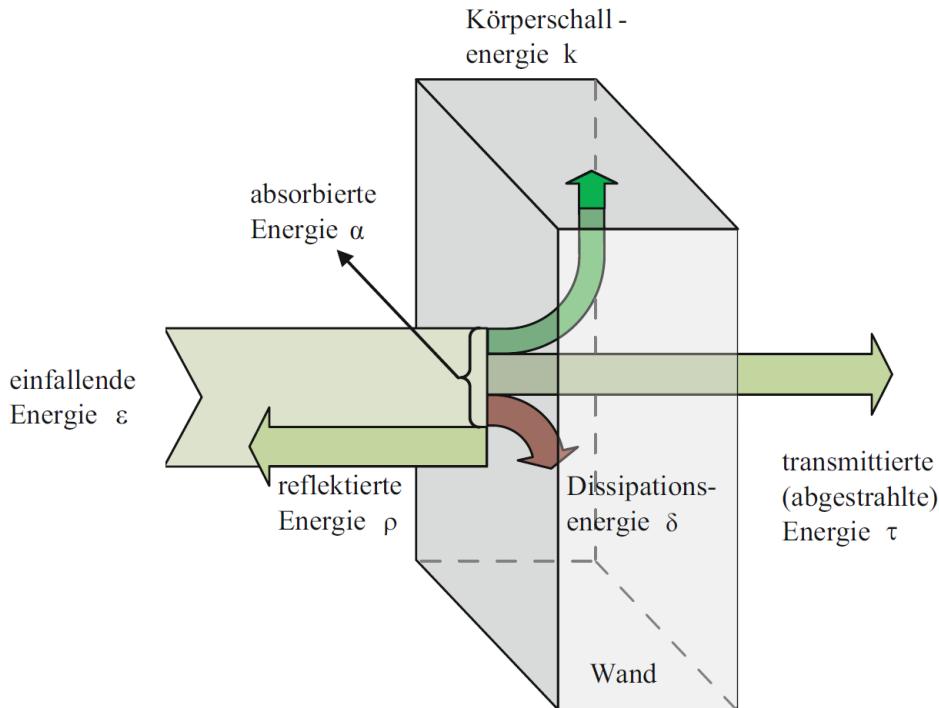


Abbildung 16: Schallenergiebilanz an einer Wand [43]

Absorptions- und Reflexionsgrad sind vor allem von den verwendeten Oberflächen der Wand abhängig. Die Schalldämmung der Wand ist entsprechend groß, wenn der Transmissionsgrad klein ist. Aus dem Transmissionsgrad  $\tau$  kann das Schalldämmmaß  $R$  (Güte der Dämmwirkung) der Wand bestimmt werden.

$$R = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\tau}\right) \quad (3.14)$$

Das Schalldämmmaß wird abhängig von den Eigenschaften der Wand unterschiedlich berechnet. Bei biegeweichen, ebenen Wänden ergibt sich das Schalldämmmaß (senkrechter Schalleinfall) aus dem sogenannte Massegesetz [43].

$$R = 10 \cdot \log \left[ 1 + \left( \frac{\omega \cdot m''}{2 \cdot Z} \right)^2 \right] \quad (3.15)$$

Dabei ist  $Z = \rho_0 \cdot c_0$  die Schallkennimpedanz,  $\omega$  die Kreisfrequenz und  $m''$  die flächenbezogene Masse. Das Massegesetz besagt, dass  $R$  mit 6 dB je Oktavband sowie mit 6 dB je Massenverdopplung steigt [34]. Für die Berechnung des diffusen Schalleinfalls werden vom Schalldämmmaß 3 dB abgezogen. Für die Betrachtungen in Flugzeugen sind vor allem Doppelwandaufbauten von Interesse. Da Doppelwände andere Eigenschaften als ebene Wände haben, weicht die Berechnung des Schalldämmmaßes ebenfalls ab. Theoretisch müsste das Hinzufügen einer weiteren Wand eine angenommene Massenverdopplung und somit die Erhöhung des Schalldämmmaßes um 6 dB bei senkrechtem Schalleinfall darstellen. In der Praxis müssen die Wände dafür jedoch strukturell entkoppelt (keine Körperschallübertragung) werden und der Wandabstand zwischen den Wänden müsste groß gegenüber der Wellenlänge sein. Beide Annahmen sind im Flugzeug nicht gegeben. Für Doppelwände wurde ein Feder-Masse-Ersatzsystem entwickelt. Dabei stellen die Wände die Massen und der Luftraum bzw. die Dämpfschicht die Feder dar. Das Schalldämmmaß von Doppelwänden aus biegeweichen Schalen berechnet sich zu [43]:

$$R = 20 \cdot \log \left( \omega \cdot \frac{m_1'' + m_2''}{2 \cdot Z} \right) + 40 \cdot \log \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (3.16)$$

Das Schalldämmmaß von Wandaufbauten kann auch aus gemessenen Pegeln berechnet werden. Dafür wird in einem Senderaum mit der Quelle der Schalldruckpegel  $L_S$  erzeugt, das Messobjekt mit der Fläche  $S$  wird als Trennwand zwischen Senderaum und dem Empfangsraum eingebracht. Dann wird der Schalldruckpegel  $L_p$  im Empfangsraum gemessen. Die folgende Abbildung zeigt diesen Messaufbau.

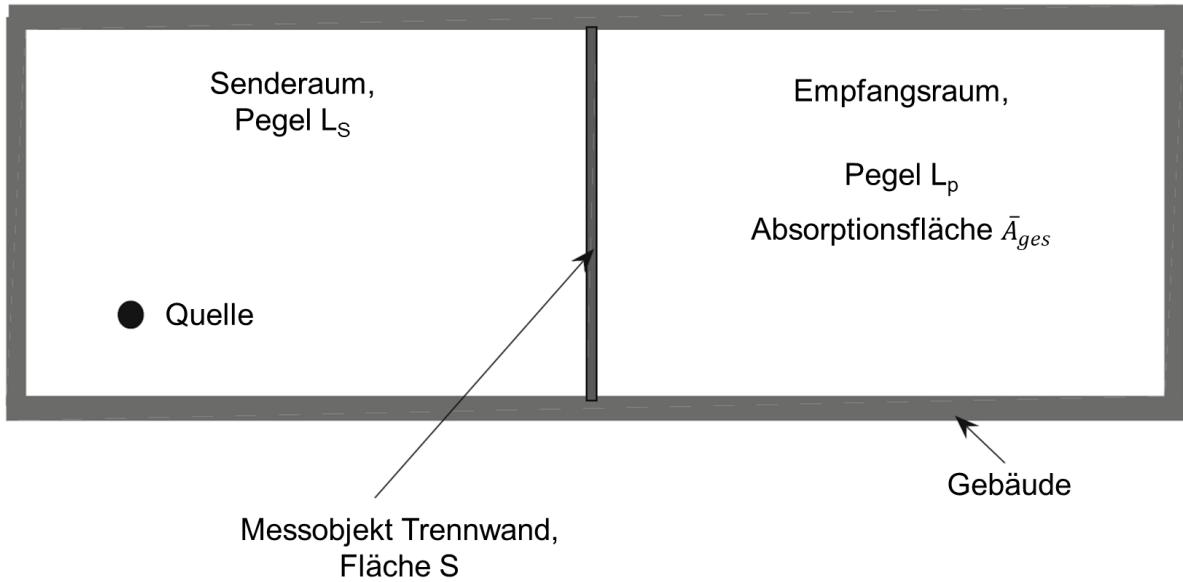


Abbildung 17: Messanordnung zur Bestimmung des Dämmmaßes der Trennwand zwischen zwei Räumen

Für die Berechnung des Schalldämmmaßes des Messobjektes muss die Gesamtabsorption bekannt sein. Dann kann das Schalldämmmaß wie folgt berechnet werden:

$$R = L_S - L_P - 10 \cdot \log \frac{\bar{A}_{ges}}{S} \quad (3.17)$$

Der Schalldruckpegel in einem Raum kann bei gegebener einfließender Schallleistung  $L_w$  und äquivalenter Absorptionsfläche vorausberechnet werden. Folgende Gleichung gilt für einen Raum mit diffusem Schallfeld. [43]

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log \frac{\bar{A}_{ges}}{S_0} + 6 - K_0 \text{ dB} \quad (3.18)$$

$$K_0 = -10 \cdot \log \frac{\rho \cdot c}{400} \text{ dB}$$

Dabei ist  $K_0$  der Korrekturpegel für die Kennimpedanz und die Bezugsfläche  $S_0 = 1 \text{ m}^2$ . Eine Verdopplung der äquivalenten Absorptionsfläche würde in einer Reduzierung des Schalldruckpegels im Raum um 3 dB resultieren. [43]

### 3.5 Körperschall und Schallabstrahlung

Wie bereits am Anfang dieses Kapitels erwähnt wurde, lässt sich die Schallentstehung in Luft- und Körperschall, sowie Flüssigkeitsschall (nicht von Bedeutung für diese Ausarbeitung) aufteilen. Luftschatll entsteht durch Pulsation, Turbulenzen oder Verdichtungsstöße von z.B. Ventilatoren oder Blasinstrumenten, wodurch die umgebende Luft angeregt wird und somit

Schall übertragen wird. Bei direkter Luftschallabstrahlung  $P_L$  (Luftschallleistung) durch Öffnungen und Undichtigkeiten trägt Luftschall zur Gesamtschallemission bei. Körperschall entsteht durch mechanische Stöße, Unwuchten oder magnetische Kräfte z.B. von Getrieben oder Transformatoren. Die direkt angeschlossene Struktur (z.B. ein Maschinengehäuse) wird somit erregt und strahlt Schall ab. Die sogenannte indirekte Luftschallabstrahlung  $P_K$  (Körperschallleistung) durch Körperschallschwingungen der Struktur trägt ebenfalls zur Gesamtschallemission bei. Diese berechnet sich wie folgt. [43]

$$P_{ges} = \sum_i P_{L,i} + \sum_j P_{K,j} \quad (3.19)$$

Die schematische Darstellung der Schallleistungsmechanismen ist [43] zu entnehmen. Vom Ohr wird die Gesamtschallemission immer als Luftschall wahrgenommen, eine Unterscheidung in direkte (Luftschall) und indirekte (Körperschall) Schallentstehung ist aufgrund der zu entwickelnden Lärmminderungsmaßnahmen jedoch notwendig. Bei der Betrachtung von Maschinen (zum Beispiel Treibstoffpumpen oder elektronische Geräte in der Bordküche) können die einzelnen Teilschallleistungspegel aus einzelnen Körperschall- und Luftschalleinträgen bestimmt werden und an den identifizierten Schwachstellen Schallminderungsmaßnahmen durchgeführt werden. Die abgestrahlte Leistung entspricht im einfachsten Fall der Intensität multipliziert mit der betrachteten Fläche  $A$ . Die Körperschallleistung berechnet sich aus der Schallkennimpedanz  $Z$ , der Fläche, dem Quadrat des Effektivwertes der Schallschnelle  $\tilde{v}^2$  und dem Abstrahlgrad  $\sigma$ . [43]

$$P_K = \tilde{v}^2 \cdot S \cdot Z \cdot \sigma \quad (3.20)$$

Abhängig von der Größe der Strukturen können auch einzelne Körperschallleistungen in Bezug auf Teilflächen bestimmt werden. Die Schallschnelle  $v$  kann für die Berechnung der Körperschallleistung mit wenig Aufwand messtechnisch bestimmt werden. Zuerst wird die Körperbeschleunigung gemessen, woraus sich durch Integration die Körperschallschnelle berechnen lässt. Anschließend wird der Effektivwert durch einen sogenannten Effektivwert-Detektor berechnet. Der Abstrahlgrad sagt aus, wie stark der Einfluss von Strukturschwingungen auf die Schallabstrahlung ist. Maximale Abstrahlung liegt bei  $\sigma = 1$  vor, minimale Abstrahlung bei  $\sigma = 0$ . Das Abstrahlmaß  $\sigma' = 10 \log(\sigma) dB$  wird zur logarithmischen Darstellung des Abstrahlgrades verwendet. [43]

## 4 Methodik und Vorgehensweisen

In diesem Kapitel wird die allgemeine Methodik dieser Abschlussarbeit für die Quantifizierung von Schallleistungsbeiträgen durch Messungen, die Erstellung eines Schallleistungsmodells und die Minimierung des Schalldruckpegels erläutert. Zudem wird eine spezifische Methodik zur Bestimmung des Schallleistungspegels aus Intensitätsmessungen behandelt. Dabei wird auf Besonderheiten bezüglich der Grenzwerte und Genauigkeitsklassen sowie Richtcharakteristiken einer Intensitätssonde hingewiesen.

### 4.1 Methodik der Ausarbeitung

Die Methodik dieser Ausarbeitung wird anhand der folgenden Darstellung aufgezeigt und im weiteren Verlauf dieses Abschnittes erläutert.

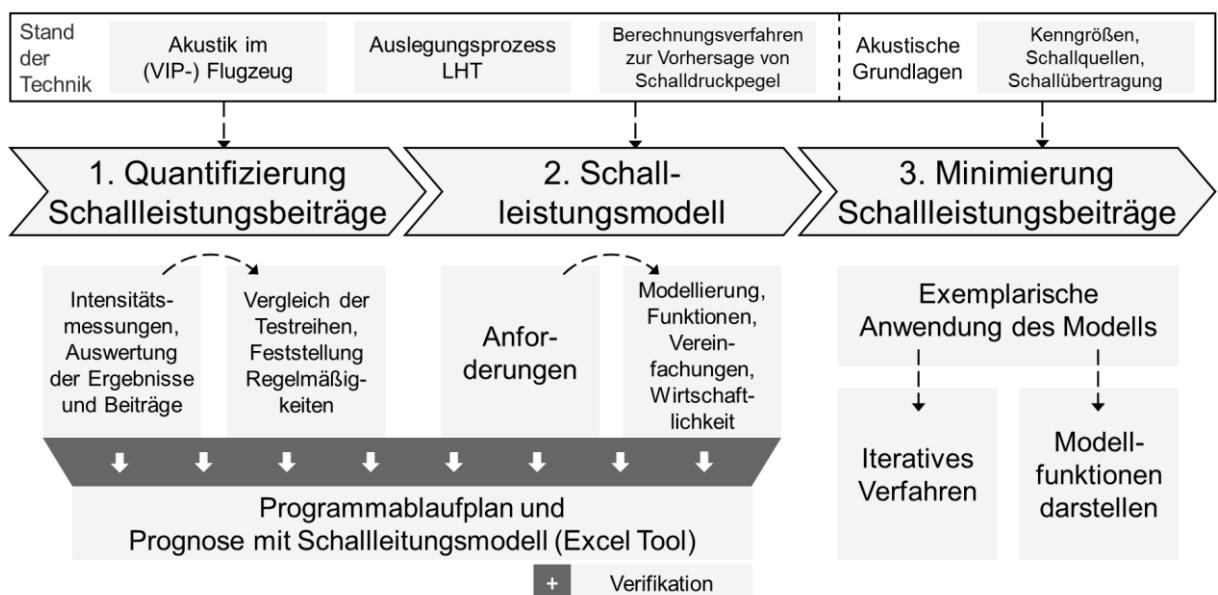


Abbildung 18: Allgemeine Methodik

Im oberen Teil der Abbildung ist das Rahmenwerk dieser Ausarbeitung, bestehend aus dem Stand der Technik und den akustischen Grundlagen aufgeführt. Das Rahmenwerk wirkt sich durch verschiedene Aspekte auf die darunter stehenden drei Haupteile aus. Im Stand der Technik wird das Thema eingeordnet und es wird ersichtlich, wieso das Thema dieser Arbeit einen weiteren Bearbeitungsbedarf hat und warum die Ergebnisse aus dem Stand der Technik heute noch nicht ausreichend sind. Die akustischen Grundlagen erläutern Grundbegriffe und notwendige Formeln sowie Herleitungen für die durchgeführten Berechnungen in Kapitel 5 und 6. Die benötigten Formeln werden in dem Grundlagenkapitel dargestellt, sodass bis auf die Erläuterung einer Norm im folgenden Abschnitt und der Berechnungen im Schallleistungsmodell in Abschnitt 6.2.3, nur wenige Formeln im Fließtext des Hauptteils notwendig sind.

In dem ersten Hauptteil (Kapitel 5), der Quantifizierung von Schallleistungsbeiträgen durch Intensitätsmessungen (experimentelle Forschung), werden Versuchsaufbau, Versuchsdurchführung und die Darstellung der Ergebnisse von Schallintensitätsmessungen

nach Norm beschrieben. Allgemein werden die prozentualen Beiträge der unterschiedlichen Schallpfade zum einfließenden Schallleistungspegel in die Kabine ermittelt und somit dominante Schallpfade identifiziert. Insgesamt werden vier Testreihen durchgeführt: HCAT (*Hamburg Centre of Aviation Training-Lab* an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg), VIP A319, Standard A321, VIP A350. Zuerst wird eine Intensitätsmessung im HCAT durchgeführt. Dabei werden leichte Abweichungen von der Norm für Intensitätsmessungen vorgenommen, damit ein zuverlässiges Messverfahren für Messflüge etabliert werden kann. Während dieser Flüge treten verschiedene Besonderheiten vor allem im Hinblick auf Störgeräusche und des verfügbaren Zeitrahmens auf. Bei der Messung im HCAT wird die selbst gebaute Intensitätskiste als Messequipment verwendet und dessen Auswirkung auf die Messgenauigkeit untersucht. Anschließend werden die Messflüge auf VIP A319, Standard A321 und VIP A350 erläutert und deren Ergebnisse dargestellt. Ergänzende Messungen, welche sich nicht auf Messungen von Schallintensitätspegeln verschiedener Segmente eines Querschnitts im Flugzeug beziehen, werden in den Anhang D aufgenommen. Zum Schluss dieses Kapitels werden die verschiedenen Messungen verglichen, damit Regelmäßigkeiten in Bezug auf dominante Schallpfade festgestellt werden können.

Im zweiten Hauptteil (Kapitel 6), dem Schallleistungsmodell, werden die Messergebnisse der Schallintensitätsmessungen in ein Modell überführt. Es wird ein einfaches, grundlegendes Schallleistungsmodell aufgebaut, welches aus den eingegebenen Intensitätspegeln einen Schalldruckpegel in der Kabine berechnet und die Möglichkeit zur Minimierung einzelner Schallpfade durch ein iteratives Verfahren bietet. Die Minimierung stellt dar, welche Anstrengungen theoretisch unternommen werden müssen, um den Schalldruckpegel auf einen geringeren Zielpegel zu reduzieren. Dafür werden Anforderungen resultierend aus dem Auslegungsprozess und Interviews mit den LHT Akustikern ermittelt. Darauf aufbauend werden die Art der Modellierung (Excel), der Aufbau des Modells und dessen Funktionen erläutert. Danach werden die erforderlichen Vereinfachungen und Fehlereinflüsse beschrieben sowie der Aspekt Wirtschaftlichkeit kurz beleuchtet. Für die Umsetzung wird ein Programmablaufplan erstellt. Das Modell soll keine SEA-Simulation ersetzen, sondern einfache Zusammenhänge darstellen und die Grundlage für Erweiterungen liefern. Zum Schluss findet eine Modellverifikation statt. Für die Verifikation werden gemessene Schalldruckpegel und berechnete Schalldruckpegel mit dem Modell für die vier Testreihen verglichen.

Das Schallleistungsmodell wird anschließend im dritten Hauptteil (Kapitel 7) für eine exemplarische Minimierung verwendet. Dies dient dazu die verschiedenen Funktionen des Modells aufzuzeigen und die hohen Aufwände für einen geringeren Schalldruckpegel ersichtlich zu machen. Dabei werden einzelne Iterationen (Zwischenstände bei der Minimierung) dargestellt. Ziel der Minimierung ist das Eliminieren dominanter Schallpfade und das Senken der Beiträge verschiedener Schallpfade auf ein ähnliches Niveau.

Abschließend wird die Diskussion zur Interpretation und Beurteilung der Ergebnisse dienen. Zudem werden Optimierungsmöglichkeiten für die Schallintensitätsmessung bei Flügen sowie für die Erweiterung des Schallleistungsmodells genannt.

## 4.2 Spezifische Methodik zur Bestimmung des Schallleistungspegels aus Intensitätsmessungen

Die Methodik zur Bestimmung des Schallleistungspegels aus Intensitätsmessungen nach [47] wird erläutert, damit ein einheitliches Vorgehen für die Intensitätsmessungen in Kapitel 5 gegeben ist. Die Art der Auswertung, das heißt die Betrachtung von Messgenauigkeiten, Ergebnissen und Berechnung von Schallleistungen aus den gemessenen Intensitätspegeln, wird vereinheitlicht. Es wird aufgezeigt, welche Aspekte laut Norm theoretisch erfüllt werden müssen. Ein leicht von dieser Norm abweichendes Messverfahren wird in Kapitel 5 entwickelt.

Die zu untersuchende Messfläche wird in aneinandergrenzende Segmente aufgeteilt. Entlang eines bestimmten Pfades wird die Intensität der einzelnen Segmente gemessen und das Messgerät ermittelt daraus die mittlere Normalkomponente der Schallintensität während der Dauer des Abtastvorganges. Die Quelle wird dabei durch die Wahl der Messfläche definiert. Anforderungen an die akustische Umgebung bzgl. des Pegels der Fremdschallintensität müssen eingehalten werden. Intensitäten resultierend aus Fremdschallquellen können durch Schallschirme abgeschirmt werden. Die Abtastung der Messfläche kann entweder mit einem mechanischen System oder manuell durchgeführt werden. Dabei muss die Intensitätssonde kontinuierlich entlang eines vorher festgelegten Pfades bewegt werden, sodass der Abstand der benachbarten Linien gleich groß ist. Die Sonde wird während der Abtastung immer senkrecht zur Messfläche gehalten. Die Abtastgeschwindigkeit beträgt bei einer manuellen Messung zwischen 0,1 m/s bis 0,5 m/s und die Dauer des Abtastvorgangs soll größer als 20 Sekunden sein. Die Messfläche muss in mindestens vier Segmente aufgeteilt werden. Die Segmente sind so zu wählen, dass eine kontinuierliche Abtastung senkrecht zur Oberfläche möglich ist, der Flächeninhalt exakt zu bestimmen sein muss und die Bereiche der Messfläche mit negativer Teilschallleistung von denen mit positiver getrennt werden. Dies ist elementar bei Messbereichen, welche stark von Fremdschallquellen beeinflusst werden. Die Intensitätssonde ist abhängig von der zu untersuchenden Fläche mit einem Abstand von 10 bis 20 cm entfernt zu halten. Nach der Messung werden für jedes einzelne Segment und für jedes Frequenzband nach Formel (3.3) zuerst aus den gemessenen Schallintensitätspegeln die Schallintensitäten bestimmt. Anschließend werden die Teilschallleistungen  $P_i$  berechnet.

$$P_i = I_{ni} \cdot S_i \quad (4.1)$$

Dabei beschreibt  $I_{ni}$  die über ein Segment  $i$  gemittelte Normalkomponente der Schallintensität der zu untersuchenden Messfläche. Der Flächeninhalt des Segments  $i$  ist  $S_i$ . Absorbierte Schallleistung erscheint als negativer Anteil und kann einen Fehler bei der Schallleistungsbestimmung bewirken. Deswegen wird in der Formel mit dem Betrag der gemessenen Intensität gerechnet. Eine Überprüfung der Gültigkeit der Messungen für diese negativen Teilschallintensitäten erfolgt im Rahmen der Bestimmung der Genauigkeitsklassen. Die Berechnungen nach [47] gelten nicht in Frequenzbereichen, in denen eine negative Schallleistung der Quelle gemessen wurde. Im nächsten Schritt wird aus den einzelnen Geräuschquellen der Schallleistungspegel der Geräuschquelle berechnet.

$$L_W = 10 \cdot \log \left| \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{P_0} \right| I_{ni} \cdot S_i \text{ dB} \quad (4.2)$$

Dabei ist  $N$  die Gesamtzahl der Messsegmente. Der berechnete Wert gibt die Schallleistung für jedes Frequenzband an. Alle Segmente haben abhängig vom Intensitätspegel und der Segmentfläche einen unterschiedlichen Beitrag zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel. Bei der Darstellung dieser Beiträge werden in dieser Ausarbeitung pro Terzband die jeweils vier höchsten Beiträge hellrot eingefärbt, um die dominanten Schallpfade zu identifizieren. Ein Schallpfad ist dominant, wenn er im Vergleich zu den anderen Schallpfaden einen entscheidenden prozentualen Anteil zur gesamten Schallleistung beiträgt.

#### 4.2.1 Grenzwerte und Genauigkeitsklassen

Die Ergebnisse einer Messung sind in dieser Ausarbeitung, abhängig von dem verwendeten Messequipment und der Messumgebung, nur für einen bestimmten Frequenzbereich zu betrachten. Der Hersteller der Intensitätssonde gibt bei der Verwendung eines 12 mm Abstandhalters eine Genauigkeit der Intensitätspegel von 1 dB bis zu einer oberen Grenzfrequenz von 5000 Hz an. Dies hat den Hintergrund, dass es zu Ungenauigkeiten kommt, wenn die gemessenen Wellenlängen im Vergleich zum Abstand zwischen den Mikrofonen zu klein werden. Die untere Grenzfrequenz für den 12 mm Abstandhalter liegt laut Spezifikation bei 250 Hz. Für die Darstellung der Ergebnisse ist ein sinnvoller Diagrammbereich in Bezug auf die Frequenz zu wählen. Unter Berücksichtigung der erläuterten unteren sowie oberen Grenzfrequenz der Messungen werden die Diagramme und Tabellen in den folgenden Kapiteln in einem Bereich von 250 Hz bis 5000 Hz abgebildet. [48]

Die Genauigkeitsklasse und die Gültigkeit einer Messung werden gemäß [47] durch drei Kriterien bestimmt. Abhängig von der Erfüllung dieser Kriterien sind weitere Einschränkungen für den zu betrachtenden Frequenzbereich bei der Auswertung vorzunehmen. Dafür ist die Berechnung der sogenannten Feldindikatoren für alle Frequenzbänder einer Messfläche notwendig. Sie werden als der Messflächenschalldruck-Intensitäts-Indikator  $F_{M,pI}$  und der Indikator zur Kennzeichnung negativer Teilschallleistungen  $F_{+/-}$  bezeichnet. Beide Indikatoren werden aus den Messergebnissen aller Segmente bestimmt. Die Betrachtung negativer Schallleistungen ist wichtig, da die Schallintensität eine vektorielle Größe ist und somit positive Werte bei einem Schalleinfall aus der Hauptmessrichtung und negative Werte bei einem Schalleinfall von hinten angezeigt werden.

$$F_{M,pI} = L_p - L_W + 10 \cdot \log \left( \frac{\sum S_i}{S_0} \right) \text{ dB} \quad (4.3)$$

$$F_{+/-} = 10 \cdot \log \left( \frac{\sum |P_i|}{\sum P_i} \right) \text{ dB} \quad (4.4)$$

Dabei ist  $S_0 = 1 \text{ m}^2$  der Bezugsflächeninhalt und  $[L_p]$  der mittlere Messflächenschalldruckpegel. Dieser berechnet sich aus:

$$L_p = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{S} \cdot \sum_{i=1}^N S_i \cdot 10^{L_{pi}} \right] \text{ dB} \quad (4.5)$$

Aus den Feldindikatoren wird im Folgenden die Genauigkeitsklasse durch die Erfüllung bestimmter Kriterien definiert. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Genauigkeitsklassen, Kriterien, Standardabweichungen und dem systematischen Fehlermaß.

Tabelle 2: Genauigkeitsklassen bei Messungen gemäß [47]

Genauigkeitsklasse (GK)	Zu erfüllende Kriterien	Standardabweichung $s$ [dB]	Systematisches Fehlermaß $K$ [dB]
GK 2	Kriterien 1,2,3	1,5	10
GK 3	Kriterien 1,3	4	7

Zur Bestimmung der Genauigkeitsklasse werden die entsprechenden Werte für Standardabweichung und systematischem Fehlermaß in die Gleichungen der Kriterien zusammen mit den Messwerten eingesetzt.

$$\text{Kriterium 1: } L_D > F_{M,pI} \quad (4.6)$$

$$\text{Kriterium 2: } F_{+/-} \leq 3 \text{ dB} \quad (4.7)$$

$$\text{Kriterium 3: } |L_{Wi}(1) - L_{Wi}(2)| \leq s \quad (4.8)$$

Bei der Auswertung der Messungen im folgenden Kapitel werden die Frequenzbänder in den Tabellen rot eingefärbt, die ein Kriterium für eine bestimmte GK nicht erfüllen. Der Arbeitsbereich berechnet sich abhängig von der zu bestimmenden GK aus  $L_D = \delta_{pI0} - K$ . Dabei ist  $\delta_{pI0}$  der Druck-Restintensitäts-Abstand, welcher durch den Hersteller der Intensitätssonde zu  $\delta_{pI0} = 16,8$  angegeben wird [48]. Bei der Berechnung von Kriterium 3 beschreibt  $L_{Wi}(1)$  den berechneten Schallleistungspegel aus einer ersten Messung eines bestimmten Segmentes und  $L_{Wi}(2)$  dessen Wiederholmessung. Das heißt, wenn die GK2 erreicht werden soll, muss für jedes Segment eine Wiederholmessung stattfinden. Wenn bestimmte Kriterien für die Erlangung einer gewünschten GK nicht erfüllt werden, können Maßnahmen für die Messumgebung getroffen werden, zum Beispiel durch das Einbringen von absorbierendem Material oder durch das Erhöhen des Abstandes zwischen Sonde und Segment. Die Betrachtung der Ergebnisse kann neben der Messfläche ebenfalls auf einzelne Segmente bezogen werden, beispielsweise für die Recherche des ausschlaggebenden Segmentes, wenn das Kriterium 1 nicht erfüllt wird. Bei der Messung wird ebenfalls der für ein Segment  $i$  berechnete Druck-Intensitäts-Index  $F_{pI,i}$  als Ergebnis ausgegeben und kann im Einzelfall ebenfalls herangezogen werden. [49]

Der Indikator  $F_{pI,i}$  wird vom Schallanalysator als Messergebnis ausgegeben und muss nicht gesondert berechnet werden. Aus der Berechnung des Arbeitsbereiches der Messung ergeben sich für  $F_{pI,i}$  sinnvolle Einteilungen: Alle Werte für  $F_{pI,i} > 9,8$  resultieren in einem ungenauen Ergebnis für das Frequenzband eines Segmentes und werden in den tabellarischen Darstellungen der folgenden Kapitel hellrot eingefärbt. Werte für  $F_{pI,i} > 6,8$  resultieren in GK 3 und werden gelb eingefärbt. Auch wenn auf einzelnen Frequenzbändern eines Segmentes der Grenzwert von 9,8 überschritten wird, kann die Messung trotzdem gültig

sein. Werte für  $F_{pI,i} < 6,8$  Messungen sind in den Tabellen nicht gesondert eingefärbt und resultieren bei der Berechnung der Kriterien in GK 2.

#### 4.2.2 Richtcharakteristik der Intensitätssonde

Bei der Messung mit einer Intensitätssonde müssen die Richtcharakteristiken der Sonde berücksichtigt werden. Die Schallintensität ist eine vektorielle Größe und mit der Sonde wird der Anteil in einer Richtung, entlang der Sondenachse gemessen, nicht aber der komplette Vektor. Für Schall, der in einem Winkel von  $90^\circ$  zur Sondenachse einfällt, wird keine Intensität gemessen, da es keinen Unterschied in den beiden Schalldrücken der Mikrofone gibt. Wenn Schall in einem beliebigen Winkel  $\theta$  zur Achse einfällt, wird die Intensität entlang der Achse um den Faktor  $\cos \theta$  reduziert. Der erläuterte Zusammenhang wird in folgender Abbildung dargestellt. [50]

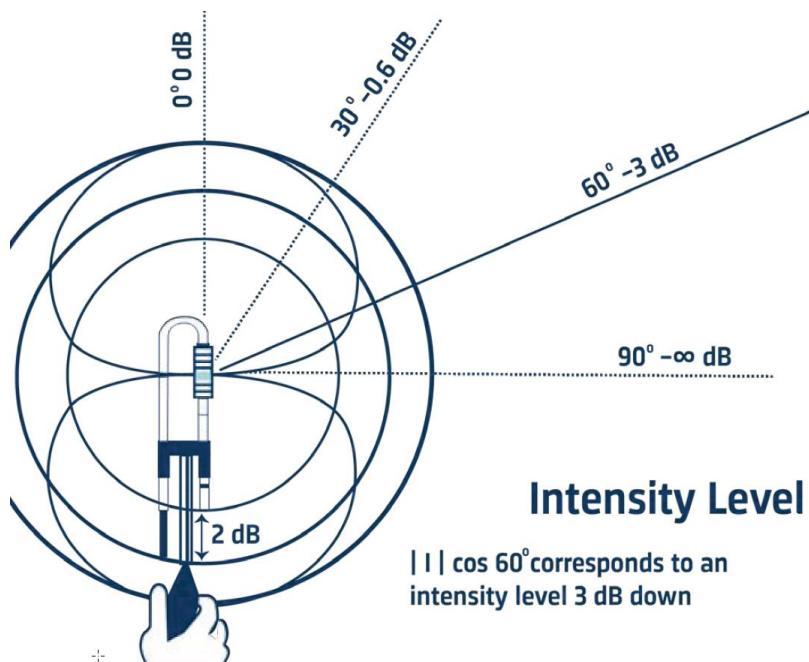


Abbildung 19: Reduktion des Schallintensitätspegels in Abhängigkeit vom Winkel zur Quelle [50]

Bei der Messung von Panels im Flugzeug muss aus den genannten Gründen berücksichtigt werden, dass die Sonde nicht nur Intensitätspegel entlang der Sondenachse aufnimmt, sondern auch Pegel, die (abhängig vom Abstand zwischen Messsegment und Sonde) aus der unmittelbaren Umgebung eines Segmentes resultieren. Somit können zum Beispiel Spalte in der Seitenverkleidung oder Panels mit hoher Intensität die Messergebnisse eines festgelegten Segmentes leicht verfälschen. [50]

## 5 Quantifizierung von Schallleistungsbeiträgen durch Intensitätsmessungen

In diesem Kapitel werden Intensitätsmessungen von vier Testreihen behandelt. Dabei werden die jeweiligen Schallleistungsbeiträge ermittelt. In der ersten Testreihe wird in einem Demonstrator ein Messverfahren etabliert, welches anschließend für die weiteren drei Testreihen verwendet werden kann. Diese sind Messflüge mit besonderen Randbedingungen. Deshalb ist ein Abweichen von der Norm notwendig.

Ziel der Messungen ist es, verschiedene Schallpfade in der Kabine zu quantifizieren und somit Kenntnisse über dominante Schallpfade und weniger dominante Schallpfade zusammenzutragen. Für die Feststellung von Regelmäßigkeiten in diesem Zusammenhang werden die Ergebnisse der verschiedenen Messreihen im letzten Abschnitt dieses Kapitels miteinander verglichen. Die Erkenntnisse aus diesem Kapitel sind die Grundlage für die Minimierung von Schallpfaden.

### 5.1 Intensitätsmessungen HCAT

Im Folgenden wird die Bestimmung der eingebrachten Schallleistungen aus Schallintensitätsmessungen verschiedener Schallpfade im Kabinen-Demonstrator am HCAT beschrieben. Das Messverfahren entspricht dem in DIN EN ISO 9614-2 beschriebenen Vorgehen [47]. Abweichungen von der Norm werden an den entsprechenden Stellen gekennzeichnet. Die Abweichungen sind notwendig, um ein zuverlässiges Messverfahren für die Schallintensitätsmessung während eines Messfluges zu gewährleisten. Bei der Darstellung der Ergebnisse wird auf die Feldindikatoren, Schallintensitätspegel und Schalleistungsbeiträge zum Schalldruckpegel in der Kabine eingegangen.

#### 5.1.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung HCAT

##### Messumgebung

Die Messungen werden in einem bestimmten Abschnitt der Kabine des A320 Rumpfausschnittes am HCAT in der Akustikklimakammer durchgeführt. Der ca. 4,5 m lange Rumpfausschnitt befindet sich in der Mitte der Klimakammer. Die Kabine ist ein Abbild der Konfiguration einer Standardkabine von Linienfluggesellschaften (vgl. Abschnitt 2.1.4). Für die Messungen werden die Sitzreihen im Bereich zwischen Spant drei und fünf aus der linken Seite der Kabine entfernt, um entsprechenden Raum für die Messungen zu erhalten. Der Messbereich im HCAT-Demonstrator ist zwei Spante lang und die halbe Kabinenbreite breit. Der Kabinenboden begrenzt den Bereich nach unten und die Kabinendecke nach oben.

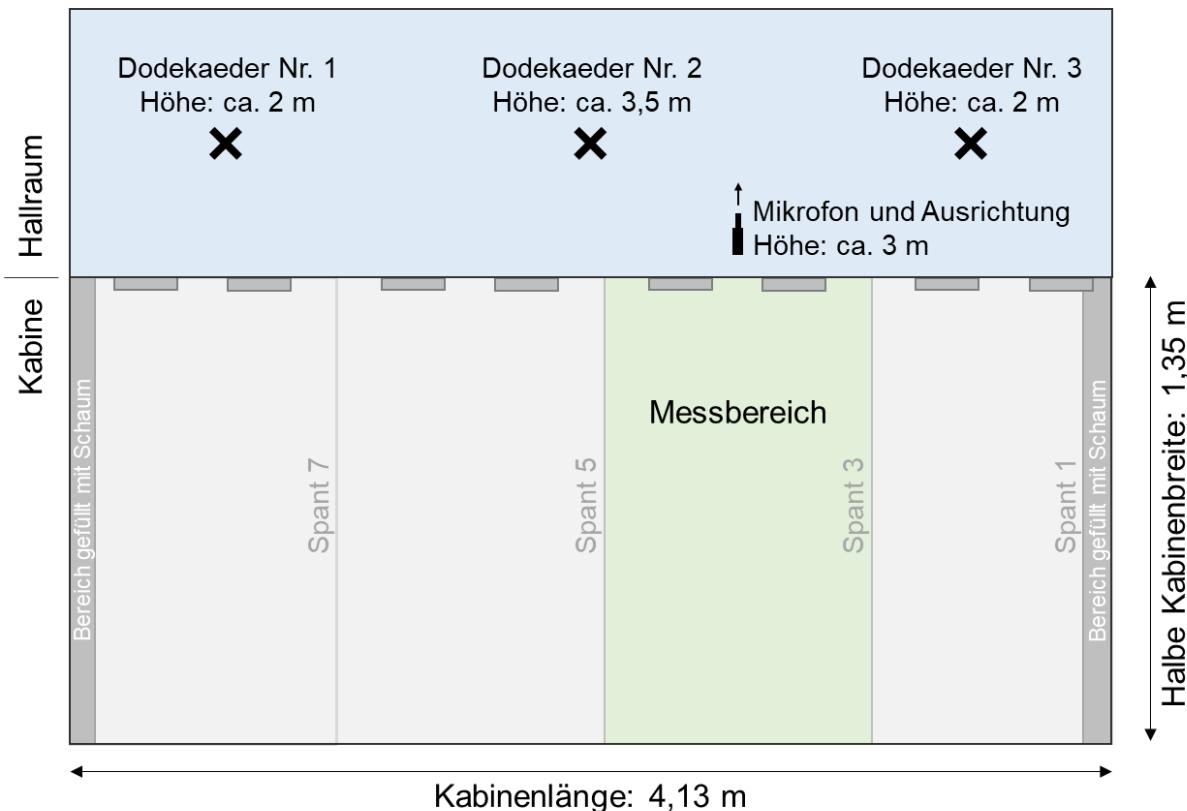


Abbildung 20: Schematische Darstellung vom Rumpfausschnitt im HCAT sowie dem Messbereich und Messaufbau

Die Messumgebung wird während der Messungen bis auf das teilweise Ausbauen von Seitenwandpanels nicht verändert. Die Messergebnisse sind entsprechend gekennzeichnet. In der Messumgebung entstehen Störschallpegel während der Messung nicht dominanter Schallpfade. Es gibt keine Wind- oder Gasströmungen.

### Versuchsaufbau und Messverfahren

Die Akustikklimakammer dient als Hallraum, in dem ein weißes Rauschsignal mit drei Oktaederlautsprechern (je 800 Watt RMS an 4 Ohm [51]) erzeugt wird. Es findet somit eine Umweltsimulation statt. Diese Lautsprecher werden mit Stativen auf unterschiedlichen Höhen in der Akustikklimakammer positioniert, um ein möglichst homogenes, diffuses Schallfeld zu erzeugen. Der Schalldruckpegel wird mit einem Abstand von 10 cm Entfernung zum Rumpf in einer Höhe von vier Metern mit Hilfe eines Stativs gemessen, damit das Frequenzspektrum der Anregung bekannt ist. Zusätzliche Messungen des Schalldruckpegels in der Akustikklimakammer an verschiedenen Stellen haben gezeigt, dass auf der Seite der Lautsprecher von einem homogenen Schallfeld ausgegangen werden kann (vgl. Anhang D1). Der Messaufbau und wichtige Positionsmarkierungen für die Reproduzierbarkeit der Messungen sind in Abbildung 20 dargestellt. Innerhalb des Messbereichs wird eine Messfläche mit einzelnen Segmenten definiert. Dabei werden die bereits erläuterten Anforderungen aus der Norm berücksichtigt. Die Auswahl der Segmente wird hauptsächlich durch den Boden-, Seiten- und Deckenaufbau der Kabine und entsprechender Panels bestimmt. Die folgende Übersicht stellt die 13 Panels mit den üblichen Begriffen dar.

Segment/Panel	Größe [m <sup>2</sup> ]
1. Floor Panel Inboard	0,53
2. Floor Panel Middle	0,53
3. Floor Panel Outboard	0,47
4. Dado Gap	0,06
5. Dado Panel	0,42
6. Lower Sidewall Panel	0,55
7. Window (-Panel)	0,20
8. Upper Sidewall Panel	0,55
9. ECS Gap	0,03
10. Closure Panel	0,42
11. Service Area Panel	0,41
12. Ceiling ECS Gap	0,05
13. Ceiling	0,53

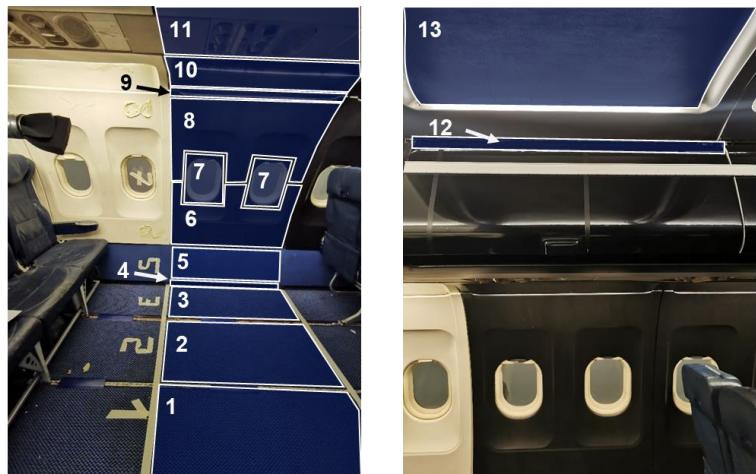


Abbildung 21: Definierte Segmente (Panels) der Messfläche

Die Segmente werden so definiert, dass Spalte, Undichtigkeiten und die unterschiedliche Beschaffenheit der Panels berücksichtigt sind. Wenn auf ein zu messendes Segment eine starke Fremdschallintensität (Störschallpegel) einwirkt, ist laut Norm ein Schallschirm für eine höhere Genauigkeitsklasse notwendig. Dafür wurde eine Vorrichtung gebaut, im Folgenden Intensitätskiste genannt, welche auf das zu vermessende Segment gesetzt werden kann. Die Kiste hat einen Innendurchmesser von 40 x 25 cm, wurde aus Standard Sandwichpanels zusammengesetzt und anschließend von außen mit halbzölligem Filz sowie von innen mit 40 mm dickem offenporigem Schaum (Material: Basotect) bezogen. Eine Abbildung mit Abmaßen befindet sich im Anhang C. Die Intensitätssonde wird durch einen Spalt in die Intensitätskiste eingeführt. Durch den Spalt ist es möglich, die Abtastung entlang eines festgelegten Pfades durchzuführen. Um dem Abtastpfad zu folgen, muss die Intensitätssonde leicht geneigt werden. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, bewirkt die Neigung der Sonde von 30°, relativ zur Normalkomponente des Segmentes, gemäß Hersteller eine maximale Abweichung von ±0,6 dB [50]. Aufgrund des Einsatzes der Intensitätskiste sind leichte Abweichungen von der Norm notwendig: Erstens werden einzelne Segmente nicht komplett abgetastet. Es wird lediglich ein 40 x 25 cm großer Bereich des Segmentes berücksichtigt. In der Auswertung wird dann die gemessene Intensität des Teilbereichs für das gesamte Segment angenommen. Somit besteht die Möglichkeit, dass lokale Phänomene auf einem Panel auf die Gesamtheit des Panels übertragen werden. Zweitens werden die Segmente nur horizontal oder vertikal abgetastet. Dies ist notwendig, da vertikales und horizontales Abtasten ein Versetzen der Messkiste und somit eine Veränderung des zu messenden Teilbereiches des Messsegmentes zur Folge hätte. In Vorversuchen hat sich herausgestellt, dass es keinen Unterschied zwischen vertikalen und horizontalen Messungen im relevanten Frequenzbereich gibt (Siehe Anhang E1, gemessen im FTZ Akustik der HAW). Drittens werden keine Wiederholmessungen der einzelnen Segmente durchgeführt, um den Zeitrahmen der Messung zu reduzieren und ein Messverfahren für einen Messflug zu etablieren. Somit kann im Rahmen der Messung nach [47] Kriterium 3 für GK 2 nicht überprüft werden. Die verwendete Messtechnik wird in Tabelle 3 aufgelistet. Eine Kalibrierung der Intensitätssonde findet vor Beginn der Messung statt.

Tabelle 3: Verwendetes Messequipment

Beschreibung	Bezeichnung
<b>Schallintensitätsmessung</b>	
Signalgenerator und Verstärker	PA1000
Schallquelle	Qsources Type Qohm
Mikrofonpaar	B&K Type 4197
Schallanalysator	B&K Type 2270
Intensitätssonde	B&K Sound Intensity Probe Kit Type 3599, Abstandhalter: 12 mm
Schallschirm	LHT Schallintensitätskiste
Schallanalysator	B&K Type 2270
<b>Schalldruckpegelmessung (Anregung)</b>	
Mikrofon	B&K Type 4189
Schallanalysator	B&K Type 2250

### Versuchsdurchführung

In der Akustikklimakammer wird ein homogenes, breitbandiges Schallfeld mit weißem Rauschen erzeugt (vgl. Anhang D1). An den Verstärkern sind Tiefpass- und Hochpassfilter angeschaltet. Zuerst wird der Schalldruckpegel in der Akustikklimakammer an der in Abbildung 20 beschriebenen Position und anschließend in der Kabine innerhalb des Messbereichs gemessen. Die Mittelungszeit bei den Messungen beträgt jeweils 15 Sekunden. Anschließend werden insgesamt vier Testreihen für die Intensitätsmessung durchgeführt:

Tabelle 4: Testreihen Intensitätsmessung

Testreihe-Nr.	Schallschirm	Kabinenkonfiguration	Gemessene Segmente
M1	Ohne	Standard, ohne Sitze	1-13
M2	Intensitätskiste	Standard, ohne Sitze	1-13
M6	Ohne	Standard, ohne Sitze, Seitenwandpanels entfernt	4-10
M7	Intensitätskiste	Standard, ohne Sitze, Seitenwandpanels entfernt	4-8, 10

In jeder Testreihe werden die Segmente nacheinander abgetastet. Der vermessene Teilbereich von 40 x 25 cm liegt dabei immer in der Mitte des Segmentes, das heißt es wird beim Rumpf-Querschnitt von Spant 4 gemessen. Testreihe M1 wird ohne die Intensitätskiste als Schallschirm gemessen. Für Testreihe M2 wird die Intensitätssonde durch die Intensitätskiste durchgeführt. Bei M6 werden nur die Segmente vier bis zehn vermessen, da bei diesen Segmenten die Konfiguration verändert wird. Hierbei werden die Verkleidungen vor der Messung entfernt, wodurch die darunterliegende Glasfasermatte sichtbar wird. Bei M7 wird diese Testreihe mit Intensitätskiste wiederholt. Während der Messung hat sich herausgestellt,

dass es nicht möglich ist Segment 9 sinnvoll zu messen. Für die Ergebnisse ist die Überprüfung der Messmethode mit der Intensitätskiste der Vergleich zwischen M1 und M2 sowie M6 und M7 von Bedeutung. Des Weiteren wird zwischen M1 und M6 sowie M2 und M7 verglichen, wie sich das Entfernen der Seitenwandverkleidung auf den gemessenen Intensitätspegel auswirkt. In der nachfolgenden Abbildung ist die Messung der Testreihen M2 und M6 beispielhaft dargestellt



Abbildung 22: Messdurchführung, a) Testreihe M6, b) Testreihe M2

Bei der Intensitätsmessung wird die Sonde mit einem Abstand von circa 10 cm Entfernung zum Panel gehalten. Der Abstand der Abtastlinien beträgt ungefähr 10 cm und die Messgeschwindigkeit beträgt ungefähr 0,2 m/s.

### 5.1.2 Darstellung der Ergebnisse HCAT

Zuerst wird auf den Druck-Intensitäts-Indikator und den Schallintensitätspegel der Messergebnisse eingegangen. Anschließend werden die aus den Schallintensitätspegeln berechneten Schallleistungen dargestellt, um die dominanten Pfade, welche den Schalldruckpegel in der Kabine bestimmen, zu identifizieren. Die einzelnen Segmente haben für jedes Frequenzband, abhängig von der gemessenen Intensität und der Segmentfläche, unterschiedlich hohe Beiträge zum Schalldruckpegel. Da während einer Messung im Flug hohe Störschallpegel auftreten, ist es unter anderem ein Ziel die Messverfahren mit und ohne Verwendung der Intensitätskiste zu vergleichen.

#### Kriterien zur Bestimmung einer Genauigkeitsklasse

Wie in Abschnitt 4 beschrieben werden Gültigkeit und Genauigkeitsklasse durch die Kriterien und somit den Feldindikatoren bestimmt. Im Rahmen der Auswertung wird sowohl auf die Erfüllung der Kriterien der Messfläche und somit auf die Feldindikatoren eingegangen sowie auf den Druck-Intensitäts-Indikator der einzelnen Segmente  $F_{pI,i}$ . Zuerst wird die Gültigkeit der Testreihen M1, M2, M6 und M7 überprüft. Folgende Tabelle stellt dar, welche Kriterien für die

jeweilige GK erfüllt oder nicht erfüllt werden. Wenn ein Kriterium nicht erfüllt wird, ist die Zelle rot eingefärbt.

*Tabelle 5: Überprüfung der Kriterien zur Bestimmung einer GK für Testreihen M1, M2, M6, M7*

Testreihe	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
M1 Kriterium 1 für GK 2	-0,6	0,0	-0,1	0,1	0,2	0,9	0,3	-0,3	-0,9	-1,1	-0,6	-0,8	-1,5	-1,8
M1 Kriterium 2 für GK 2	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M1 Kriterium 1 für GK 3	2,4	3,0	2,9	3,1	3,2	3,9	3,3	2,7	2,1	1,9	2,4	2,2	1,5	1,2
M2 Kriterium 1 für GK 2	6,9	5,2	4,5	4,2	5,2	5,6	5,0	4,6	4,6	4,0	4,4	4,5	3,1	4,9
M2 Kriterium 2 für GK 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,9	F
M2 Kriterium 1 für GK 3	9,9	8,2	7,5	7,2	8,2	8,6	8,0	7,6	7,6	7,0	7,4	7,5	6,1	7,9
M6 Kriterium 1 für GK 2	2,9	3,5	3,3	3,5	3,5	3,5	3,2	3,0	2,7	2,5	2,8	2,6	2,3	2,7
M6 Kriterium 2 für GK 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M6 Kriterium 1 für GK 3	5,9	6,5	6,3	6,5	6,5	6,5	6,2	6,0	5,7	5,5	5,8	5,6	5,3	5,7
M7 Kriterium 1 für GK 2	8,1	6,4	5,1	5,2	5,9	6,2	6,0	5,6	5,6	5,3	5,2	5,1	5,1	5,3
M7 Kriterium 2 für GK 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M7 Kriterium 1 für GK 3	11,1	9,4	8,1	8,2	8,9	9,2	9,0	8,6	8,6	8,3	8,2	8,1	8,1	8,3

In der Tabelle ist zu erkennen, dass Testreihe M1 die GK 2 aufgrund von Kriterium 1 nicht erfüllt und somit nur für GK 3 gültig ist.  $F_{M,pI}$  ist aufgrund eines Störschallpegel zu hoch. M2 ist bis auf das 5000 Hz Terzband in GK 2 einzuteilen. Kriterium 2 wird aufgrund von einer hohen Anzahl negativ gemessener Schallintensitätspiegel für 5000 Hz nicht erfüllt. Testreihen M6 und M7 sind in GK 2 einzuteilen, da alle Kriterien erfüllt werden. Damit die Einflussfaktoren der Kriterien verständlicher werden, wird im Folgenden auf den Druck-Intensitäts-Indikator der einzelnen Segmente ( $F_{pI,i}$ ) eingegangen, welcher zur Berechnung von Kriterium 1 verwendet wird.

Tabelle 6: Druck-Intensitäts-Indikator  $F_{pI,i}$  einzelner Segmente Testreihe M1 und M2

Segment	$\bar{X}$	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
M1 Floor Panel Inboard	12,2	11,1	8,7	7,9	12,4	8,2	7,0	9,7	9,2	11,3	11,3	13,1	15,6	23,1	22,6
M1 Floor Panel Middle	9,8	11,2	7,2	8,1	8,1	9,0	5,5	6,6	8,5	9,7	10,1	9,7	10,0	14,5	18,5
M1 Floor Panel Outboard	6,9	7,5	5,6	7,8	7,7	6,4	5,3	5,5	5,7	7,6	7,2	6,4	6,8	8,7	8,8
M1 Dado Gap	3,5	2,6	2,2	3,6	3,0	3,2	2,2	2,5	2,9	4,5	5,3	4,1	4,4	4,6	4,1
M1 Dado Panel	6,7	3,6	4,3	4,8	4,8	5,3	4,4	5,0	6,3	8,5	8,4	7,7	8,5	11,0	11,6
M1 Lower Sidewall Panel	7,1	5,1	8,0	6,6	5,1	6,1	5,8	6,2	6,8	6,6	7,3	8,5	8,1	9,2	9,4
M1 Window (-Panel)	7,5	9,5	9,4	7,7	6,6	8,8	7,8	6,2	7,2	4,6	6,1	8,0	8,2	7,9	7,0
M1 Upper Sidewall Panel	6,9	8,1	6,1	5,4	6,4	7,0	6,9	7,4	6,7	6,4	7,0	6,5	6,7	7,4	8,0
M1 ECS Gap	4,2	6,6	8,2	5,6	3,3	2,2	3,6	3,7	3,7	4,2	4,7	3,2	3,1	3,0	3,3
M1 Closure Panel	8,1	14,7	19,3	7,4	6,2	5,2	6,7	8,5	7,5	7,7	6,5	5,9	6,1	6,1	5,9
M1 Service Area Panel	10,4	17,0	13,3	10,4	10,0	12,4	12,0	10,2	10,1	9,8	9,4	7,7	7,6	7,2	8,1
M1 Ceiling ECS Gap	8,2	27,2	17,9	7,8	7,5	6,6	8,2	4,5	4,0	5,1	5,4	4,6	5,2	5,5	5,6
M1 Ceiling	9,4	8,8	7,0	8,4	6,4	8,3	10,3	10,4	10,0	9,5	10,8	9,4	10,4	11,4	11,0
M2 Floor Panel Inboard	3,3	0,9	2,8	3,4	3,3	1,9	1,4	2,8	2,8	3,6	4,8	4,4	6,1	4,4	4,2
M2 Floor Panel Middle	2,9	0,4	1,6	2,8	2,7	2,0	1,8	2,2	2,6	3,0	3,8	4,1	5,1	7,3	1,0
M2 Floor Panel Outboard	2,6	1,2	2,2	2,8	3,2	2,3	1,9	2,7	2,8	2,9	3,0	2,5	2,5	6,8	0,4
M2 Dado Gap	1,3	-0,8	1,2	2,6	1,1	0,6	0,7	0,8	1,1	1,0	2,0	1,3	1,3	1,2	4,1
M2 Dado Panel	1,9	-0,7	0,3	2,2	2,4	1,5	1,1	1,4	2,3	2,9	3,7	6,0	0,5	0,8	2,1
M2 Lower Sidewall Panel	1,4	-0,9	0,7	2,0	2,5	1,9	1,5	1,2	2,6	1,4	1,5	1,7	0,5	0,9	2,3
M2 Window (-Panel)	1,4	-1,1	1,4	2,2	2,2	1,7	1,6	0,9	1,5	1,0	1,6	1,4	1,3	1,2	2,1
M2 Upper Sidewall Panel	2,5	-0,4	1,1	2,1	1,9	1,2	-0,1	1,2	2,0	2,4	2,5	2,6	2,3	15,9	0,9
M2 ECS Gap	1,8	-0,1	1,3	1,7	0,7	-0,1	0,3	0,9	1,5	1,7	1,3	1,1	1,7	2,7	10,6
M2 Closure Panel	2,4	0,9	2,6	2,6	2,9	1,4	0,7	1,3	1,7	2,2	2,2	2,3	3,1	6,6	2,9
M2 Service Area Panel	5,7	0,1	3,4	2,6	3,8	3,8	2,7	2,4	5,7	4,3	18,8	7,0	8,9	14,7	2,2
M2 Ceiling ECS Gap	1,1	-1,8	1,0	1,7	2,2	1,1	0,6	0,6	0,7	0,7	1,0	0,8	1,2	3,4	2,4
M2 Ceiling	4,0	0,3	2,2	2,0	2,9	2,0	3,3	1,7	2,4	3,5	9,9	5,0	4,2	16,5	0,9

Allgemein ist zu erkennen, dass  $F_{pI,i}$  für Testreihe M2 (mit Störgeräuschunterdrückung durch Intensitätskiste) insgesamt deutlich geringere Werte aufweist als für M1. Testreihe M1 weist insgesamt 34 Werte für  $F_{pI,i}$  auf, die über dem Grenzwert von 9,8 liegen und 69 Werte, die in einem Bereich für  $F_{pI,i}$  zwischen 6,8 und 9,8 liegen (wichtig für die Genauigkeitsklasse). Die Mittelwerte für  $F_{pI,i}$  über alle Frequenzbänder sind im Vergleich zu M2 erhöht. Bei M2 überschreiten nur sechs Werte den Grenzwert, drei Werte liegen im Bereich für  $F_{pI,i}$  zwischen 6,8 und 9,8. Gemittelt über das dargestellte Frequenzspektrum und alle Segmente liegt  $F_{pI,i}$  für Testreihe M1 bei 7,2 und für Testreihe M2 bei 2,0. Die Qualität der Messung ist bei M2 deutlich besser. Bei M1 fällt auf, dass die geringsten Werte für  $F_{pI}$  im Segment Dado Gap sowie ECS Gap gemessen werden (Spalte in der Seitenverkleidung). Die niedrigen Werte resultieren daraus, dass die Gaps einen hohen Schallintensitätspegel aufweisen und Störschallpegel aus der Richtung anderer Segmente geringer ausfallen als bei der Messung eines Segmentes mit einem niedrigen Schallintensitätspegel. Testreihe M2 stellt außerdem die direkte Maßnahme zur Erhöhung der Messqualität für Testreihe M1 dar. Laut Norm [49] kann diese entweder durch das Erhöhen des Messabstandes um 5 cm bis 10 cm oder durch das Einbringen von schallabsorbierendem Material in den Empfangsraum (Flugzeugkabine) erreicht werden. Die Intensitätskiste stellt durch die schallabsorbierende Konstruktion eine direkte Maßnahme zur Erhöhung der Messqualität von M1 dar. Die folgende Tabelle zeigt

einen erneuten Vergleich zwischen der Messung mit und ohne Intensitätskiste bei leicht veränderter Messfläche ohne die Seitenwandpanels (*Lining*).

Tabelle 7: Druck-Intensitäts-Indikator  $F_{pI,i}$  einzelner Segmente Testreihe M6 und M7

Segment	$\bar{x}$	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
M6 Dado Gap	5,4	3,2	3,4	4,9	4,6	3,6	3,8	5,4	6,0	5,2	6,1	5,7	7,5	8,8	7,2
M6 Dado Panel	4,7	2,0	2,5	2,6	3,0	3,4	3,3	4,5	5,1	5,6	6,4	6,2	7,2	7,4	6,8
M6 Lower Sidewall Panel	4,2	3,7	4,4	3,8	4,6	3,7	3,8	3,8	4,0	4,5	5,1	5,1	4,3	4,3	4,3
M6 Window (-Panel)	3,7	7,6	6,4	4,1	3,6	5,2	4,3	3,1	3,0	2,9	2,7	2,6	2,1	2,2	1,9
M6 Upper Sidewall Panel	4,7	7,1	4,5	4,8	3,9	4,0	5,0	4,7	4,4	5,0	5,1	4,5	4,4	4,7	4,2
M6 ECS Gap	4,8	3,8	4,9	4,7	3,4	3,3	4,0	5,4	5,1	7,2	6,2	5,8	4,4	4,3	4,6
M6 Closure Panel	6,1	9,0	9,1	5,0	4,8	4,8	4,9	5,6	5,2	5,3	5,5	5,5	7,7	7,2	6,3
M7 Dado Gap	1,1	-2,1	0,7	1,7	2,1	0,6	0,3	0,8	1,8	1,6	1,4	1,4	1,3	1,2	3,3
M7 Dado Panel	1,5	-0,1	1,4	2,6	2,2	1,5	0,8	1,4	1,6	1,6	1,7	1,5	1,4	1,4	1,5
M7 Lower Sidewall Panel	1,3	-0,9	0,6	1,8	2,1	1,2	0,9	0,9	1,5	1,8	2,0	1,7	1,5	1,6	1,8
M7 Window (-Panel)	2,0	0,4	2,0	3,5	2,3	1,8	1,3	1,6	1,7	2,0	2,4	2,1	2,2	2,1	2,5
M7 Upper Sidewall Panel	1,3	-1,3	0,5	1,4	1,6	0,7	0,7	1,2	1,7	1,8	1,6	3,6	2,0	2,3	0,5
M7 ECS Gap															Nicht gemessen
M7 Closure Panel	1,0	-1,1	0,9	2,5	2,2	0,8	0,4	0,6	1,3	1,0	1,3	1,1	1,2	1,0	1,3

Tabelle 7 zeigt, dass bei der Messung ohne Seitenverkleidungen die Druck-Intensitäts-Indikatoren der vermessenen Segmente geringer werden. Alle Werte im betrachteten Frequenzbereich liegen unter dem Grenzwert von 9,8. Erneut sind die Werte für  $F_{pI,i}$  bei der Messung mit Intensitätskiste deutlich geringer als ohne. Bei M7 ist kein Wert für  $F_{pI,i}$  größer als 6,8. Im Vergleich dazu sind bei M6 12 Werte größer als 6,8 und die Mittelwerte der einzelnen Segmente sind höher. Gemittelt über den angegebenen Frequenzbereich und jedes Segment liegt  $F_{pI,i}$  (Panel 4-10) für Testreihe M6 bei 3,8 und für Testreihe M7 (Panel 4-8 und 10) bei 1,0. Bei M6 fällt auf, dass die geringsten Werte für  $F_{pI,i}$  bei dem Segment M6 Window (-Panel) auftreten. Erneut resultieren die niedrigen Werte daraus, dass für dieses Segment hohe Intensitätspegel gemessen werden und somit die Auswirkungen von Störschallquellen geringer ausfallen.

### Schallintensitätspegel

Folgende Tabelle bildet die gemessenen Intensitätspegel in dB SIL 3 für die Testreihen M1, M2, M6 und M7 ab. Die Panels mit den höchsten und niedrigsten Intensitätspegeln werden ersichtlich. Panel 1-3 und 11-13 werden bei den Testreihen M6 und M7 nicht vermessen, da sie lediglich eine Wiederholmessung von M1 und M2 aufgrund der unveränderten Kabinenkonfiguration darstellen würden. Für nachfolgende Berechnungen wird für diese Panels der Wert von M1 bzw. M6 übertragen. In der Tabelle wird deswegen N/A (Abkürzung für *Not Applicable* – nicht relevant) eingetragen.

Tabelle 8: Intensitätspegel dB SIL 3 für alle Segmente der Testreihen M1, M2, M6, M7

Segment	Messung mit Sonde		Messung mit Sonde und Intensitätskiste	
	Mit Lining (M1)	Ohne Lining (M6)	Mit Lining (M2)	Ohne Lining (M7)
Floor Panel Inboard	40,1	N/A	34,6	N/A
Floor Panel Middle	44,3	N/A	37,8	N/A
Floor Panel Outboard	48,5	N/A	43,8	N/A
Dado Gap	52,0	52,4	48,0	50,5
Dado Panel	46,4	52,7	38,2	52,4
Lower Sidewall Panel	45,9	55,0	41,8	49,7
Window (-Panel)	46,1	57,6	45,1	57,9
Upper Sidewall Panel	46,2	54,1	40,9	50,5
ECS Gap	52,4	53,6	46,6	N/A
Closure Panel	47,4	52,6	41,9	51,6
Service Area Panel	43,7	N/A	34,2	N/A
Ceiling ECS Gap	46,0	N/A	43,2	N/A
Ceiling	40,6	N/A	34,5	N/A

Zuerst werden die Ergebnisse hinsichtlich der Unterschiede der Kabinenkonfiguration erläutert. Messungen ohne Lining resultieren in höheren Intensitätspegeln. In der Testreihe M1 und M2 weisen die Segmente Dado Gap und ECS Gap die höchsten Intensitätspegel auf. Der geringe Wert für  $F_{pI,i}$  lässt sich bei diesen Segmenten für M1 somit erklären. Die geringsten Pegel werden mit Lining für das Floor Panel Inboard sowie die Ceiling gemessen. Mit Lining ist der Wert für das Service Area Panel ebenfalls sehr gering. Für M6 und M7 ist der gemessene Schallintensitätspegel für das Window Panel am höchsten, passend zum geringsten Druck-Intensitäts-Indikator. Die geringsten Schallintensitätspegel werden bei M6 für Dado Gap, Dado Panel und Closure Panel gemessen. Bei M7 werden die geringsten Pegel beim Lower Sidewall Panel, Dado Gap und Upper Sidewall Panel gemessen. Auffallend ist, dass bei den Segmenten mit Spalt (Dado Gap, ESC Gap) kaum Unterschiede zwischen der Messung mit und ohne Lining bestehen. Die Abweichungen sind kleiner als drei dB SIL 3. Dies ist auf den konstruktiven Spalt zurückzuführen, der im Vergleich zu einem Panel keinen Schallübertragungsverlust aufweist. Die größten Abweichungen liegen beim Vergleich von M1 und M6 bei Window Panel ( $\Delta L_{I,i} = 12 \text{ dB SIL}$ ) sowie Lower Sidewall Panel ( $\Delta L_{I,i} = 9 \text{ dB SIL}$ ) und beim Vergleich von M2 und M7 bei Dado Panel ( $\Delta L_{I,i} = 14 \text{ dB SIL}$ ) und Window Panel ( $\Delta L_{I,i} = 13 \text{ dB SIL}$ ) vor.

Als zweites wird Tabelle 8 in Bezug auf die Verwendung der Intensitätskiste ausgewertet. Auf einem Messflug wird mit Lining gemessen, deswegen ist diese Auswertung von besonderer Bedeutung, um das Verhalten der Intensitätskiste zu analysieren und gegebenenfalls eine

Korrekturkurve für die Intensitätskiste zu berechnen. Diese Korrekturkurve könnte für weitere Messungen genutzt werden, um den Einfluss der Intensitätskiste bei der Auswertung herauszurechnen. Allgemein sind die gemessenen Pegel für die Messung mit der Intensitätskiste geringer. Die Differenz zwischen der Messung mit und ohne Intensitätskiste ist stark von den vermessenen Segmenten abhängig. Für die Messung mit Lining variiert die Differenz zwischen 1 dB SIL 3 sowie 10 dB SIL 3, der Mittelwert der Abweichung liegt über alle Segmente bei circa 5 dB SIL 3. Wenn das Lining entfernt wird, liegt die Differenz segmentabhängig zwischen 0 dB SIL 3 und 5 dB SIL 3, der Mittelwert der Abweichung liegt über alle Segmente bei etwa 2 dB SIL 3 und ist somit geringer als bei der Messung mit Lining. Dies ist erneut darauf zurückzuführen (vgl. M1 Dado Gap und ECS Gap), dass der Störschallpegel beim Vermessen der dominanten Segmente ohne Lining deutlich geringer ist.

Drittens werden die Terzbänder einzelner Segmente und Testreihen genauer betrachtet. Allgemein sinkt der Schallintensitätspegel bei höheren Frequenzen für alle Segmente im betrachteten Frequenzbereich. Bei der Testreihe M2 (Intensitätskiste wird verwendet) kann ein Abknicken der Schallintensitätspegel ab 2500 Hz beziehungsweise 3150 Hz, abhängig vom vermessenen Segment beobachtet werden. Zuerst werden die Panels 1-3 dargestellt: Messungen der Floor Panels Richtung Kabinenmitte resultieren in einem geringeren Schallintensitätspegel.

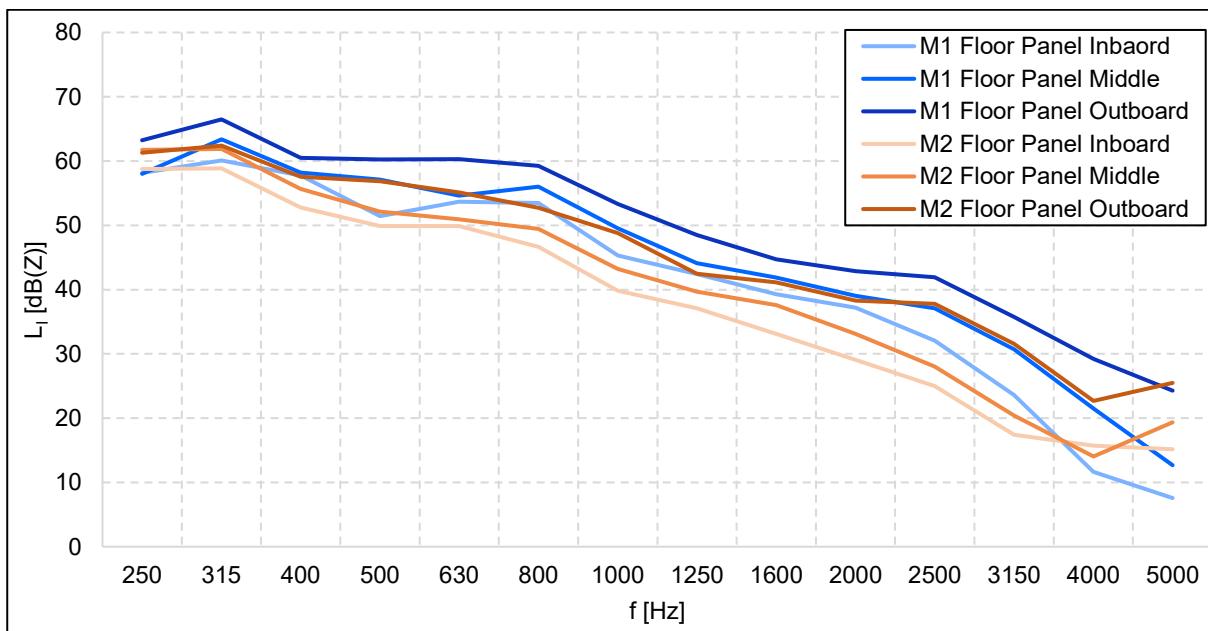


Abbildung 23: Gemessene Intensitätspegel Testreihe M1 und M2 für Panel 1-3

In Abbildung 23 ist zu erkennen, dass die Pegel für alle Segmente ab einer Frequenz von 800 Hz deutlich abfallen. Beim Segment M1 Floor Panel Outboard stagniert der Pegel von 400 Hz bis 800 Hz bei 60 dB. Die gemessenen Pegel der Segmente M1 Floor Panel Middle und M1 Floor Panel Inboard weisen zwischen 500 Hz und 800 Hz einen Anstieg der Pegel auf. Im Vergleich zur Testreihe M1 sinken die Pegel für die einzelnen Segmente der Testreihe M2 dauerhaft mit zunehmender Frequenz. Bei der Messung M2 Floor Panel Inboard ist das frühe Abknicken der Kurve mit Intensitätskiste deutlich zu erkennen. Die dargestellten Kurven weisen den typischen Verlauf für zunehmende Frequenzen auf, d.h. mit zunehmender

Frequenz steigt das Schalldämmmaß und der Intensitätspegel sinkt dementsprechend (vgl. Massegesetz, Abschnitt 3.4). Folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Intensitätspegel für Panel 4-5 von M1 und M2.

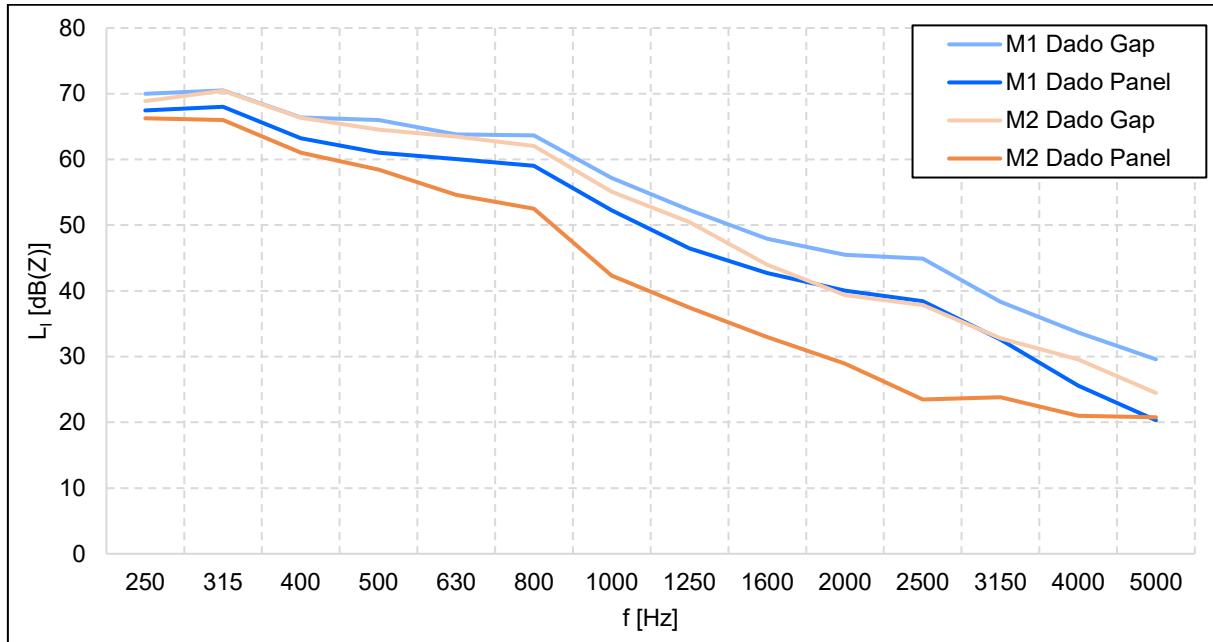


Abbildung 24: Gemessene Intensitätspegel Testreihe M1 und M2 für Panel 4-5

In der Abbildung 24 ist zu erkennen, dass die Pegel gemessen mit Intensitätskiste geringer sind als bei einer Messung ohne Intensitätskiste. Der Unterschied bei der Messung eines Spaltes (Dado Gap) zwischen einer Messung mit und ohne Intensitätskiste ist geringer als für die Messung eines Panels (Dado Panel). Des Weiteren fällt auf, dass ein Abknicken der Kurve bei der Messung des Dado Gaps nicht zu beobachten ist. Diese Aussage lässt sich auch auf die Messung anderer Spalte (M2 ESC Gap und M2 Ceiling ECS Gap) übertragen. Folgend werden die bereits erläuterten, unterschiedlichen Ergebnisse für die Panels 6-8 bei der Messung ohne Lining dargestellt.

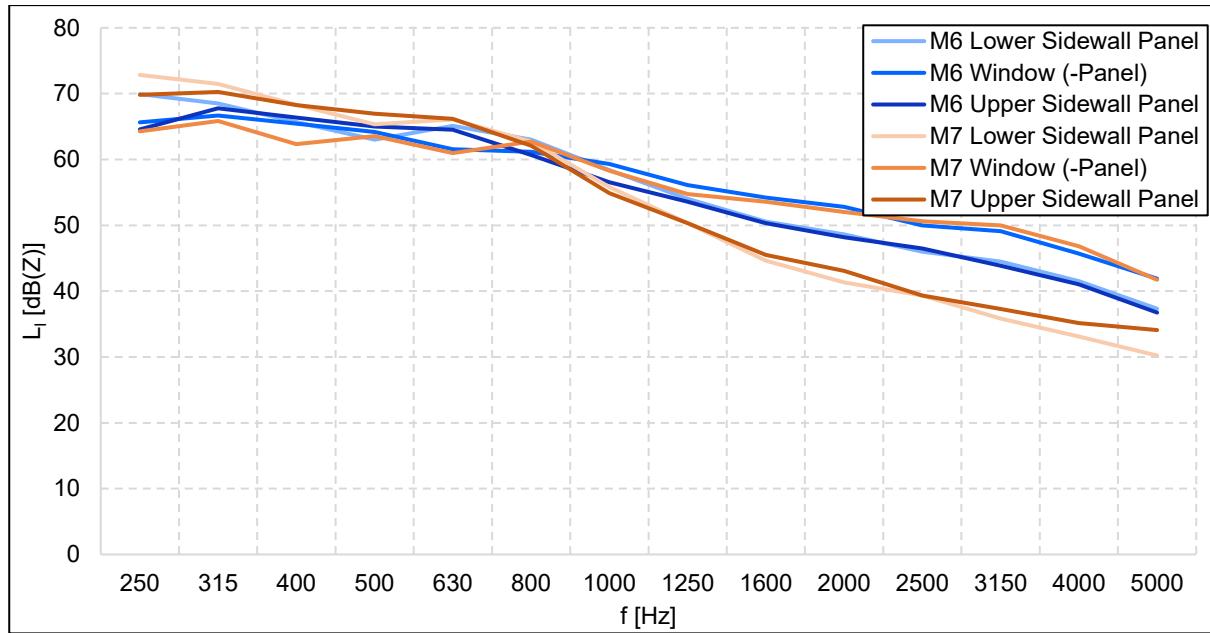


Abbildung 25: Gemessene Intensitätspegel Testreihe M6 und M7 für Panel 6-8

In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die Kurven ab 800 Hz auseinander laufen. Die höchsten Intensitäten werden für das Window Panel gemessen. Die Ergebnisse von M6 und M7 stimmen bezüglich dieses Segmentes überein. Für das Lower Sidewall Panel und Upper Sidewall Panel werden sowohl für M6 also auch M7 jeweils gleiche Pegel gemessen. Die Pegel sind für die Messung ohne Intensitätskiste jedoch höher als mit Intensitätskiste. Ähnliche Verläufe werden für M1 und M2 bei diesen Panels ersichtlich. Lediglich die Intensitätspegel unterscheiden sich: Die Differenz zwischen den Pegeln vom Window Panel und dem Lower sowie Upper Sidewall Panel sind deutlich geringer. Somit weist die tatsächliche Fensterscheibe höhere Schallübertragungsverluste als ein Verkleidungspanel auf. Die Verläufe von Intensitätspegeln der weiteren Segmente der Testreihen M1 und M2 befinden sich in Anhang E2.

## **Beiträge zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel**

Folgend wird untersucht, wie hoch die Beiträge der einzelnen Segmente zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel in die Kabine sind. Mit den Formeln (4.1) und (4.2) wird der gesamt einfließende Schallleistungspegel in die Kabine berechnet. Folgende Tabelle stellt die Schallleistungspegel und die Genauigkeitsklasse zur Übersicht dar.

Tabelle 9: Schallleistungspegel und GKs für Frequenzbänder der Testreihen M1, M2, M6 und M7

Allgemein sinkt der einfließende Schallleistungspegel für alle Testreihen mit zunehmender Frequenz, entsprechend der gemessenen Intensitätspegel. Pro Terzband sinkt der Pegel bei M1 und M2 um circa 3 dB, bei M6 um 2,4 dB und bei M7 um circa 2,8 dB. Für die Darstellung der Beiträge als SIL 3 Pegel werden aus den relevanten Terzbändern der Frequenzen Oktavbänder berechnet. Der Schallleistungspegel für die 1000 Hz Oktave berechnet sich aus:

$$L_{W,Oktav\ 1000\ Hz} = 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{L_{W,800\ Hz}}{10}} + 10^{\frac{L_{W,1000\ Hz}}{10}} + 10^{\frac{L_{W,1250\ Hz}}{10}} \right) \quad (5.1)$$

Analog dazu werden die Oktavbänder für 2000 Hz und 4000 Hz berechnet. Aus den Schallleistungspegeln der drei Oktavbänder werden nach Formel (3.5) die Schallleistungen berechnet. Durch den Vergleich zwischen Teilschallleistung eines Schallpfades zur gesamt einfließenden Schallleistung werden die prozentualen Beiträge ersichtlich, welche dabei helfen, die dominanten Schallpfade zu erkennen. Folgende Tabelle stellt die Beiträge in % je Oktave dar.

Tabelle 10: Schallleistungsbeiträge Testreihe M1 und M2 in %

Segment	Testreihe M1			Testreihe M2		
	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Floor Panel Inboard	6%	4%	1%	4%	3%	1%
Floor Panel Middle	12%	7%	5%	8%	7%	2%
Floor Panel Outboard	22%	15%	15%	17%	20%	18%
Dado Gap	7%	4%	4%	16%	4%	4%
Dado Panel	18%	7%	6%	11%	2%	4%
Lower Sidewall Panel	12%	13%	9%	8%	12%	27%
Window (-Panel)	2%	9%	4%	5%	20%	13%
Upper Sidewall Panel	8%	14%	14%	12%	10%	11%
ECS Gap	2%	2%	5%	2%	2%	3%
Closure Panel	6%	13%	20%	9%	15%	9%
Service Area Panel	2%	6%	12%	2%	1%	2%
Ceiling ECS Gap	1%	2%	1%	2%	2%	2%
Ceiling	2%	4%	3%	3%	2%	3%

Wie bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben, stellen in Tabelle 10 die hellrot markierten Zellen für jede Frequenz und Testreihe die vier höchsten Schallleistungsbeiträge und somit die dominanten Schallpfade in die Kabine dar. Sie sind für 55 % bis 70 % der einfließenden Schallleistung in die Kabine verantwortlich. Es ist zu erkennen, dass vor allem das Floor Panel Outboard unabhängig von Testreihe und Frequenz einen dominanten Schallpfad darstellt. Das Lower und Upper Sidewall Panel sind ebenfalls dominante Schallpfade. Auffällig ist der hohe Beitrag vom Lower Sidewall Panel bei 4000 Hz (M2). Das Dado Panel weist für niedrigere Frequenzen höhere Beiträge auf und das Closure Panel für höhere Frequenzen. Bei M2 stellt das Window Panel für höhere Frequenzen einen dominanten Schallpfad dar, bei M1 ist dies nicht der Fall. Das hängt mit den gemessenen Schallintensitäten zusammen, welche für M2

relativ zu den anderen Panels deutlich höher sind (vgl. Abbildung 25). Die Beiträge sind beim Service Area Panel für M1 im Vergleich zu M2 höher, da bei der Messung mit der Sonde ebenfalls ein Teil des danebenliegenden Closure Panels im Einflussradius der Sonde liegt. Die Intensitätskiste schirmt die höheren Pegel des Closure Panels ab. Das Ceiling Panel stellt in keiner der Messungen einen relevanten Beitrag dar. Es wird ersichtlich, dass die Gaps bei hohen Intensitätspegeln geringere Beiträge aufweisen (bis auf den M2 Dado Gap bei 1000 Hz). Dies liegt an den vergleichsweise kleinen Flächen für die Gaps.

## 6 Überführung der Messergebnisse in ein Schallleistungsmodell

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse aus dem vorherigen Kapitel in ein Schallleistungsmodell überführt. Zuerst werden die Anforderungen an das Modell beschrieben, darauf aufbauend die Modellierung durchgeführt und die Funktionen des Modells erläutert. Unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit und der Anforderungen erfolgen dann notwendige Vereinfachungen des Modells. Zum Schluss finden die Verifikation statt. Das Modell wird benötigt, um die Auslegung für die Unikatfertigung bei der LHT effizienter zu gestalten und somit die Abweichungen zwischen spezifiziertem und gemessenem Schalldruckpegel (vgl. Abschnitt 2.2.3) zu verringern.

### 6.1 Anforderungen an ein Schallleistungsmodell

Die Anforderungen an das Schallleistungsmodell sind aus dem Stand der Technik und vor allem dem Auslegungsprozess abzuleiten. Das Schallleistungsmodell muss den Schalldruckpegel in der Flugzeugkabine prognostizieren können. Es soll Stellparametern berücksichtigen, die von LHT beeinflusst werden können, um diesen Schalldruckpegel zu realisieren. Das Modell muss die Kabine abbilden und aufzeigen, ob und wie Änderungen im Schallisoliierungspaket den Schalldruckpegel beeinflussen. Es muss ersichtlich werden, an welchen Positionen zusätzlich Maßnahmen eingebracht werden müssen, um einen bestimmten Schalldruckpegel realisieren. Die Modellierung darf aufgrund der Vielzahl von Variablen jedoch nicht zu komplex werden, d.h. Eingabeparameter müssen auf ein sinnvolles Maß beschränkt werden. Dies kann durch die Verwendung von Varianten und Standards realisiert werden. Verschiedene Kombinationen sind lediglich bei der Implementierung des Modells zu berücksichtigen. Die Varianten der verschiedenen Kombinationen für Isoliermatten, Absorbermaterialien und Masselayer sind die Stellparameter. Ein komplexes Modell mit vielen Eingabeparametern ist nicht hilfreich, wenn diese erstens nur aufwendig bestimmt werden können, zweitens aufgrund von expliziten Kundenwünschen außerhalb der Kontrolle von LHT liegen (zum Beispiel Verwendung von Materialien mit geringerem akustischen Wirkungsgrad) und drittens keine Sensitivität auf das Endergebnis haben. Das Modell muss für LHT so generisch und grob sein, dass es mit der Produktionsmenge von circa zwei bis vier Completions in einem Jahr wirtschaftlich betrieben werden kann und trotzdem ausreichend gut der Realität entspricht. Eine weitere Anforderung an das Modell betrifft die Spiegelung der Modellierungsrichtung. Das Modell bekommt als Eingabeparameter einen Schalldruckpegel vorgegeben und gibt verschiedene Möglichkeiten aus, mit welchen Schalldämmmaßnahmen, in Form von Standards und Varianten, dieser Pegel erreicht werden kann. Zudem wäre eine Risikoabschätzung sinnvoll, welche das Risiko vorhersagt, wenn bestimmte Einsparungen bei Gewicht, Aufwand oder Kosten vorgenommen werden. Eine weitere Anforderung besteht darin, dass der Aufbau des Modells so gestaltet werden sollte, dass es zukünftig erweiterbar ist. Es muss flexibel bedienbar und veränderbar sein.

### 6.2 Modellierung und Funktionen des Modells

Die Vorgehensweise bei der Modellierung des Schallleistungsmodells ist vor allem von den Anforderungen der LHT abhängig. Aus diesen kann eine Modellierungsart abgeleitet werden

und Vereinfachungen getroffen werden. Das Schallleistungsmodell soll im Rahmen dieser Ausarbeitung erste Grundlagen für die Modellierung legen, in dem die Ergebnisse der Intensitätsmessungen in ein Modell überführt werden. Aus diesem Grund können nicht alle genannten Anforderungen aus dem vorherigen Abschnitt im Modell berücksichtigt werden. Die implementierten Funktionen des erstellten Modells werden in Abschnitt 6.2.1 erläutert.

In Abschnitt 2.3 wurden bereits verschiedene Berechnungsverfahren zur Vorhersage von Schalldruckpegeln beziehungsweise Schallleistungspegel vorgestellt. Eine Verwendung dieser Verfahren für die Modellierung geht mit erheblichen Modellierungsaufwänden einher, welche den Umfang dieser Arbeit überschreiten würden. Zudem müsste evaluiert werden, ob zum Beispiel die Verwendung der SEA einen wirtschaftlichen Nutzen für das LHT Completion Center hätte. Deswegen wird im Rahmen dieser Ausarbeitung ein Schallleistungsmodell in Microsoft Excel mit den zur Verfügung stehenden Intensitätsmessungen als wichtigste Eingabeparameter modelliert. Aufgrund der Anforderung einer einfachen Bedienbarkeit und Veränderbarkeit wird auf Makros oder Eingabemasken vorerst verzichtet.

### 6.2.1 Funktionen des Modells

Die Funktionen des Modells sind in folgender Abbildung dargestellt. Es wird zwischen zwei Hauptfunktionen und jeweiligen Teilfunktionen unterschieden.

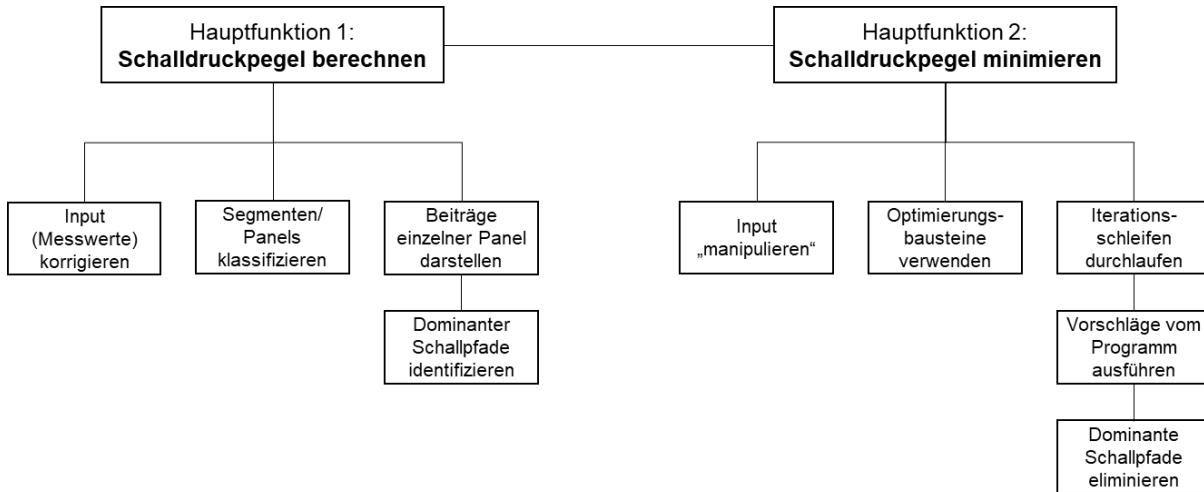


Abbildung 26: Visualisierung der Funktionen und Hauptkomponenten des Schallleistungsmodells

Die erste Hauptfunktion bezieht sich auf die Berechnung des Schalldruckpegels in der Kabine aus gemessenen Schallintensitäten. Die Messwerte stellen die Quelle im Modell dar und es ist keine aufwendige Simulation von turbulenter Grenzschicht, Triebwerksgeräuschen und weiteren Quellen (vgl. Abschnitt 2.1.1) durchzuführen. Daraus ergeben sich die Systemgrenzen der Modellierung. Die Eingabeparameter sind die (korrigierten) Schallintensitäten der einzelnen Segmente (Schallpfade in die Kabine) eines Rumpfquerschnittes und jeweilige Segmentgrößen und Gewichte der Panels (werden nur für die Minimierung benötigt), die Nachhallzeit in der Kabine und das betrachtete Volumen. Die Segmente beziehungsweise Panels werden klassifiziert und die Zusammenhänge werden somit verständlicher. Die Umgebung wirkt ausschließlich über die Eingabeparameter auf das

System ein. Die Ausgangsgröße ist der berechnete und gegebenenfalls minimierte Schalldruckpegel in der Kabine. Des Weiteren werden die einzelnen Beiträge der Segmente zum einfließenden Schallleistungspegel in die Kabine als Ausgangsgröße dargestellt. Diese werden benötigt, um eine theoretische Minimierung durchzuführen, da anhand der Beiträge zu erkennen ist, welche Schallpfade optimiert werden müssen, um einen geringeren Schalldruckpegel zu erreichen.

Die zweite Hauptfunktion ist die theoretische Minimierung des Schalldruckpegels durch die realitätsnahe Manipulation der Eingangswerte einzelner Schallpfade. Eine ausführliche Erläuterung erfolgt in nächsten Abschnitt. Die Minimierung lässt sich entsprechend der in Abschnitt 2.1.3 dargestellten Schalldämmmaßnahmen in vier Optimierungsbausteine aufteilen. Diese sind Erhöhung der Masse, Verringerung von Spalten, Entkopplung der Struktur und Veränderung der Steifigkeit von Panels. Masse und Steifigkeit wirken sich auf die Impedanz des Aufbaus aus. In Bezug auf Masse und Verringerung des Spaltes kann auch die Konfiguration als Optimierung verändert werden, zum Beispiel durch die Verwendung einer VIP-Sonnenblende anstatt einer Standard-Sonnenblende. Neben der Optimierung der Schallpfade kann ebenfalls die Gesamtabsorption erhöht werden und so eine Minimierung des Schalldruckpegels erreicht werden. Im Rahmen dieser Ausarbeitung werden die Optimierungsbausteine Masse und Spalte inklusive der Konfiguration sowie die Veränderung der Gesamtabsorption abgebildet. Für die Minimierung wird eine Iterationsschleife durchlaufen, wodurch dominante Schallpfade eliminiert werden. Die Minimierung wird dabei durch eine Automatisierung von Vorschlägen zur nächsten Optimierung jeder Iteration unterstützt. Durch die Vorgabe eines Ziel-Schalldruckpegels und die Ausgabe der Optimierungen pro Schallpfad wird in einem gewissen Maße die Anforderung bezüglich der Spiegelung der Modellierungsrichtung abgebildet. Der genaue Ablauf wird im folgenden Abschnitt erläutert.

Für die Integration der Optimierungsbausteine Steifigkeit und Entkopplung bedarf es noch weiterer Untersuchungen. Diese Aspekte sollten für eine Erweiterung des grundlegenden Schallleistungsmodells berücksichtigt werden. Die Eingabe von veränderten Massen und Spaltmaßen bildet noch keine konkreten Aufbauten (z.B. Seitenwandaufbau aus Flugzeughaut, Isoliermatte und Sandwichpanel mit Stoff) ab. Dies bezieht sich zum Beispiel auf das Hinzufügen eines Masselayers oder Ändern des Teppichs von Standard zu VIP. Durch den Aufbau des Modells lassen sich diese Aspekte in Zukunft jedoch zusätzlich etablieren.

### **6.2.2 Ablaufplan der Modellbedienung**

Der Ablaufplan der Modellbedienung wird anhand eines Programmablaufplans nach DIN 66001 erstellt. Dieser Plan „beschreibt durch Verwendung von Sinnbildern symbolisch den Ablauf oder die Reihenfolge logischer Operationen, die zur Lösung von Problemen notwendig sind“ [52]. Folgende Abbildung zeigt die drei Elementarbausteine der Datenverarbeitung.

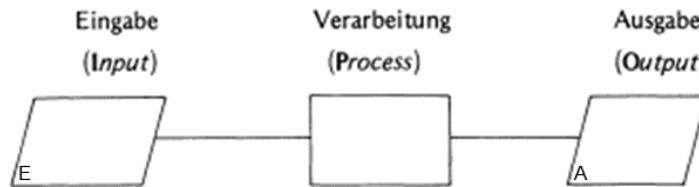


Abbildung 27: Die drei Elementarbausteine der Datenverarbeitung, modifiziert [52]

Im Elementarbaustein Verarbeitung werden Elementarereignisse miteinander zu Ablaufstrukturen verbunden. Dabei werden die einzelnen Ereignisse durch symbolische Bilder (Sinnbilder) dargestellt und durch Ablauflinien verbunden. Ziel ist es, im Programmablaufplan Eingaben „E“, Abfragen, Entscheidungsvorgänge und Ausgaben „A“ zu visualisieren. Eine Auflistung der Sinnbilder und die Erläuterung zur Anwendung befindet sich in Anhang G. [52]

Folgende Abbildung stellt den übergeordneten Programmablaufplan für das Schallleistungsmodell dar. Die beiden Hauptfunktionen des Modells (Berechnung des Schalldruckpegels im Raum und dessen theoretische Minimierung) sind durch die grauen Kästen gekennzeichnet. Unterprogramme mit eigenen, intern ablaufenden Prozessen sind durch zwei vertikale Striche innerhalb des Rechteckes gekennzeichnet und dienen dazu, den Programmablaufplan zu vereinfachen sowie übersichtlicher zu gestalten.

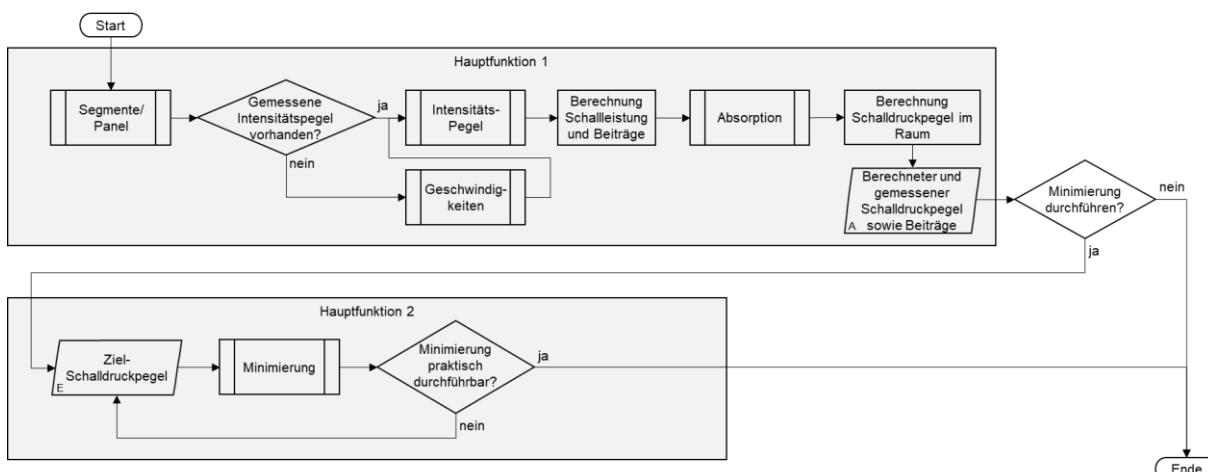


Abbildung 28: Programmablaufplan Schallleistungsmodell

Zuerst wird das Unterprogramm Segmente/Panel durchlaufen. Wie in folgender Abbildung zu sehen ist, werden dabei zuerst die Namen der Segmente, sowie deren Größe in Quadratmeter und eine Klassifizierung eingegeben.

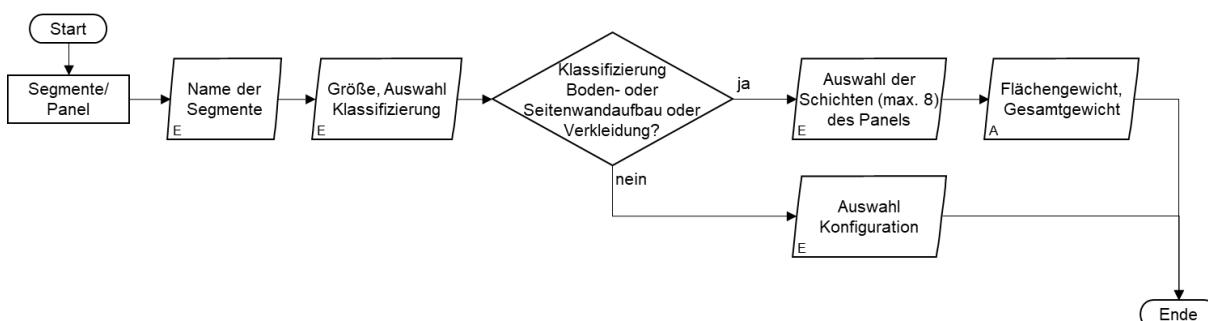


Abbildung 29: Unterprogramm Segmente/Panel

Bei der Klassifizierung von Segmenten wird zwischen Seitenwandaufbau, Bodenaufbau, Verkleidung (beispielsweise Ceiling), Fenster, Gap (Spalt) und Dado unterschieden. Entsprechend des betrachteten Segmentes muss eine Klassifizierung ausgewählt werden. Für ein Closure Panel würde beispielsweise die Klassifizierung Seitenwandaufbau ausgewählt werden. Wenn die Klassifizierung Bodenaufbau, Seitenwandaufbau oder Verkleidung zutreffend ist, muss der komplette Aufbau der Schichten ausgewählt werden, damit die richtigen Flächengewichte und letztendlich Gesamtgewichte ermittelt werden können. Für ein Standard Sidewall Panel müssten zum Beispiel die Schichten Flugzeugaußenhaut, Standard OEM Isoliermatte, Sandwichpanel (PH10-2F, 10 mm dick und 2 Decklagen) und Furnier als Oberfläche ausgewählt werden. Wenn die Klassifizierung Fenster, Gap (Spalt) oder Dado entspricht, wird lediglich die entsprechende Konfiguration eingegeben, zum Beispiel Standard Fenster oder VIP-Fenster.

Nach dem Durchlaufen des ersten Unterprogrammes werden die weiteren Schritte im Programmablaufplan verfolgt. Es wird abgefragt ob gemessene Intensitätspiegel vorhanden sind. Entsprechend der Entscheidung wird entweder direkt das Unterprogramm Pegel oder zuvor das Unterprogramm Geschwindigkeiten bearbeitet (vgl. Abbildung 28).

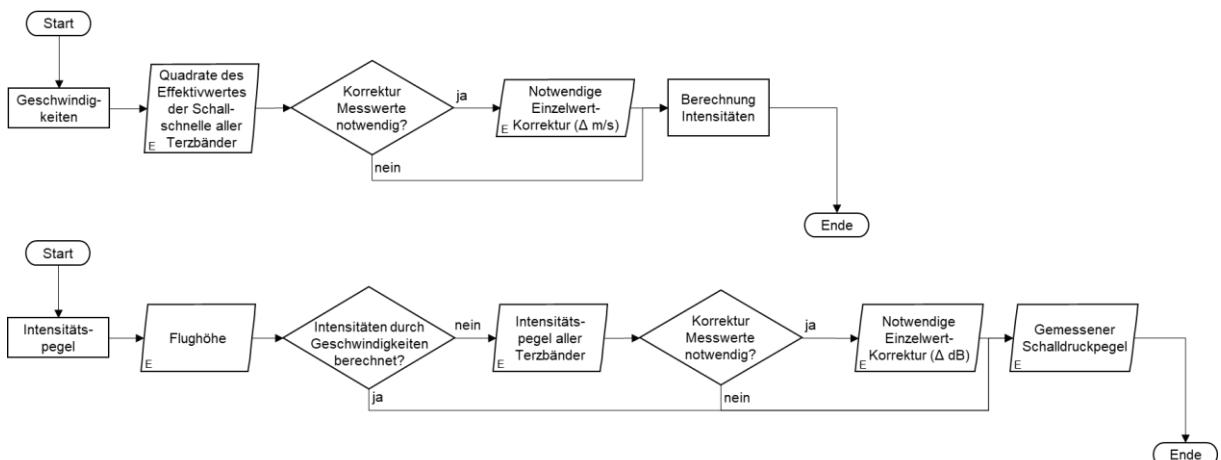


Abbildung 30: Unterprogramme Intensitätspiegel und Geschwindigkeiten

Abhängig von der Entscheidung des Anwenders wird das Unterprogramm Geschwindigkeiten durchlaufen. Es werden entsprechend die Quadrate des Effektivwertes der Schallschnelle  $\bar{v}^2$  aller Terzbändern pro Segment eingegeben. Sollte aus den Messdaten hervorgehen, dass für einzelne Segmente oder Terzbänder ungültige oder nicht physikalisch erklärbare Messwerte auftreten müssen diese korrigiert werden. Normalerweise sollten Ergebnisse mit vereinzelten ungültigen Messungen wiederholt werden. In der Praxis ist dieser Umstand, vor allem für Messflüge, nicht immer gegeben, sodass eine manuelle Korrektur der Messergebnisse oft notwendig ist. Die Korrektur findet in m/s statt. Wenn gemessene Intensitätspiegel vorhanden sind, wird direkt das Unterprogramm Intensitätspiegel bearbeitet, ansonsten findet dies im Anschluss an das Unterprogramm Geschwindigkeiten statt. Für die Berechnung der Dichte wird zuerst die Flughöhe während der Messung eingetragen. Abhängig davon, ob bereits Intensitätspiegel durch das Unterprogramm Geschwindigkeiten berechnet worden sind, werden die Intensitätspiegel jedes Terzbandes von jedem Segment eingegeben und es findet

erneut eine Korrektur von Messwerten in der Pseudoeinheit dB statt. Zum Schluss wird der gemessene Schalldruckpegel in der Kabine eingegeben, welcher parallel zur Messung der Geschwindigkeiten, beziehungsweise Intensitätspegel gemessen wurde, damit bei der Bewertung des Ergebnisses des berechneten Schalldruckpegels ein Vergleichswert vorhanden ist.

Wie in Abbildung 28 zu sehen ist, wird anschließend aus den Intensitätspegeln der gesamt einfließenden Schallleistungspegel und die Beiträge der einzelnen Segmente berechnet. Als nächster Schritt im Programmablaufplan wird das Unterprogramm Absorption durchlaufen, dargestellt in der nächsten Abbildung.

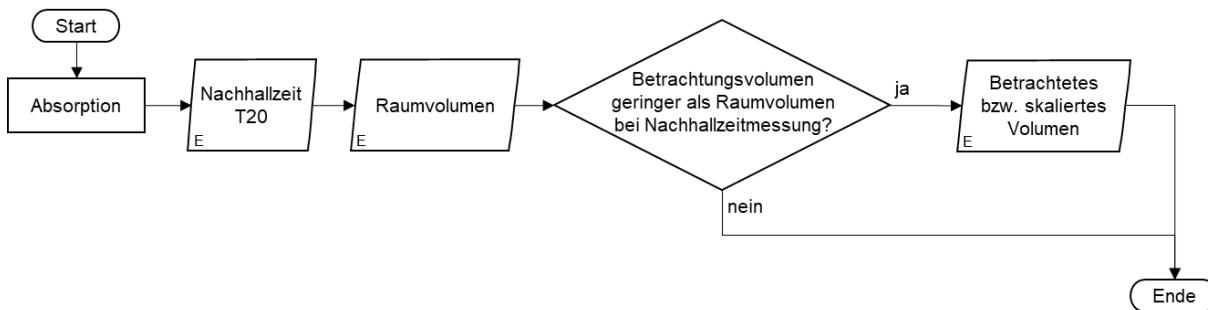


Abbildung 31: Unterprogramm Absorption

Innerhalb des Unterprogramms Absorption wird zuerst die gemessene Nachhallzeit und das dafür zu berücksichtigende Raumvolumen bei der Nachhallzeitmessung eingegeben. Da der Messbereich häufig kleiner ist als der gesamte Raum und die Berechnung der äquivalenten Absorptionsfläche vom Volumen abhängig ist, muss das herunterskalierte Volumen von der Nachhallzeitmessung auf den Messbereich angegeben werden (Zielraumvolumen). Die Berechnung wird genauer in folgendem Abschnitt 6.2.3 erläutert. Abschließend wird innerhalb der ersten Hauptfunktion der berechnete und gemessene Schalldruckpegel, sowie die Beiträge zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel ausgegeben und in Diagrammen dargestellt.

Wie in Abbildung 28 zu sehen ist, wird nach dem Durchlaufen aller Unterprogramme der Hauptfunktion 1 des Schallleistungsmodell der Schalldruckpegel im Raum berechnet und zusammen mit dem gemessenen Schalldruckpegel sowie den Beiträgen einzelner Segmente zum einfließenden Schallleistungspegel ausgegeben. Anschließend entscheidet der Anwender, ob eine Minimierung durchgeführt werden soll. Wenn dies nicht der Fall ist, wäre der Programmablaufplan hier beendet. Ansonsten wird Hauptfunktion 2 durchlaufen. Dafür muss der Anwender zuerst einen Zielpegel vorgeben, welcher bei einer Minimierung erreicht werden soll. Dieser kann zum Beispiel aus einer Spezifikation für ein Completion Projekt hervorgehen. Nach der Eingabe wird das Unterprogramm Minimierung durchlaufen. Bei der Minimierung sind im Schallleistungsmodell die Optimierungsbausteine Masse, Spalte und Konfiguration sowie die Veränderung der Gesamtabsorption abgebildet. Das Unterprogramm Minimierung ist in folgender Abbildung dargestellt.

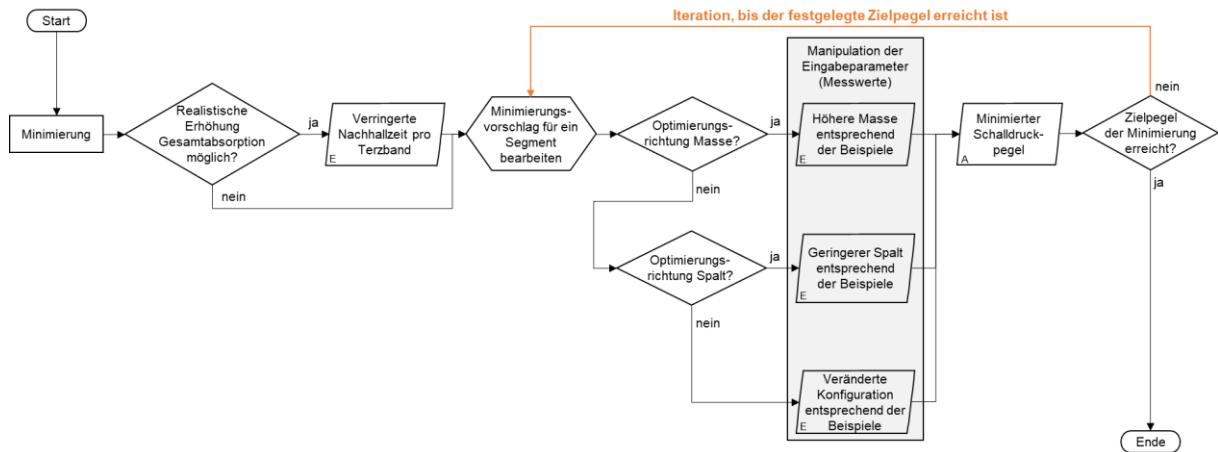


Abbildung 32: Unterprogramm Minimierung

Im Unterprogramm muss der Anwender zuerst die Frage beantworten, ob eine realistische Erhöhung der Gesamtabsorption möglich ist. Für diese Evaluierung müssen der aktuelle Wert der Nachhallzeit auf den Terzbändern und die Ausstattung der betrachteten Kabine, wie die verwendeten Materialien, berücksichtigt werden. Eine schallharte Oberfläche könnte in der Praxis zum Beispiel durch eine stoffartige und besser absorbierende Oberfläche getauscht werden. Eine realistische Erhöhung der Gesamtabsorption wäre beispielsweise in einer Standard-Kabine mit relativ hoher Nachhallzeit durchzuführen. Wenn die Kabine jedoch bereits eine komplette VIP-Ausstattung erhalten hat und die Nachhallzeit sehr gering ist (beispielsweise 0,1 Sekunden), ist eine weitere Erhöhung der Gesamtabsorption unrealistisch. Nachhallzeitmessungen der LHT haben gezeigt, dass diese in Flugzeugen für einen Frequenzbereich größer 400 Hz und kleiner 2500 Hz überwiegend zwischen 0,1 und 0,3 Sekunden liegen und für zunehmende Frequenzen leicht ansteigen. Die sinnvolle Eingabe einer theoretisch erreichbaren Nachhallzeit kann somit vorgenommen werden. Das Modell berechnet den minimierten Schalldruckpegel, nach einer Eingabe der geringeren Nachhallzeit. Allgemein bewirkt eine Verdopplung der Gesamtabsorption eine Halbierung der Nachhallzeit und damit eine Reduzierung des Schalldruckpegels um 3 dB. Anschließend beginnt ein iterativer Prozess für die Minimierung. Für jede Iteration wird jeweils ein vom Schallleistungsmodell vorgegebener Minimierungsvorschlag vom Anwender bearbeitet. Dieser Vorschlag basiert auf dem aktuell dominantesten Schallpfad, da eine Minimierung dieses Schallpfades die stärkste Wirkung auf den Schalldruckpegel hat. Für eine optimal ausgelegte Flugzeugkabine müssten alle Schallpfade den gleichen Beitrag zum gesamt einfließenden Schalldruckpegel liefern, sodass es keine dominanten Schallpfade mehr gibt. Bei der ersten Iteration wird der dominante Schallpfad der Messung bearbeitet. Für die Minimierung wird zuerst die Optimierungsrichtung abgefragt. Ist die Optimierungsrichtung Masse, wird auf dem Schallpfad vom Minimierungsvorschlag die Masse manuell durch eine Eingabe angepasst. Damit diese Anpassung auf realistischen Werten beruht, gibt das Schallleistungsmodell Beispiele für Massen von verschiedenen Komponenten an, zum Beispiel ein Masselayer mit 1,4 kg/m<sup>2</sup> oder eine VIP-Matte mit 0,4 kg/m<sup>2</sup>. Analog dazu ist die Vorgehensweise bei der Optimierungsrichtung Spalte oder Konfiguration. Das Modell gibt immer Vorschläge aus, die den Anwender unterstützen realistische Eingaben zu tätigen. Da der Beitrag zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel durch die manuelle Eingabe für

den bearbeiteten Schallpfad geringer geworden ist, wird der Minimierungsvorschlag als nächste Iteration die Bearbeitung des dann dominantesten Schallpfades vorschlagen. Diese Iterationsschleife wird so lange durchlaufen, bis der Zielpegel der Minimierung erreicht wird.

Im Modell haben die Eingaben auf den drei Optimierungsrichtungen eine Manipulation der Eingabeparameter zu Folge. Beim Optimierungsbaustein Masse wird auf Grundlage des Vergleiches von der Masse vor und nach der Minimierung basierend auf dem Massegesetz ein  $\Delta$ dB-Wert berechnet und entsprechend der Intensitätspegel herabgesetzt. Beim Optimierungsbaustein Konfiguration entfällt die Berechnung des  $\Delta$ dB-Wertes. Stattdessen wird basierend auf Messwerten oder angenommenen Werten, ein  $\Delta$ dB-Wert für die jeweilige Konfiguration definiert. Als Beispiel dienen vier verschiedene Konfigurationen für den Dado Gap: Offener Dado Gap, Dado Gap mit Ventbox, Geschlossener Dado Gap und neues Dado Konzept. Für die ersten drei Konfigurationen liegen Messwerte vor, aus denen  $\Delta$ dB-Werte berechnet werden können. Für das fiktive neue Dado Konzept, welches die besten Eigenschaften in Bezug auf den Schallübertragungsverlust haben soll, werden  $\Delta$ dB-Werte angenommen, welche die  $\Delta$ dB-Werte der anderen drei Konfigurationen auf den verschiedenen Terzbändern überschreiten. Beim Optimierungsbaustein Spalte wird die Fläche des Segmentes verringert, somit wird der Spalt kleiner. Im Modell wird bei der Berechnung der Schallleistung dann mit der verringerten Fläche gerechnet, resultierend in einen geringen Wert. Die genauen Berechnungen werden im folgenden Abschnitt erläutert. Wenn der Zielpegel erreicht ist, wird das Unterprogramm Minimierung beendet. Anschließend muss der Anwender die Frage beantworten, ob die durchgeföhrte Minimierung praktisch durchführbar wäre oder nicht. Der Anwender bewertet beispielsweise, ob die hinzugefügte Masse in das Flugzeug zu integrieren ist, der damit zusammenhängende Bauraum zur Verfügung steht oder der Dado Gap tatsächlich geschlossen werden kann. Wenn dies nicht der Fall ist, muss ein größerer Wert für einen Zielpegel eingegeben werden und die Minimierung entsprechend erneut durchlaufen werden. Ansonsten ist der Programmablaufplan abgeschlossen. Beim Modell ist zu berücksichtigen, dass die eingesetzten Minimierungsmaßnahmen Näherungen an die Realität darstellen. Grenzen der Realität (zum Beispiel können Spalte nicht immer komplett geschlossen werden) müssen vom Anwender bei der Modellierung berücksichtigt werden.

### 6.2.3 Berechnungen im Modell

Die erste Hauptfunktion des Schallleistungsmodells ist die Berechnung des Schalldruckpegels in der Kabine aus gemessenen Schallintensitäten. Allgemein wird der Schalldruckpegel für ein diffuses Schallfeld nach Formel (3.18) berechnet. Sie bildet einen direkten Zusammenhang zwischen dem Schalldruckpegel am Immissionsort und dem einfließenden Schallleistungspegel der Quelle. Für die Berechnung des Schalldruckpegels müssen die einzelnen Komponenten der Gleichung bestimmt werden. Der einfließende Schallleistungspegel  $L_W$  wird, wie bereits in Kapitel 4 erläutert, nach Norm [47] aus den Intensitätspegeln berechnet. Wenn die Intensitätspegel vorher aus Geschwindigkeiten zu bestimmen sind, wird die abgestrahlte Intensität eines sich bewegenden Panels (Körper) aus Formel (3.20) wie folgt berechnet.

$$I_K = \bar{v}^2 \cdot Z \cdot \sigma \quad (6.1)$$

Die Gesamtabsorption  $\bar{A}_{ges}$  lässt sich über Formel (3.13) und das betrachtete Volumen des Messbereiches beziehungsweise des Raumes berechnen. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, muss die Gesamtabsorption gegebenenfalls vom Volumen der Nachhallzeitmessung auf das Volumen im Messbereich ( $V_{skaliert} = V_{Ausschnitt}/V_{Gesamt}$ ) herunterskaliert werden. Diese Berechnung wird folgendermaßen vorgenommen.

$$\bar{A}_{ges,skaliert} = \bar{A}_{ges} \cdot V_{skaliert} \quad (6.2)$$

Wenn eine Skalierung stattfindet, berechnet das Modell den Schalldruckpegel im Raum entsprechend mit der skalierten äquivalenten Absorptionsfläche. Für die Berechnung des Korrekturpegel  $K_0$  für die Kennimpedanz ist die Luftdichte in der Kabine entscheidend. Am Boden beträgt diese nach internationaler Standardatmosphäre  $1,225 \text{ kg/m}^3$ . Für die Messflüge wird mit einer Dichte von  $0,909 \text{ kg/m}^3$  gerechnet. Sie entspricht einer Höhe von 3 km über dem Meeresspiegel und somit dem Kabinendruck in einem Flugzeug auf Reiseflughöhe. Da die Schallimpedanz  $Z$  aus Dichte und Schallgeschwindigkeit bestimmt wird, sind alle Größen für die Berechnung des Schalldruckpegels im Raum bekannt.

Für die zweite Hauptfunktion des Modells muss abhängig von der Optimierungsrichtung eine andere Berechnung vorgenommen werden. Die Eingabeparameter werden durch die Berechnungen manipuliert. Bei dem Optimierungsbaustein Masse wird ein  $\Delta\text{dB}$ -Wert aus der Masse vor der Minimierung  $m''_{vorher}$  und nach der Minimierung  $m''_{nachher}$  mit Hilfe des Massegesetzes nach Formel (3.15) für diffusen Schalleinfall gerechnet, das heißt bei der Formel werden am Ende 3 dB abgezogen. Der  $\Delta\text{dB}$ -Wert errechnet sich aus dem Unterschied des Schalldämmmaßes und wird pro Terzband von dem gemessenen Intensitätspegel ( $L_{I,i,vorher}$ ) abgezogen.

$$L_{I,i,nachher} = L_{I,i,vorher} - (R_{m''_{vorher}} - R_{m''_{nachher}}) \quad (6.3)$$

In Bezug auf den Spalt wird nicht der gemessene Intensitätspegel manipuliert, sondern die Fläche des zu bearbeitenden Segmentes verkleinert. Somit wird die Schallleistung mit der Fläche nach der Minimierung  $S_{i,nachher}$  neu berechnet.

$$L_{W,i,nachher} = I_{i,vorher} \cdot S_{i,nachher} \quad (6.4)$$

Bei der Minimierung durch die Veränderung der Konfiguration eines Schallpfades wird erneut der gemessene Intensitätspegel durch einen  $\Delta\text{dB}$ -Wert manipuliert. Abweichend von der Masse, kann dieser nicht berechnet werden, sondern wird durch Messungen ermittelt oder angenommen. Im Schallleistungsmodell sind für bestimmte Konfigurationen Terzbandabhängige  $\Delta\text{dB}$ -Wert ( $L_{Konfig}$ ) hinterlegt, welche bei der Auswahl einer Konfiguration vom gemessenen Intensitätspegel abgezogen werden.

$$L_{I,i,nachher} = L_{I,i,vorher} - \Delta L_{Konfig} \quad (6.5)$$

Aus den jeweiligen Anpassungen errechnet sich ein abweichender, einfließender Schallleistungspegel ( $L_{W,nachher}$ ), welcher in Formel (3.18) eingesetzt wird und sich daraus der minimierte Schalldruckpegel ergibt.

## 6.3 Vereinfachungen, Wirtschaftlichkeit und Fehlereinflüsse

Dieser Abschnitt beschreibt, welche Vereinfachungen im Modell vorgenommen werden und wie das Modell wirtschaftlich zu bewerten ist. Des Weiteren werden die Fehlereinflüsse beruhend auf den Eingabeparametern, welche aus Messungen resultieren, beschrieben.

### 6.3.1 Vereinfachungen und Wirtschaftlichkeit

Eine Vereinfachung besteht darin, dass in dem betrachteten Messbereich in der Kabine von einem diffusen Schallfeld ausgegangen wird. Somit muss der Schalldruckpegel nicht für einen spezifischen Punkt berechnet werden. Bezuglich Räumen in VIP-Flugzeugen wird für mehrere Messpunkte, verteilt im Raum, oft ein sehr ähnlicher Wert gemessen. Ob für den relativ kleinen Messbereich bei den Intensitätsmessungen wirklich von einem diffusen Schallfeld auszugehen ist, muss durch weitere Untersuchungen bestätigt werden. Verschiedene Messpositionen im gesamten Flugzeug weisen unterschiedliche Schalldruckpegel für die Kabine auf (vgl. Abschnitt 2.1.2). Da sich die einfließenden Schallleistungen abhängig von den verschiedenen kabinenpositionsabhängigen internen und externen Quellen stark unterscheiden, dürfen über das Modell keine Rückschlüsse auf einen Schalldruckpegel in einem vom Messbereich stark abweichenden Messpunkt gezogen werden.

Bei anderen Berechnungsverfahren, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, wird zwischen Luft- und Körperschall unterschieden. In diesem Modell wird dieser Aspekt aufgrund der räumlichen Systemgrenze vor den Panels Richtung Kabine nicht berücksichtigt. Dieser Zusammenhang wirkt sich auf die zweite Hauptfunktion Minimierung aus. Inwieweit eine Minimierung eines Schallpfades durch Masse in der Praxis tatsächlich die gleiche Wirkung hervorruft wie im Modell, hängt davon ab, ob der Übertragungsweg auf Luft- oder Körperschall zurückzuführen ist. Wenn der Schalleintrag hauptsächlich über Körperschallwege und nicht über Luftschallweg erfolgt, wirkt sich beispielsweise die Erhöhung der Masse der Isoliermatte nicht auf den Schalldruckpegel aus. Eine weitere Vereinfachung bezieht sich auf die Unterschiede zwischen Einfach- und Doppelwänden, beschrieben in Abschnitt 3.4, und die damit einhergehende Berechnung des Massegesetzes. Da bei den betrachteten Segmenten ein deutlich komplexeres Konstrukt als eine Doppelwand vorliegt, wird zur Vereinfachung das Massegesetz für diffusen Schalleinfall bei einer Einfachwand nach Formel (3.15) für die Berechnung des  $\Delta\text{dB}$ -Wertes verwendet. Andernfalls wäre eine exakte Simulation des Verhaltens der Aufbauten notwendig und würde ein genaueres Berechnungsverfahren (wie die SEA) verlangen. Aufgrund von wirtschaftlichen Aspekten und der Verfügbarkeit von Eingangswerten wird eine solche Simulation zum jetzigen Zeitpunkt nicht durchgeführt.

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des Modells, lässt sich folgendes feststellen: Mit dem Modell können in kürzester Zeit, nach der einmaligen Überführung der Messergebnisse in das Modell, im Rahmen der Minimierung qualitative Vergleiche unterschiedlicher Optimierungswege hergestellt werden. Nach dem Durchlaufen der Minimierung wird deutlich, welche Schallpfade in der Praxis zu bearbeiten sind. Der exakte quantitative Vergleich ist für diese Feststellung nicht unbedingt notwendig, kann unter Berücksichtigung gewisser Sicherheitsmargen bestimmt durch die Berechnung, jedoch in Zukunft implementiert werden. Abhängig von

gewünschter Genauigkeit oder erforderlichem Gültigkeitsbereich ist es somit hilfreich unterschiedlich aufwendige Modelle zur Verfügung zu haben [53]. Deswegen ist das Schallleistungsmodell für den erläuterten Anwendungsfall des qualitativen Vergleiches aufgrund der kurzen Durchlaufzeit des gesamten Programmablaufplanes und den wertvollen und in der Praxis nutzbaren Erkenntnisse durch die Minimierung wahrscheinlich wirtschaftlich zu betreiben. Das Modell stellt das Grundlagenwerk für die Schalldruckpegelberechnung in VIP-Flugzeugen dar.

### 6.3.2 Fehlereinflüsse

Neben den bereits erläuterten Vereinfachungen sind Fehlereinflüsse zu berücksichtigen, welche auf die Messungen der Eingabeparameter zurückzuführen sind. Dies kann mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung betrachtet werden. Jede Messung ist mit einem Fehler behaftet der sich auf das Endergebnis auswirkt. Systematische Fehler können sich in einem ungünstigen Fall aufzaddieren und das Ergebnis zu stark beeinflussen. Zufällige Fehler gleichen sich in den meisten Fällen aus. Mit der Fehlerfortpflanzung kann bestimmt werden, wie sich Einzelfehler auf das Endergebnis fortpflanzen. Für komplexe Messgrößen wird meistens das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz angewendet, bei dem die Bestimmung des Größtfehlers ausreichend ist. Dies wäre bei den Messungen in den meisten Fällen die maximale Abweichung in Dezibel. Ein sich fortpflanzender Fehler könnte auch aufgrund der Sondencharakteristik (vgl. Abschnitt 4.2.2) oder Verwendung der Intensitätskiste entstehen. [54]

Da das Modell hauptsächlich darauf abzielt einen qualitativen Vergleich bei der Minimierung herzustellen und nicht darauf, einen möglichst genauen Schalldruckpegel mit minimaler Abweichung zum gemessenen Schalldruckpegel zu berechnen, kann auf eine ausführliche Berechnung der Fehlerfortpflanzung an dieser Stelle verzichtet werden. Diese Betrachtung wird wichtiger, je weiter sich das Modell in Zukunft einem gemessenen Schalldruckpegel annähern wird.

## 7 Minimierung von Schallleistungsbeiträgen anhand des Schallleistungsmodells

In diesem Kapitel wird anhand des Schallleistungsmodells exemplarisch die Minimierung in den einzelnen Schritten aufgezeigt. Dafür wird der Programmablaufplan mit den Eingabeparametern von der Testreihe HCAT M2 in Abschnitt 7.1 durchlaufen. Einzelne Iterationen werden beispielhaft beschrieben und das Ergebnis der Minimierung dargestellt. In Abschnitt 7.2 werden die Ergebnisse der Minimierungen der Testreihen A319 VIP, A321 STD und A350 VIP aus Kapitel 5 dargestellt und miteinander verglichen. Allgemein ist bei der Minimierung anzustreben, alle Schallpfade auf einen möglichst gleichen prozentuellen Anteil zum einfließenden Schallleistungspegel zu senken, sodass keine einzelnen, dominanten Schallpfade vorhanden sind.

### 7.1 Exemplarische Minimierung mit der Testreihe HCAT M2

Gemäß Ablaufplan werden die Unterprogramme Segmente/Panel, Pegel und Absorption durchlaufen. Eine Korrektur der Messergebnisse ist nicht erforderlich. Am Ende der ersten Hauptfunktion werden der berechnete und gemessene Schalldruckpegel sowie die Beiträge zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel ausgegeben und in Diagrammen dargestellt.

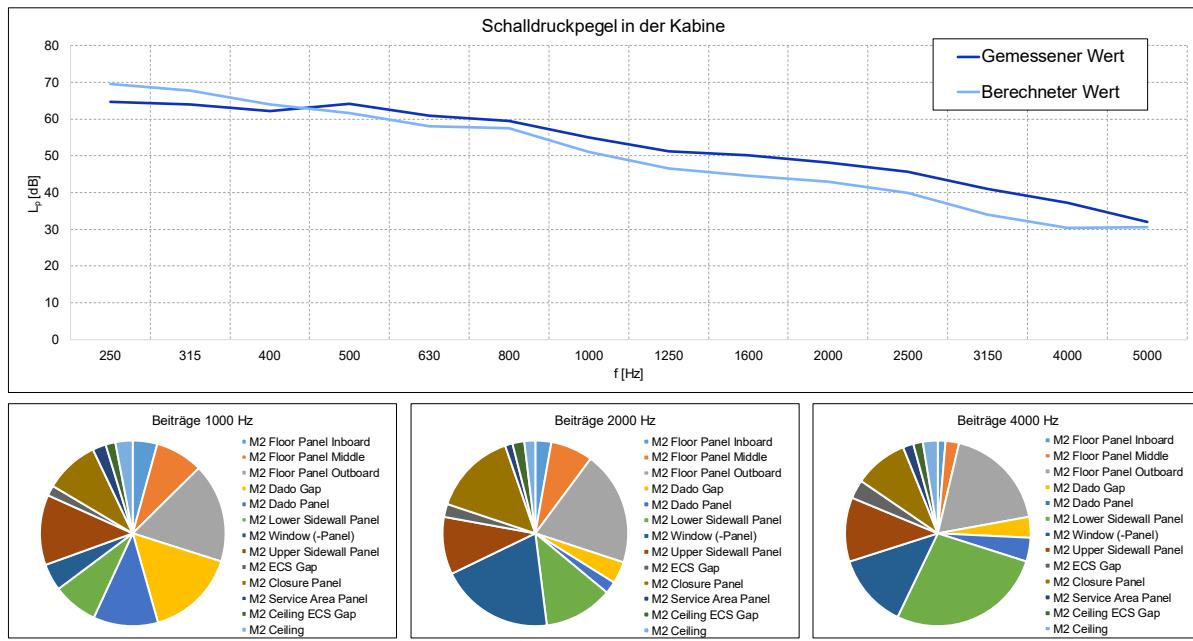


Abbildung 33: Ausgabe Schallleistungsmodell Hauptfunktion 1

Da eine Minimierung durchgeführt werden soll, wird anschließend der Ziel-Schalldruckpegel im Modell eingegeben. Dieser soll 3 dB SIL 3 unter dem berechneten Schalldruckpegel von 47,69 dB SIL 3 liegen. Nach dieser Definition wird abgefragt, ob es realistisch ist, die Gesamtabsorption zu erhöhen. Für die Testreihe M2 wurde im HCAT eine durchschnittliche Nachhallzeit von 1,67 Sekunden im SIL-Bereich gemessen (vgl. Anhang D2). Die Kabine befindet sich in einer Standard-Kabinenkonfiguration. Eine Erhöhung der Gesamtabsorption resultierend aus der Eingabe einer geringeren Nachhallzeit wäre somit möglich. Deswegen wird die Nachhallzeit im Schallleistungsmodell auf 1,4 Sekunden herabgesetzt. Der Pegel sinkt

dadurch um 0,74 dB. Im nächsten Schritt wird die Iterationsschleife durchlaufen. Bei jeder Iteration wird jeweils ein Minimierungsvorschlag des Modells bearbeitet. Damit der Ziel-Schalldruckpegel erreicht werden kann müssen insgesamt neun Iterationen durchgeführt werden. Folgend werden die Zwischenergebnisse der Iterationen eins bis drei, vier bis sechs und sieben bis neun dargestellt. Durch die neunte Iteration wird der Ziel-Schalldruckpegel unterschritten. Dieser Iterationsschritt stellt somit das Endergebnis dar.

### 7.1.1 Iterationen 1-3: Zwischenergebnis der Minimierung

Wie bereits bei der Auswertung der Messung im HCAT (vgl. Abschnitt 5.1.2) ersichtlich wurde, ist der größte Beitrag der Testreihe HCAT M2 zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel mit 19 % dem Floor Panel Outboard zuzuteilen. Deswegen schlägt das Schallleistungsmodell für die erste Iteration vor, dieses Segment als dominantesten Schallpfad zu optimieren. Der Minimierungsvorschlag und die daraus resultierenden Beispiele zur möglichen Optimierung sind in folgendem Ausschnitt aus dem Schallleistungsmodell dargestellt.

Minimierungsvorschlag		Beispiele Mögliche Optimierungen		
Aktuell Dominanter Schallpfad:	M2 Floor Panel Outboard	Zusätzliches Gewicht [kg/m <sup>2</sup> ]	Veränderte Konfiguration	Geringerer Spalt [m <sup>2</sup> ]
	19%	Teppichunterbau: 2,5	N/A	N/A
Klassifizierung:	Bodenaufbau	VIP Teppich mit Unterbau: 6,7	N/A	N/A
Optimierungsrichtung:	Masse	STD Teppich: 3 Masselayer 2: 1,4	N/A	N/A

Abbildung 34: Minimierungsvorschlag und Beispiele zur möglichen Optimierung aus dem Schallleistungsmodell

Da sich die Optimierungsrichtung auf die Erhöhung der Masse bezieht, muss im Folgenden eine erhöhte Masse des Panels eingegeben werden. Damit diese Eingabe auf realistischen Werten beruht, zeigt das Modell Beispiele möglicher Optimierungen auf. Durch die Auswahl eines dieser Beispiele wird die Stärke der Minimierung auf einem Schallpfad beeinflusst. Diese Vorschläge werden durch die Optimierungsrichtung und die Klassifizierung ausgelöst: Für Bodenaufbauten, Seitenwandaufbauten und Verkleidungen werden jeweils unterschiedliche Beispiele für zusätzliches Gewicht aufgezeigt, an denen sich der Anwender orientieren kann. Für Bodenaufbauten kann zum Beispiel ein Teppichunterbau hinzugefügt werden. Dies würde für einen Seitenwandaufbau keinen Sinn ergeben. Für die Klassifizierungen Dado und Fenster wird eine jeweils andere Konfiguration vorgeschlagen. Für die Klassifizierung Spalte wird ein geringerer Spalt vorgeschlagen. In Bezug auf die erste Iteration wird für das Floor Panel Outboard zusätzlich ein Teppichunterbau mit 2,5 kg/m<sup>2</sup> zur ursprünglichen Masse des Panels (Masse Vorher: 5,14 kg/m<sup>2</sup>) dazu addiert. Nach jeder Iteration ändern sich die prozentualen Beiträge aller Segmente zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel.

Für die zweite Iteration wird das Lower Sidewall Panel vorgeschlagen, da dieses nach der Minimierung des Floor Panels Outboard jetzt den höchsten Beitrag zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel aufweist. Beim Lower Sidewall Panel wird entschieden, zusätzlich Skin Damping von innen auf die Außenhaut des Flugzeugs (vgl. Abbildung 5) in diesem Bereich aufzubringen, resultierend in eine zusätzlich hinzugefügte Masse von 2,05 kg/m<sup>2</sup>. Bei der nächsten Iteration wird das Window (-Panel) optimiert. Bei der Messung befand sich das

Fenster in einer Standard Konfiguration. Deswegen wäre die erste Optimierungsstufe eine VIP-Sonnenblende zu verwenden, die einen höheren STL als eine Standard-Sonnenblende hat. In Bezug auf die Klassifizierung Fenster gibt es weitere Optimierungsmöglichkeiten, welche dem Anwender zur Auswahl stehen, beispielsweise kann das Fenster ebenfalls komplett geschlossen werden. Der dadurch entstehende Platz kann genutzt werden, um absorbierendes Material in die Fensterfläche einzubringen, welches den STL weiter erhöht und den Beitrag dieses Segmentes verringern würde. Da für die VIP-Sonnenblende keine Messwerte vorliegen, wird beispielhaft angenommen, dass der STL 3 dB auf jedem Frequenzband höher ist.

Innerhalb jeder Iteration müssen die entsprechenden Eingaben in den blau eingefärbten Zellen der Tabelle in Abbildung 35 getätigt werden. Neben dieser Tabelle ist ein Ergebnis-Diagramm über die prozentualen Beiträge zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel dargestellt. Letztendlich wird bei jeder Iteration zuerst der Minimierungsvorschlag begutachtet, dann die Eingabe der Minimierung vorgenommen und das Ergebnis betrachtet. Dann beginnt die nächste Iteration erneut mit der Begutachtung des Minimierungsvorschlags. Die folgende Tabelle zeigt den aktuellen Stand nach der dritten Iteration.

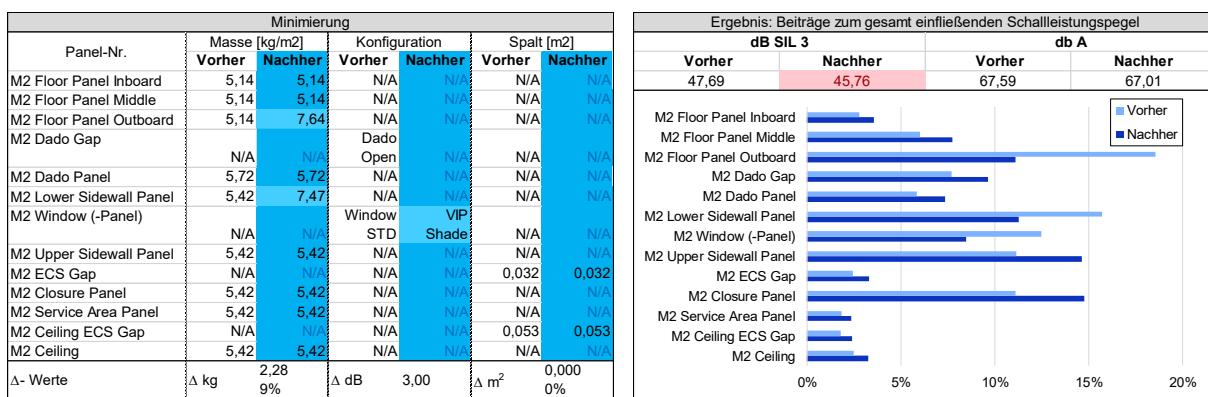


Abbildung 35: Zwischenergebnis nach Iterationen 1-3

Auf der linken Seite der Abbildung sind die erlaubten Eingaben durch die blaue Einfärbung gekennzeichnet. Tatsächlich getätigte Eingaben erhalten eine hellblaue Farbe, damit eindeutig sichtbar wird, auf welchen Schallpfaden eine Veränderung vorgenommen wurde. Unter den Segmenten werden die  $\Delta$ -Werte in Bezug auf die Optimierungsbausteine dargestellt. Die Gesamtmasse aller Segmente wurde beispielsweise insgesamt um 9 % erhöht. Die rechte Seite der Abbildung beschreibt den Schalldruckpegel vor und nach Minimierung für den SIL-sowie A-bewerteten Schalldruckpegel in der Kabine und die prozentualen Beiträge aller Segmente zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel vor der Minimierung (hellblau) und nach der dritten Iteration (dunkelblau). Allgemein bezieht sich das Wort „Vorher“ in den Abbildungen immer auf den Zeitpunkt vor der Minimierung und nicht auf den vorherigen Iterationsschritt. Es ist bereits zu erkennen, dass der dominante Schallpfad nach Minimierung einen geringeren Beitrag hat als vor der Minimierung. Der Schalldruckpegel unter „dB SIL 3 nachher“ ist noch rot eingefärbt, da der Ziel-Schalldruckpegel noch nicht erreicht ist. Durch die drei Iterationen konnte der Schalldruckpegel um weitere 1,19 dB SIL 3 reduziert

werden, sodass der aktuelle Schalldruckpegel zusammen mit der bereits erhöhten Gesamtabsorption auf 45,76 dB SIL 3 sinkt.

### 7.1.2 Iterationen 4-6: Zwischenergebnis der Minimierung

Erneut werden für die Iterationen vier bis sechs die notwendigen Schritte gemäß vorherigem Abschnitt durchlaufen. Bei der vierten Iteration wird das Gewicht des Closure Panels um 1,4 kg/m<sup>2</sup> (Material: Masselayer) erhöht. Das gleiche Material wird ebenfalls für die weiteren beiden Iterationsschritte beim Upper und Lower Sidewall Panel verwendet. Folgende Abbildung stellt das Ergebnis der Iterationen vier bis sechs dar.

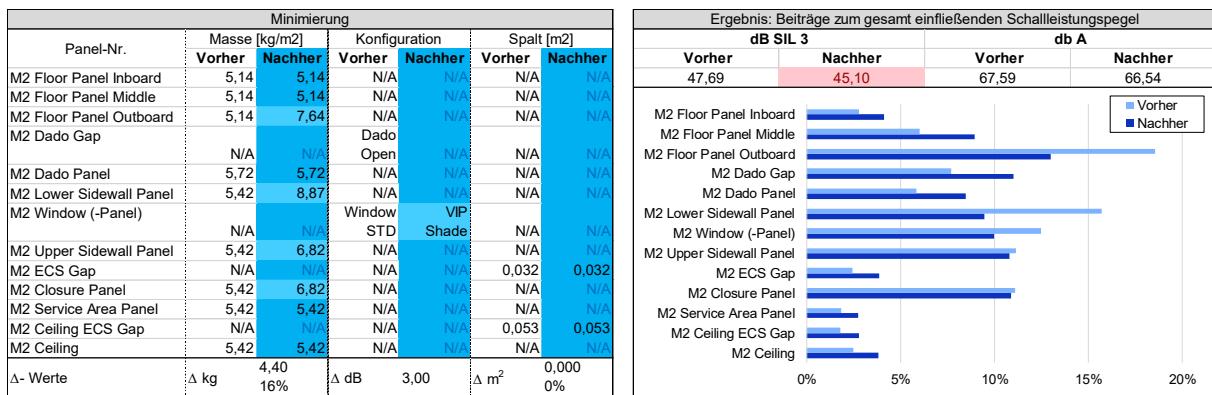


Abbildung 36: Zwischenergebnis nach Iterationen 4-6

Die Veränderungen an Closure und Lower Sidewall Panel sind durch die hellblaue Einfärbung der Zelle zu erkennen. Der  $\Delta$ -Wert von 1,4 kg/m<sup>2</sup> wurde zum vorherigen Gewicht dazu addiert. Für das Lower Sidewall Panel fällt dies im Vergleich zur Abbildung 35 nicht direkt auf, da der  $\Delta$ -Wert von 1,4 kg/m<sup>2</sup> bereits auf die eingetragene Masseerhöhung dazu addiert worden ist. Aufgrund der Tatsache, dass bei den Iterationen nur Masse hinzugefügt worden ist, haben sich die  $\Delta$ -Werte auch nur für den Optimierungsbaustein Masse verändert. Die Erhöhung liegt jetzt bei 16 % der Gesamtmasse aller Segmente vor der Minimierung. Durch die drei Iterationen konnte der Schalldruckpegel um weitere 0,66 dB auf 45,10 dB SIL 3 gesenkt werden. Da dieser Wert immer noch über dem Ziel-Schalldruckpegel liegt, müssen weitere Iterationen durchgeführt werden.

### 7.1.3 Iterationen 7-9: Ergebnis der Minimierung

Als nächstes werden die Iterationen sieben bis neun durchgeführt. Bei der siebten Iteration wird das Gewicht des Floor Panel Outboard um weitere 1,4 kg/m<sup>2</sup> durch einen Masselayer erhöht. Somit wird das Gewicht dieses Segments fast verdoppelt. Bei der achten Iteration wird die Konfiguration des Dado Gap verändert. Da sich der Dado Gap in Standard Konfiguration befindet, wird, ähnlich wie bei der Optimierungsrichtung Fenster, die erste Optimierungsstufe einer Ventbox zur Verringerung des STL verwendet. Eine weitere Optimierungsstufe wäre zum Beispiel das Schließen des Dado Gaps, welches in einem Flugzeug nur unter bestimmten Bedingungen möglich ist. Mit der neunten Iteration wird der Ziel-Schalldruckpegel unterschritten und die Minimierung somit beendet. Dafür wird das Closure Panel um einen weiteren Masselayer mit 1,4 kg/m<sup>2</sup> ergänzt. Die folgende Abbildung stellt das Ende der

Iteration und somit das Ergebnis der Minimierung dar. Dies ist daran zu erkennen, dass der Schalldruckpegel für „dB SIL 3 Nachher“ nicht mehr rot, sondern grün eingefärbt ist.

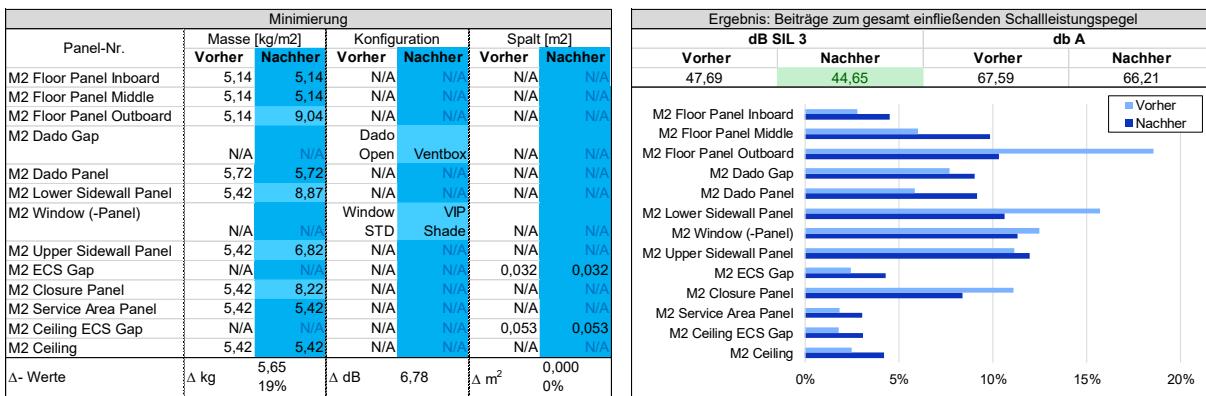


Abbildung 37: Endergebnis nach Iterationen 7-9

Da sowohl die Masse des Floor Panel Outboard als auch des Closure Panel durch eine vorangegangene Iteration bereits verändert worden sind, ist lediglich anhand des  $\Delta$ -Wertes auf dem jeweiligen Schallpfad die Veränderung in der Abbildung zu erkennen. Sichtbar hinzugekommen ist die Veränderung beim Dado Gap.

Als Ergebnis der Minimierung kann festgehalten werden, dass die Gesamtmasse aller Segmente um 5,65 kg und somit 19 % vom Gesamtgewicht vor der Minimierung erhöht worden ist. Der  $\Delta$ dB-Wert der veränderten Konfigurationen steigt mit der Konfigurationsänderung des Dado Gaps auf 6,78 dB. Auf der rechten Seite der Abbildung 37 ist der minimierte Schalldruckpegel von 44,65 dB SIL 3 zu sehen. Die Prozentbeiträge der Segmente zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel sind in dem darunter angeordneten Diagramm abzulesen. Durch die letzte Iteration wird der Schalldruckpegel nochmals um 0,44 dB SIL 3 gesenkt. Die Veränderungen über die verschiedenen Iterationen stellt die folgende Tabelle dar.

*Tabelle 11: Prozentuale Beiträge der Segmente zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel bei unterschiedliche Iterationsschritten*

Panel/Segment	Vor Minimierung	Nach Iteration 3	Nach Iteration 6	Endergebnis (Iteration 9)
M2 Floor Panel Inboard	3%	4%	4%	5%
M2 Floor Panel Middle	6%	8%	9%	10%
M2 Floor Panel Outboard	19%	11%	13%	10%
M2 Dado Gap	8%	10%	11%	9%
M2 Dado Panel	6%	7%	8%	9%
M2 Lower Sidewall Panel	16%	11%	9%	11%
M2 Window (-Panel)	12%	8%	10%	11%
M2 Upper Sidewall Panel	11%	15%	11%	12%
M2 ECS Gap	2%	3%	4%	4%
M2 Closure Panel	11%	15%	11%	8%
M2 Service Area Panel	2%	2%	3%	3%
M2 Ceiling ECS Gap	2%	2%	3%	3%
M2 Ceiling	3%	3%	4%	4%

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Abweichungen der Prozentbeiträge der Segmente mit zunehmenden Iterationen abnehmen. Dies ist gleichbedeutend mit einer gewissen Neutralisierung von dominanten Schallpfaden und somit dem Ziel der Minimierung. Vor der Minimierung lag der Unterschied zwischen maximalem und minimalem Prozentbeitrag bei 17 Prozentpunkten, nach der Minimierung liegt der Unterschied bei 9 Prozentpunkten. Tendenziell wurde am Anfang der Minimierung mehr Gewicht (bzw. bessere Konfigurationen, und kleinere Spalte) eingebracht als gegen Ende der Minimierung, damit eine Optimierung in feineren Schritten vollzogen werden kann. Aus diesem Grund und dem Aspekt, dass es mit zunehmenden Iterationen weniger dominante Schallpfade gibt und sich die Schallpfade immer mehr angleichen resultiert, dass die Verringerung des Schalldruckpegels zwischen zwei Iterationen mit steigender Anzahl an Iterationen abnimmt. Die Iterationen 1-3 haben den Schalldruckpegel um 1,19 dB reduziert, die Iterationen 4-6 um 0,66 und die letzten drei Iterationen um lediglich 0,44. Als letzter Schritt im Programmablaufplan muss beurteilt werden, ob die Minimierung realistisch umsetzbar ist. Dies ist für alle durchgeführten Iterationen sowie die Veränderung der Absorption zutreffend und liegt hauptsächlich daran, dass im Demonstrator am HCAT eine Standard-Kabine verbaut wurde und damit deutlich mehr Optimierungspotential als eine hochwertige VIP-Kabine bietet.

Abhängig davon, an welche Beispiele sich der Anwender bei den Iterationen hält und damit den Umfang der Minimierung pro Iteration beeinflusst, kann es abhängig vom Anwender zu leichten Unterschieden beim minimierten Schalldruckpegel sowie der Anzahl der Iterationen kommen. Dies ist nicht relevant, da die Beiträge sowie die  $\Delta$ -Werte für die Optimierungsbausteine Masse, Konfiguration und Spalte am Ende jeder Minimierung ähnlich

sein werden. Abschließend wird der Verlauf von gemessenem, berechnetem (vor der Minimierung) und minimiertem Schalldruckpegel dargestellt.

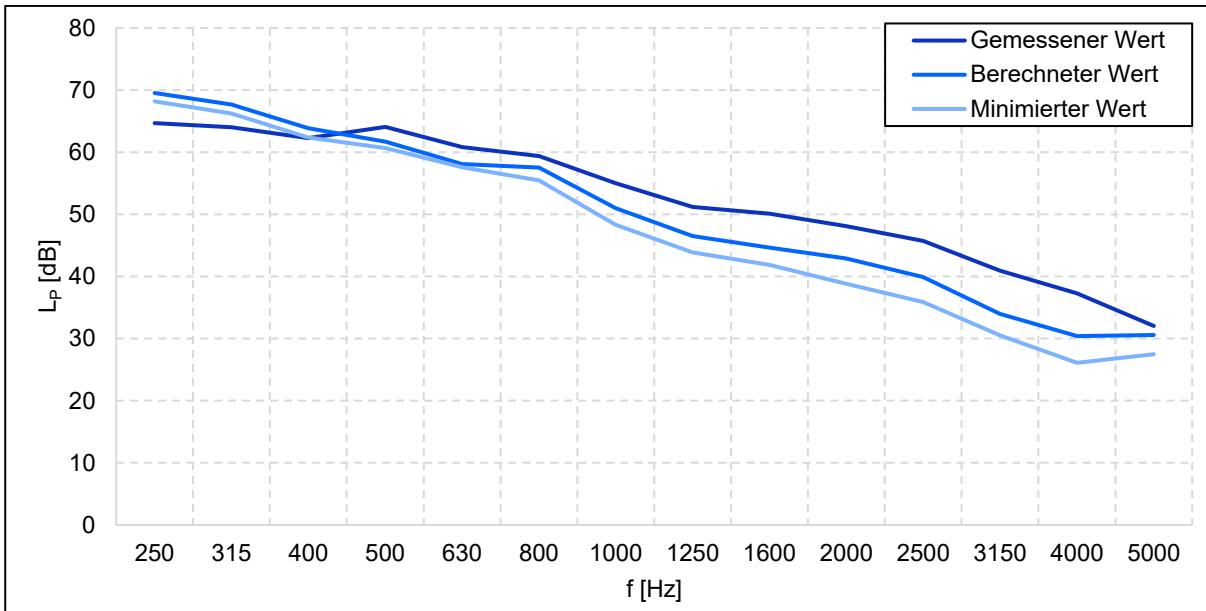


Abbildung 38: Gemessener, berechneter und minimierter Schalldruckpegel für Testreihe HCAT M2

Erwartungsgemäß liegt, neben dem SIL-bewerteten Schalldruckpegel, die Verlaufskurve des minimierten Schalldruckpegels unter dem berechneten Schalldruckpegel.

## 8 Diskussion

In diesem Kapitel werden die relevantesten Ergebnisse interpretiert. Die Unterteilung bezieht sich auf die Intensitätsmessungen und Auswertungen in Kapitel 5 und die Überführung in das Schallleistungsmodell in Kapitel 6 und 7.

### 8.1 Identifizierung dominanter Schallpfade durch Intensitätsmessungen

Folgend werden die wichtigsten Erkenntnisse der Intensitätsmessungen erläutert. Für die Etablierung eines Messverfahrens wurden unter anderem Vergleichsmessungen mit (HCAT M2) und ohne (HCAT M1) Intensitätskiste durchgeführt. Dessen Effektivität wurde durch die Betrachtung der Druck-Intensitäts-Indikatoren  $F_{pI,i}$  einzelner Segmente bewiesen. Der durchschnittliche Wert über alle Segmente und Frequenzbänder von  $F_{pI,i}$  liegt bei der Messung mit Intensitätskiste bei 2,0 und somit deutlich unter dem Wert von 7,2 bei der Messung ohne Intensitätskiste. Während des Fluges ist eine Messung ohne Intensitätskiste aufgrund der zusätzlich auftretenden Störgeräusche durch Triebwerkslärm oder ECS Geräusche nicht möglich. Für zukünftige Messungen muss die Intensitätskiste verwendet werden.

Störgeräusche, welche Messungen maßgeblich beeinflussen, sind zum Beispiel beim A321 Flug zu erkennen. Die starken Störgeräusche durch Luftströmungen sind für hohe Werte für  $F_{pI,i}$  und negative Werte beim ECS Gap verantwortlich. Es ist wahrscheinlich, dass durch Luftverwirbelungen aus der Klimaanlage direkt am Mikrofon starke Schwankungen von Schalldruck und Schallintensität auftreten. Zudem werden Luftströme von der Rückwand der Intensitätskiste zurückgeworfen, resultierend in negativen Schallintensitäten. Eine ungenaue Messung eines Segmentes wirkt sich dadurch auf die Genauigkeitsklasse der gesamten Messung aus. Ob und wie Lautstärke von Luftauslässen ohne beträchtliche Einflüsse auf die Messgenauigkeit im Flug gemessen werden kann, gilt es in Zukunft zu untersuchen. Negative Schallintensitäten treten ebenfalls für hohe Frequenzen bei den Floor Panel im A350 auf. Diese sind auf die Materialien des verwendeten VIP-Teppichs zurückzuführen, welche für hohe Frequenzen den Schall absorbieren können und dadurch eine negative Intensität gemessen wird.

Aus den Intensitätsmessungen wurden die Beiträge einzelner Segmente zum gesamt einfließenden Schallleistungspegel berechnet. Durch die bildliche Darstellung der Beiträge werden dominante Schallpfade erkennbar. Folgend werden die wichtigsten Erkenntnisse erörtert und Schlussfolgerungen gezogen. Bezüglich der Floor Panel wurde bei den Messungen eine wichtige Erkenntnis erlangt. Mehrere Messungen haben gezeigt, dass Outboard Floor Panel deutlich höhere Schallintensitäten als Inboard Floor Panel aufweisen. Bei allen vier Testreihen stellt nur das äußere Floor Panel einen dominanten Schallpfad dar und nicht die weiteren Floor Panels in Richtung Kabinenmitte. Der Intensitätspegel der Floor Panels nimmt ab, je weiter in Richtung Kabinenmitte gemessen wird. Dies könnte sowohl an dem zunehmenden Abstand zur Außenhaut des Flugzeugrumpfes und somit einem größeren Abstand von der Quelle (dies bezieht sich auf die Luftschanllanregung durch die Fußbodenpanels aus dem Bereich zwischen Frachtraum und Fußboden) liegen als auch an der geringeren Anregung der Floor Panels durch Körperschall. Der Einfluss der Luftschanllanregung durch den Zwischenraum über dem Frachtraum dürfte jedoch deutlich geringer sein als die Körperschanllanregung über die Struktur, da der Pegel im Frachtraum ansonsten ebenfalls entsprechend des Abstandes zur Außenhaut des Flugzeugrumpfes gemäß der Messpositionen von Outboard und Inboard Floor Panel abnehmen müsste. Der Schalldruckpegel im Frachtraum konnte während der Messflüge nicht gemessen werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass dieser im Frachtraum innerhalb von den 0,5 m bis 1 m Abstand zwischen Outboard und Inboard Floor Panel keinen entscheidenden Schwankungen unterliegt (annähernd diffuses Schallfeld im Messbereich), welche die hohen Unterschiede erklären können. Stattdessen sind die hohen Intensitäten für Outboard Floor Panel und die geringeren Intensitäten der Inboard Floor Panel vor allem auf die Körperschanllanregung zurückzuführen. Durch die zunehmende Dämpfung aufgrund der längeren Strecke bis zur Kabinenmitte wird der Einfluss für Floor Panels in der Kabinenmitte somit ebenfalls geringer.

Für dominante Schallpfade konnten weitere Regelmäßigkeiten festgestellt werden. Das Upper Sidewall Panel ist bei drei von vier Messungen als dominanter Schallpfad aufgetreten, Dado Gap, Closure Panel und Ceiling ECS Gap (unter der Berücksichtigung dieses Segmentes bei

der A321 STD Testreihe) bei jeweils zwei von vier Testreihen. Dominante Schallpfade stellen für zukünftige Schallisoliierungspakete Optimierungspotentiale dar und müssen für deren Auslegung berücksichtigt werden. Die Identifikation von nicht dominanten Schallpfaden ist ebenfalls relevant. Diese sind das Floor Panel Inboard, das Service Area Panel und die Ceiling. Aufwände im Schallisoliierungspaket können für nicht dominante Schallpfade bei zukünftigen Auslegungen aufgrund des geringen Beitrages zum gesamt einfließenden Schalleistungspegels reduziert werden. Der Schalldruckpegel wird dadurch nicht erhöht und es wird Gewicht eingespart, welches für andere Schallpfade reinvestiert werden kann, wie bei der Minimierung in Kapitel 7. Durch dieses Verfahren wird der Schalldruckpegel minimiert und das Gewicht bleibt identisch. Wenn eine Reinvestition des Gewichts nicht durchgeführt wird, reduziert sich das Gesamtgewicht des Flugzeuges, gleichbedeutend mit einer höheren Flugreichweite.

Zukünftig kann eine weitere Verbesserung des Messverfahrens für Intensitätsmessungen im Flug eine höhere Genauigkeitsklasse auf allen Frequenzbändern herbeiführen. Die Ergebnisse der Intensitätsmessungen haben aufgezeigt, dass durch die Verwendung der Intensitätskiste bereits deutliche Steigerungen der Messgenauigkeit erzielt werden konnten. Ein Untersuchungsaspekt könnte sich auf die Bestimmung einer Korrekturkurve für die Intensitätskiste beziehen. Des Weiteren gilt es die identifizierten dominanten Schallpfade durch weitere Intensitätsmessungen zu bestätigen

## 8.2 Schalldruckpegelberechnung und Minimierung im Schallleistungsmodell

Das Schallleistungsmodell stellt durch die beiden Hauptfunktionen Schalldruckpegelberechnung und Minimierung vom Schalldruckpegel ein nützliches, valides und wirtschaftliches Tool für die Auslegung und Optimierung eines Schallisoliierungspaketes spezifisch für das LHT Completion Center im Bereich von VIP-Flugzeugen dar. Bei der Anwendung des Modells auf die vier Testreihen wurde festgestellt, dass der berechnete Schalldruckpegel geringer ist als der gemessene. Die Abweichung beträgt im Mittel über alle Frequenzbänder von 250 Hz bis 5000 Hz und Testreihen -3,4 dB. Das Begründen der negativen Abweichung mit der Messungenauigkeit von 1,5 dB (GK 2) beziehungsweise 4 dB (GK 3) und verstärkende Ungenauigkeiten durch die Richtcharakteristik der Intensitätssonde (vgl. Abschnitt 4.2.2) ist aufgrund der klaren, negativen Tendenzen der Kurve (Prognosekurve vom berechneten Schalldruckpegel unterschreitet den gemessenen Pegel) nicht ausreichend. Stattdessen ist die negative Abweichung auf drei mögliche Ursachen zurückzuführen. Erstens können die gemessenen Schallintensitäten geringer sein als die realen Intensitäten. Dies führt dazu, dass die Eingangswerte für das Schallleistungsmodell zu gering sind und somit auch der berechnete Schalldruckpegel. Die Abweichung könnte bei der Messung durch die Intensitätskiste und das innen verbaute offenporige Material (Basotect) entstehen. Der Absorptionskoeffizient des Materials steigt mit höheren Frequenzen ebenfalls an und kann somit die allgemeine Tendenz der Kurven erklären, dass mit höheren Frequenzen die Höhe der Abweichung zunimmt. Die Abweichung könnte ebenfalls auf das Übertragen lokaler Phänomene des gemessenen Segmentausschnittes auf die gesamte Größe des Panels zurückzuführen sein. Gemessen wurde bei den Testreihen meistens in der Mitte eines Panels. Die Panelanbindungen, welche sich meistens außen am Panel befinden, weisen teilweise höhere Schallabstrahlungen auf. Des Weiteren werden von der Intensitätssonde nicht senkrecht abgestrahlter Schall nur in einem verringerten Maß aufgenommen. Da die vektorielle Schallabstrahlung von Panels in einem Flugzeug nicht bekannt ist, kann dies ein weiterer Einflussfaktor auf zu gering gemessene Intensitäten sein. Der Einfluss anderer Eingangswerte auf das Verhalten zwischen gemessenem und berechnetem Schalldruckpegel kann ausgeschlossen werden: Die Absorptionsflächenkorrektur ist bei allen Testreihen aufgrund einer relativ konstanten Nachhallzeit über alle Terzbänder konstant, beziehungsweise leicht steigend für höhere Frequenzen. Korrekturfaktor und Korrekturpegel sind über alle Frequenzen konstant. Zweitens kann ein Grund für die negative Abweichung darin liegen, dass nicht alle Schallpfade bei der Definition der Segmente der Messfläche berücksichtigt worden sind. Es kann zum Beispiel der Fall eintreten, dass eine lokale Schallquelle (zum Beispiel ein Luftauslass) oder Spalte zwischen den Messflächen nicht berücksichtigt wurden. Dieser Schallpfad würde dann nicht in die Berechnung einfließen und deswegen eine negative Abweichung erklären. Die dritte Ursache hat ihren Ursprung im gemessenen Schalldruckpegel und nicht im berechneten. Der gemessene Schalldruckpegel wird nicht für eine bestimmte Messfläche (wie bei der Intensitätsmessung) ermittelt, sondern für einen Raum oder eine Position. Problematisch dabei ist, dass bei der Messung auch Schalleinträge den Schalldruckpegel beeinflussen können, welche außerhalb der Messfläche

der Intensitätsmessung liegen. Daraus folgt, dass dann der gemessene Schalldruckpegel zu hoch ist und nicht der berechnete Schalldruckpegel zu gering.

Die Minimierung ermöglicht dem Anwender festzustellen, welche Aufwände notwendig sind, um einen gewünschten Ziel-Schalldruckpegel zu realisieren. Durch die Optimierung auf Ebene der einzelnen Schallpfade gibt das Schallleistungsmodell die Aufwände in kg, dB oder m<sup>2</sup> für jeden spezifischen Schallpfad an. Der Vergleich von Minimierungen verschiedener Testreihen hat bedeutende Erkenntnisse hervorgebracht. Es werden weniger Iterationen für die Minimierung benötigt, wenn es davor nur wenige dominante Schallpfade anstatt einer Vielzahl dominanter Schallpfade gibt. Dies liegt daran, dass bei einem hohen Beitrag von einem oder zwei Schallpfaden der Schalldruckpegel schon bei den ersten ein oder zwei Iterationen deutlich gesenkt werden kann und die Berechnung des gesamt einfließenden Schallleistungspegels somit stärker von einer Minimierung beeinflusst wird. Durch die Minimierung werden alle Schallpfade einander angeglichen. Das heißt es gibt nach der Minimierung keine dominanten Schallpfade und der einfließende Schallleistungspegel wird zu ähnlichen Anteilen der verschiedenen Schallpfade berechnet. Dies ist ein Gütemerkmal für eine effizient ausgelegte Flugzeugkabine, da somit unnötige Aufwände für Schallpfade ohne Einfluss auf den Schalldruckpegel vermieden werden, resultierend in Kosten- und Gewichtseinsparungen.

Es gilt das Schallleistungsmodell im Hinblick auf die Minimierung und die realitätsnahe Abbildung der akustischen Zusammenhänge zu optimieren. Dies betrifft zum Beispiel die Unterscheidung zwischen Luft- und Körperschall, welche aufgrund der gewählten Systemgrenzen bei der Modellierung nicht abgebildet ist. In diesem Zusammenhang müssen weitere Forschungen hinsichtlich der Optimierungsbausteine Steifigkeit und Entkopplung angestellt werden und deren Ergebnisse in das Schallleistungsmodell integriert werden. Des Weiteren muss das Erhöhen des STL nach Massegesetz dahingehend untersucht werden, wie sich mehrwandige Aufbauten aus verschiedenen Materialien und damit einhergehenden Impedanzsprüngen bei der Minimierung verhalten. Die Gesamtabsorption wird im Modell über die gemessene Nachhallzeit und das Raumvolumen berechnet. Diese Messungen können vernachlässigt werden, wenn die Absorptionskoeffizienten der verwendeten Oberflächenmaterialien bekannt sind. Aus diesen lässt sich ebenfalls die Gesamtabsorption berechnen.

## 9 Fazit und Ausblick

Diese Ausarbeitung stellt die grundlegende Forschung für die Gesamtbetrachtung von VIP-Flugzeugkabinen und einem zu berechnenden Schalldruckpegel dar. Sie hat nachvollziehbar aufgezeigt wie dominante Schallfade durch Intensitätsmessungen zu quantifizieren sind. Da Messungen während der Flugphase für diese Quantifizierung unerlässlich sind, wurde ein Messverfahren für die reale Umgebung entwickelt. Dieses kann in verschiedenen Forschungsbereichen der Akustik von Flugzeugen verwendet werden. Bei vier durchgeföhrten Testreihen konnten Regelmäßigkeiten hinsichtlich dominanter Schallpfade festgestellt werden. Diese werden den Fokus der Auslegung des Schallisolierungspaktes in Zukunft beeinflussen. Ein hohes Optimierungspotential bietet die Erkenntnis, dass die Beiträge zum einfließenden Schallleistungspegel von Floor Panels abnehmen, je weiter in Richtung Kabinenmitte gemessen wird.

Die Messergebnisse wurden nachfolgend in das Schallleistungsmodell überführt. Dieses hat bewiesen, dass die Berechnung des Schalldruckpegels aus den einfließenden Schallleistungen einzelner Segmente in der Flugzeugkabine eine valide Methode ist. Die Erweiterung des Modells um die Minimierung des Schalldruckpegels ermöglicht es dem Anwender nachzuvollziehen, welche zusätzlichen Schalldämmmaßnahmen für spezifische Schallpfade notwendig sind, um einen bestimmten Ziel-Schalldruckpegel zu realisieren. Das exemplarische Beispiel der Minimierung untermauert die Effektivität der Modellierung.

Das Modell wurde entsprechend der spezifischen Anforderungen des VIP Completion Centers der Lufthansa Technik gestaltet und entwickelt. Durch die Reduktion der Eingabeparameter wird der Zeitaufwand für das Durchlaufen des Programmablaufplans auf ein geringes Maß beschränkt. Bei der Minimierung wird der Anwender durch die schematische Vorgehensweise mit dem Programmablaufplan sowie einer Teilautomatisierung durch die Minimierungsvorschläge unterstützt. Der Auslegungsprozess von Schallisolierungspaketen für VIP-Flugzeugkabinen wird durch die Integration des Schallleistungsmodells in Zukunft maßgeblich vereinfacht werden, wodurch ein entscheidender wirtschaftlicher Mehrwert erzeugt wird. Der spezifizierte Schalldruckpegel gemäß individueller Kundenanforderung wird durch das Verringern von Schalldämmmaßnahmen auf nicht dominanten Schallpfaden und das Hinzufügen von Schalldämmmaßnahmen auf dominanten Schallpfaden mit einem besseren Kosten-Nutzen-Verhältnis erreicht. Dadurch werden ebenfalls geringe Schalldruckpegel bei gleichem Gewicht möglich, resultierend in einen erhöhten Passagierkomfort.

Die Effizienz des Schallleistungsmodells konnte in der Ausarbeitung eindeutig nachgewiesen werden. In der Diskussion wurden weitere Optimierungspotentiale aufgezeigt, dessen Möglichkeit zur Umsetzung über den Zeitrahmen dieser Ausarbeitung hinausgeht. Dieses Potential sollte genutzt werden, um zukünftig die Weiterentwicklung der Methodik zu unterstützen.

## Literaturverzeichnis

- [1] S. Pennig, J. Quehl und V. Rolny, „Effects of aircraft cabin noise on passenger comfort,“ in *Ergonomics*, 55 (10), Köln, 2012, pp. 1252-1265.
- [2] U. Orrenius, V. Cotonu und A. Wareing, „Analysis of sound transmission through aircraft fuselages excited by turbulent boundary layer or diffuse acoustic pressure fields,“ in *38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Ottawa, Canada, 2009, pp. 2637-2645.
- [3] Lufthansa Technik AG, „Annual Report 2022,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.lufthansa-technik.com/en/financials>. [Zugriff am 1 April 2023].
- [4] Lufthansa Technik AG, „T/OS Special Aircraft Services,“ 2022. [Online]. Available: [https://ebase.dlh.de/ebase/lht/de/LHT\\_B\\_NLS/T\\_OES/T\\_Z.html](https://ebase.dlh.de/ebase/lht/de/LHT_B_NLS/T_OES/T_Z.html). [Zugriff am 11 Dezember 2022].
- [5] W. Timm, „Lufthansa Technik on air - Episode 02: VIP aircraft,“ [Online]. Available: <https://www.lufthansa-technik-broadcast.com/aviation-podcasts.html>. [Zugriff am 6 Februar 2023].
- [6] Luminary Air Group, „Aircraft Insulation Basics,“ [Online]. Available: <https://luminary.aero/cabin-comfort-systems/aircraft-insulation-basics/>. [Zugriff am 25 November 2022].
- [7] C. Thomas und H. Scheel, „Kabinenakustik in der Luftfahrtforschung,“ in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, Hamburg, 2018.
- [8] J. F. Wilby, „Aircraft Interior Noise,“ in *Journal of Sound and Vibration*, Calabasas, California, USA, 1996, pp. 434-453.
- [9] J. L. T. da Rocha, Coupled Structural-Acoustic Analytical Models for the Prediction of Turbulent Boundary-Layer-Induced Noise in Aircraft Cabins, Victoria, Canada, 2010.
- [10] N. Hu, H. Buchholz, und M. Herr, „Contributions of Different Aeroacoustic Sources to Aircraft Cabin Noise,“ in *19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Berlin, 2013.
- [11] J. F. Wilby, „Interior Noise of General Aviation Aircraft,“ in *SAE Transactions*, Vol. 91, 1982, pp. 3133-3144.
- [12] A. Paonessa, „The passive and active noise control strategy in the aircraft interior noise,“ in *Journal de Physique IV Proceedings*, 1994, pp. C5-51-C5-53.

- [13] Z. Liu, H. Lee und C. Lu, „Passive and active interior noise control of box structures using the structural intensity method,“ in *Applied Acoustics, Volume 67*, Singapore, 2005, pp. 112-134.
- [14] Aearo Technologies LLC, „Noise, Vibration and Thermal Control for the Aerospace Industry,“ 2021. [Online]. Available: [https://www.rshughes.com/p/Aearo-Technologies-E-A-R-ADC-126-2-25-Ft-Width-X-4-Ft-Length-X-0-25-In-Thick-Advanced-Damping-Composite-Sheet-640-0126/640\\_0126/](https://www.rshughes.com/p/Aearo-Technologies-E-A-R-ADC-126-2-25-Ft-Width-X-4-Ft-Length-X-0-25-In-Thick-Advanced-Damping-Composite-Sheet-640-0126/640_0126/). [Zugriff am 1 Januar 2023].
- [15] A. Y. Zverev, „Noise Control Mechanisms of Inside Aircraft,“ in *Acoustical Physics, Vol. 62, No. 4*, Moscow, Russia, 2016, p. 478–482.
- [16] J. Weisbeck, „Quieting aircraft cabin noise,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/amd0415-reducing-cabin-noise-aircraft/>. [Zugriff am 13 12 2022].
- [17] V. Cotoni, B. Gardner, J. A. Cordioli, J. P. Carneal und C. Fuller, „Advanced Modeling of Aircraft Interior Noise using the Hybrid FE-SEA method,“ 2008.
- [18] Lufthansa Technik AG, „VIP Aircraft Services - It's all about you,“ [Online]. Available: <https://www.lufthansa-technik.com/vip-aircraft>. [Zugriff am 25 November 2022].
- [19] F. Kühne, „Die Luxus-Jets der VIPs,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.airliners.de/einfach-vip-jets-lufthansa-technik/50857>. [Zugriff am 15 November 2022].
- [20] Airbus S.A.S, „Airbus launches new A320 Airspace interior,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2017-06-airbus-launches-new-a320-airspace-interior>. [Zugriff am 16 Dezember 2022].
- [21] Airbus S.A.S, „ACJ319 “best in class” cabin is highlighted at Dubai show,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2017-11-acj319-best-in-class-cabin-is-highlighted-at-dubai-show>. [Zugriff am 16 Dezember 2022].
- [22] DuPont de Nemours, Inc., „Attractive, easy-to-clean, scuff-resistant surface protection for aircraft interiors,“ DuPont de Nemours, Inc., [Online]. Available: <https://www.dupont.com/tedlar/tedlar-aerospace-applications.html>. [Zugriff am 2 Januar 2023].
- [23] M. Hararat-Tehrani, F. Schwarz und M. Taddiken, „Decompression Panel For Aircraft Partition“. USA Patent 4899960, 13 Februar 1990.

- [24] F. Vance und J. Young, „Design, development, and validation of acoustic insulation packages for business and VIP aircraft,“ in *NOISE-CON22*, Lexington, Kentucky, USA, 2022, pp. 800-809.
- [25] D. Casalino, F. Diozzi, R. Sannino und A. Paonessa, „Aircraft noise reduction technologies: A bibliographic review,“ in *Aerospace Science and Technology* 12(1), 2008, pp. 1-17.
- [26] J. Cordioli, S. Gerges, A. Pererira, M. Carmo und C. Grandi, „Vibro-Acoustic Modeling of Aircrafts Using Statistical Energy Analysis,“ in *SAE Brasil Congress and Exhibit*, 2004.
- [27] R. M. Erhard, M. A. Clarke und J. J. Alonso, „A Low-Cost Aero-Propulsive Analysis of Distributed Electric Propulsion Aircraft,“ in *AIAA Scitech 2021 Forum*, 2021.
- [28] Lufthansa Technik AG, „Sound Strategy 2020-2021,“ Hamburg, 2021.
- [29] J. Hansen, Interviewee, *Experteninterview Auslegungsprozess VIP Completion Akustik*. [Interview]. 1 Dezember 2022.
- [30] T. Helligrath, Interviewee, *Experteninterview Auslegungsprozess VIP Completion Akustik*. [Interview]. 21 Dezember 2022.
- [31] T. Tews, Interviewee, *Experteninterview Auslegungsprozess VIP Completion Akustik*. [Interview]. 16 Dezember 2022.
- [32] DIN - Deutsches Institut für Normung, „DIN ISO 5129:2001 Messung des Schalldruckpegels in Luftfahrzeugen während des Fluges,“ Berlin, 2003.
- [33] P. Zeller, *Handbuch Fahrzeugakustik*, München: Springer-Verlag, 2018.
- [34] M. Möser, *Technische Akustik*, Springer-Verlag, 2015.
- [35] B. Aloufi, K. Behdinan und J. Zu, „Theoretical vibro-acoustic modeling of acoustic noise transmission through aircraft windows,“ in *Journal of Sound and Vibration*, 371, 2016, p. 344–369.
- [36] R. Cherif, A. Wareing und N. Atalla, „Evaluation of a hybrid TMM-SEA method for prediction of sound transmission loss through mechanically coupled aircraft double-walls,“ in *Applied Acoustics*, 2017, pp. 132-140.
- [37] B. Campolina, N. Atalla und N. Dauchez, „Assessment of the validity of statistical energy analysis and transfer matrix method for the prediction of sound transmission loss through aircraft double-walls,“ in *Acoustics 2012*, 2012.

- [38] B. Campolina, „Vibroacoustic modelling of aircraft double-walls with structural links using Statistical Energy Analysis (SEA),“ 2012.
- [39] Z. Sun, J. Sun, C. Wang und Y. Dai, „Dynamic Vibration Absorbers Used for Increasing Transmission Loss of Aircraft Panels,“ in *Applied Acoustics*, Vol. 48, 1996, pp. 311-321.
- [40] B. Liu, L. Feng und A. Nilsson, „Sound transmission through curved aircraft panels with stringer and ring frame attachments,“ in *Journal of Sound and Vibration* 300(3-5), 2007, pp. 949-973.
- [41] D. Johansson und P. Connell, „Statistical Energy Analysis software,“ Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2010.
- [42] G. Petrone, G. Melillo, A. Laudiero und S. De Rosa, „A Statistical Energy Analysis (SEA) model of a fuselage section for the prediction of the internal Sound Pressure Level (SPL) at cruise flight conditions,“ in *Aerospace Science and Technology*, 88, 2019, pp. 340-349.
- [43] R. Sinambari und S. Sentpali, Ingenieurakustik, Frankenthal und München: Springer-Verlag, 2014.
- [44] E. Parizet, Y. Padayashi und O. Collery, „Efficiency of loudness models for the evaluation of airplane cockpit noise comfort,“ in *Acoustics 2012*, 2012.
- [45] H. Lazarus, C. A. Sust, R. Steckel, M. Kulka und P. Kurtz, Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation, Springer-Verlag, 2007.
- [46] Luminary Air Group, LCC, Aircraft Cabin Noise Reduction - A Primer, 2021, pp. 545-564.
- [47] DIN - Deutsches Institut für Normung, „DIN EN ISO 9614-2 Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen, Teil 2; Messung mit kontinuierlicher Abtastung,“ Berlin, 1996.
- [48] Brüel & Kjær, „Sound Intensity Probe Kit Type 3599,“ [Online]. Available: <https://www.bksv.com/en/transducers/acoustic/sound-intensity-probes/3599>. [Zugriff am 10 Februar 2023].
- [49] DIN - Deutsches Institut für Normung, DIN EN ISO 15186-1 Bestimmung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen aus Schallintensitätsmessungen, Teil 1: Messungen im Prüfstand, Berlin, 2003.
- [50] Brüel & Kjær, The Fundamentals of Sound Intensity Measurement, 2021.

- [51] Qsources, „Qohm,“ [Online]. Available: <https://www.qsources.be/infra-qsources/qohm/>. [Zugriff am 03 März 2023].
- [52] E. Hering, Software-Engineering, Wiesbaden: Springer-Verlag, 1984.
- [53] F. Lehringer, „Modelle zur Berechnung von Absorptionsschalldämpfern in Abgasanlagen — Teil 1,“ in *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 1998, p. 362–366.
- [54] K. Eden und H. Gebhard, Dokumentation in der Mess- und Prüftechnik, Wiesbaden: Springer-Verlag, 2014.
- [55] Verein Deutscher Ingenieure e.V., „VDI-Richtlinie 3633 - Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Blatt 0: Begriffe,“ 2018.
- [56] SAE Aerospace, „ARP 4754 - Aerospace Recommended Practice,“ 2010.
- [57] B. Plaumann, „Vertifierung Systemintegration und Versuch [Vorlesungsfolien],“ 2021.
- [58] T. Gerberich, Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie, Wiesbaden: Gabler-Verlag, 2011.
- [59] M. Rabe, S. Spieckermann und S. Wenzel, Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Springer-Verlag, 2008.
- [60] S. Haxter und C. Spehr, „Two-Dimensional Evaluation of Turbulent Boundary Layer Pressure Fluctuations at Cruise Flight Conditions,“ in *IAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Colorado Springs, USA, 2012.
- [61] DIN - Deutsches Institut für Normung, DIN EN ISO 3382 Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter, 2000.

## **Anhang**

Anhang A – Ergänzende Erläuterungen zu SIMKAB Messungen in Abschnitt 2.1.2

Anhang B – Darstellungen der Intensitätskiste

Anhang C – Ergänzende Messungen und Auswertungen

Anhang D – Ergänzende Verläufe gemessener Intensitätspegeln verschiedener

Anhang E – Sinnbilder für Programmablaufpläne

## Anhang A – Ergänzende Erläuterungen zu SIMKAB Messungen in Abschnitt 2.1.2

### Anhang A1 – Flugbedingungen und Umweltparameter

Flugversuchsbedingungen für zwei Mikrofonpositionen, den unteren und den oberen TAS und für verschiedene FLs, die für die hier durchgeführte parametrische Analyse ausgewählt wurden. Die Angabe „x mic. Pos 2/10“ steht für die Position Zwei und Zehn des Mikrofons in Metern, gemessen vom Anfang der Kabine.

Tabelle A1.1: Flugbedingungen und Umweltparameter [10]

	$TAS = u \text{ [m/s]}$	$x, \text{ mic. pos. 2/10 [m]}$	$\rho \text{ [kg/m}^3]$	$\nu \text{ [m}^2/\text{s]}$
<b>FL 270</b>	214/237	13/25.4	0.50	$3.1 \cdot 10^{-5}$
<b>FL 310</b>	213/236	13/25.4	0.44	$3.4 \cdot 10^{-5}$
<b>FL 350</b>	212/236	13/25.4	0.38	$3.8 \cdot 10^{-5}$
<b>FL 390</b>	206/236	13/25.4	0.32	$4.3 \cdot 10^{-5}$

### Anhang A2 – Darstellung der 30 Messpositionen an drei Fenstern



Abbildung A2.1: DLR ATRA-Testträger in Takeo mit Druck-Messwandler-Anordnung [60]

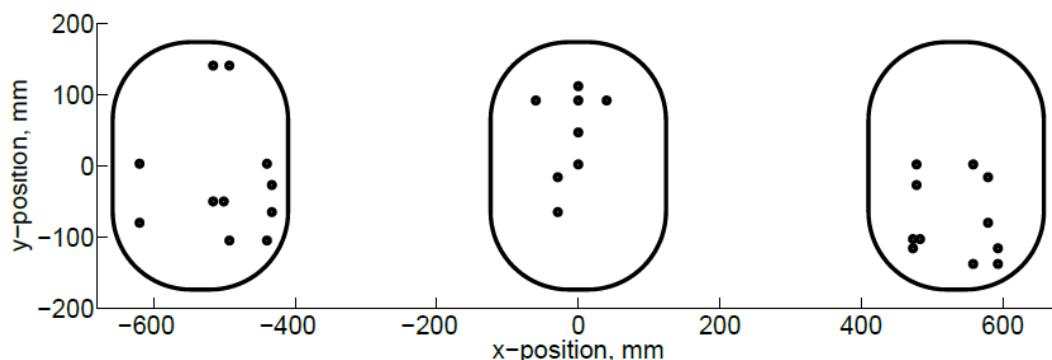


Abbildung A2.2: Skizze der Fensterattrappen mit Kulite-Positionen auf der Steuerbordseite des Flugzeugs; Ansicht von innen [60]

Absichtlich leer

## Anhang B – Darstellungen der Intensitätskiste

- Innenmaß: 25x40 cm, ausgekleidet mit 40 mm dickem Basotect
- Innenmaß (für den vorderen Bereich): 30x46 cm, ausgekleidet mit 20 mm Basotect
- Innentiefe: 37 cm
- Außenmaß: 50x35 cm, verkleidet mit halbzölligem Filz

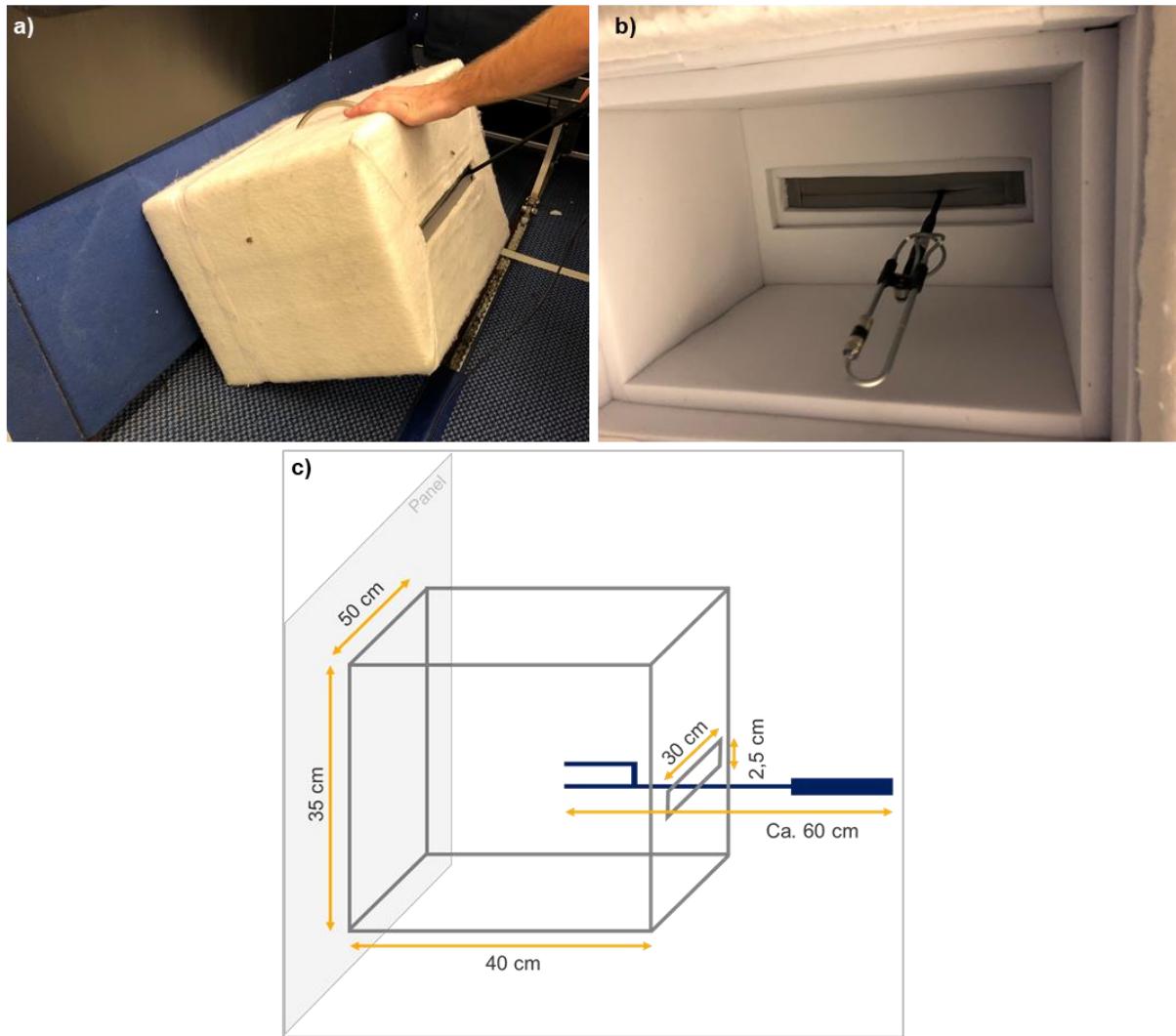


Abbildung C.1: Darstellung der Intensitätskiste in a) Außenansicht, b) Innenansicht und c) schematisch mit Außenmaßen

## Anhang C – Ergänzende Messungen und Auswertungen

### Anhang C1 – Anregung in der Akustikklimakammer im HCAT

Im Rahmen der Messungen im HCAT wird ebenfalls die Anregung in der Akustikklimakammer in Bezug auf die Homogenität der Schallverteilung untersucht. Eine homogene Schallverteilung ist Voraussetzung für die Beurteilung von Schallbeiträgen unterschiedlicher Panels in der Kabine des Flugzeuggrumpfes. Für die Untersuchung wird der Schalldruckpegel in verschiedenen Höhen im relevanten Messbereich (Span 4 des Demonstrators, vgl. Abbildung 20), auf der Lautsprecher entfernten Seite des Flugzeuggrumpfes und an verschiedenen Positionen in der Kabine gemessen. Das Mikrofon wird bei der Messung der Anregung circa 10 cm vom Flugzeuggrumpf entfernt gehalten. Folgende Abbildung zeigt die gemessenen Schalldruckpegel.

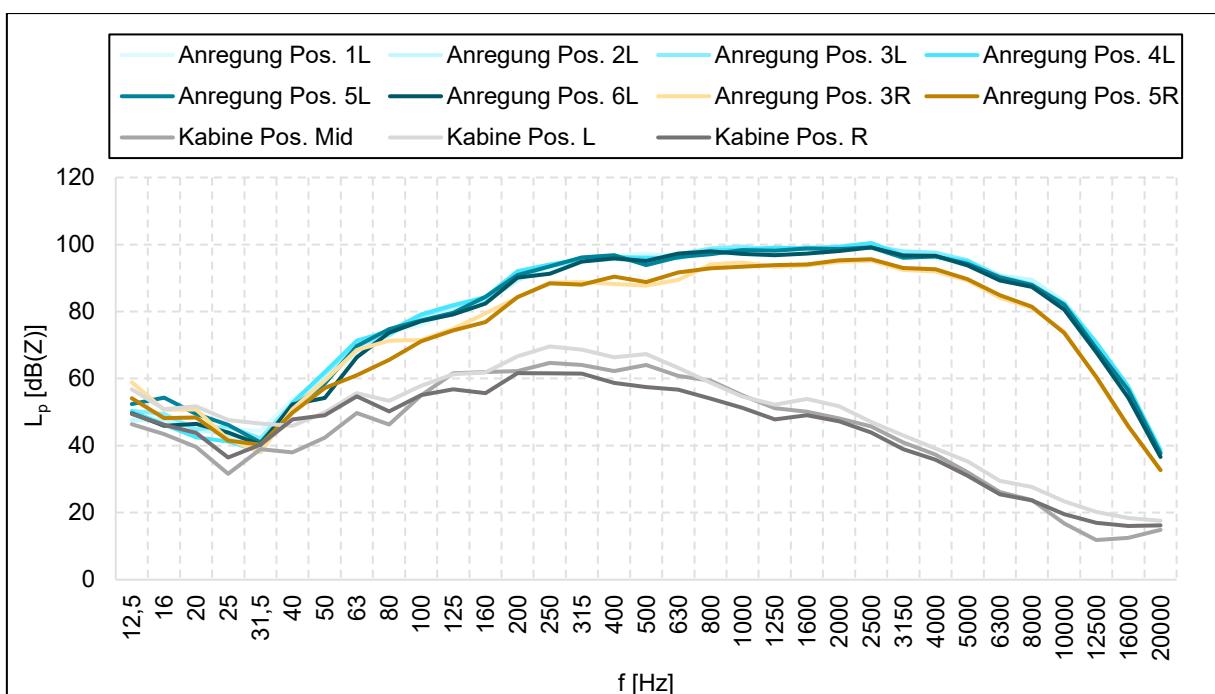


Abbildung C1.1: Gemessener Schalldruckpegel der gemessenen Positionen

In der Abbildung sind die Schalldruckpegel auf der Seite der Lautsprecher und der Lautsprecher entfernten Seite des Flugzeuggrumpfes sowie in der Kabine deutlich zu unterscheiden. Die Anregungs-Positionen Links weisen über das gesamte Frequenzspektrum sehr ähnliche Pegel auf. Der größte Wert für die sechs Positionen liegt bei 109,23 dB(A) und der geringste Wert bei 108,16 dB(A). Die Pegel auf der Lautsprecher entfernten Seite fallen dagegen um circa 4 dB(A) auf 104,27 dB(A) ab (Mittelwert der zwei Messpositionen). Die unterschiedlichen Pegel in der Akustikklimakammer auf der linken und rechten Seite resultieren ebenfalls aus einem geringeren Pegel in der Kabine. Folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang.

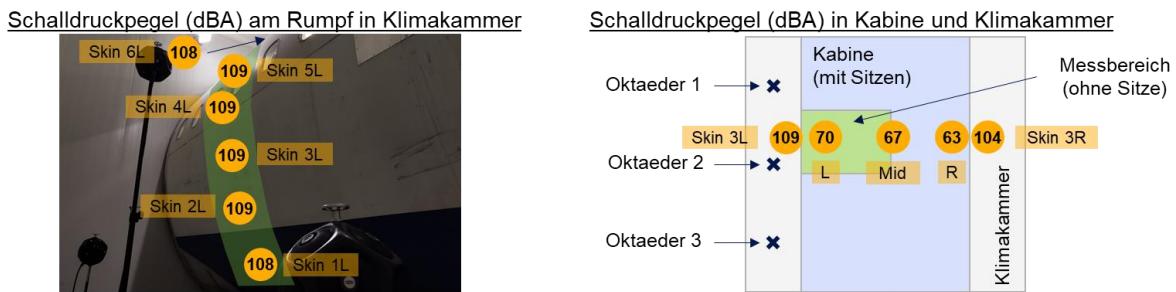


Abbildung C1.2: Übersicht Schalldruckpegel in Akustikklimakammer und Kabine mit Positionsangabe

Auf der linken Seite in der Kabine, nahe den Lautsprechern, beträgt der Pegel circa. 70 dB(A) und fällt ab, je weiter man sich in der Kabine auf die rechte Seite begibt. In der Mitte beträgt der Pegel etwa 67 dB(A) und auf der rechten Seite 63 dB(A). Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Messbereich (linke Seite) die Sitze ausgebaut wurden und somit lokal die Absorption geringer ist als auf der rechten Seite. Der Schalldruckpegel direkt über dem Rumpf an der höchsten Stelle konnte nicht gemessen werden. Da die Pegel auf der Anregungsseite nahezu gleich sind, kann von einer homogenen Schallverteilung im Messbereich ausgegangen werden.

## Anhang C2 – Nachhallzeit im HCAT

Die Nachhallzeit  $T$  gibt die Zeit an, die nach dem Abschalten der Schallquelle vergeht, bis die Schallenergie auf den millionsten Teil des Anfangswertes abgeklungen ist und der Pegel somit um 60 dB abgefallen ist [34]. Dabei ist „die Pegelabnahme durch die lineare Regression mit kleinsten quadratischen Abweichungen von der gemessenen Abklingkurve zwischen den Pegelwerten 5 dB und 35 dB unter dem Anfangspegel gegeben“ [61]. Somit kann für  $T$  auch ein kleinerer Dynamik-Bereich des Abklingverhaltens von 5 dB bis 35 dB ( $T_{30}$ ) oder von 5 dB bis 25 dB ( $T_{20}$ ) verwendet werden [61].

Die Nachhallzeit wird durch zwei Einflussfaktoren bestimmt: die Gesamtabsorption  $\bar{A}_{ges}$  im betrachteten Raum sowie dem Raumvolumen  $V$ . Eine höhere Gesamtabsorption reduziert die Nachhallzeit, da weniger Reflexionen an den Wänden auftreten. Ein größeres Raumvolumen erhöht die Nachhallzeit, da die Schallwege im Mittel größer sind und die Reflexionen somit nicht so schnell aufeinander folgen.

Entsprechend der Formel (3.13) kann aus der gemessenen Nachhallzeit die Gesamtabsorption bestimmt werden. Die aus der Nachhallzeit berechnete Gesamtabsorption ist des Weiteren genauer als die aus den einzelnen Flächen und Absorptionsgraden berechnete Gesamtabsorption. [43]

Die Messung der Nachhallzeit im Airbus A320 des HCATs wird gemäß DIN EN ISO 3382 durchgeführt. Die Quelle muss eine kugelförmige Richtcharakteristik aufweisen und einen ausreichend hohen Schallpegel erzeugen, damit das Abklingverhalten um 30 dB oder 20 dB gemessen werden kann. Die Messpunkte im Raum müssen so gewählt werden, dass sie das Raumvolumen zweckentsprechend überdecken und ein Abstand von 2 m zwischen Quelle und

Mikrofon eingehalten werden kann. Die Nachhallzeit ist für zwei Quellpositionen im Raum zu bestimmen. [61]

Der Dodekaeder von LHT erfüllt die Anforderungen an die Quelle und weist mit 109 dB(A) einen ausreichend hohen Schalldruckpegel auf. Die Messpositionen und der Messaufbau sind der folgenden Abbildung zu entnehmen.

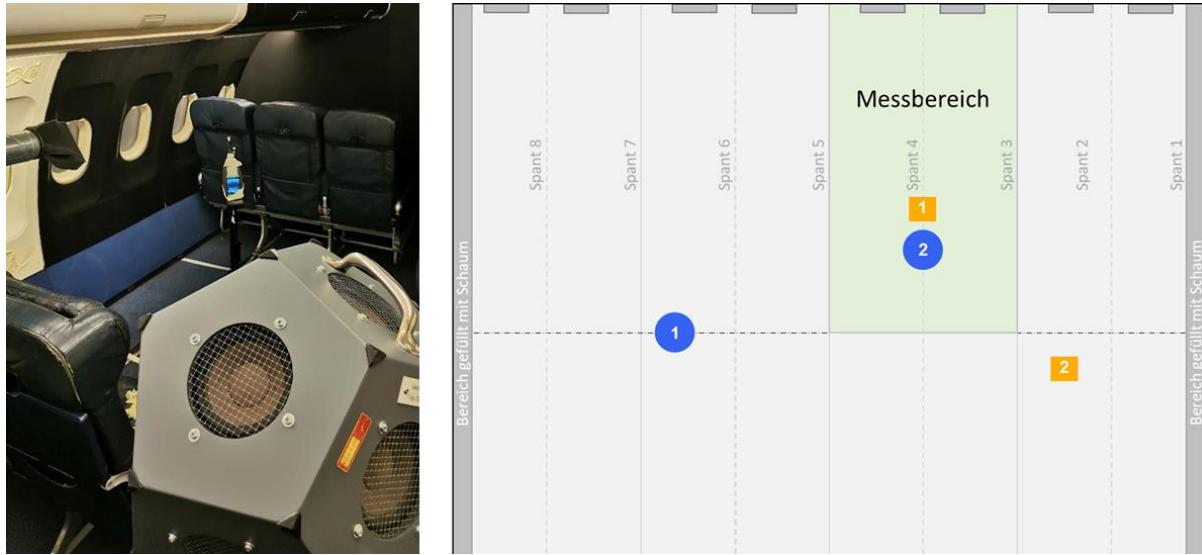
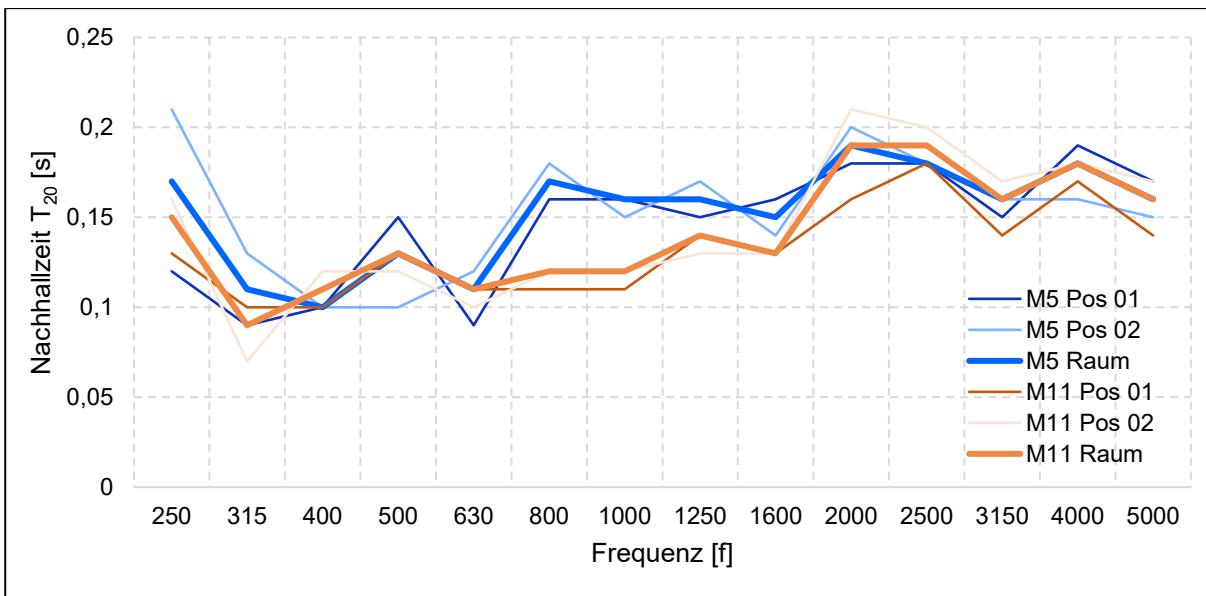
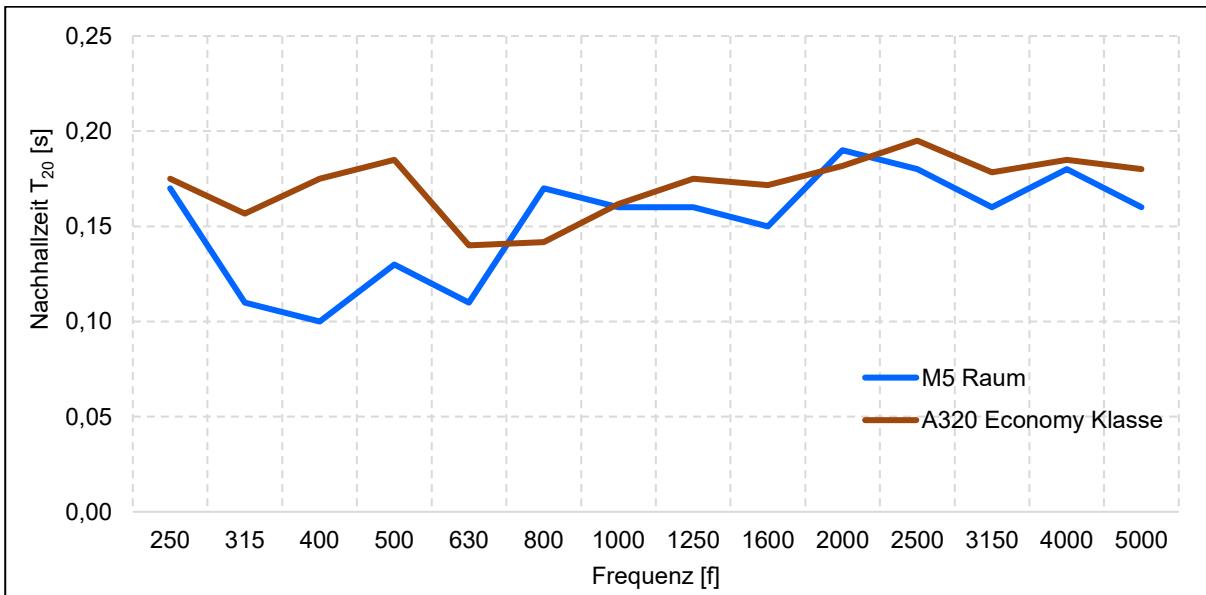


Abbildung C2.1: Messaufbau und Messpositionen Nachhallzeit-Messung

In der Abbildung stellen die blauen Punkte die Positionen des Dodekaeders und die gelben Rechtecke die Position des Mikrofons dar. Für jede Position der Quelle wird abweichend von der Norm lediglich eine Mikrofonposition gemessen. Aus den beiden Messungen wird auf die Frequenzbänder der Mittelwert gebildet und somit die Nachhallzeit für den Raum bestimmt. Die Nachhallzeit wurde für die Kabinenkonfiguration mit Lining (M5) und ohne Lining (M11) bestimmt. Des Weiteren ist bei den Messergebnissen zu berücksichtigen, dass im Demonstrator am Anfang (Spant 1) und am Ende (Spant 9) eine circa 10 cm dicke Schicht offenporiger Schaum verbaut ist (vgl. die dunkelgrauen Bereiche in Abbildung 20). Die Gesamtabsorption wird durch diesen Einbau deutlich erhöht und die Nachhallzeit sinkt. Die folgende Abbildung zeigt die Messergebnisse für die Frequenzen von 250 Hz bis 5000 Hz. Es wird die Nachhallzeit  $T_{20}$  gemessen.

Abbildung C2.2: Nachhallzeit  $T_{20}$  für M5 und M11

Die Nachhallzeit nimmt sowohl für M5 als auch für M11 für höhere Frequenzen zu. Es ist zu erkennen, dass M5 in einem Bereich von 800 Hz bis 1600 Hz eine höhere Nachhallzeit als M11 aufweist. Dies resultiert in einer höheren, über den angegebenen Frequenzbereich gemittelte Nachhallzeit von  $T_{20} = 0,15$  s für M5 und  $T_{20} = 0,14$  s für M11. Der Grund für die geringere Nachhallzeit von M11 ist, dass das Lining entfernt wurde und somit die dahinter verbaute Glaswolle im Vergleich zum Lining mehr Schall absorbiert. Somit wird weniger Schall reflektiert und die Nachhallzeit sinkt. Die Nachhallzeit gemessen im Demonstrator wird folgend mit der Nachhallzeit in einem tatsächlichen Flugzeug (Airbus A320) mit Standardkabine verglichen.

Abbildung C2.3: Nachhallzeit  $T_{20}$  für M5 und A320 in der Economy Klasse

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, werden bei M5 insgesamt kürzere Nachhallzeiten im Vergleich zum Airbus A320 in der Economy Klasse gemessen. Die über den angegebenen Frequenzbereich gemittelte Nachhallzeit liegt für den Airbus A320 bei  $T_{20} = 0,16$  s. Der Grund

für die geringfügig höhere Nachhallzeit könnte an dem im Demonstrator verbauten offenporigem Schaum am Anfang und Ende des Kabinenausschnitts und dem unterschiedlichen Raumvolumen liegen. Im tatsächlichen Flugzeug ist der Schaum nicht eingebaut.

## Anhang D – Ergänzende Verläufe gemessener Intensitätspegel in verschiedenen Messungen

### Anhang D1 – Gemessene Intensitätspegel für horizontale und vertikale Abtastung im FTZ Akustik an einem Messfenster

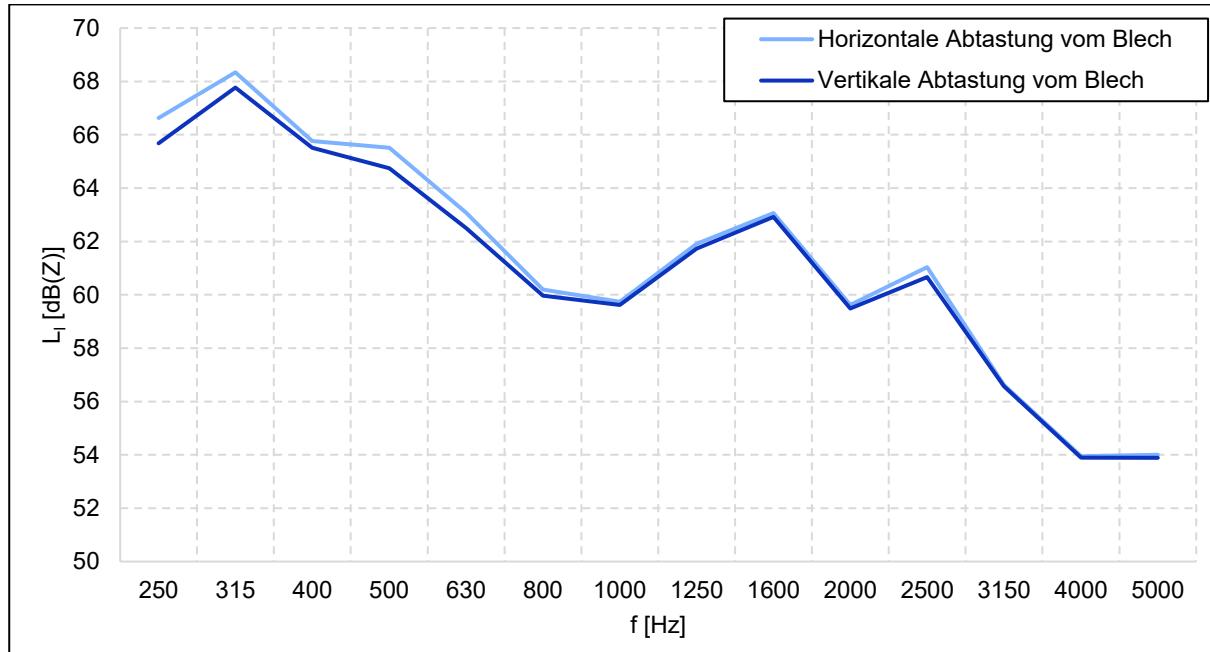


Abbildung D1.1: Gemessene Intensitätspegel für horizontale und vertikale Abtastung

### Anhang E2 – Gemessene Intensitätspegel verschiedener Segmente Testreihe M1 und M2 im HCAT

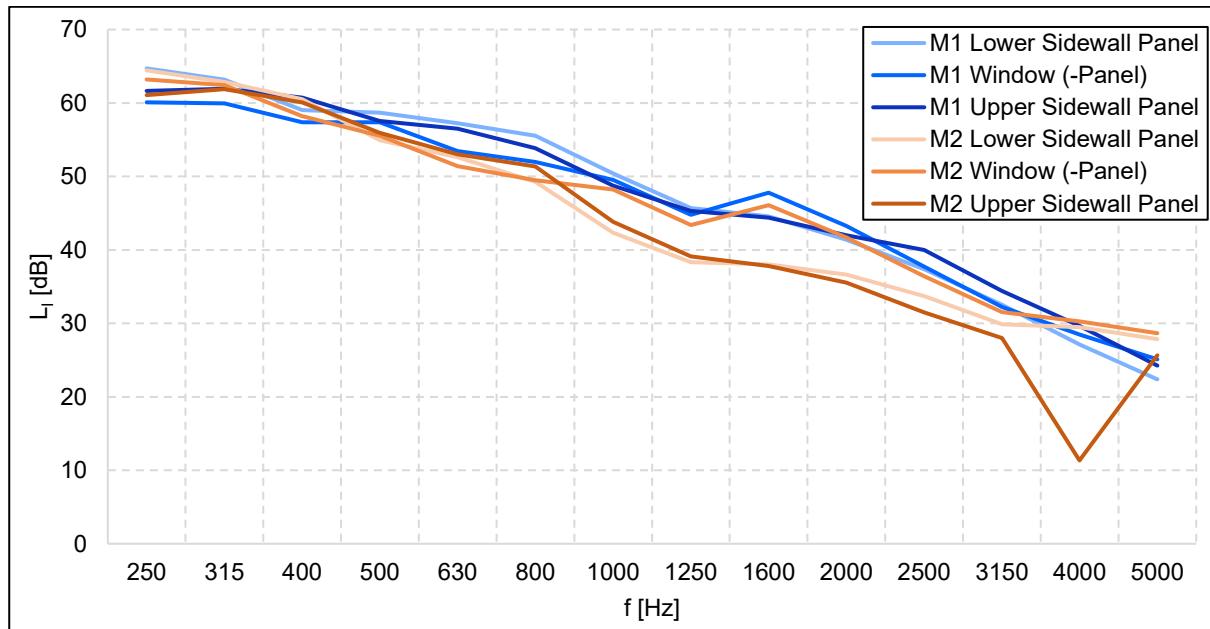


Abbildung D2.1: Gemessene Intensitätspegel Testreihe M1 und M2 für Panel 6-8

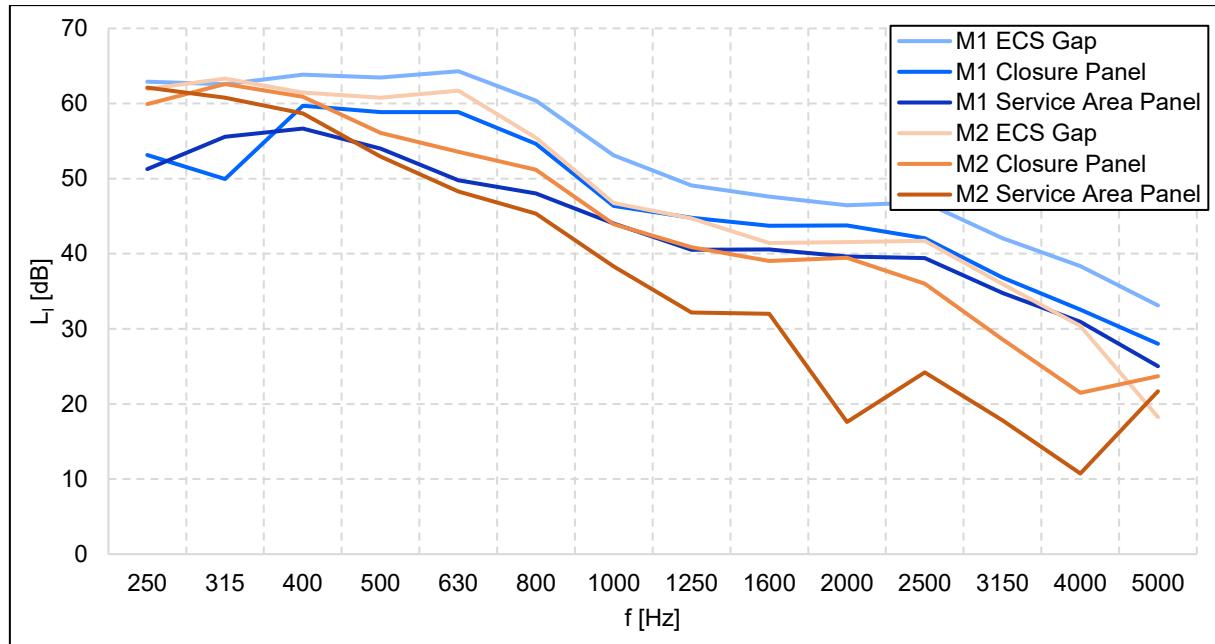


Abbildung D2.2: Gemessene Intensitätspegel Testreihe M1 und M2 für Panel 9-11

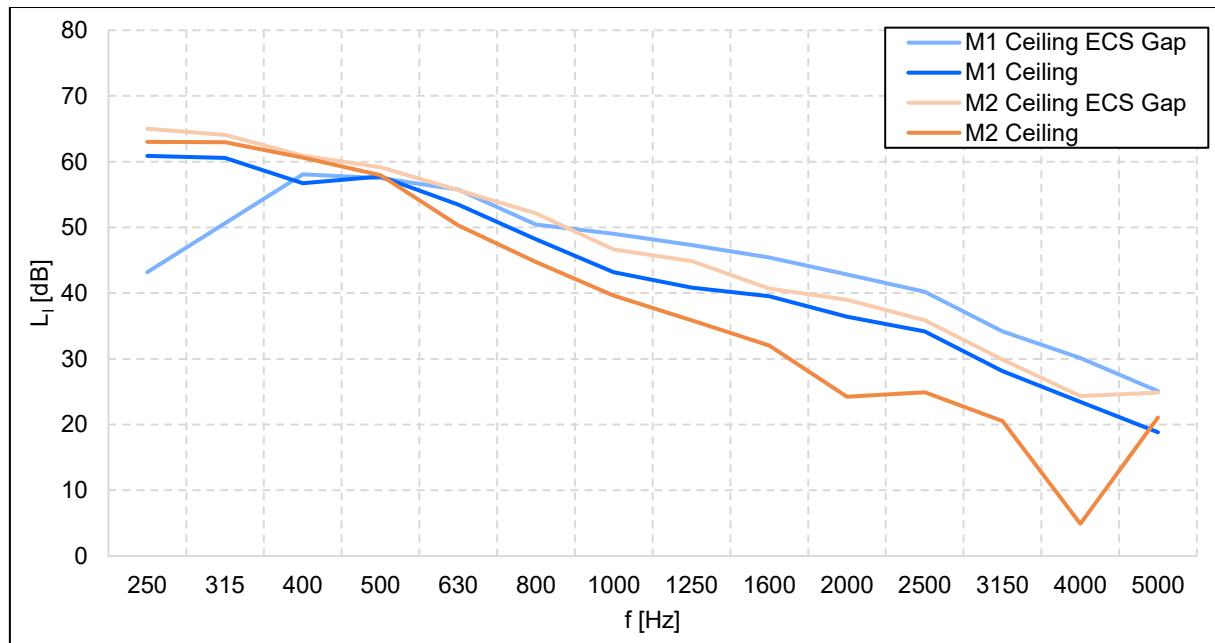


Abbildung D2.3: Gemessene Intensitätspegel Testreihe M1 und M2 für Panel 12 und 13

## Anhang E – Sinnbilder für Programmablaufpläne

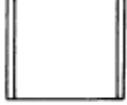
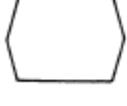
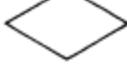
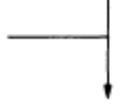
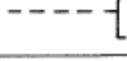
Sinnbild	Benennung	Erläuterungen zur Anwendung
	Eingabe, Ausgabe ( <i>input, output</i> )	Darstellung der Ein- oder Ausgabe durch externe Geräte. Die Beschriftung muß angeben, ob es sich um eine Ein- oder Ausgabe handelt.
	Operation, allgemein ( <i>process</i> )	Hiermit werden allgemeine Operationen dargestellt. Sie werden häufig zur Angabe arithmetischer Rechenoperationen verwendet (können aber auch logische Operationen beinhalten).
	Unterprogramm ( <i>predefined process</i> )	Darstellung eines in sich geschlossenen Programmteils. Die Beschriftung muß eine eindeutige Zuordnung des Unterprogramms erkennen lassen.
	Programm- Modifikation ( <i>preparation</i> )	Dient zur Vorbereitung von Operationen, z.B. der Änderung von Zählern.
	Verzweigung ( <i>decision</i> )	Der Programmablauf kann durch eine oder mehrere Bedingungen verändert werden. Dabei ergeben sich mindestens zwei Ausgänge (Bedingung erfüllt = Ja und Bedingung nicht erfüllt = Nein).
	Grenzstelle ( <i>terminal/ interrupt</i> )	Darstellung von Anfang, Ende oder Zwischenhalt. Die entsprechende Eintragung erfolgt in das Sinnbild.
	Übergangsstelle ( <i>connector</i> )	Der Übergang kann von mehreren Stellen aus, aber nur zu einer Eingangsstelle hin erfolgen. Zusammengehörige Übergangsstellen müssen gleiche Bezeichnungen tragen.
	Ablauflinien ( <i>flow lines</i> )	Angabe der Ablaufrichtung. Vorzugsrichtungen sind – von oben nach unten und – von links nach rechts. Zur Verdeutlichung können Pfeilspitzen eingetragen werden, besonders bei Abweichungen von den Vorzugsrichtungen.
	Zusammenführung ( <i>junction</i> )	Der Ausgang sollte immer mit einer Pfeilspitze gekennzeichnet werden. Zwei sich kreuzende Ablauflinien bedeuten keine Zusammenführung. Kreuzungen sollten aus Gründen der Übersichtlichkeit vermieden werden.
	Bemerkung ( <i>comment</i> )	Es kann an jedes Sinnbild angefügt werden. Dient zur Anbringung von Bemerkungen.

Abbildung E.1: Sinnbilder für Programmablaufpläne nach DIN 66001 [52]