



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Martin Knorr

Entwicklung, Implementierung und Validierung eines Umweltsimulationsregelkreises zur Nachbildung der Kabinenakustik von Verkehrsflugzeugen

Martin Knorr

**Entwicklung, Implementierung und
Validierung eines
Umweltsimulationsregelkreises zur
Nachbildung der Kabinenakustik von
Verkehrsflugzeugen**

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

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

Abgabedatum: 02.11.2024

Zusammenfassung

Martin Knorr

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung, Implementierung und Validierung eines Umweltsimulationsregelkreises zur Nachbildung der Kabinenakustik von Verkehrsflugzeugen

Stichworte

Akustik, Umweltsimulationsregelkreis, Flugzeug, Entwicklung, Experimentelle Validierung

Kurzzusammenfassung

Diese Masterarbeit entwickelt, implementiert und validiert einen adaptiven, akustischen Feedback-Regelkreis zur realitätsnahen Nachbildung der Kabinenakustik von Verkehrsflugzeugen im Labor. Aktuelle Bodentests nutzen oft einfache Rauschanregungen, die die komplexen akustischen Bedingungen realer Flüge nicht adäquat simulieren. Der entwickelte Regelkreis basiert auf realen Flugmessdaten und ermöglicht eine präzisere Reproduktion des Schallfelds, was zu realitätsnäheren Untersuchungen von Lärminderungsmaßnahmen führt. Dadurch wird ein Beitrag zur Verbesserung des Passagierkomforts, der Sicherheit und zur Entwicklung effizienterer, umweltfreundlicher Technologien in der Luftfahrt geleistet.

Martin Knorr

Title of the paper

Development, Implementation, and Validation of an Environmental Simulation Control Loop for Reproducing the Cabin Acoustics of Commercial Aircraft

Keywords

Acoustics, Environmental Simulation Control Loop, Aircraft, Development, Experimental Validation

Abstract

This master's thesis develops, implements, and validates an adaptive acoustic feedback control loop for realistically reproducing the cabin acoustics of commercial aircraft in a laboratory setting. Current ground tests often use simple noise excitations that do not adequately simulate the complex acoustic conditions of real flights. The developed control loop is based on real flight measurement data and enables a more precise reproduction of the sound field, leading to more realistic investigations of noise reduction measures. This contributes to the improvement of passenger comfort and safety, as well as to the development of more efficient and environmentally friendly technologies in aviation.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abbildungsverzeichnis | III |
| Tabellenverzeichnis | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Stand der Technik | 2 |
| 2.1 Grundlagen der Akustik | 2 |
| 2.2 Akustik im Flugzeug | 15 |
| 2.2.1 Comfort & Entwicklung des Kabinenlärms in Verkehrsflugzeugen | 15 |
| 2.2.2 Geräuschquellen | 18 |
| 2.2.3 Aufbau Lärminderungsmaßnahmen | 22 |
| 2.2.4 Notwendigkeit der Entwicklung eines Umweltsimulationsregelkreises | 28 |
| 2.3 Grundlagen der akustischen Umweltsimulation | 30 |
| 2.3.1 Sound Field Reproduction: | 30 |
| 2.3.2 Time Waveform Reproduction (TWR): | 41 |
| 2.3.3 SISO & und MIMO Vibrationsmethoden Random Vibration control | 49 |
| 3 Material und Methoden | 60 |
| 3.1 Entwicklung des Umweltsimulationsregelkreises nach VDI 2206 | 60 |
| 3.2 Anforderungserhebung gemäß VDI 2206 | 62 |
| 3.3 Systemarchitektur & Implementierung | 67 |
| 3.3.1 Implementierungsansätze von Regelarchitekturen | 67 |
| 3.3.2 Gesamtstruktur des akustischen Umweltsimulationsregelkreises | 70 |
| 3.3.3 Ablauf und Prozessschritte einer Iteration im Regelkreis | 71 |
| 3.3.4 Funktionale Analyse und Integration der Subsysteme im Umweltsimulationsregelkreis | 73 |
| 3.4 Integration und Verifikation | 85 |
| 3.4.1 Physische Implementierung des Systems in Bezug auf Hardware und Software | 85 |
| 3.4.2 Versuchsaufbau HCAT | 86 |
| 3.4.3 Vorversuche Schalldruckpegelverteilung | 89 |
| 3.4.4 Hauptuntersuchung - Vorversuche und Optimierung des Regelkreises | 96 |
| 3.4.5 Versuchsdurchführung Hauptuntersuchung | 97 |
| 4 Ergebnisse | 101 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5 | Diskussion..... | 110 |
| 5.1 | Limitationen | 110 |
| 5.1.1 | Ursachen der Limitationen | 110 |
| 5.1.2 | Auswirkungen der Limitationen auf die Ergebnisse..... | 112 |
| 5.1.3 | Erklärung der Ergebnisse | 112 |
| 5.1.4 | Überwindung der Limitationen..... | 113 |
| 5.1.5 | Ausblick für zukünftige Arbeiten | 114 |
| 5.2 | Validierung des Systems nach VDI 2206 | 114 |
| 6 | Zusammenfassung und Fazit | 117 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 119 |
| | Anhang | 125 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Longitudinalwelle in Luft | 4 |
| Abbildung 2: Hörfläche des Menschen, Schallwahrnehmung..... | 7 |
| Abbildung 3: Schallenergiebilanz an einer Wand..... | 9 |
| Abbildung 4: Dämmungsverlauf einer Einschaligen Wand | 12 |
| Abbildung 5: Schalldämmmaßverlauf Doppelschale, Ersatzsystem | 13 |
| Abbildung 6: Entwicklung des Kabinenlärms in Passagierflugzeugen | 16 |
| Abbildung 7: Geräusch- und Vibrationsquellen in die Flugzeugkabine | 19 |
| Abbildung 8: Schalldruckpegel während unterschiedlicher Flugphasen | 20 |
| Abbildung 9: Lärminderungsmaßnahmen | 23 |
| Abbildung 10: Flugzeugkabinenwandaufbau, schematische Seitenansicht | 25 |
| Abbildung 11: Schematische Darstellung Übertragungsgrad | 27 |
| Abbildung 12: Prinzipskzze Sound Field Reproduction | 32 |
| Abbildung 13: Ablaufdiagramm Sound Field Reproduction..... | 34 |
| Abbildung 14: TWR-Iterativer Regelalgorithmus | 42 |
| Abbildung 15: Mock-Up Test Rig, iNGS | 47 |
| Abbildung 16: Random-control Algorithmus..... | 51 |
| Abbildung 17: Block Diagram MIMO random vibration control | 53 |
| Abbildung 18: V-Modell | 60 |
| Abbildung 19: Blockdiagramm des entwickelten Regelkreises..... | 71 |
| Abbildung 20: Buffer Funktionsweise..... | 75 |
| Abbildung 21: Vergleich ASIO & directSound driver..... | 79 |
| Abbildung 22: Skizze des Versuchsaufbaus & Signalflüsse | 87 |
| Abbildung 23: Versuchsaufbau HCAT | 88 |
| Abbildung 24: Versuchsskizze Messpositionen..... | 90 |
| Abbildung 25: Messergebnisse Rückseite in Terzbandschritten | 93 |
| Abbildung 26: Messergebnisse Vorderseite in Terzbandschritten | 94 |
| Abbildung 27: Vergleich Messergebnisse Vorder- & Rückseite | 95 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 28: Turbosound Clipping & Limiting..... | 96 |
| Abbildung 29: Audio interface Preamp Einstellungen | 98 |
| Abbildung 30: Ergebnisse Iteration1 & Iteration 2..... | 102 |
| Abbildung 31: Ergebnisse Iteration1 & Iteration 2 | 103 |
| Abbildung 32: Ergebnisse Iteration1 & Iteration 2..... | 103 |
| Abbildung 33: Ergebnisse Iteration 4, Iteration 2, Iteration 10 | 104 |
| Abbildung 34: Ergebnisse Terzband Iteration 1 | 105 |
| Abbildung 35: Ergebnisse Terzband Iteration 2 | 106 |
| Abbildung 36: Ergebnisse Terzband Iteration 10 | 107 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 1: Akustische Feldgrößen | 4 |
| Tabelle 2: Ergebnistabelle Terzband Messreihe 4..... | 109 |

1 Einleitung

Die kontinuierliche Verbesserung der Sicherheit und des Passagierkomforts bei gleichzeitiger Sicherstellung ökologischer und ökonomischer Effizienz stellt in der heutigen Luftfahrtindustrie eine wesentliche Herausforderung dar. Ein zentrales Element dieses Bestrebens ist die akustische Optimierung von Flugzeugkabinen. Ein angemessenes Innenlärmniveau ist entscheidend für das Komfortempfinden der Passagiere und der Besatzung sowie für deren Kommunikationsmöglichkeiten. Aktuelle Lärminderungsmaßnahmen resultieren jedoch häufig in einer signifikanten Massenzunahme, was den Treibstoffverbrauch erhöht und somit die Effizienz des Flugzeugs mindert. Diese Maßnahmen können zu einem Mehrgewicht von mehreren Tonnen pro Flugzeug führen und offenbaren ein erhebliches Potenzial für Effizienzsteigerungen und CO₂-Reduktion.

In der Anfangsphase der Entwicklung neuer Lärminderungsmaßnahmen sind In-Flight-Testkampagnen aufgrund ihrer hohen Kosten und Komplexität oft nicht durchführbar. Als Alternative dienen Bodentests, bei denen das während des Fluges auftretende Schallfeld durch die Platzierung von Lautsprecherarrays um den Flugzeugrumpf simuliert wird. Durch die Reproduktion verschiedener Flugzustände sowie Kabinen- und Flugzeugkonfigurationen kann die Wirksamkeit von Schallminderungsmaßnahmen gezielt unter Laborbedingungen untersucht werden. Allerdings werden bei diesen Bodentests in der Regel nur einfache, breitbandige Rauschanregungen eingesetzt. Diese Methode stößt an ihre Grenzen, da sie die spezifischen akustischen Charakteristika, die während eines realen Fluges auftreten, nicht adäquat nachbilden kann. Dies führt zu einer weniger präzisen Evaluierung der entwickelten Lärminderungsmaßnahmen [1]

Vor diesem Hintergrund besteht die Notwendigkeit, einen Umweltsimulationsregelkreis zu entwickeln, der es ermöglicht, das Anregungssignal für verschiedene Untersuchungen so zu gestalten, dass es den echten Flugzuständen gleicht und dem realen Schalleintrag entspricht. Dies ist essenziell, um realitätsnähere und präzisere Ergebnisse zu erzielen und fundierte Aussagen über den Einfluss von Lärm auf den Komfort sowie die Wirksamkeit von Lärminderungsmaßnahmen treffen zu können. Die vorliegende Masterarbeit widmet sich der Entwicklung, Implementierung und Validierung eines adaptiven, akustischen Feedback-Controllers. Dieses Regelungskonzept wird verwendet, um ein aus realen Flugversuchen abgeleitetes Schalldruckprofil präzise in Laborumgebungen zu reproduzieren und somit eine kontrollierbare akustische Umgebung im Labor zu schaffen. Dadurch leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Forschung und Entwicklung in der Luftfahrtakustik sowie zur Weiterentwicklung umweltfreundlicher und komfortsteigernder Technologien in der Luftfahrtindustrie.

2 Stand der Technik

Zu Beginn jedes Kapitels ist eine Übersicht über dessen Inhalt sinnvoll. Am Ende eines Kapitels kann eine Überleitung zum nachfolgenden Kapitel helfen, den Argumentationsfluss bzw. den roten Faden aufzuzeigen.

2.1 Grundlagen der Akustik

Schall, im physikalischen Sinne, bezeichnet mechanische Schwingungen, die in einem elastischen Medium auftreten und sich als Wellen durch Gase, Flüssigkeiten oder feste Körper ausbreiten. Diese Schwingungen erfordern die Präsenz von Materie, sodass sich Schall im Vakuum nicht ausbreiten kann. Schall lässt sich nach dem Medium, in dem er sich ausbreitet, klassifizieren, wobei Luftschall, Flüssigkeitsschall und Körperschall unterschieden werden. Ein Raum, der mit Materie gefüllt ist und in dem sich Schallwellen ausbreiten, wird als Schallfeld bezeichnet. [2][3]

Die Entstehung von Schall ist eng mit Druck- und Dichteschwankungen im Medium verbunden, welche von Menschen als Schallereignisse wahrgenommen werden können [3]. Diese Schallereignisse sind vielfältig und reichen von einfachen Tönen, die durch harmonische Schwingungen einer einzelnen Frequenz entstehen, bis hin zu komplexeren Schallphänomenen wie Geräuschen, die keine klar definierte Tonhöhe oder Klangfarbe aufweisen. [2]

Die Ausbreitung von Schallwellen in der Luft erfolgt ausschließlich als Longitudinalwellen, da Gase und Flüssigkeiten keine Schubspannungen übertragen können [3][4]. Dabei werden Schallwellen durch die Impulsübertragung zwischen benachbarten Teilchen weitergeleitet, was einen mechanischen Energietransport, jedoch keinen Massetransport zur Folge hat. [2][3]

Eine anschauliche Darstellung der Ausbreitung einer Longitudinalwelle in Luft ist in der folgenden Abbildung 1 zu sehen. Die Abbildung zeigt schematisch, wie sich Verdichtungen und Verdünnungen der Luftteilchen entlang der Ausbreitungsrichtung der Welle abwechseln. Dabei wird deutlich, dass die Schwingung der Luftteilchen parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle erfolgt. Diese Schwingung bewegt sich mit einer Schallschnelle v , während sich die Welle selbst mit der Schallgeschwindigkeit c ausbreitet. Dadurch wird der Schall in der Luft übertragen.

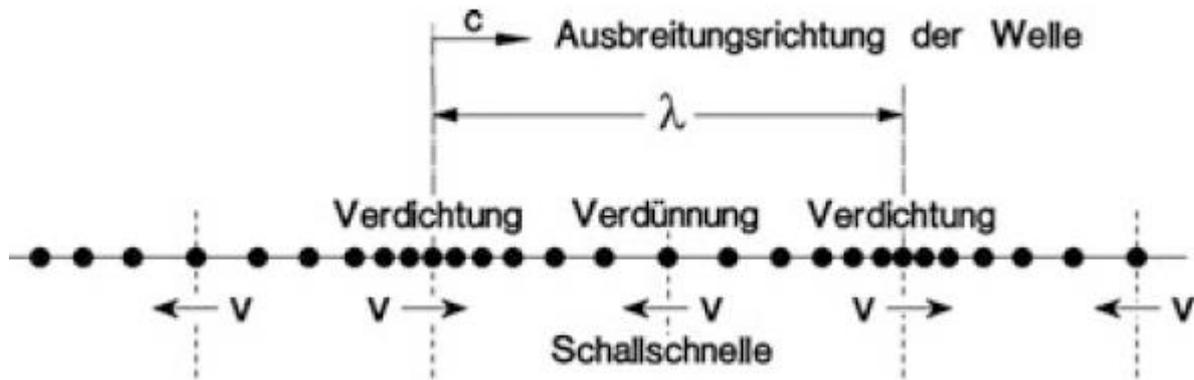


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Longitudinalwelle in Luft [3]

Die Klangfarbe eines Schallereignisses wird durch die Frequenzzusammensetzung und das Amplitudenverhältnis der Teiltöne bestimmt [2][3]. Mithilfe der Fourier-Analyse kann die Frequenzzusammensetzung eines Schallsignals ermittelt werden. [3]

Begrifflichkeiten

In der Akustik ist es von grundlegender Bedeutung, ein Luftschallfeld präzise zu charakterisieren. Ein Luftschallfeld wird typischerweise durch zwei wesentliche Größen beschrieben, die sowohl orts- als auch zeitabhängig sind: der Schalldruck $p(x, t)$ und die Schallschnelle $v(x, t)$. Der Schalldruck, der als skalare Größe fungiert, repräsentiert die Schwankungen des Luftdrucks, die durch Schwingungen einer Schallquelle in der umgebenden Luft hervorgerufen werden. Diese Schwingungen werden aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Luft, insbesondere ihrer Kompressibilität und Masse, weitergeleitet und erreichen schließlich das menschliche Ohr. Daher spielt der Schalldruck als wichtigste akustische Feldgröße eine zentrale Rolle und variiert sowohl mit dem Ort als auch mit der Zeit [5]. Der Schalldruck, auch als Schallwechseldruck bekannt, ist eng mit dem statischen Luftdruck p_0 verknüpft. Er überlagert diesen und beschreibt die dynamischen Druckschwankungen, die in einem akustischen Feld auftreten. In kartesischen Koordinaten kann der Schalldruck als Funktion von Ort und Zeit dargestellt werden $p(x, y, z, t)$. Die Messung des Schalldrucks erfolgt in Pascal [Pa], wobei 1 Pa gleich 1 Newton pro Quadratmeter entspricht [2]. Der statische Luftdruck beträgt etwa 10^5 Pa, während der Schalldruck in der Akustik in einem weiten Bereich variieren kann: von etwa 2×10^{-5} Pa, der Schwelle des Hörens bei einer Frequenz von 1000 Hz, bis zu 200 Pa, was der Schmerzschwelle des menschlichen Gehörs entspricht [4]. Diese Druckschwankungen sind im Vergleich zum statischen Luftdruck relativ gering, was bedeutet, dass der Schalldruck oft als vernachlässigbar klein angesehen wird. Dennoch ist er von entscheidender Bedeutung für die Wahrnehmung von Schallereignissen, da er die Grundlage für die Schallübertragung in der Luft bildet. Die Variabilität

des Schalldrucks ermöglicht es, unterschiedliche Schallereignisse zu unterscheiden und sie präzise zu charakterisieren [2].

Die Schallschnelle, eine vektorielle Größe, beschreibt die Geschwindigkeit, mit der die Teilchen eines Mediums um ihre Ruhelage schwingen. Im Gegensatz zum Schalldruck, der nur die Stärke der Druckschwankungen angibt, erfasst die Schallschnelle sowohl den Betrag der Geschwindigkeit als auch die Richtung der Bewegung der Teilchen [4]. Diese Schallschnelle tritt innerhalb einer Schallwelle auf und variiert sowohl mit dem Ort als auch mit der Zeit, was sie zu einer entscheidenden Größe bei der Charakterisierung der Schallausbreitung macht [6]. Es ist wichtig, die Schallschnelle nicht mit der Schallgeschwindigkeit zu verwechseln, die die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle selbst beschreibt. Die Schallschnelle bezieht sich ausschließlich auf die Wechselgeschwindigkeit oder Teilchengeschwindigkeit der Mediumsteilchen und wird in Metern pro Sekunde gemessen [2]. Diese Unterscheidung ist wesentlich, um die physikalischen Prozesse, die zur Wahrnehmung von Schall führen, korrekt zu verstehen. Die Wahrnehmung von Schallereignissen erfordert eine physikalische Wirkungskette, die mit der Schallquelle beginnt, durch das Übertragungsmedium fortgesetzt wird und schließlich im Ohr des Hörers endet [7]. In der nachfolgenden Tabelle 1, werden die grundlegenden Feldgrößen der Akustik dargestellt, einschließlich ihrer verwendeten Symbole, Einheiten und typischen Größenordnungen, insbesondere für Schalldruck und Schallschnelle.

| Größe | Übliches Symbol | Einheit | Größenordnungen (in Luft) der Schwankungen um Ruhelage |
|----------------|-----------------|-----------------------|--|
| Schalldruck | p | Pa = N/m ² | 0 – 20 µPa bis 20 Pa |
| Schallschnelle | v | m/s | 0 – 50 nm/s bis 50 mm/s |

Tabelle 1: Akustische Feldgrößen [6]

In der Akustik sind die Konzepte der Schallintensität und Schalleistung von zentraler Bedeutung, da sie die energetischen Eigenschaften eines Schallfeldes beschreiben. Die Schallintensität I wird als das Produkt aus Schalldruck p und Schallschnelle v definiert und beschreibt die pro Flächeneinheit hindurchtretende Schalleistung. Die Schallintensität stellt somit die über eine Fläche transportierte Energie dar und wird in Watt pro Quadratmeter [W/m²] gemessen. [2] [4] [8]

$$I(t) = p(t) \cdot v(t) \quad (2.1)$$

Die Schallintensität ist eine vektorielle Größe, die in Richtung der Schallschnelle zeigt. Da die Intensität orts- und zeitabhängig ist, wird in der Praxis oft der zeitlich gemittelte Intensitätswert verwendet. Dieser Mittelwert \bar{I} lässt sich durch Integration der momentanen Intensität über eine bestimmte Zeitperiode T berechnen. [2] [8]

Die Schallleistung P hingegen beschreibt die gesamte von einer Schallquelle abgestrahlte Energie pro Zeiteinheit und wird in Watt [W] angegeben. Um die Schallleistung zu berechnen, integriert man die Schallintensität über eine Hüllfläche A , die die Schallquelle vollständig umgibt. Diese Integration berücksichtigt die durch die Fläche hindurchtretende Energie und führt zur Bestimmung der abgestrahlten Schallleistung P [4][5]. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schallintensität die lokale Verteilung der Schallenergie im Schallfeld beschreibt, während die Schallleistung die gesamte abgestrahlte Energie einer Schallquelle erfasst. Beide Größen sind eng miteinander verbunden und bilden die Grundlage für die energetische Analyse akustischer Felder.

Pegeln & Hörfläche

In der Akustik werden verschiedene Pegelgrößen verwendet, um die Intensität von Schallwellen zu quantifizieren und vergleichbar zu machen. Zu den wichtigsten gehören der Schalldruckpegel, der Schallschnellepegel und der Schallintensitätspegel, die alle in der logarithmischen Einheit Dezibel [dB] angegeben werden. Der Schalldruckpegel, der am häufigsten zur Beschreibung von Schallwellen verwendet wird, ist als der 20-fache Logarithmus des Verhältnisses des Effektivwertes des Schalldrucks zu einem festgelegten Bezugswert definiert. Dieser Bezugsschalldruck beträgt 20 Mikropascal [μPa], was der zuvor erwähnten menschlichen Hörschwelle bei einer Frequenz von 1000 Hz entspricht. [2][4]. Die Wahl des Dezibels als Maßeinheit für den Schalldruckpegel ist besonders sinnvoll, da das menschliche Gehör Schall in logarithmischer Weise wahrnimmt. Diese logarithmische Wahrnehmung basiert auf dem Weber-Fechner-Gesetz, das den Zusammenhang zwischen einem physikalischen Reiz und der empfundenen Lautstärke beschreibt. Laut diesem Gesetz nimmt die Empfindung proportional zum Logarithmus des physikalischen Reizes zu. Dies bedeutet, dass bei einer Verdopplung des Schalldrucks die wahrgenommene Lautstärke nur um einen bestimmten Faktor ansteigt. Diese Eigenschaft erklärt, warum die subjektive Wahrnehmung von Lautstärkeänderungen nicht linear, sondern logarithmisch erfolgt. [3][5] Das menschliche Hörvermögen erstreckt sich über einen breiten Bereich von Frequenzen und Schalldruckpegeln, innerhalb dessen Schall wahrgenommen wird. Die Hörfläche beschreibt diesen Bereich, der durch die obere und untere Grenze der Schallwahrnehmung definiert ist. Die obere Frequenzgrenze, die das menschliche Ohr wahrnehmen kann, liegt bei etwa 20.000 Hz, wobei diese Grenze mit zunehmendem Alter abnimmt und sich auf etwa 10.000 Hz halbieren kann. Die untere Frequenzgrenze liegt bei etwa 16 bis 20 Hz. Frequenzen unterhalb dieser Grenze werden in der Regel nicht mehr als Schallereignis, sondern als mechanische Erschütterungen wahrgenommen. Der hörbare Frequenzbereich ist somit nach unten durch den Infraschall und nach oben durch den Ultraschall begrenzt.

Neben den Frequenzgrenzen ist auch die Wahrnehmung von Schalldruckpegeln für das menschliche Gehör entscheidend. Die obere Grenze des Schalldrucks, die das menschliche Ohr ohne Schmerz empfinden kann, liegt bei etwa 100 N/m^2 , was einem Schalldruckpegel von 134 dB entspricht. Diese Grenze stellt die sogenannte Schmerzschwelle dar, deren Überschreitung zu einer unerträglichen Belastung führt. [8]

Durch die logarithmische Skalierung können Lautstärkeänderungen, die über mehrere Größenordnungen variieren, auf eine kompakte und übersichtliche Weise dargestellt werden. Dies erleichtert nicht nur die Wahrnehmung von Lautstärkeunterschieden, sondern auch die Arbeit mit akustischen Daten in der Forschung und Praxis erheblich [5][8]. Die logarithmische Darstellung der Schallgrößen ermöglicht zudem den Umgang mit den großen Spannweiten der Messwerte, die in der akustischen Messtechnik häufig auftreten. Diese Methode ist besonders nützlich, da sie es erlaubt, sowohl extrem kleine als auch sehr große Schallpegel auf einer einheitlichen Skala abzubilden [2][4]. Zusätzlich wird durch die logarithmische Darstellung eine bessere Übereinstimmung zwischen der physikalischen Realität und der menschlichen Wahrnehmung erreicht. Je stärker die Empfindung bereits ist, desto größer muss der Reizzuwachs sein, um eine weitere Steigerung der wahrgenommenen Lautstärke zu erzielen. Dieses Prinzip verdeutlicht, warum die logarithmische Skala für die Darstellung von Schallpegeln besonders geeignet ist, da sie sowohl den Anforderungen der Messtechnik als auch der menschlichen Wahrnehmung gerecht wird. [3]

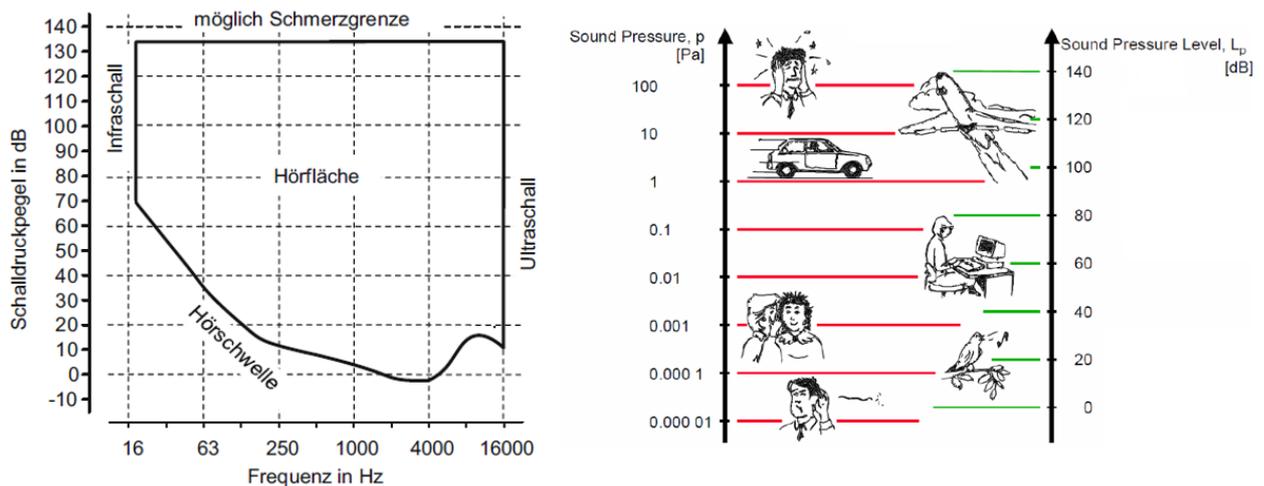


Abbildung 2: (links) Hörfläche des Menschen [5], (rechts) Schallwahrnehmung [9], ergänzt in [2]

Neben dem Schalldruckpegel wird auch der Schallschnellepegel verwendet, um die Geschwindigkeit der Teilchenbewegung im Schallfeld zu beschreiben. Dieser Pegel wird ebenfalls logarithmisch berechnet, wobei die Bezugsschallschnelle international auf $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ festgelegt ist [2]. Der Schallintensitätspegel beschreibt die pro Flächeneinheit

transportierte Schallenergie und wird auf ähnliche Weise wie der Schalldruckpegel berechnet. Der Bezugsschallintensitätspegel ist auf $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$ festgelegt, was der typischen Hörschwelle entspricht. Diese Pegelgrößen sind so aufeinander abgestimmt, dass bei ebenen Wellen unter Normalbedingungen die Pegel von Schalldruck, Schallschnelle und Schallintensität gleich sind. [2] [4]

Die weite Verbreitung der Dezibel-Skala in der akustischen Forschung und Praxis spiegelt sich in der Vielzahl der Normen und Standards wider, in denen ihre Nutzung fest verankert ist, darunter auch die DIN 45630 „Grundlagen der Schallmessung“. Die Fähigkeit, Schallpegel auf einer einheitlichen Skala darzustellen, macht das Dezibel zu einem unverzichtbaren Werkzeug in der Akustik, sowohl für wissenschaftliche Untersuchungen als auch für technische Anwendungen [2][4][5][8]. In der nachfolgenden Beschreibung sind die wesentlichen Pegelgrößen nochmals mit ihren Bezugsgrößen zusammengefasst:

Schalldruckpegel (Feldgröße):

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad \text{mit: } p_0 = 2 * 10^{-5} \text{ Pa} \quad (2.2)$$

Schallschnellepegel (Feldgröße):

$$L_v = 10 \lg \left(\frac{v^2}{v_0^2} \right) = 20 \lg \left(\frac{v}{v_0} \right) \quad \text{mit: } v_0 = 5 * 10^{-8} \frac{m}{s} \quad (2.3)$$

Schallintensitätspegel (Energiegröße):

$$L_I = 10 \lg \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad \text{mit: } I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2} \quad (2.4)$$

Schall an Grenzflächen, Schalldämmmaß und Masseneffekt

Bei der Wechselwirkung von Luftschall mit einer Wand treten unterschiedliche Phänomene auf. Ein beträchtlicher Anteil der Schallenergie wird von der Wand reflektiert, während ein weiterer Teil in die Wand eindringt und dort entweder absorbiert oder weitergeleitet wird. Die reflektierte Energie trägt zur Schallausbreitung im Raum bei, während die absorbierte Energie teilweise in Form von Körperschall weitergeleitet wird, der die Wand selbst in Schwingungen versetzt. Diese Schwingungen können wiederum in benachbarten Räumen als unerwünschte Schallwellen wahrgenommen werden. Ein weiterer Teil der absorbierten Energie wird in Wärme umgewandelt, ein Prozess, der als Energiedissipation oder Schalldämpfung bekannt ist. Obwohl die durch Körperschall und Transmission weitergeleitete Energie oft als gering betrachtet und in vereinfachten Berechnungen vernachlässigt wird, können sie dennoch zu störenden Schallpegeln in angrenzenden Räumen führen. [8]

Die Fähigkeit einer Wand, Schall zu dämmen, hängt von mehreren Faktoren ab, darunter die reflektierte, absorbierte und transmittierte Schallenergie. Um die Eigenschaften der Schallausbreitung an einer Wand quantitativ zu erfassen, werden verschiedene akustische Parameter verwendet. Diese beinhalten die Intensitäten des einfallenden Schalls I_ϵ , des reflektierten Schalls I_ρ , des absorbierten Schalls I_α , der dissipativen Verluste I_δ , des durch die Wand transmittierten Schalls I_τ , sowie des Körperschalls I_K . Auf Basis dieser Intensitäten lassen sich die nachfolgenden Größen ableiten und beschreiben:

$$\text{Reflexionsgrad: } \rho = \frac{I_\rho}{I_\epsilon} \quad (2.5)$$

$$\text{Absorptionsgrad: } \alpha = \frac{I_\alpha}{I_\epsilon} \quad (2.6)$$

$$\text{Dissipationsgrad: } \delta = \frac{I_\delta}{I_\epsilon} \quad (2.7)$$

$$\text{Transmissionsgrad: } \tau = \frac{I_\tau}{I_\epsilon} \quad (2.8)$$

In der nachfolgenden Abbildung 3 wird die Schallenergiebilanz an einer Wand graphisch dargestellt.

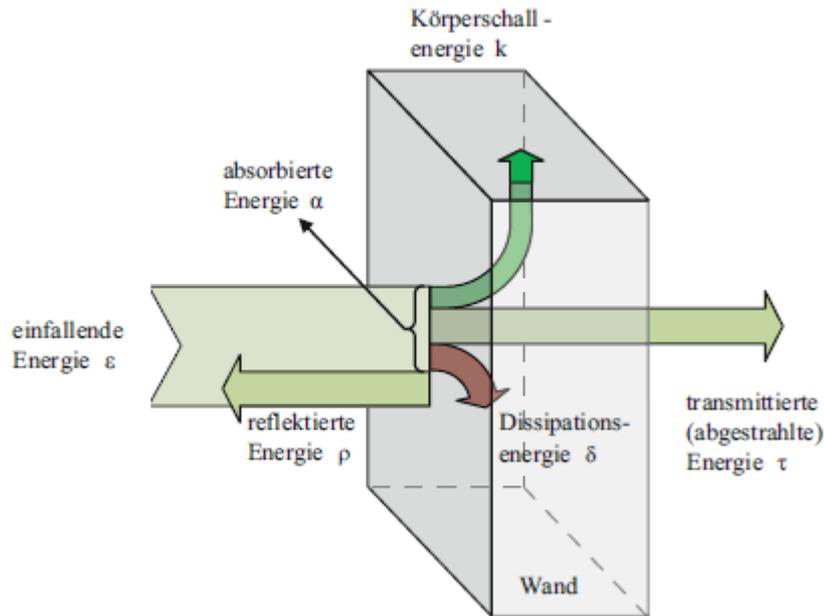


Abbildung 3: Schallenergiebilanz an einer Wand [7]

Ein spezieller Fall tritt auf, wenn eine ebene Schallwelle auf eine Oberfläche trifft. In diesem Fall wird ein Teil der Energie reflektiert und ein weiterer Teil durch die Wand hindurch transmittiert, wobei die transmittierte Schallwelle auf der gegenüberliegenden Seite in die Umgebung abgestrahlt wird. Der Transmissionsfaktor t eines Materials definiert sich als das Verhältnis der Druckamplitude der transmittierten Schallwelle \widehat{p}_t zu der Druckamplitude der eintreffenden Schallwelle \widehat{p}_e und kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$t = \frac{\widehat{p}_t}{\widehat{p}_e} \quad (2.9)$$

In Fällen, in denen der einfallende Schall nicht aus einer einzelnen Richtung kommt, sondern aus einem diffusen Schallfeld, wird die Analyse komplizierter, da die Verhältnisse der Druckamplituden schwer zu bestimmen sind. Hier bietet sich an, den Transmissionsgrad zu verwenden, der das Verhältnis der übertragenen Schalleistung P_t zur eintreffenden Schalleistung P_e beschreibt:

$$\tau = \frac{P_t}{P_e} = \iint_S I_t \, dS \cdot \frac{1}{\iint_S I_e \, dS} \quad (2.10)$$

In einem Schallfeld, das nur aus ebenen Wellen besteht, kann der Effektivwert der Schallintensität I_{eff} durch den vereinfachten Ausdruck wie folgt beschrieben werden:

$$I_{eff} = \frac{1}{2} R\{\widehat{p}\widehat{v}\} = \frac{1}{2} \widehat{p} \cdot \left(\frac{\widehat{p}}{Z_0}\right) = \frac{\widehat{p}^2}{2Z_0} = \frac{p_{eff}^2}{Z_0} \quad (2.10)$$

Der Schallwellenwiderstand Z_0 auch als akustische Impedanz bezeichnet, wirkt analog zum elektrischen Widerstand (Ohm'schen Gesetz), indem er als scheinbare Kraft entgegen der Ausbreitungsrichtung der Schallwellen wirkt. Der Schallwellenwiderstand setzt sich aus der mittleren Dichte ρ_0 und der Schallgeschwindigkeit c_0 des Mediums zusammen und kann wie folgt beschrieben werden:

$$Z_0 = \frac{\hat{p}}{\hat{v}} = \rho_0 c_0 \quad (2.11)$$

Durch die Verknüpfung des Transmissionsfaktors mit dem Schallwellenwiderstand lässt sich der Transmissionsgrad bei einer ebenen Wellenausbreitung folgendermaßen ausdrücken:

$$\tau = t^2 \cdot \frac{Z_0}{Z_0} = t^2 \quad (2.12)$$

Diese Gleichung gilt unter der Annahme, dass der Schallwellenwiderstand auf beiden Seiten des Trennmateriale dabei gleich ist: $Z_1 = Z_2 = Z_0$. [2] [5] [8]

Schalldämmmaß

Die Schalldämmung, insbesondere die Luftschalldämmung, spielt eine zentrale Rolle in der Akustik und steht in engem Zusammenhang mit dem Transmissionsgrad. Eine hohe Schalldämmung wird erreicht, wenn die Schallübertragung durch eine einschalige Wand minimal ist. Einschalige Wände bzw. Bauteile sind solche, die als eine Einheit mitschwingen. Diese bestehen entweder aus einem homogenen Material oder aus mehreren fest verbundenen Schichten von Materialien, die zwar unterschiedliche Eigenschaften haben, aber in ihren schalltechnischen Merkmalen ähnlich sind [10]. Das Schalldämmmaß, häufig mit R bezeichnet, dient dabei als quantitativer Indikator für diese Dämmeigenschaft [8]. Die exakte Berechnung des Schalldämmmaßes basiert auf speziellen Formeln, die den Transmissionsgrad sowie andere relevante Parameter berücksichtigen. Dabei wird als englische Terminologie der Begriff „Sound Transmission Loss“ (STL) in diesem Zusammenhang verwendet. Es ist jedoch wichtig, diesen nicht mit dem in der Bauakustik verwendeten, bewerteten Schalldämmmaß R_w zu verwechseln. Eine detaillierte Analyse der Gleichungen für τ und R verdeutlicht, dass der Transmissionsgrad mit zunehmender Masse der Wand und steigender Frequenz der einfallenden Schallwelle sinkt, was zu einem Anstieg des Schalldämmmaßes führt [8]. Das Schalldämmmaß ist demnach abhängig vom Verhältnis der Massenimpedanz $j\omega m'$, wobei ω die Kreisfrequenz und m' das Flächengewicht beschreibt. Die Schallkennimpedanz $Z = \rho \cdot c$ stellt hierbei einen Widerstand des umgebenden Mediums dar. [5]

Mathematisch lässt sich das Schalldämmmaß wie folgt ausdrücken:

$$R = 10 \cdot \log\left(\frac{P_e}{P_d}\right) \quad (2.13)$$

Wobei gilt: $P_e = I_e \cdot A_e$ und $P_d = I_d \cdot A_e$. Hieraus ergibt sich:

$$R = 10 \cdot \log\left(\frac{I_e}{I_d}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\tau}\right) \quad (2.14)$$

Mit

$$\tau = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega \cdot m'}{2 \cdot Z}\right)^2} \quad (2.15)$$

Vereinfacht sich das schließlich zu:

$$R = 10 \cdot \log\left[1 + \left(\frac{\omega \cdot m'}{2 \cdot Z}\right)^2\right] \quad (2.16)$$

Bei einem schrägen Schalleintrag wird das Schalldämmmaß wie folgt definiert:

$$R_{\vartheta} \approx 10 \lg\left[1 + \left(\frac{\omega \cdot m'}{2Z}\right)^2 \cos^2 \vartheta\right] \quad (2.17)$$

Die Auswertung der Schalldämmmaß Gleichung zeigt folgende Erkenntnisse auf:

- Eine Verdopplung der flächenbezogenen Masse führt zu einer Erhöhung des Schalldämm-Maßes R um 6 dB.
- Eine Verdopplung der Frequenz (was einer Erhöhung um eine Oktave entspricht) bewirkt ebenfalls eine Steigerung des Schalldämm-Maßes R um 6 dB.
- Bei einem Schalleinfall in einem flachen Winkel (ϑ nähert sich 90° , was bedeutet, dass $\cos \vartheta$ gegen 0 geht) nimmt das Schalldämm-Maß R erheblich ab.
- Bei einem senkrechten Schalleinfall (ϑ nähert sich 0° , was bedeutet, dass $\cos \vartheta$ gegen 1 geht) erreicht das Schalldämm-Maß R seinen höchsten Wert.

Um realistische Umweltbedingungen nachzubilden, wird von einem diffusen Schalleinfall ausgegangen, bei dem der Schall gleichmäßig aus allen Richtungen eintrifft [5]. Dabei werden 3 dB vom Schalldämmmaß abgezogen. Des Weiteren ist es in den meisten Fällen nicht sinnvoll, ein gemitteltetes Schalldämmmaß über den gesamten Frequenzbereich anzugeben. Stattdessen sollte das Schalldämmmaß R in Abhängigkeit von der Frequenz, zum Beispiel über eine Terzleiter, dargestellt werden [8]. Der frequenzabhängige Dämmungsverlauf einer einschaligen Wand ist in Abbildung 4 dargestellt.

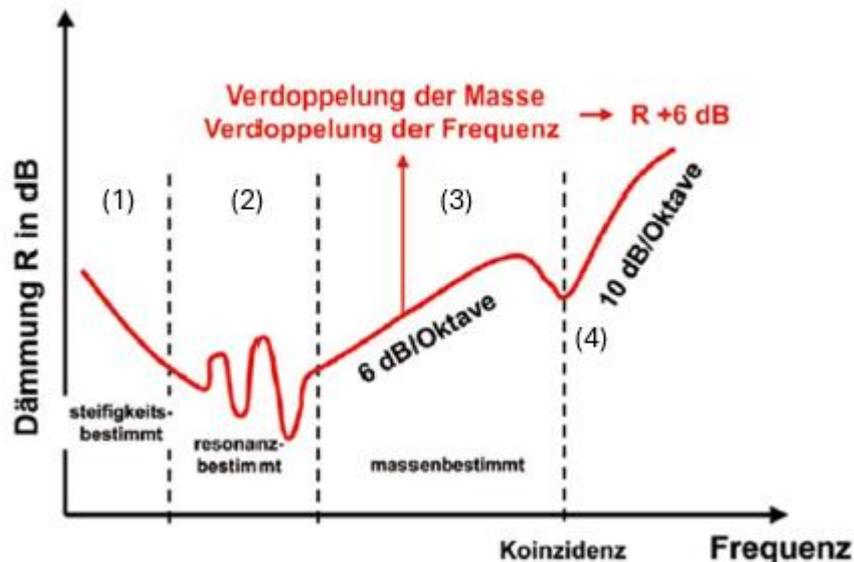


Abbildung 4: Dämmungsverlauf einer Einschaligen Wand (ergänzt) [6]

Im niedrigen Frequenzbereich (1) spielt die Steifigkeit der Wandschale eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Schalldämmung. Nach diesem Bereich folgt ein Abschnitt, der durch Resonanzerscheinungen (2) geprägt ist [6]. Niederfrequente Resonanzen in dünnwandigen Strukturen treten auf, wenn die Anregungsfrequenzen mit den Eigenfrequenzen der Struktur übereinstimmen. Dies führt zu hohen Schwingungsamplituden, die stark von der Dämpfung des Materials abhängen und in einer verstärkten Schallabstrahlung resultieren. Im weiteren Verlauf wird die Schalldämmung vorwiegend von der Masse der Wandschale selbst beeinflusst, entsprechend dem Berger'schen Massengesetz (3). In diesem Abschnitt zeigt sich wie bereits zuvor anhand der Formel erläutert, eine Zunahme der Schalldämmung um etwa 6 dB pro Oktave, also bei jeder Verdoppelung der Frequenz, bis schließlich die Koinzidenzfrequenz erreicht wird [6]. Der Dämpfungseinbruch bei der Koinzidenzfrequenz (4), auch als Spuranpassungsfrequenz bezeichnet, tritt auf, wenn die Geschwindigkeit der einfallenden Schallwelle mit der der freien Biegewelle in der Wand übereinstimmt. In diesem Fall wird die erzwungene Welle in der Wand leicht angeregt, was zu einem Resonanzeffekt führt. Dieser Resonanzvorgang bewirkt sehr hohe Amplituden in der Wandauslenkung [11]. Bei der Koinzidenzfrequenz stimmt die Projektion der schräg einfallenden Schallwelle genau mit der

Wellenlänge der freien Biegewelle der Wandschale überein, wobei dieses Phänomen unter anderem durch das Verhältnis von Wandmasse zu Biegesteifigkeit beeinflusst wird [6]. In diesen Koinzidenz- oder Spuranpassungsfrequenzen kommt es zudem zu einer Verschlechterung gegenüber den Rechenwerten nach dem Berger'schen Gesetz. Diese Frequenzen führen zu einer maximalen Überlagerung der Wellen, wodurch die Wand mit der höchsten Amplitude schwingt. Dies resultiert in einer signifikanten Erhöhung der Schalldurchlässigkeit und verursacht ein sogenanntes „Dämmloch“, das die Schalldämmeigenschaften der Wand in diesem Frequenzbereich erheblich mindert [10]. Nach Überschreiten der Koinzidenzfrequenz (4) erhöht sich die Schalldämmung um etwa 10 dB pro Oktave. Oberhalb dieser Frequenz verbessert sich somit die Schalldämmleistung gegenüber den Berger'schen Berechnungen. Aus diesem Grund sollte die Koinzidenzgrenzfrequenz, wenn möglich, unterhalb des Bereichs der akustisch relevanten Frequenzen liegen. [6] [10]

Doppelschalige Bauteile

Doppelschalige Bauteile, bzw mehrschalige Bauteile, bestehen aus mehreren biegesteifen Schalen, die nicht starr, sondern durch elastische Schichten – in der Regel Dämmschichten oder Luftschichten – federnd miteinander verbunden sind. Der charakteristische Verlauf des Luftschalldämm-Maßes R eines doppelschaligen Bauteils in Abhängigkeit von der Frequenz sowie das entsprechende Ersatzschaltbild sind in Abbildung 5 dargestellt.

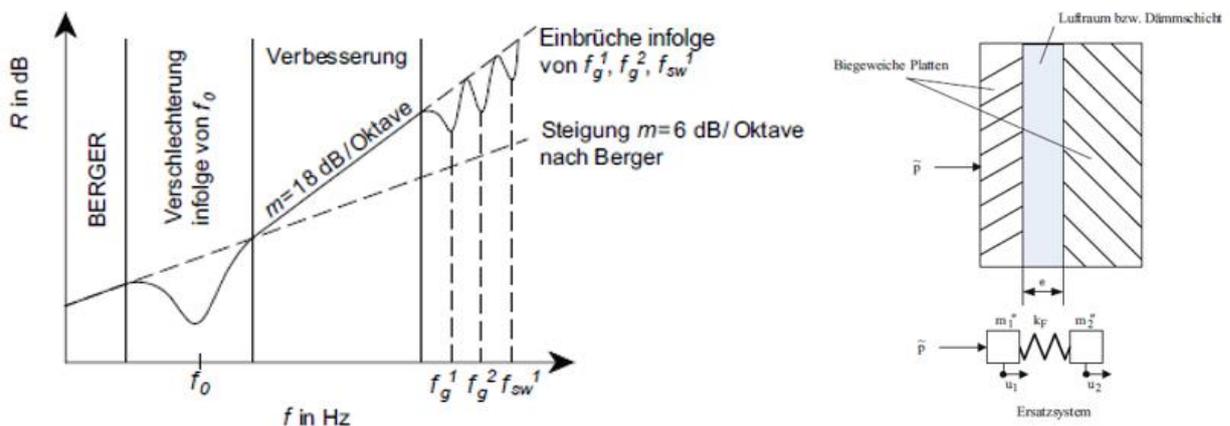


Abbildung 5: Schalldämmmaßverlauf Doppelschale [12] (links), Ersatzsystem [8] (rechts)

Das linke Bild beschreibt den frequenzabhängigen Verlauf des Luftschalldämm-Maßes R für zweischalige Bauteile. Der massenbedingte Anstieg (Steigung der gestrichelten Linie) beträgt wie bereits erwähnt nach Berger 6 dB je Oktave. Die Resonanzfrequenz des mehrschaligen Systems wird durch f_0 gekennzeichnet. Die Koinzidenzgrenzfrequenzen der Schalen 1 und 2 werden durch f_g^1 und f_g^2 dargestellt. Die Frequenz f_{sw}^1 steht für die Ausbildung der ersten stehenden

Welle in einer nicht gedämpften Luftzwischen­schicht der Dicke a (Hohlraumresonanzfrequenzen).

Das Schalldämmmaßprofil eines doppelschaligen Wandaufbaus zeigt signifikante Abweichungen vom theoretischen Verhalten nach Berger. Diese Unterschiede lassen sich in verschiedene charakteristische Frequenzbereiche unterteilen:

- Bereich 1: Im niedrigen Frequenzbereich wirkt die Doppelwand entsprechend dem Massengesetz einer masseäquivalenten Einzelwand.
- Bereich 2: Im Bereich der Eigenfrequenz f_0 der Doppelwand tritt ein deutlicher Einbruch des Schalldämmmaßes auf.
- Bereich 3: Die Interaktion zwischen den beiden Wänden bewirkt eine Steigerung des Schalldämmmaßes im Vergleich zum Massegesetz einer Einzelwand, die die gleiche Masse wie der Doppelwandaufbau besitzt.
- Bereich 4: Im Bereich der Koinzidenz­grenzfrequenzen f_g^1 und f_g^2 der einzelnen Schalen kommt es zu einem erneuten Einbruch des Schalldämmmaßes. Zusätzlich kann es durch die Bildung stehender Wellen im Schalen­zwischenraum (Hohlraumresonanzen) zu weiteren Verschlechterungen kommen, was durch f_{sw}^1 dargestellt wird.

2.2 Akustik im Flugzeug

2.2.1 Comfort & Entwicklung des Kabinenlärms in Verkehrsflugzeugen

Ein vorrangiges Ziel der Flugzeughersteller besteht in der Steigerung der Effizienz und Sicherheit von Lufttransportsystemen. Mit dem zunehmenden Wettbewerb zwischen den Fluggesellschaften rücken jedoch auch die Kundenzufriedenheit und der Komfort der Passagiere an Bord zunehmend in den Fokus. Komfort wird als ein psychologischer Zustand des subjektiven Wohlbefindens definiert, der durch Entspannung, Angenehmheit, Zufriedenheit und Bequemlichkeit unter optimalen Bedingungen auftritt [13]. Laut DIN-Norm 1320 wird Lärm als „unerwünschter Hörschall“ definiert, der zu Störungen, Belästigungen, Beeinträchtigungen oder Schäden führen kann. Genuit beschreibt Lärm weiter wie folgt: „Lärm ist Schall, der im Frequenzbereich des menschlichen Gehörs auftritt, die Stille oder eine beabsichtigte Schallwahrnehmung stört und zu Belästigung führt oder die Gesundheit gefährdet“ [14].

Obwohl Flugzeugpassagiere Lärm seltener im Zusammenhang mit Komfort erwähnen als andere physische Merkmale wie den Sitzkomfort und frühere Studien sich hauptsächlich auf den thermischen Komfort konzentrierten, weist Lärm dennoch eine deutliche Korrelation mit dem Gesamtkomfort auf [15]. In der wissenschaftlichen Ausarbeitung von Mellert et al. [16] konnte gezeigt werden, dass Umweltbedingungen wie Lärm und Vibration am Arbeitsplatz des Kabinen- und Flugpersonals erheblichen Einfluss auf das Wohlbefinden, die Leistungsfähigkeit und die Gesundheit haben. Diese Effekte werden durch Messungen auf Langstreckenflügen und Tests in Simulatoren untersucht. Dabei entwickelten die Forscher verschiedene Indikatoren, um die menschliche Reaktion präzise zu charakterisieren. Parameter der Umweltbedingungen und Indikatoren der menschlichen Reaktion können dabei effektiv modelliert werden. Es zeigte sich, dass diese Parameter und Indikatoren eine komplexe wechselseitige Abhängigkeit offenbaren. Dabei hatte besonders der Lärmpegel einen signifikanten Einfluss auf das gesundheitliche Wohlbefinden, vor allem wenn der Pegel mit der Arbeitszeit ansteigt. Die negativen Auswirkungen der Umweltbedingungen werden im Laufe eines langen Flugs zunehmend deutlicher wahrgenommen. [15]

Die alleinige Fokussierung auf den Kabinenlärm (SPL) ist jedoch im Hinblick auf die Komfortbeurteilung nicht zielführend. So wird in Studien gezeigt, dass eine Reduktion des Schalldruckpegels in Zugabteilen, die Flugzeugkabinen ähneln, nicht zwangsläufig zu einer Komfortsteigerung führt, da dadurch andere störende Geräusche, wie Gespräche anderer Passagiere oder Waggongeräusche, wahrnehmbarer werden könnten. [17] [18]

Des Weiteren sei erwähnt, dass ein kontinuierlicher Schalldruckpegel (SPL) von 62–65 dB(A), der andere Geräusche maskiert, Aktivitäten der Passagiere wie Lesen und Schlafen positiv

beeinflussen kann. In einer Studie, in der 42 Probanden aus verschiedenen Berufsgruppen in einem Inter-Regional-Zug getestet wurden, zeigten die Ergebnisse, dass verstärkte Hintergrundgeräusche den akustischen Komfort erhöhten und störende Geräusche wie Gespräche über Mobiltelefone weniger wahrnehmbar machten. Trotz des höheren Schalldruckpegels verbesserte sich somit das gesamte Komfortempfinden in der maskierten Umgebung. [19]

In den frühen Tagen des Passagierflugverkehrs, als Flugzeuge wie die Lockheed Super Constellation und die Boeing 377 Stratocruiser mit Propellern betrieben werden, sind Passagiere extrem hohen Lärmpegeln von 90 dB(A) bis 105 dB(A) ausgesetzt. Um diese Lärmpegel zu reduzieren, ergreifen die Flugzeugbauer umfangreiche Maßnahmen, insbesondere zur Reduzierung tieffrequenter Geräusche, die durch die Propeller entstehen. Mit dem Beginn des Jet-Zeitalters Mitte der 1950er Jahre und der Einführung der ersten Generation von Turbofan-Triebwerken sinkt der Kabinenlärm um etwa 5 dB. Dabei verschiebt sich das Lärmspektrum von tiefen, brummenden Tönen zu einem breiteren Spektrum mit stärkeren Tiefen und Mitten. Die Hauptquelle des Lärms verlagert sich zudem von vor den Triebwerken hinter die Triebwerke. Flugzeuge wie die De Havilland Comet und die Boeing 367 setzen neue Standards im Kabinenlärm mit Pegeln von 85 dB(A) bis 90 dB(A), abhängig von der Sitzplatzposition [20][21]. Die Entwicklung des Kabinenlärms in Passagierflugzeugen wird detaillierter in Abbildung 6 veranschaulicht.

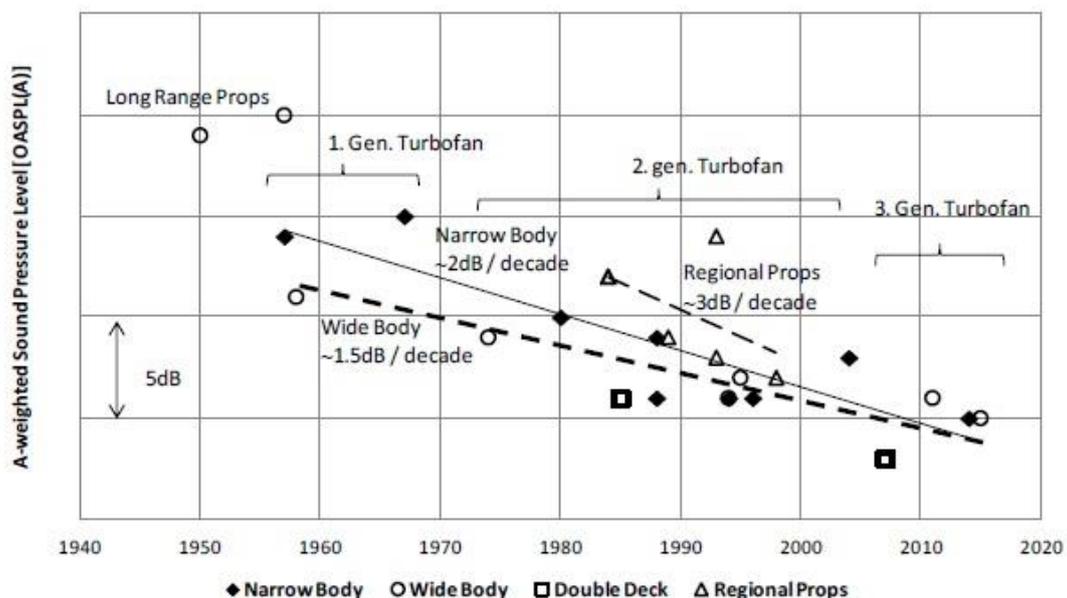


Abbildung 6: Entwicklung des Kabinenlärms in Passagierflugzeugen

Erst in den 1960er Jahren, mit der zweiten Generation von Jet-Triebwerken in Flugzeugen wie der Boeing 707 und der DC-9, konnte der Kabinenlärm weiter auf 83dB(A) bis 85dB(A) reduziert

werden. Seither haben Flugzeug- und Triebwerkshersteller kontinuierlich Fortschritte erzielt, indem sie die Nebenstromverhältnisse erhöht und die Lärminderungsmaßnahmen verbessert haben. Diese technischen Entwicklungen haben nicht nur den Kraftstoffverbrauch deutlich reduziert, sondern auch das Gewicht der Flugzeuge niedrig gehalten. Dabei liegt heute der Lärmpegel in Flugzeugkabinen zwischen 74dB(A) und 80dB(A) [20][21]. In weiteren Untersuchungen zeigt sich, dass die kontinuierlichen Lärmpegel in der Kabine während des Reiseflugs nur geringfügig variieren. Innerhalb derselben Minute werden in der mittleren Kabine sowie im vorderen und hinteren Teil der Kabine konstante Lärmpegel von 75 dB(A), 76 dB(A) und 78,5 dB(A) gemessen [22]. Der Lärmpegel wird in anderen wissenschaftlichen Ausarbeitungen oft als SIL beschrieben. SIL steht dabei für „Speech-interference Level“ und beschreibt die Störung der Wahrnehmung von Sprache durch Geräusche [23]. Die Schalldruckpegel von Kabinen in Serienflugzeugen des Linienbetriebs bewegen sich in der Regel im Bereich von 55-65 dB (SIL3); in VIP-Flugzeugkabinen liegen sie durch Reduktionsmaßnahmen nur bei 50-55 dB und im hochoptimierten Bereich können sogar Sil3 Werte von 45-47 dB erreicht werden. [24]

2.2.2 Geräuschquellen

Im Zusammenhang mit dem Innenlärm von Flugzeugen lassen sich drei Hauptgruppen von Geräuschquellen identifizieren: das Antriebssystem, die externe aerodynamische Strömung, wobei die turbulente Grenzschicht (TBL) die dominante Quelle darstellt, und die Bordausrüstung, bei der das Klimatisierungssystem (ACS) den dominanten Anteil des Kabinenlärms verursacht [25][26]. Diese Quellen können über zwei Arten von Übertragungswegen in das Innere des Flugzeugrumpfes gelangen: die Luftschallübertragung und den strukturbedingten Körperschall. Eine Vielzahl von Geräuschquellen und Übertragungswegen trägt zum Kabinenlärm bei. Rotoren, Einlass- und Auslasssysteme von Turbofan-Triebwerken, Turbomaschinen und turbulente Grenzschichtablösungen über den Flugzeugoberflächen erzeugen Geräusche, die direkt auf die Außenfläche des Rumpfes treffen und in die Kabine übertragen werden, was als Luftschallübertragung bezeichnet wird. Unwuchtkräfte des Triebwerks, die durch Triebwerksaufhängungen übertragen werden, sowie Abgas- oder Propellerwachen, die auf die Flügel- oder Leitwerke treffen, erzeugen Vibrationen, die entlang der Flugzeugstruktur übertragen und als akustischer Lärm in die Kabine abgestrahlt werden. Dieser Lärm wird als strukturbedingter Körperschall bezeichnet. Weitere wichtige Geräuschquellen wie Klimaanlageanlagen und hydraulische Systeme zur Betätigung von Fahrwerk oder Klappen sowie rotierende Maschinen wie Ventilatoren, Verdichtern und Pumpen befinden sich innerhalb des Flugzeugrumpfes. Diese Quellen erzeugen typischerweise Strömungsgeräusche oder tonale Komponenten, die unterschiedlich wahrgenommen werden und zu unterschiedlichen Komfortempfindungen und Lärmakzeptanz in der Kabine führen können. Jede dieser Quellen kann übermäßigen Lärm erzeugen und muss daher in einem Lärmschutzdesign berücksichtigt werden. [27][28] In der nachfolgenden Abbildung 7 werden Geräusch- und Vibrationsquellen und deren Übertragungswege bis in die Flugzeugkabine zum Empfänger dargestellt.

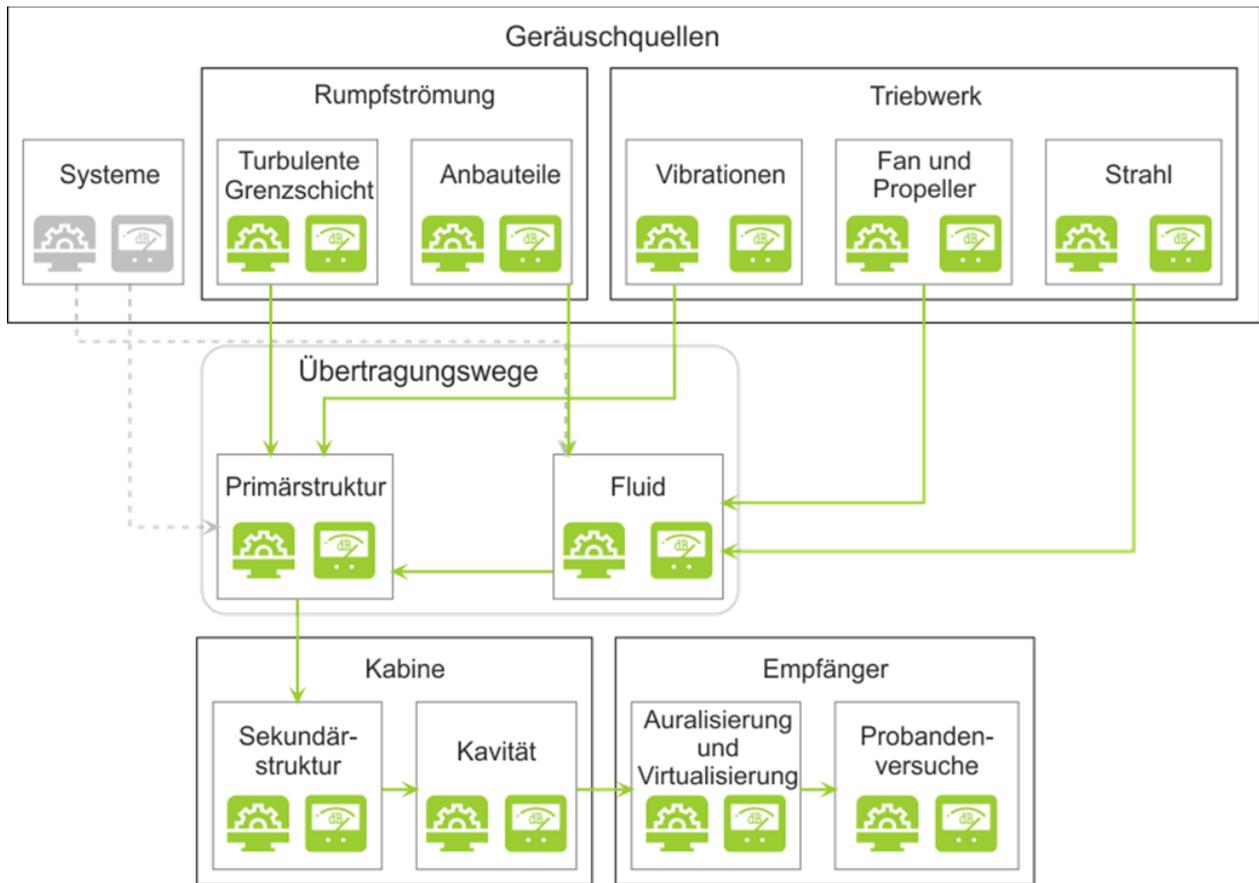


Abbildung 7: Geräusch- und Vibrationsquellen in die Flugzeugkabine [29]

Die Reduzierung des Innenlärms in Flugzeugen erfordert die Identifikation und gezielte Behandlung der relevanten Quellen und Übertragungswege. In modernen Flugzeugen wurden bereits offensichtliche Quellen und Pfade behandelt, jedoch bleiben verschiedene Quellen und Wege, die ähnliche Beiträge zum Innenlärm leisten, eine Herausforderung [25]. Die turbulente Grenzschichtablösung stellt wie bereits erwähnt die dominierende Lärmquelle im Reiseflug von Verkehrsflugzeugen dar. Diese durch die Luftströmung über die Flugzeugoberflächen erzeugten Geräusche sind besonders relevant bei größeren, strahlgetriebenen und aerodynamisch optimierten Flugzeugen und beeinflussen den Kabinenlärm erheblich [27]. Im Reiseflug sind die Strömungsquellen die Hauptverursacher des Innenlärms, im Gegensatz zum Start, bei dem das Triebwerk als primäre Lärmquelle dominiert [30]. In Abbildung 8 sind die sich verändernden Schalldruckpegel während unterschiedlicher Flugphasen aufgeführt.

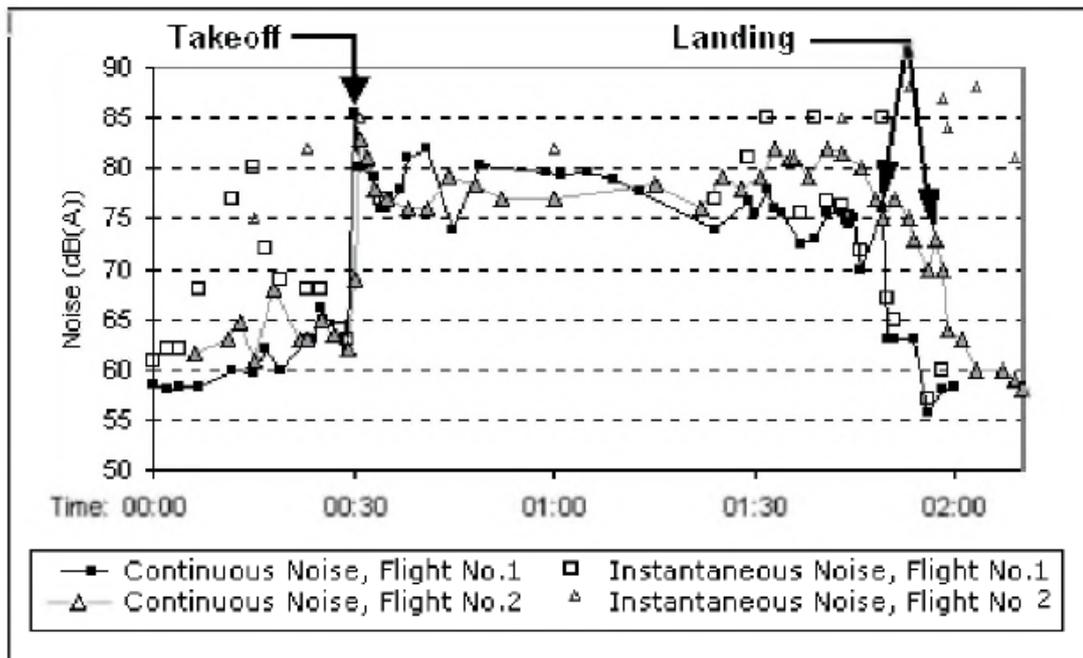


Abbildung 8: Schalldruckpegel während unterschiedlicher Flugphasen [31]

Angesichts der Entwicklung neuer, leiserer Strahltriebwerke wird die durch turbulente Grenzschichten verursachte Lärmbelastung als die wichtigste Lärmquelle angesehen. Daher ist die Reduktion dieses Lärms ein zentrales Forschungsthema [32]. Die Schalldruckpegel innerhalb der Flugzeugkabine variieren nicht nur je nach Flugzustand, sondern auch in Abhängigkeit von der Sitzposition der Passagiere. Allgemein ist der Kabinenlärm stark abhängig vom gewählten Sitzplatz und dem jeweiligen Flugzustand. Dieser Lärm wird durch verschiedene Quellen innerhalb und außerhalb des Druckumpfes sowie durch die jeweiligen Schallübertragungswege beeinflusst. Im vorderen Kabinenbereich dominiert während des Reiseflugs breitbandiger Grenzschichtlärm, der durch Druckverwirbelungen auf der Außenhaut entsteht. Je höher die Druckgradienten, desto kleiner die Wirbel und desto höher die Frequenz des Lärms. Im hinteren Kabinenbereich nehmen die Druckwirbel an Größe zu, wodurch das Lärmspektrum zu tieferen Frequenzen verschoben wird [20]. Das Frequenzspektrum des Kabinenlärms kann vereinfacht als Breitbandlärm beschrieben werden, wobei die Maximalfrequenz und der Frequenzanstieg je nach Position im Kabinengang variieren. Im vorderen Bereich erreicht das Spektrum ein hochfrequentes Maximum mit einem Plateau zwischen 1 kHz und 4 kHz. In der mittleren Kabine liegt das Maximum bei 600 Hz bis 800 Hz, während im hinteren Bereich ein tieffrequentes Spektrum mit Maximalpegeln zwischen 250 Hz und 500 Hz vorherrscht [20].

Die erwähnten Geräuschquellen und deren Eigenschaften bezüglich des Kabinenlärms werden des Weiteren in [26] Hus Arbeit intensiv untersucht. Die Ergebnisse der Studie, basierend auf Airbus A320 Flugtests im Rahmen des deutschen nationalen Projekts SIMKAB (LuFo IV), ermöglichten eine detaillierte Bewertung der verschiedenen Lärmquellen in der Kabine unter

unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten, Flughöhen sowie Betriebsbedingungen der Triebwerke und des Klimasystems. Es wird festgestellt, dass der Lärm des Klimaanlage-Systems (ACS) eine untergeordnete Rolle spielt und den Gesamtschalldruckpegel (OASPL) im vorderen Bereich des Testgebiets nur um etwa 1-2 dB(A) erhöht, wenn das ACS eingeschaltet ist. Die Bedeutung des ACS-Lärms nimmt mit zunehmender Fluggeschwindigkeit ab. Der durch die turbulente Grenzschicht induzierte Kabinenlärm hingegen erhöht den OASPL um etwa 3-4 dB(A) von der vorderen Messposition in der Nähe der Flügelwurzel bis zum hinteren Kabinenbereich. Dieser Lärm steigt mit abnehmender Flughöhe und zunehmender Fluggeschwindigkeit und stellt den dominierenden Lärmbeitrag während des Reiseflugs dar, besonders bei niedrigeren Fluggeschwindigkeiten auf allen getesteten Flughöhen sowie bei höheren Fluggeschwindigkeiten auf niedrigeren Flughöhen. Der Triebwerkslärm wirkt sich hauptsächlich auf den hinteren Teil der Kabine aus. Seine relative Bedeutung nimmt mit zunehmenden Flughöhen und Fluggeschwindigkeiten zu, wobei Letzteres nur im Reiseflug relevant ist. Im Reiseflug wird der durch das Triebwerk induzierte Lärm im hinteren Kabinenbereich bei höheren Flughöhen gleichwertig zu dem TBL-induzierten Lärm. [26]

Eine der zentralen Herausforderungen bei der Senkung des Innenraumgeräuschpegels in Flugzeugen liegt in der präzisen Identifikation relevanter Geräuschquellen und Übertragungswege, um eine gezielte Lärminderung einzuleiten. Der Identifikationsprozess gestaltet sich relativ einfach, wenn es nur eine dominierende Geräuschquelle und einen hauptsächlichlichen Übertragungsweg gibt. In den meisten modernen Flugzeugen sind jedoch viele der offensichtlichen Lärmquellen und Übertragungswege durch fortschrittliche Designmaßnahmen bereits reduziert worden. Die Herausforderung besteht daher zunehmend darin, eine Vielzahl an unterschiedlichen Quellen und Übertragungswegen zu identifizieren, die jeweils vergleichbare Anteile zum Innenraumgeräuschpegel beitragen. Um eine spürbare Reduktion des Kabinengeräuschpegels zu erreichen, ist es notwendig, alle diese Quellen und Wege umfassend zu erkennen und gezielt zu behandeln. [25]

2.2.3 Aufbau Lärminderungsmaßnahmen

Bei Schallschutzmaßnahmen unterscheidet man grundsätzlich zwischen primären und sekundären Maßnahmen. Primäre Maßnahmen zielen darauf ab, die Geräuschentwicklung direkt an der Quelle zu minimieren, idealerweise wird dabei bereits die Entstehung von Schall verhindert. Sekundäre Maßnahmen hingegen fokussieren darauf, den Schall daran zu hindern, das menschliche Ohr zu erreichen [8]. Des Weiteren werden in dynamischen Systemen Vibrationen und Geräuschpegel durch verschiedene Ansätze verringert, die in aktive, passive und semi-aktive Methoden unterteilt werden können [4][33]. Aktive Geräuschregelungssysteme (Active Noise Control, ANC) werden eingesetzt, um unerwünschte Geräusche oder Störsignale zu reduzieren, die von einer Lärmquelle über ein Übertragungsmedium abgestrahlt werden. Diese Störungen können unterschiedliche Formen annehmen, wie etwa Luftschall, elektrische Störungen, akustische Emissionen oder Vibrationen. Da die Lärmquellen und die Übertragungsmedien oft zeitlich variabel sind, sind die Geräuschsignale häufig nicht stationär in Bezug auf Frequenzspektrum, Amplitude und Geschwindigkeit. ANC-Systeme arbeiten typischerweise durch die Einführung eines gegenphasigen Signals, das über ein sekundäres Quellsystem erzeugt wird, um den Lärm im Übertragungsmedium zu kontrollieren. Passive Methoden zur Schallkontrolle, insbesondere zur Reduzierung von Luftschall, umfassen den Einsatz von Absorbern, Barrieren, Schalldämpfern und Schalldämmmaterialien. Zur Minderung von Körperschall und den damit verbundenen Vibrationen können verschiedene Techniken angewendet werden. Oftmals reicht bereits eine Anpassung der Systemsteifigkeit oder -masse aus, um die Resonanzfrequenzen zu verschieben und somit unerwünschte Vibrationen zu reduzieren, vorausgesetzt die Anregungsfrequenzen bleiben konstant. In vielen Fällen ist es jedoch notwendig, Vibrationen zu isolieren oder durch den Einsatz von Dämpfungsmaterialien zu dissipieren. Semi-aktive Methoden kombinieren aktive Kontrollelemente mit passiven Dämpfungselementen, um deren Dämpfungseigenschaften zu verbessern. Beispiele hierfür sind elektrorheologische (ER) und magnetorheologische (MR) Fluide sowie die aktive Schichtdämpfung (ACLD), bei der die herkömmliche Einschränkungsschicht durch intelligente Materialien ersetzt wird. Aufgrund der hohen Kosten und der komplexen Schallfeldverhältnisse im Inneren von Fahrzeugen und Flugzeugkabinen erfolgt die großflächige Implementierung aktiver und semi-aktiver Technologien jedoch nur zögerlich. Eine kostengünstigere und einfacher zu implementierende Alternative zu diesen Techniken ist die passive Dämpfung durch viskoelastische Materialien. Diese Dämpfungselemente können auf verschiedene Weise in das System integriert werden, um die Schwingungen effektiv zu reduzieren. [25] [33]

In Abbildung 9 sind beispielhaft verschiedene akustische Lärminderungsmaßnahmen dargestellt, die in modernen Transportflugzeugen zum Einsatz kommen. Im Folgenden werden die heute gebräuchlichen Lärminderungsmaßnahmen sowie deren Wirkmechanismen –

Dämmung, Dämpfung und Isolation – näher erläutert. Dabei werden auch die verwendeten Materialien detaillierter beschrieben.

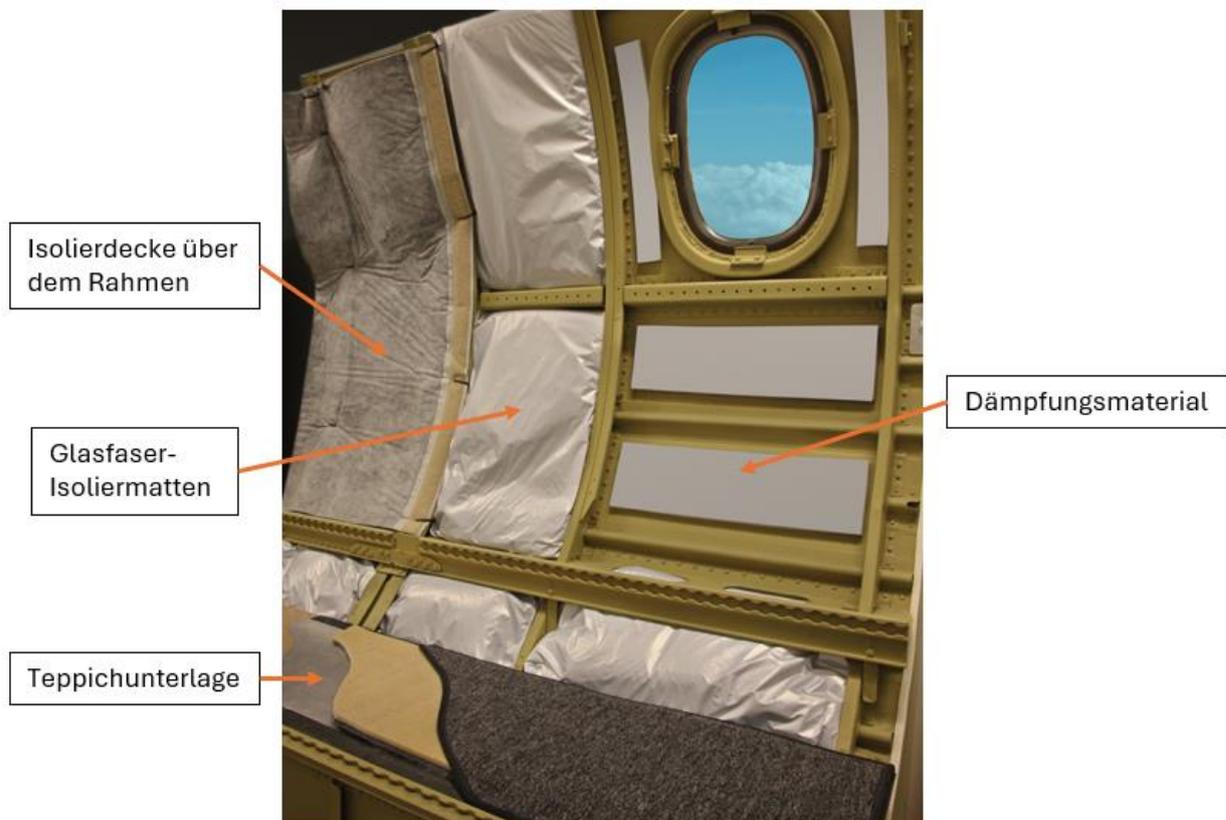


Abbildung 9: Lärminderungsmaßnahmen [34]

Damping Materialien CLD/UCLD

Viskoelastische Materialien, die sowohl elastische als auch viskose Eigenschaften kombinieren, sind in der Lage, mechanische Energie bei ihrer Verformung unter externen Lasten in Wärme umzuwandeln, was zur Dissipation von Energie führt [35]. Diese Eigenschaft macht sie seit langem zu einer effektiven Wahl für die Dämpfung von Biegeschwingungen in verschiedenen Strukturen [35, 36]. Die viskoelastischen Materialien (VEM) werden in der Regel als Schicht direkt auf das elastische Element oder die Oberfläche einer Trägerstruktur aufgebracht oder zwischen der Trägerstruktur und einer einschränkenden Einspannschicht eingeschlossen [36] [35] [37]. Diese Konfigurationen, die als Unconstrained Layer Damping (UCLD) – auch bekannt als Free Layer Damping – und Constrained Layer Damping (CLD) oder Passive Constrained Layer Damping (PCLD) bezeichnet werden, ermöglichen eine passive Ableitung von Energie aus der schwingenden Struktur und tragen somit zur Dämpfung der Strukturschwingungen bei [35].

Bei der UCLD-Methode wird die mechanische Energie vor allem durch die wechselnde Dehnung und Stauchung der viskoelastischen Schicht dissipiert, während bei der CLD/PCLD-Methode die Energiedissipation hauptsächlich durch Scherbeanspruchungen im VEM erfolgt [36][37]. UCLD

ist hinsichtlich der Umsetzung einfach und kostengünstig, jedoch weniger effektiv als CLD, welches bei höheren Dämpfungsanforderungen bevorzugt wird [38]. Die VEM-Schicht kann bei UCLD entweder gesprüht oder als Zuschnitt aufgetragen werden [37].

Neben den Hauptkonfigurationen UCLD und CLD gibt es auch weitere Dämpfungskonfigurationen, wie abgestimmte oder semi-aktive Dämpfer, die Anbringung von VEM an Stützen elastischer Elemente (z. B. Wellen) sowie mehrschichtige Strukturen [37]. Dabei spielt die Dicke der VEM-Schichten eine entscheidende Rolle für die Effektivität der Dämpfung [39]. Eine gezielte Anpassung der Dickenverteilung und Positionierung der VEM-Schichten kann den Verlustfaktor der schwingenden Struktur signifikant erhöhen, teilweise um bis zu 100 % oder mehr [40]. Insbesondere bei weicheren und dickeren viskoelastischen Schichten trägt die Dickenbewegung maßgeblich zur Energiedissipation bei, wobei die Effektivität stark von der Schwingungsfrequenz abhängt [39]. Im Flugzeugbau finden CLD-Produkte breite Anwendung, um Kabinengeräusche und Vibrationen zu reduzieren [33].

Trotz der zahlreichen Studien zur optimalen Anordnung passiver Dämpfungsmaßnahmen fehlen allgemeingültige Richtlinien zur Platzierung von Dämpfungsschichten [41]. Die DIN EN ISO 11688 gibt zwar allgemeine Hinweise, empfiehlt jedoch spezifisch die Platzierung von Dämpfungsschichten nahe der Erregungsquelle, um die Übertragung von Körperschall zu reduzieren. Diese Regel wird jedoch im Handbuch Konstruktion [42] relativiert, da eine Platzierung direkt an den Kraftübertragungspunkten zu einer unerwünschten Reduzierung der Nachgiebigkeit führen kann. Numerische und experimentelle Studien sind daher oft die Basis für die Optimierung der Positionierung von Dämpfungsschichten.

Absorbermaterialien

Der derzeit übliche Aufbau von Kabinenwänden in Verkehrsflugzeugen ist eine Doppelwandkonstruktion, deren vorteilhaftes Schalldämmverhalten und Wirkmechanismen in Kapitel 2.1 näher erläutert wird. Diese Konstruktion setzt sich aus der Flugzeugrumpfstruktur und den Kabinenverkleidungselementen (Lining) zusammen. Der Zwischenraum in dieser Doppelwandkonstruktion ist in der Regel mit Glaswolle ausgefüllt, die als primäres Absorbermaterial fungiert. Eine schematische Darstellung dieses Seitenwandaufbaus findet sich in Abbildung 10.

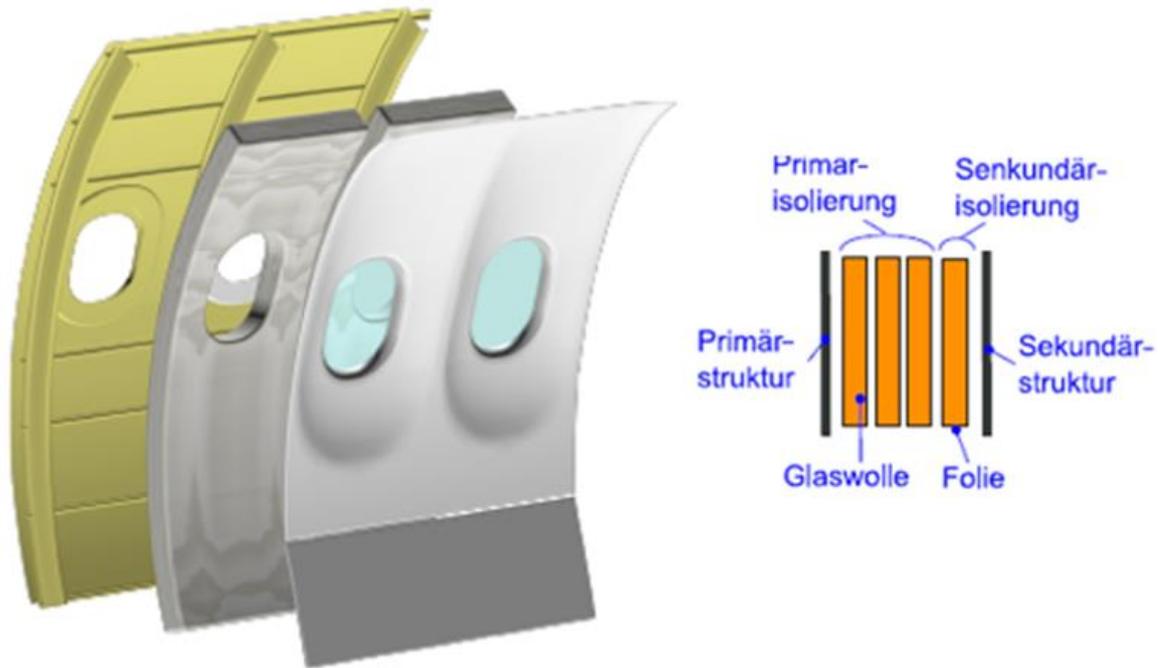


Abbildung 10: Flugzeugkabinenwandaufbau [43] (links), schematische Seitenansicht [44] (rechts)

Neben Glaswolle kommen auch alternative Absorbermaterialien wie Melaminharzschaum und Polyimidschaum zum Einsatz. Diese Materialien bieten ebenfalls gute akustische Eigenschaften und können Glaswolle in der Flugzeugdoppelwand ersetzen, sofern dabei keine Körperschallbrücken entstehen. Boeing nutzt Melaminharz- und Polyimidschaum bereits erfolgreich zur akustischen Isolierung in ihren Flugzeugen. In Kurzstreckenflugzeugen beträgt der Abstand zwischen den beiden Wänden typischerweise etwa 10 cm, während er in Langstreckenflugzeugen ungefähr 14 cm beträgt [13].

Um die Formstabilität der Absorbermaterialien zu gewährleisten und den Einbau zu erleichtern, werden diese in spezielle Folien aus Polyethylenterephthalat (PET) oder Polyvinylfluorid (PVF) eingehüllt [14]. Diese verpackten Glaswollpakete werden an der Flugzeugrumpfstruktur als Primärisolation und an den Kabinenverkleidungselementen als Sekundärisolation angebracht. Eine schematische Darstellung dieser Unterscheidung ist in Abbildung 10 (rechts) zu sehen. Für den Einsatz in der Luftfahrt wird Glaswolle in unterschiedlichen Dichte- und Güteklassen produziert, um eine Vielzahl an Anforderungen zu erfüllen. Zu den wichtigsten Anforderungen zählen eine sehr geringe Dichte, geringe Feuchtigkeitsspeicherung, gute thermische Isolation, Feuerfestigkeit, einfache Installierbarkeit sowie eine hervorragende akustische Absorption, insbesondere im mittleren und höheren Frequenzbereich.

Aktuell bietet die Kabinenwandisolation eine effektive Schalldämmung für höhere Frequenzen ab etwa 1000 Hz. Im tieferen Frequenzbereich hingegen, typischerweise zwischen 100 und 200 Hz, ist die Schalldämmung aufgrund der auftretenden Doppelwandresonanzfrequenz unzureichend,

was den Passagierkomfort beeinträchtigen kann. Dies liegt unter anderem daran, dass die Absorptionsfähigkeit von Glaswolle in diesem Frequenzbereich stark abnimmt. Da künftige Triebwerke voraussichtlich genau in diesem tiefen Frequenzbereich verstärkt Lärmemissionen mit hohen Schalldruckpegeln erzeugen werden, besteht die Notwendigkeit, die derzeitige Kabinenwandkonstruktion so zu verbessern, dass der Komfortstandard für Passagiere weiterhin gewährleistet bleibt [13].

Mechanismen der Schwingungsdämpfung und -isolation

Schwingungsdämpfung und Schwingungsisolation sind zwei wesentliche Ansätze zur Kontrolle unerwünschter Vibrationen in mechanischen Systemen. Beide Mechanismen haben unterschiedliche Funktionen und Wirkungsweisen, die im Design von Vibrationskontrollsystemen sorgfältig berücksichtigt werden müssen [45]. Schwingungsisolation zielt darauf ab, die Übertragung von Vibrationen von einer Quelle auf eine Struktur zu minimieren. Dies wird durch die Verwendung von Isolationselementen erreicht, die eine flexible Verbindung zwischen den Komponenten schaffen. Diese Elemente, oft elastomere Materialien, verringern die Übertragung von Energie durch ihre Fähigkeit, sich unter Last zu verformen. Ein gut ausgelegtes Isolationssystem hat eine niedrige Eigenfrequenz, was bedeutet, dass es in der Lage ist, Vibrationen bei höheren Anregungsfrequenzen effektiv zu isolieren. Dies verhindert, dass Vibrationen, die von Maschinen wie Motoren oder Pumpen erzeugt werden, auf angrenzende Strukturen übertragen werden, wo sie als unerwünschter Lärm oder Vibrationen auftreten könnten [45]. In der Luftfahrt wird beispielsweise die Schwingungsisolation durch spezielle Motorhalterungen erreicht, die Vibrationen reduzieren, die sonst durch die Flugzeugstruktur übertragen würden. Diese Halterungen müssen nicht nur die Vibrationen effektiv isolieren, sondern auch die notwendige strukturelle Unterstützung gewährleisten [25]. Ein wichtiger Parameter bei der Schwingungsisolation ist das Isolierungsverhältnis, das das Verhältnis der in das System eintretenden Energie zur aus dem System austretenden Energie beschreibt. In einem idealen Isolationssystem ist die Schwingungsisolierung bei Frequenzen oberhalb der Eigenfrequenz klein, was bedeutet, dass die Isolationseffizienz hoch ist. Allerdings kann eine unzureichend gedämpfte Isolationsvorrichtung bei Resonanzfrequenzen eine Verstärkung der Vibrationen bewirken, was zu erhöhten Belastungen und möglichen Schäden an den Strukturen führen kann [25, 45].

In Abbildung 11 ist die Isolationsfähigkeit in Abhängigkeit vom Frequenzverhältnis dargestellt. Der Graph zeigt die komplexe Beziehung zwischen Dämpfung und Isolation. Bei niedriger Dämpfung (z.B. Gummi oder Silikon) steigt Übertragungsgrad bei der Resonanzfrequenz (Punkt B) stark an, was zu einer erheblichen Verstärkung der Schwingungen führt. Oberhalb der Resonanzfrequenz, im sogenannten Isolationbereich (D), bietet jedoch das System eine gute Isolation. Bei hoher Dämpfung (z.B. E-A-R C-1002) ist die Übertragungsfaktor bei Resonanz

deutlich reduziert, wodurch die Schwingungsverstärkung gemildert wird. Allerdings geht dies zulasten der Isolationseffizienz bei höheren Frequenzen, da das System insgesamt steifer wird und weniger effektiv Vibrationen isolieren kann. Dies verdeutlicht den unvermeidlichen Kompromiss zwischen Dämpfung und Isolation, der bei der Gestaltung von Vibrationskontrollsystemen sorgfältig abgewogen werden muss. [45]

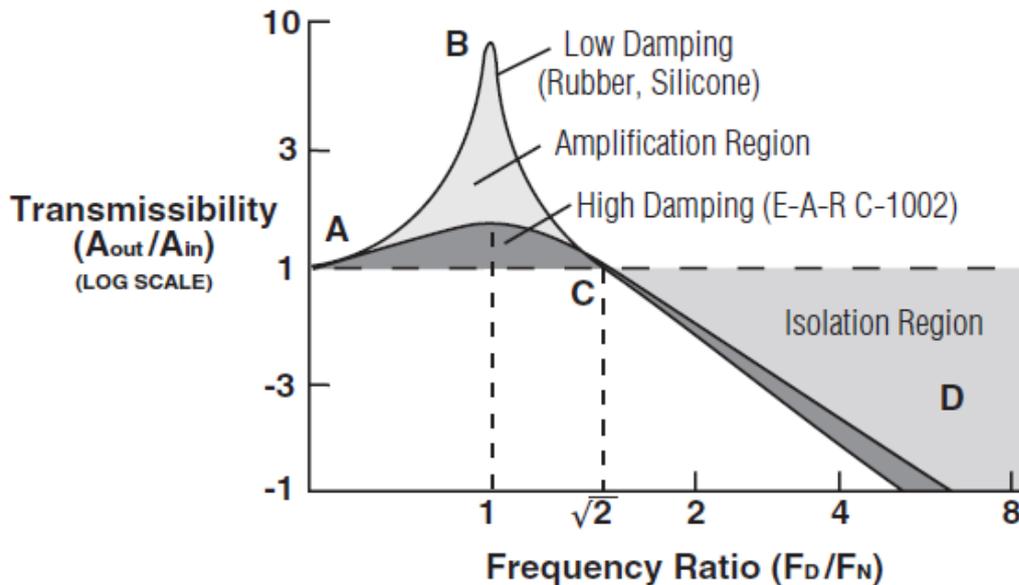


Abbildung 11: Schematische Darstellung Übertragungsgrad [45]

Schwingungsdämpfung hingegen konzentriert sich auf die Reduzierung der Amplitude von Schwingungen, indem die Vibrationsenergie in andere Energieformen, meist Wärme, umgewandelt wird. Dies wird durch das Hinzufügen von Dämpfungselementen erreicht, die die Energie absorbieren und zerstreuen. Ein gängiger Mechanismus der Dämpfung ist die hysteretische Dämpfung, die in elastomeren Materialien vorkommt. Hierbei verursacht die innere Reibung innerhalb des Materials Energieverluste, die als Wärme abgeführt werden. Der Verlustfaktor eines Materials, der das Verhältnis der dissipierten Energie zur gespeicherten Energie pro Schwingungszyklus beschreibt, ist ein Schlüsselindikator für die Dämpfungsfähigkeit des Materials [45]. In diesem Zusammenhang sind Elastomere besonders geeignet, da sie so entwickelt werden können, dass ihre Dämpfungseigenschaften den spezifischen Anforderungen einer Anwendung entsprechen. Die Wahl des richtigen Elastomers, basierend auf Faktoren wie dem Young'schen Modul und der internen Dämpfung, ist entscheidend für die Leistungsfähigkeit des Dämpfungssystems [46].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Kombination von Schwingungsdämpfung und -isolation oft notwendig ist, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Ein Isolationssystem ohne ausreichende Dämpfung kann bei Resonanzfrequenzen unerwünschte Verstärkungen aufweisen, während ein gut gedämpftes System in der Lage ist, sowohl Schwingungen zu

reduzieren als auch die Übertragung von Vibrationsenergie auf andere Strukturen zu minimieren [25] [45] [46].

2.2.4 Notwendigkeit der Entwicklung eines realitätsnahen Umweltsimulationsregelkreises zur Nachbildung der Kabinenakustik in Verkehrsflugzeugen

In vielen der zuvor beschriebenen Forschungsarbeiten, sei es in Komfortstudien oder Untersuchungen zu den erläuterten Lärminderungsmaßnahmen, werden die Untersuchungen häufig mit einem standardisierten weißen Rauschsignal durchgeführt. Dieses weiße Rauschen dient dabei als Simulationssignal für den Schalleintrag in Versuchsaufbauten. Allerdings entspricht dieses Rauschen nicht den real auftretenden Akustikprofilen, deren Frequenzzusammensetzung und tatsächlichem Schalleintrag. Dadurch basieren viele dieser Untersuchungen auf idealisierten Zuständen, die die komplexen akustischen Verhältnisse in Flugzeugkabinen nicht adäquat widerspiegeln. Die in Kapitel 2.2 dargestellten vielfältigen Geräuschquellen und Übertragungswege, wie das Antriebssystem, die externe aerodynamische Strömung und die Bordausrüstung, tragen in unterschiedlichen Flugphasen und Kabinenbereichen zu variierenden Schalldruckpegeln und Frequenzspektren bei. Beispielsweise dominiert im vorderen Kabinenbereich während des Reiseflugs der breitbandige Grenzsichtlärm, während im hinteren Bereich der Triebwerkslärm einen größeren Einfluss hat. Diese komplexen und dynamischen akustischen Bedingungen können durch ein einfaches weißes Rauschsignal nicht angemessen simuliert werden.

Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit, einen Umweltsimulationsregelkreis zu entwickeln, der es ermöglicht, das Anregungssignal für verschiedenste Untersuchungen so zu gestalten, dass es den echten Flugzuständen gleicht und dem realen Schalleintrag entspricht. Dies ist essenziell, um realitätsnähere und präzisere Ergebnisse zu erzielen und fundierte Aussagen über den Einfluss von Lärm auf den Komfort und die Wirksamkeit von Lärminderungsmaßnahmen treffen zu können.

Im Folgenden werden daher die Ergebnisse einer umfassenden Literaturrecherche präsentiert, die verschiedene Regelungsalgorithmen und Verfahren analysiert, welche sich mit der Nachbildung des akustischen Umfelds in Flugzeugkabinen beschäftigen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird eine Auswahl getroffen und schließlich ein geeigneter Regelalgorithmus entwickelt, der im Laborumfeld getestet wird. Durch die Integration dieses Regelkreises in experimentelle Untersuchungen können die in realen Flugbedingungen auftretenden akustischen Phänomene detailliert nachgebildet werden, was zu einer verbesserten Validierung von Lärminderungsstrategien und einem tieferen Verständnis der Kabinenakustik führt.

Die Entwicklung eines solchen Umweltsimulationsregelkreises ist daher von entscheidender Bedeutung, um die Diskrepanz zwischen idealisierten Laborbedingungen und der komplexen Realität in Flugzeugkabinen zu überbrücken. Sie ermöglicht es, die akustischen Eigenschaften unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen und gleichzeitig die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Dies trägt letztendlich zur Verbesserung des Passagierkomforts und zur Weiterentwicklung effektiver Lärminderungsmaßnahmen in der Luftfahrt bei.

2.3 Grundlagen der akustischen Umweltsimulation - Reproduktion des akustischen Umfelds in Verkehrsmitteln: Methoden, Technologien und Validierungsansätze

Sound Field Control (SFC) Technologie ermöglichen eine aktive Steuerung von Audiosignalen innerhalb eines akustischen Schallfeldes. Sie umfasst dabei drei wesentliche Forschungsbereiche: die Schallfeldreproduktion (sound field reproduction), personalisierte Audiosysteme (personal audio system) und die aktive Lärmkontrolle (active noise control) und -methoden. Die Schallfeldreproduktion verwendet Lautsprecherarrays, um ein Schallfeld in einem definierten Zielbereich nachzubilden. Personalisierte Audiosysteme erweitern diesen Ansatz, indem sie mehrere Bereiche gleichzeitig abdecken, sodass unterschiedliche Zuhörer in einem gemeinsamen Raum individuelle Audioinhalte hören können. Die aktive Lärmkontrolle verfolgt das Ziel, das ursprüngliche Schallfeld durch die Erzeugung eines sekundären Schallfeldes im Zielbereich zu unterdrücken [47]. Während personalisierte Audiosysteme und aktive Lärmkontrolle interessante Ansätze darstellen, erweisen sie sich für das vorliegende Vorhaben als weniger relevant. Der nachfolgende Teil dieser Arbeit widmet sich zunächst der Schallfeldreproduktion, da sie eine präzise Nachbildung eines definierten Schallfeldes ermöglicht und für die Reproduktion von Kabinenakustik besonders geeignet scheint. In den darauffolgenden Kapiteln werden zudem weitere Verfahren, wie der Time Waveform Replication (TWR)-Prozess sowie die SISO- und MIMO-Random Vibration Control Algorithmen, detailliert vorgestellt, da diese in früheren Forschungsarbeiten erfolgreich in Experimenten zur Nachbildung von Schallfeldern eingesetzt wurden.

2.3.1 Sound Field Reproduction:

Die Schallfeldreproduktion ermöglicht es, ein akustisches Umfeld zu schaffen, das dem realen Schallfeld in Transportmitteln nachempfunden ist. Dadurch können Versuchspersonen akustische Effekte bzw. Ereignisse sowie die Klangqualität realitätsnah beurteilen. Zusätzlich bietet die erzeugte akustische Umgebung eine wertvolle Grundlage für die Entwicklung und Erprobung von Lärminderungsmaßnahmen, die unter anderem in Kapitel 2.2.3 näher erläutert werden. [48]

In der wissenschaftlichen Literatur werden drei Hauptkategorien von Methoden zur Schallfeldreproduktion unterschieden und untersucht. Die erste Kategorie basiert auf dem Huygensschen Prinzip, bei dem das Schallfeld im Zielbereich durch die Reproduktion des Schalldrucks und der Schallschnelle an den Grenzflächen erzeugt wird [48][49]. Das Huygenssche Prinzip besagt, dass jede beliebige Schallabstrahlung durch das Integral von Punktquellen auf der Oberfläche der Schallquelle beschrieben werden kann. Jeder Punkt auf einer Wellenfront wird dabei als Ausgangspunkt einer Elementarwelle angesehen. Die

Überlagerung dieser Elementarwellen erzeugt die fortschreitende Wellenfront. Dieses Prinzip bildet die theoretische Grundlage der Wellenfeldsynthese (Wave Field Synthesis, WFS), die zur Nachbildung komplexer Schallfelder eingesetzt wird [49]. WFS basiert zudem auf dem Helmholtz-Rayleigh-Integral und kann mathematisch präzise durch die Kirchhoff-Helmholtz-Integralgleichung beschrieben werden [50]. Diese Methode ermöglicht eine dreidimensionale akustische Wahrnehmung, da sie in der Lage ist, Schallquellen an beliebigen Positionen im Raum realistisch abzubilden [50]. Allerdings treten oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz Aliasing-Effekte auf, welche die Genauigkeit der Schallfeldreproduktion beeinträchtigen können [50][51]. Des Weiteren sind derzeit keine vollständig ausgereiften Mikrofonanordnungen verfügbar, die für die optimale Anwendung der WFS geeignet sind [50]. In der Praxis erweist sich die vollständige Umsetzung des theoretischen Ansatzes als technisch schwierig, da eine unendliche Anzahl von Lautsprechern mit unendlich kleinen Abständen benötigt würde [49]. Um diese Herausforderung zu bewältigen, wird die Anzahl der Lautsprecher in realen Anwendungen reduziert, was jedoch zu Aliasing-Fehlern und Truncation-Effekten führen kann. [49] [51]

Die zweite Kategorie beruht auf dem Modenabgleich-Verfahren, wie es bei der Ambisonics-Methode angewendet wird. Hierbei wird das Schallfeld mithilfe von Basisfunktionen in Kugelkoordinaten bzw. räumlichen Polarkoordinaten sowie deren entsprechenden Koeffizienten beschrieben. Die Steuerungssignale der sekundären Schallquellen werden durch Minimierung der Differenz der Modenkoeffizienten zwischen dem ursprünglichen und dem nachgebildeten Schallfeld berechnet [48]. Ambisonics (HOA) basiert auf der Idee, das Schallfeld aus einer Vielzahl von ebenen Schallwellen zu synthetisieren, die aus allen möglichen Richtungen auf einen bestimmten Punkt treffen. Dieses Schallfeld wird durch orthogonale Kugelflächenfunktionen n -ter Ordnung beschrieben, was eine präzise Nachbildung der akustischen Umgebung ermöglicht. In der Praxis arbeiten Ambisonics-Systeme jedoch mit einer begrenzten Anzahl von Kanälen, wobei die Anzahl der Kanäle direkt von der Ordnung des Systems abhängt. Je höher die Ordnung, desto genauer kann das Schallfeld lokalisiert werden, wobei die Lokalisationsunschärfe durch eine höhere Kanalanzahl reduziert wird. [50]

Die HOA- als auch die WFS-Methoden sind in der Lage, das gewünschte Schallfeld sowohl an einem einzelnen Punkt als auch in einem größeren Bereich zu erzeugen, erfordern jedoch eine beträchtliche Anzahl an Lautsprechern. Zudem stellt die HOA-Methode spezifische Anforderungen an den Aufbau des Lautsprecherarrays, wie etwa die Verwendung von kugelförmigen Lautsprecheranordnungen um das Zielgebiet. Im Gegensatz dazu stellt die dritte Kategorie, die Pressure Matching Methode (PM-Methode), keine besonderen Anforderungen an die Anzahl oder die Anordnung der Schallquellen. Obwohl die PM-Methode im Vergleich zu WFS und HOA lediglich den Schalldruck an ausgewählten Kontrollpunkten reproduziert, bietet sie eine höhere Praxistauglichkeit durch ihre vereinfachte Handhabung [47]. Daher wird im Folgenden der

Fokus auf den PM-Prozess gelegt, der näher untersucht und detailliert beschrieben wird, um seine Vorteile und Einsatzmöglichkeiten umfassend zu beleuchten.

Prozessbeschreibung

Wie in Abbildung 12 dargestellt, sind mehrere Zielpunkte im Reproduktionsbereich angeordnet. Der Schalldruck dieser Zielpunkte wird im primären Schallfeld gemessen und dient dabei als Reproduktionsziel. Um den Zielbereich herum werden Schallquellen positioniert, die entweder Lautsprecher oder Shaker sein können. Shaker regen Strukturen zur Schallerzeugung an, jedoch sind Lautsprecher vorzuziehen, da bei Shakern die Schalleigenschaften stark mit der Struktur gekoppelt sind und somit weniger präzise gesteuert werden können.

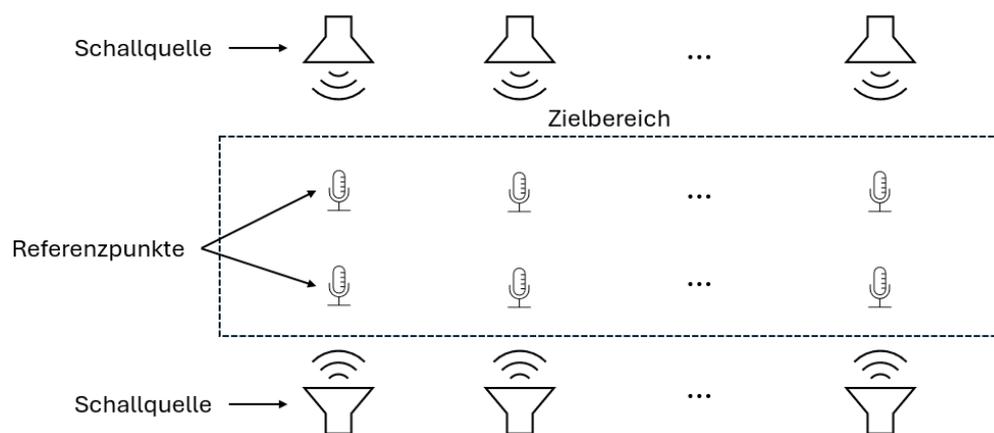


Abbildung 12: Prinzipskizze Sound Field Reproduction in Anlehnung an [48]

Für ein lineares und zeitinvariantes System, also ein System, dessen Verhalten und Eigenschaften sich nicht mit der Zeit ändern, lässt sich die Beziehung zwischen der Ansteuerung der Schallquellen und dem Schalldruck an den Zielpunkten im Frequenzbereich beschreiben. Ein zeitinvariantes System zeichnet sich dadurch aus, dass die Reaktion auf ein bestimmtes Eingangssignal immer gleich bleibt, unabhängig davon, wann das Signal auf das System angewendet wird. Dies ermöglicht eine konsistente und verlässliche Modellierung des Systems über verschiedene Zeitpunkte hinweg. Die Beziehung zwischen den Schallquellen und dem Schalldruck an den Zielpunkten lässt sich mathematisch wie folgt ausdrücken:

$$P(f) = G(f)S(f) \quad (3.1)$$

Dabei ist f die Frequenz, die aus Gründen der Übersichtlichkeit im weiteren Verlauf weggelassen wird. P ist ein Vektor der Größe $M \times 1$, der den Schalldruck an den Zielpunkten enthält, die als Reproduktionsziele festgelegt werden. M ist die Anzahl der Zielpunkte. S ist ein Vektor der Größe $N \times 1$, der die Ansteuerungen der Schallquellen repräsentiert. N beschreibt die Anzahl der Schallquellen, und G ist eine Matrix der Übertragungsfunktionen der Größe $M \times N$. In den

meisten Fällen besitzt die Matrix der Übertragungsfunktionen G einen vollen Rang. Abhängig von der Beziehung zwischen M und N ergeben sich unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten für die Gleichung:

- Falls $M = N$, hat die Gleichung eine exakte Lösung.
- Falls $M > N$, hat die Gleichung die Lösung der kleinsten Quadrate (Least-Square).
- Falls $M < N$, gibt es unendlich viele Lösungen, und die allgemeine Lösung lautet:

$$S = G^+P + (I - G^+G)Y \quad (3.2)$$

Dabei ist G^+ die Moore-Penrose-Pseudoinverse von G welche in einem späteren Absatz näher erläutert wird. und Y ist ein beliebiger Vektor der Größe $N \times 1$.

In der Literatur wird häufig der Fall $M > N$ untersucht. Dieser wird als Optimierungsproblem behandelt, bei dem Nebenbedingungen wie die Anzahl der Lautsprecher, die maximale Leistung und die Gesamtleistung eingeführt werden. Der Reproduktionsfehler wird dabei durch Methoden wie Least-Square (LS), Lasso oder Lasso-LS minimiert.

Wenn $M < N$, hat die Gleichung (1) unendlich viele Lösungen, unter denen die Ansteuerungen der Schallquellen beliebig gewählt werden können, um die Reproduktionsanforderungen genau zu erfüllen. Bei der Messung der Übertragungsfunktionsmatrix G sind jedoch Messfehler unvermeidlich. Außerdem kann sich die reale Übertragungsfunktion in Abhängigkeit von der Umgebung ändern. Um den Einfluss von Fehlern in G auf das Reproduktionsergebnis zu minimieren, sollte ein sorgfältiges Testprozedere implementiert werden.

Angenommen, die reale Übertragungsfunktion ist \hat{G} , und ihre Beziehung zu G wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\hat{G} = G + \Delta G \quad (3.3)$$

wobei ΔG den Messfehler darstellt.

In Gleichung (3.2) wird der Ansteuerungsvektor S mit der gemessenen Übertragungsfunktion berechnet. Wenn er auf das reale System angewendet wird, ist der Schalldruck an den Zielpunkten:

$$\hat{P} = \hat{G}S \quad (3.4)$$

Der Unterschied zwischen dem realen Schallfeld und dem gewünschten Schallfeld lautet somit:

$$\Delta P = \Delta G S \quad (3.5)$$

Die Elemente in ΔP sollten reduziert werden. Die 2-Norm (Euklidische Norm) ist dabei ein Maß für die Länge eines Vektors und kann verwendet werden, um die Reproduktionsgenauigkeit zu bewerten. Um die Abweichung ΔP zu minimieren, wird vorgeschlagen, die minimalen 2-Norm-Lösungen zu verwenden, die durch die Moore-Penrose-Pseudoinverse G^+ beschrieben werden. Während diese Methode für eine zufällige Störung ΔG nicht immer die optimale Lösung sein muss, sorgt sie im Durchschnitt für die geringste Abweichung zwischen dem realen und dem gewünschten Schallfeld.

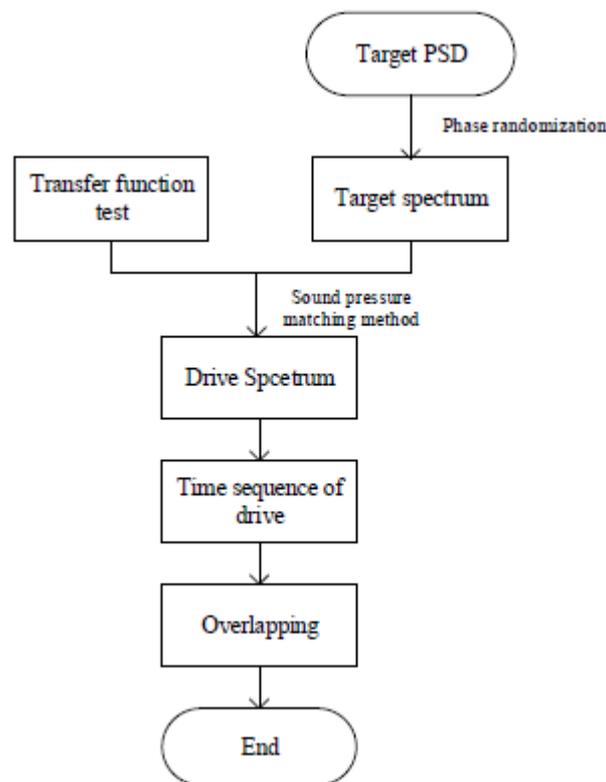


Abbildung 13: Ablaufdiagramm Sound Field Reproduction [48]

1. Übertragungsfunktionstest: Im ersten Schritt wird die Übertragungsfunktion $G(m,n)$ zwischen der Ansteuerung jeder Schallquelle und dem resultierenden Schalldruck an den Zielpunkten gemessen. Diese Übertragungsfunktion bildet die Grundlage für die Berechnung des Ansteuerspektrums. Es wird empfohlen, mehr Schallquellen als Zielpunkte zu haben, um eine bessere Kontrolle über das Schallfeld zu gewährleisten. Die Übertragungsfunktion wird über das Verhältnis des Autoleistungsspektrums des Schalldrucks und des Kreuzleistungsspektrums der Ansteuerung berechnet:

$$G(m,n) = \frac{S_{p,pm}}{S_{up}} \quad (3.6)$$

Hierbei beschreibt S_{p,p_m} das Autoleistungsspektrum des Schalldrucks am m -ten Zielpunkt und S_{u_p} das Kreuzleistungsspektrum zwischen dem Schalldruck am m -ten Zielpunkt und der Ansteuerung der n -ten Schallquelle.

2. Berechnung des Zielspektrums: Das Zielschallfeld wird durch das Leistungsdichtespektrum (PSD) der Zielpunkte beschrieben, das die gewünschte Schalldruckverteilung an den Zielpunkten darstellt. Da das Schallfeld oft durch Rauschen charakterisiert ist, muss das PSD-Spektrum durch Hinzufügen zufälliger Phasen in das Fourier-Spektrum umgewandelt werden:

$$|P(m)| = \sqrt{S_m \Delta f} \quad (3.7)$$

Hierbei ist S_m das Ziel-PSD am m -ten Zielpunkt und Δf die Frequenzauflösung. Um die Phaseninformation zu berücksichtigen, wird eine zufällige Phase φ hinzugefügt:

$$P(m) = |P(m)| e^{j\varphi} \quad (3.8)$$

φ ist hierbei gleichmäßig zwischen $-\pi$ und π verteilt.

3. Berechnung des Ansteuerspektrums: Das Ansteuerspektrum S wird mithilfe der Sound Pressure Matching-Methode berechnet, basierend auf der bereits bestimmten Übertragungsfunktion G . Die Berechnung erfolgt durch Anwendung der Moore-Penrose-Pseudoinversen:

$$S = G^+ P \quad (3.9)$$

Die Ansteuerungen der Schallquellen S werden so berechnet, dass das Zielspektrum P an den Zielpunkten erreicht wird. Wenn die berechneten Ansteuerungen für einige Schallquellen zu hoch sind, können sie skaliert werden, um in den Leistungsbereich der Lautsprecher zu passen. Diese Anpassungen werden vorgenommen, um sicherzustellen, dass der resultierende Schalldruckpegel möglichst nahe am gewünschten Zielspektrum liegt. Sollte eine Anpassung erforderlich sein, wird der Prozess der Berechnung und Anpassung iterativ wiederholt, bis die gewünschten Pegel erreicht werden.

4. Zeitsequenz der Ansteuerung: Das berechnete Ansteuerspektrum wird durch inverse Fourier-Transformation in ein Zeitsignal umgewandelt. Die Dauer dieses Zeitsignals hängt von der Frequenzauflösung Δf ab und wird durch folgende Formel berechnet:

$$T = \frac{1}{\Delta f} \quad (3.10)$$

Dieser Schritt erfolgt auf der Basis der Anpassung des Ansteuerspektrums, um sicherzustellen, dass die Schallquellen die gewünschten Schalldruckpegel an den Zielpunkten erzeugen.

5. Fensterung und Überlappung: Ein einzelner Frame des Zeitsignals ist oft nicht ausreichend, um die Schallfeldreproduktion in der Praxis zu realisieren. Daher werden mehrere Zeitsequenzen erzeugt und überlappend kombiniert, um ein langes Ansteuersignal zu erstellen. Um Abrisse an den Verbindungsstellen zu vermeiden, wird eine Fensterfunktion $w(t)$ verwendet. Es wird ein halbes Sinusfenster empfohlen:

$$w(t) = \begin{cases} \sin \pi \frac{t}{T} & 0 \leq t \leq T \\ 0 & t > T, t < 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Die Fensterungen werden überlappend angewendet, um eine kontinuierliche Signalfolge ohne Sprünge oder Artefakte zu erzeugen.

Der gesamte Prozess hat einen iterativen Charakter, da die Ansteuerungen wiederholt berechnet und angepasst werden, bis der gewünschte Schalldruck an den Zielpunkten erreicht wird. In jedem Schritt wird das Ansteuerspektrum neu berechnet und, wenn nötig, skaliert, um den physikalischen Begrenzungen der verwendeten Lautsprecher gerecht zu werden. Dieser Prozess wird fortgesetzt, bis die optimale Übereinstimmung zwischen dem realen und dem gewünschten Schallfeld erreicht ist. [48]

Der zuvor vorgestellte Pressure Matching Open-Loop-Prozess stellt eine vereinfachte Version des Sound Field Reproduction (SFR)-Prozesses dar. Diese Methode bietet eine effektive und praxisnahe Lösung zur Schallfeldreproduktion, wobei insbesondere die einfache Handhabung und Umsetzung im Vordergrund steht. In der Praxis werden jedoch häufig komplexere Ansätze und Methoden verwendet, um spezifische Anforderungen an die Schallfeldreproduktion zu erfüllen. Im Folgenden werden Auszüge aus verschiedenen Forschungsarbeiten zusammengefasst, die den SFR-Prozess erfolgreich eingesetzt haben, um ein gewünschtes Schallfeld präzise zu reproduzieren. Diese Arbeiten illustrieren verschiedene Ansätze und Vorgehensweisen, die über den simplen Pressure Matching Prozess hinausgehen, und zeigen auf, wie durch den Einsatz fortschrittlicher Methoden in unterschiedlichen Anwendungen realistische Schallfelder erzeugt werden können.

Wissenschaftliche Arbeiten

In der Arbeit von Liu et al. [52] wird ein Sound Field Reproduction (SFR)-System innerhalb eines Flugzeug-Mockups entwickelt und untersucht, um Active Noise Cancelling (ANC)-Geräte unter realistischen Bedingungen zu evaluieren. Der SFR-Algorithmus basiert auf einem Multikanal Least-Mean-Square (LMS)-Ansatz, der in Kombination mit einem Feedback-Kontrollmechanismus eingesetzt wird, um ein präzises akustisches Feld zu erzeugen, das die Geräuschbedingungen in einer echten Flugzeugkabine nachbildet. Der Algorithmus wird speziell modifiziert, um die Reproduktionsgenauigkeit an den Zielpunkten zu erhöhen. Durch die Implementierung zusätzlicher Rückkopplungskontrollen werden Fehler in der Reproduktion minimiert. Eine wichtige Ergänzung ist die Verwendung der Tikhonov-Regularisierung, um die Ill-Conditioned-Probleme des Systems zu beheben. Solche Probleme entstehen, wenn kleine Fehler in den Eingabedaten zu großen Abweichungen in den Ergebnissen führen, was die Stabilität des Systems beeinträchtigt. Um diese Instabilität zu vermeiden, wird ein frequenzabhängiger Regularisierungsparameter genutzt, der die Reproduktionsgenauigkeit weiter steigert. Der Algorithmus wird in einem realitätsnahen Flugzeug-Mockup getestet, das mit Sitzen, Gepäckfächern und Fenstern ausgestattet ist, um eine realistische Umgebung zu simulieren. Zur Schallfeldreproduktion werden 32 Mikrofone im Mockup platziert, die zuvor in einem echten Flugzeug aufgenommene Geräuschdaten verwenden. Darüber hinaus kommen 27 Lautsprecher zum Einsatz, um das gewünschte Schallfeld nachzubilden. Das zentrale Ziel dieser Studie besteht darin, ein realistisches Schallfeld zu erzeugen, das den akustischen Bedingungen in einem Passagierflugzeug möglichst genau entspricht. Dadurch soll die Evaluierung von ANC-Geräten, wie Kopfhörern oder Ohrstöpseln, unter realistischen Bedingungen ermöglicht werden. Eine der größten Herausforderungen liegt dabei in der exakten Reproduktion des komplexen Schallfeldes, das durch Schallreflexionen und stehende Wellen beeinflusst wird. Dennoch zeigt die Studie, dass der modifizierte SFR-Algorithmus dank der Echtzeit-Feedbackkontrolle das Zielschallfeld mit hoher Genauigkeit reproduzieren kann. Durch iterative Anpassungen wird der Reproduktionsfehler bei den meisten Mikrofonen auf weniger als 3 dB reduziert, was eine präzise Schallfeldreproduktion ermöglicht und die Evaluierung der ANC-Geräte effektiv unterstützt.

Die Arbeiten von Gauthier et al. zwischen 2012 und 2016 fokussierten sich auf die Entwicklung und Verbesserung eines Regelalgorithmus zur Schallfeldreproduktion (SFR) innerhalb eines Flugzeugnachbaus. Ziel war es, ein realistisches Schallfeld zu erzeugen, das den akustischen Bedingungen in einer echten Flugzeugkabine entspricht. Im Folgenden wird die schrittweise Entwicklung des Algorithmus und die Evolution des experimentellen Aufbaus in chronologischer Reihenfolge dargestellt.

In ihrer ersten Studie präsentierten Gauthier et al. (2012) [53] einen multikanaligen Least-Squares-Ansatz zur Schallfeldreproduktion innerhalb eines Flugzeugnachbaus basierend auf

dem Modell einer Bombardier CRJ1000-Kabine. Der experimentelle Aufbau umfasste 36 Vibrationsaktuatoren, die an den Verkleidungspaneelen der Wände und des Bodens montiert waren, sowie einen Subwoofer zur Tieftonwiedergabe. Ein Mikrofonarray mit 80 Mikrofonen in zwei horizontalen Schichten wurde eingesetzt, um das Schallfeld zu messen und die Reproduktionsergebnisse zu evaluieren. Der Regelalgorithmus nutzte die Tikhonov-Regularisierung, um die Stabilität der Inversion zu gewährleisten und eine übermäßige Dynamik der Ausgangssignale zu verhindern, die zu Verzerrungen führen könnte. Zudem wurde ein Korrekturprozess implementiert, der die Frequenzgangfunktionen (FRFs) der Schallwandler und die akustischen Eigenschaften der Kabine kompensierte, um die Schallfeldreproduktion zu verbessern. Das Hauptziel dieser Studie war es, ein Zielschallfeld innerhalb des Kabinenmodells nachzubilden, um typische Flugzeuggeräusche zu simulieren und Analysen zur Schallqualität und zum Komfort durchzuführen. Die Ergebnisse zeigten eine zufriedenstellende Reproduktion im mittleren und hohen Frequenzbereich, während im Tieffrequenzbereich Einschränkungen auftraten, bedingt durch die begrenzte Anzahl von Schallquellen und die strukturellen Eigenschaften der Kabinenpaneele.

In der Folgearbeit von 2013 erweiterten Gauthier et al. [54] ihren Ansatz durch die Verwendung realer In-Flight-Aufnahmen aus einer Bombardier CRJ900, um das Zielschallfeld zu definieren. Dies stellte einen signifikanten Fortschritt dar, da nun authentische Fluggeräusche reproduziert wurden. Der experimentelle Aufbau blieb weitgehend unverändert, jedoch wurde die Crossover-Frequenz optimiert. Ein 4. Ordnung Butterworth-Filter mit einer Crossover-Frequenz von 140 Hz wurde implementiert, um Verzerrungen durch tieffrequente Vibrationen der Verkleidungspaneele zu reduzieren. Der Regelalgorithmus wurde durch eine feinere Abstimmung der Tikhonov-Regularisierung verbessert. Die Regularisierungsparameter λ wurden dabei gezielt getestet, um eine optimale Balance zwischen der Reduzierung des Reproduktionsfehlers und der Minimierung von Verzerrungen zu erreichen. Für hohe Frequenzen erwies sich ein λ von 0,1 und für niedrige Frequenzen ein λ von 0,01 als optimal. Das Ziel dieser Studie war es weiterhin, ein realistisches Schallfeld innerhalb des Kabinenmodells zu erzeugen, nun jedoch mit dem Fokus auf der Reproduktion echter Fluggeräusche, um die akustischen Bedingungen im Flugzeug genauer zu simulieren.

In der Arbeit von 2015 führen Gauthier et al. [55] die normierte Tikhonov-Regularisierung ein, um die Auswahl des Regularisierungsparameters zu vereinfachen und eine frequenzabhängige Anpassung zu ermöglichen. Diese Neuerung ermöglichte eine adaptive Steuerung der Regularisierung, wodurch die Reproduktionsgenauigkeit über das gesamte Frequenzspektrum verbessert wurde. Zudem wurde eine Methode der akustischen Bildgebung mittels Fokus-Beamforming eingeführt. Diese Technik erlaubte es, die räumliche Verteilung der Schallquellen innerhalb des Kabinenmodells zu visualisieren und die Unterschiede zwischen dem Ziel- und dem

reproduzierten Schallfeld detailliert zu analysieren. Der experimentelle Aufbau wurde durch verbesserte Kalibrierungsmethoden und eine präzisere Mikrofonanordnung weiterentwickelt. Die Anzahl der Aktuatoren blieb bei 41, und die Mikrofonarray-Konfiguration mit 80 Mikrofonen wurde beibehalten, jedoch für genauere Messungen optimiert.

In ihrer letzten Arbeit von 2016 konzentrieren sich Gauthier et al. [56] auf die frequentielle Anpassung der Regularisierungsparameter innerhalb des Regelalgorithmus. Durch die dynamische Anpassung des Regularisierungsparameters λ an die Frequenzbereiche konnten Reproduktionsfehler minimiert und die Stabilität der Inversion über das gesamte Frequenzspektrum hinweg verbessert werden. Der experimentelle Aufbau wurde durch eine erhebliche Erhöhung der gemessenen Übertragungsfunktionen erweitert. Insgesamt wurden 3280 Übertragungsfunktionen zwischen den 80 Mikrofonen und 41 Aktuatoren gemessen, was zu einer genaueren Modellierung des Systems führte. Die Pseudoinverse wurde für theoretische Vergleiche untersucht, erwies sich jedoch in der Praxis als unpraktikabel aufgrund der hohen dynamischen Anforderungen des Systems. Die frequentielle Tikhonov-Regularisierung hingegen ermöglichte eine signifikante Verbesserung der Schallfeldreproduktion, insbesondere im Tieffrequenzbereich, wo vorherige Studien Schwierigkeiten aufwiesen.

Über die Jahre hinweg entwickelten Gauthier et al. den Regelalgorithmus zur Schallfeldreproduktion kontinuierlich weiter:

- 2012: Einführung des multikanaligen Least-Squares-Ansatzes mit statischer Tikhonov-Regularisierung zur Stabilisierung der Inversion und Vermeidung von Verzerrungen.
- 2013: Verfeinerung der Regularisierungsparameter und Optimierung der Crossover-Frequenz zur Verbesserung der Reproduktionsgenauigkeit unter Verwendung realer Flugaufnahmen.
- 2015: Einführung der normierten Tikhonov-Regularisierung und akustischer Bildgebung, was eine adaptive Steuerung der Regularisierung und eine detaillierte räumliche Analyse des Schallfeldes ermöglichte.
- 2016: Implementierung der frequentiellen Anpassung der Regularisierungsparameter, wodurch die Reproduktionsgenauigkeit weiter gesteigert und die Stabilität des Systems über das gesamte Frequenzspektrum verbessert wurde.

Diese schrittweisen Verbesserungen führten zu einer erheblich verbesserten Schallfeldreproduktion innerhalb des Flugzeugnachbaus. Durch die Anpassung und Verfeinerung der Regularisierungsverfahren konnten die räumlichen, zeitlichen und spektralen Eigenschaften realer Fluggeräusche immer präziser nachgebildet werden. Die Arbeiten von Gauthier et al.

leisten somit einen bedeutenden Beitrag zur Forschung im Bereich der Schallfeldreproduktion und bieten wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Entwicklungen in der akustischen Simulation von Innenräumen.

2.3.2 Time Waveform Reproduction (TWR):

Time Waveform Replication (TWR) gilt als ein state-of-the-art-Verfahren, das insbesondere für die umweltnahen Replikation auf hydraulischen Vibrations-Testständen verwendet wird, um reale Lasten präzise zu simulieren, wie sie beispielsweise in Fahrzeugen auftreten [57]. TWR bietet die Möglichkeit, unterschiedlichste Umweltbedingungen zu simulieren, wobei eine Vielzahl von Last-Zeitverläufen nachgebildet werden können. Dazu gehören stationäre, zufällige Zeitverläufe (gaußsche und nicht-gaußsche), kurzzeitige Stoßanregungen, nichtstationäre Zeitverläufe mit variabler Amplitude und Frequenz sowie nichtlineare Zeitverläufe [58][59]. Diese Flexibilität macht TWR besonders geeignet für die Nachbildung komplexer Bewegungen und auch von Schallfeldern in Mehrkanalsystemen. [60]

Das Hauptziel von TWR besteht darin, den Last-Zeitverlauf eines Steuersignals nachzubilden, um reale Einsatzbedingungen im Labor zu simulieren. Diese Methode spielt eine entscheidende Rolle bei der Prüfung von Strukturen, Bauteilen und Systemen, die unterschiedlichsten Lasten ausgesetzt sind [58][61].

TWR findet in verschiedenen Industrien, wie der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie und der Militärtechnik, Anwendung. Sie wird genutzt, um sicherzustellen, dass die zu prüfenden Komponenten den strukturellen und funktionalen Anforderungen des realen Einsatzbedingungen standhalten. In der MIL-STD-810G-Norm [58] wird die TWR-Methode und deren praktische Umsetzung ausführlich beschrieben. TWR wird dabei als Schlüsseltechnik dargestellt, die es ermöglicht, sowohl in Feldversuchen gemessene als auch analytisch spezifizierte Last-Zeitverläufe zu replizieren. Diese Tests dienen der Validierung der Materialbeständigkeit unter realen Umgebungsbedingungen. TWR kann sowohl in Einzelachsentests (SISO) als auch in Mehrfchanreger-Systemen (MIMO) zur Vibrationsprüfung angewendet werden. Darüber hinaus ermöglicht TWR die experimentelle Bestimmung des Versagensverhaltens von Materialien in Bezug auf Form, Dauer und Belastungen, indem der Testzeitverlauf wiederholt angewendet wird. [58]

Prozessbeschreibung

Der TWR-Algorithmus ist ein iterativer Regelprozess, der darauf abzielt, ein Zielsignal in einem Testsystem durch wiederholte Anpassung eines Steuersignals zu verfolgen. Diese Methode wird häufig eingesetzt, um zeitabhängige Signale auf Prüfständen, beispielsweise zur Lebensdauerprüfung in der Automobilindustrie, zu replizieren. Der Algorithmus arbeitet in Iterationen und verwendet in jedem Schritt das Steuersignal u_j , um die Differenz zwischen dem Referenzsignal r und der Systemantwort y_{j-1} zu minimieren.

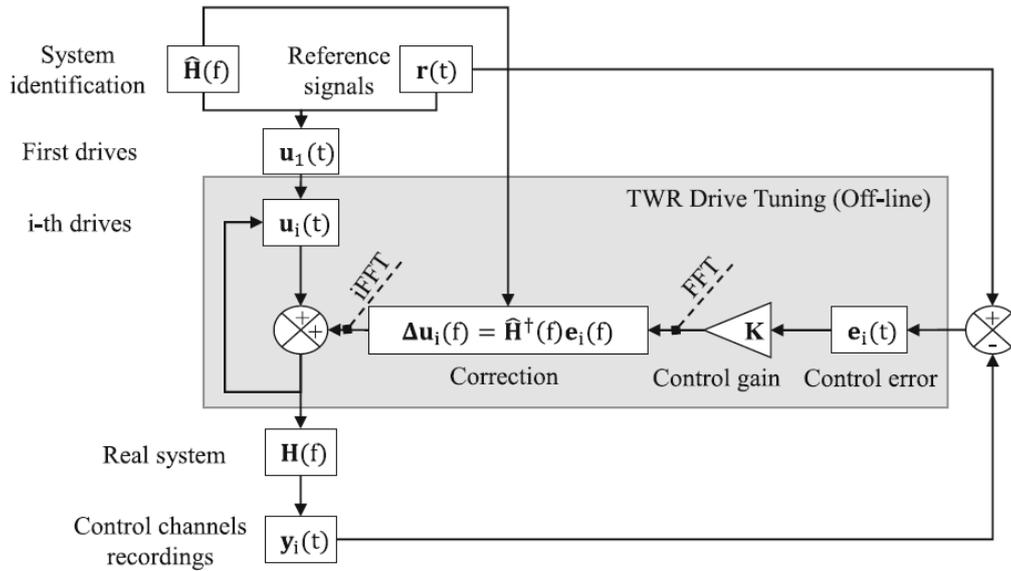


Abbildung 14: TWR-Iterativer Regelalgorithmus [60]

1. Systemidentifikation $\hat{H}(f)$ Zu Beginn wird das System identifiziert, um die Übertragungsfunktion zu erhalten, die die Eigenschaften des Systems beschreibt. Dieses Modell bildet die Grundlage für die Anpassung des Steuersignals und wird durch Messungen des realen Systems erstellt. Dieses dynamische Modell wird in der Frequenzdomäne verarbeitet, da die zeitabhängigen Signale durch Fourier-Transformation analysiert werden.
2. Initiales Steuersignal: Auf Grundlage der Systemidentifikation wird das erste Steuersignal $u_1(t)$ generiert und dem System zugeführt. Dies ist der erste Schritt des Steuerungsprozesses, bei dem das System auf das Eingangssignal reagiert.
3. Messung der Systemantwort: Das reale System $H(f)$ „erzeugt“ daraufhin eine Ausgangsgröße $y_i(t)$, die mit dem Referenzsignal $r(t)$ verglichen wird. Dieser Vergleich liefert den Fehler $e_i(t) = r(t) - y_i(t)$, der als Maß für die Abweichung zwischen dem gewünschten Referenzsignal und der tatsächlichen Systemausgabe dient.
4. Korrektur des Steuersignals: Basierend auf dem Fehler wird eine Korrektur $\Delta u_i(f)$ errechnet, die das Steuersignal in der nächsten Iteration anpasst. Die Berechnung erfolgt durch Inversion des Systemmodells H^{-1} und wird durch eine Iterationsverstärkung Q_j skaliert, um die Größe der Korrektur zu steuern. Dieser Prozess wird durch die folgende Hauptgleichung des TWR-Algorithmus beschrieben:

$$u_j = u_{j-1} + H^{-1}Q_j(r - y_{j-1}) \quad (3.12)$$

- u_j ist das aktualisierte Steuersignal in der j -ten Iteration.

- H^{-1} stellt das inverse Modell des dynamischen Systems dar.
- Q_j ist die Verstärkung, die die Stärke der Korrektur steuert.
- r ist das Referenzsignal, und y_{j-1} ist die Ausgangsantwort des Systems aus der vorherigen Iteration.

5. Neue Systemausgabe: Nachdem das Steuersignal in der neuen Iteration angepasst wurde, reagiert das System erneut und erzeugt eine neue Ausgangsgröße y_j , die wiederum mit dem Referenzsignal verglichen wird. Dieser iterierte Prozess wiederholt sich, bis die Abweichung e_j auf ein akzeptables Niveau reduziert wurde:

$$e_j = r - y_{j-1} \quad (3.13)$$

Das Ziel ist es, den Fehler e_j durch kontinuierliche Anpassungen des Steuersignals zu minimieren.

:

Die Konvergenz des TWR-Algorithmus hängt maßgeblich von der Genauigkeit der inversen systemischen Übertragungsfunktion H^{-1} und der Wahl der Iterationsverstärkung Q_j ab. Wird die Verstärkung zu groß gewählt, kann das System instabil werden und der Algorithmus divergiert. Bei zu kleinen Verstärkungen hingegen verlangsamt sich der Konvergenzprozess, da das Steuersignal nur in kleinen Schritten angepasst wird. Die Stabilität des Prozesses wird durch eine angemessene Wahl der Parameter sichergestellt.

Um die Konvergenz des Prozesses zu überwachen, wird oft ein *Composite Error* verwendet, der sowohl den RMS-Fehler als auch Amplitudenspitzen kombiniert:

$$e_{\text{comp}}(t) = \frac{\text{rms}[e(t)]}{\text{rms}[r(t)]} \alpha + \frac{\text{peak}[e(t)]}{\text{peak}[r(t)]} (1 - \alpha) \quad (3.14)$$

Hierbei ist α ein anpassbarer Faktor, der zwischen 0 und 1 liegt und die Gewichtung der beiden Fehlerarten steuert. Der Schwellenwert dieses Fehlers wird verwendet, um zu bestimmen, wann der Prozess konvergiert ist.

Der TWR-Algorithmus wurde in der Vergangenheit und wird auch in der Gegenwart in einer Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten weiter untersucht und kontinuierlich verbessert. Der Schwerpunkt vieler dieser Studien liegt auf der Anwendung des Algorithmus in Verbindung mit experimentellen Vibrationsprüfungen, häufig unter Verwendung von elektro-hydraulischen Schütteltischen (electro-hydraulic shaking tables). Diese Untersuchungen umfassen sowohl

Einkanal-, Einachs-Systeme (SISO) als auch Mehrkanal-Systeme, die bis zu sechs Freiheitsgrade besitzen. Im Folgenden wird eine Auswahl relevanter Quellen vorgestellt, die einen umfassenden praktischen Einblick in die Anwendung und Weiterentwicklung des TWR-Algorithmus bieten.

In der Arbeit von Cornelis et al. (2014) [57] werden zwei zentrale Ansätze zur Verbesserung der Leistung des TWR-Algorithmus untersucht. Erstens steht die Optimierung der Anregungssignale während der Systemidentifikation im Vordergrund, wobei verschiedene Strategien, wie zufällige und pseudo-zufällige Anregungen, verglichen werden, um die Genauigkeit der identifizierten Systemantwort zu maximieren. Zweitens wird die Möglichkeit analysiert, die systemischen Übertragungsfunktionen während der TWR-Iterationen mithilfe eines „Adaptive Modelling“-Verfahrens dynamisch zu aktualisieren. Diese Modellaktualisierungen sollen die Konvergenzrate des TWR-Prozesses verbessern und die Systemstabilität gewährleisten. Die beschriebenen Ansätze werden auf einem experimentellen Mehrkanal-Prüfstand (MIMO) angewendet, der auf hydraulischen Aktuatoren basiert und zur Dauerprüfung von Fahrzeugkomponenten dient. Dieser Prüfstand simuliert reale Lasten, wie sie im Betrieb eines Fahrzeugs auf der Straße gemessen werden, indem er Mehrachs-Vibrationen auf Fahrzeugkomponenten anwendet. Zusätzlich wird ein Mehrkörpersimulationsmodell eines Fahrzeugs verwendet, um die Leistung des verbesserten TWR-Algorithmus zu validieren. In dieser Simulationsumgebung werden reale gemessene Spindelkräfte als Zielvorgaben eingesetzt, um die Genauigkeit der Lastreplikation zu überprüfen. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine verbesserte Systemidentifikation sowie durch kontinuierliche Modellaktualisierungen die Genauigkeit und Robustheit der Lastsimulation auf dem Prüfstand signifikant gesteigert werden können. Der TWR-Algorithmus kann dadurch nicht nur die gewünschten Lasten präzise nachbilden, sondern auch die Konvergenzrate des iterativen Prozesses optimieren, was besonders für Mehrkanal-Systeme mit mehreren Freiheitsgraden von Bedeutung ist.

In beiden Arbeiten von Gang et al. wird der Time Waveform Replication Algorithmus weiterentwickelt, um die Genauigkeit der Replikation von transienten Wellenformen auf elektrohydraulischen Schütteltischen (EHST) zu verbessern. Beide Untersuchungen zielen darauf ab, die dynamischen Herausforderungen hydraulischer Systeme zu bewältigen, die oft durch Phasenverschiebungen und Verstärkungsabweichungen beeinträchtigt werden, insbesondere bei Stoß- und Vibrationstests an realen Testobjekten.

In der ersten Arbeit [62] wird ein Feed-Forward-Inverse-Regelungsansatz eingeführt, der durch Modellidentifikation und Inversion des EHST-Modells eine präzise Verfolgung der Beschleunigungsprofile ermöglicht. Der Regelungsansatz kombiniert die Inversionsübertragungsfunktion mit interner Modellregelung und Echtzeit-Feedback, um die Leistung des TWR-Algorithmus bei transienten Tests zu optimieren.

Die zweite Arbeit [63] erweitert diesen Ansatz durch die Einführung einer Hybrid-Regelungsstrategie, die eine Offline-Feedforward-Kompensation mit einer Online-adaptiven inversen Regelung (AIC) kombiniert. Ein Zero Phase Error Tracking Controller verbessert die Genauigkeit der Systeminversion, und ein Modellfehlerkompensator korrigiert Identifikationsfehler. Diese Hybridregelung erweitert die Frequenzbandbreite des EHST-Systems und verbessert die Systemdynamik, insbesondere bei variablen Lasten. Beide Arbeiten demonstrieren durch reale Experimente auf EHSTs, dass die vorgeschlagenen Regelungsstrategien die Genauigkeit und Robustheit der Wellenformreplikation signifikant verbessern. Besonders die Hybridregelung in der zweiten Arbeit zeigt eine erweiterte Anwendbarkeit bei anspruchsvollen Stoß- und Vibrationstests, indem sie die Stabilität und Leistung des Systems selbst bei nichtlinearer Dynamik gewährleistet.

In der Dissertation von Joris De Cuyper [64] wird der Time TWR Algorithmus im Kontext von industriellen Belastungstests in der Automobilindustrie analysiert und verbessert. Der TWR-Prozess, der auch in dieser Arbeit auf einem hydraulischen Prüfstand durchgeführt wird, dient dazu, reale Straßensignale auf einem Prüfstand nachzubilden, um die Ermüdungsfestigkeit von Fahrzeugkomponenten zu testen. Ein wesentliches Problem des bisherigen TWR-Ansatzes liegt in der nicht-linearen Dynamik dieser Prüfstände, was den Prozess langwierig und komplex macht. Zwei Hauptbereiche der Dissertation umfassen die Verbesserung des TWR-Prozesses und die Erweiterung um Rückkopplungsregelungen. Das bestehende TWR-Verfahren verwendet ein rein frequenzbasiertes Modell und ist ein rein iterativer Lernregelungsalgorithmus (Iterative Learning Control). Dies führt oft zu langsamen Konvergenzraten, insbesondere aufgrund der nichtlinearen Eigenschaften der hydraulischen Prüfstände.

De Cuyper schlägt vor, das TWR-Verfahren um einen Echtzeit-Feedback-Regler zu erweitern, um die Konvergenzgeschwindigkeit zu erhöhen und die Genauigkeit zu verbessern. Die Dissertation stellt drei verschiedene Feedback-Regelungsansätze vor, die sowohl die offene Schleife als auch geschlossene Schleifen einbeziehen. Die mathematische Analyse zeigt, dass durch die Einführung eines linearen Feedback-Reglers die Fehlerreduktion deutlich beschleunigt und die Gesamtleistung des Systems verbessert werden kann. Die Arbeit präsentiert auch Simulationsmodelle, die die nichtlinearen Eigenschaften von hydraulischen Systemen berücksichtigen, und validiert die entwickelten Algorithmen durch Experimente auf einem SISO-System und einem MIMO-System. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung der Konvergenz, was zu einer Reduktion der benötigten Iterationen zur Nachbildung der Belastungsprofile führt.

Wie in den vorherigen Arbeiten beschrieben, wird der TWR-Algorithmus traditionell in Verbindung mit Vibrationstests unter Verwendung von hydraulischen Shaker-Tischen eingesetzt. Im Folgenden wird dieser Algorithmus jedoch dazu verwendet, verschiedene akustische

Schalldruckprofile und Schallfelder nachzubilden. Der Fokus liegt dabei auf der präzisen Reproduktion akustischer Umgebungen, wie sie beispielsweise auf Flugzeugrumpfoberflächen vorkommen, um eine realistische Nachbildung der akustischen Lasten zu ermöglichen.

In allen drei Arbeiten von Dal Borgo et al. wird die Entwicklung eines innovativen Schallsystems zur Nachbildung der Lärmbelastung auf dem Rumpf von Turboprop-Flugzeugen im Rahmen von Bodentests thematisiert. Ziel des Systems ist es, das akustische Druckfeld, das während eines Fluges auf die Flugzeughülle wirkt, präzise zu simulieren, wobei sowohl die durch die turbulente Grenzschicht erzeugten breitbandigen Schallkomponenten als auch die tonalen Störungen durch die Propeller berücksichtigt werden.

Dabei wird in allen drei Arbeiten ein Multi-Input-Multi-Output (MIMO) Feedback-Regelungsansatz verwendet, um diese akustischen Druckfelder nachzubilden. Der MIMO-Random-Control-Ansatz wird eingesetzt, um das turbulente Druckfeld zu replizieren, während der Time Waveform Replication Algorithmus verwendet wird, um die zeitlichen Signalverläufe mit tonalen Komponenten nachzubilden. Diese Techniken ermöglichen es, die komplexen Schallfelder realistisch zu simulieren, die auf Flugzeugrümpfen während des Fluges auftreten.

In der ersten Arbeit [65] liegt der Fokus auf der Vorführung eines elektroakustischen Demonstrators, bei dem ein zylindrisches Testobjekt (Durchmesser 630 mm, Länge 2 m) mit 48 Lautsprechern und 16 Mikrofonen ausgestattet ist. Der MIMO-Feedback-Ansatz kontrolliert die Lautsprecher, um die gewünschten Schalldruckprofile zu erzeugen. Die Ergebnisse der Vorversuche zeigen, dass die Ziel-Schalldruckpegel mit hoher Genauigkeit erreicht werden, wobei die Leistungsdichtespektren (PSD) der Mikrofonomessungen innerhalb einer Toleranz von $\pm 1,5$ dB mit den Referenzsignalen übereinstimmen.

In der zweiten Arbeit [66] wird die Entwicklung dieses Systems weiter optimiert, insbesondere durch die Anordnung der Mikrofone in der Rückkopplungsschleife. Eine Pre-Test-Analyse wird verwendet, um die Anzahl der Mikrofone zu minimieren und gleichzeitig die Genauigkeit der Nachbildung zu maximieren. Die Tests zeigen, dass das System in der Lage ist, das Zielschallfeld mit einem Fehler von weniger als 3 dB bei den meisten Mikrofonen zu reproduzieren, wobei der durchschnittliche Fehler über den gesamten Frequenzbereich unter 1,5 dB liegt.

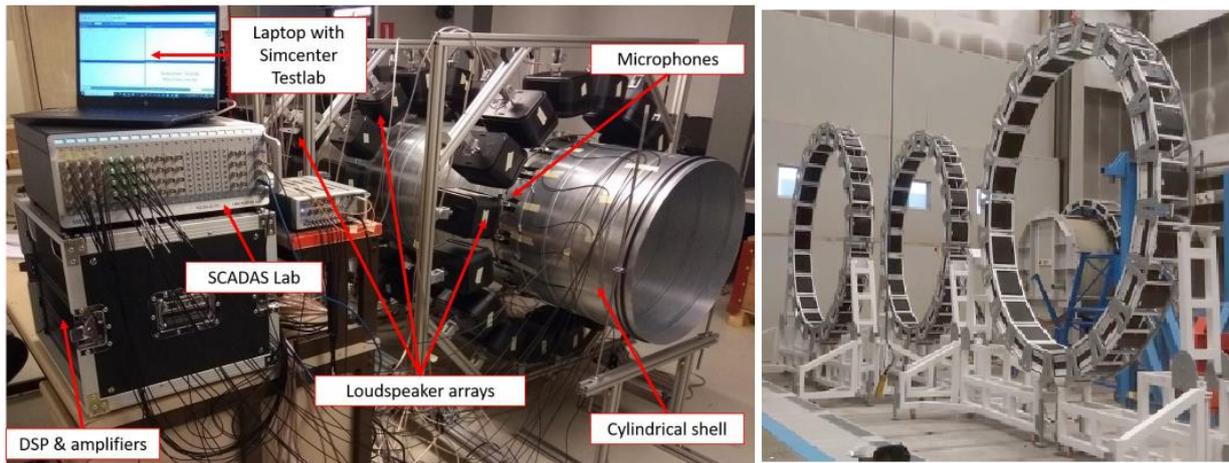


Abbildung 15: Mock-Up Test Rig [65] (links), iNGS [67] (rechts)

Die dritte Arbeit [67] baut auf den vorherigen Erkenntnissen auf und erweitert die Entwicklung des Systems für größere Flugzeugstrukturen. Hier wird ein modulares Lautsprechersystem verwendet, das flexibel an unterschiedliche Rumpfdurchmesser und -formen angepasst werden kann. In den Tests mit 66 Mikrofonen und einem zylindrischen Rumpfaufbau wurde die MIMO-Feedback-Regelung erneut erfolgreich eingesetzt, um sowohl die breitbandigen als auch die tonalen Komponenten der Schallquellen präzise nachzubilden. Dabei zeigte sich, dass das System in der Lage war, das Zielschallfeld mit einem durchschnittlichen Fehler von unter 1,5 dB über den gesamten Frequenzbereich zu simulieren. Eine Besonderheit dieser Arbeit ist die Herausforderung der Rückkopplung zwischen den Lautsprechern und der reflektierenden Oberfläche des Rumpfes, die durch destruktive Interferenzen erschwert wurde, aber durch zukünftige Modifikationen weiter optimiert werden soll.

Alle drei Arbeiten zeigen, dass dieses Schallsystem in der Lage ist, komplexe akustische Belastungen auf Flugzeigrümpfen realistisch nachzubilden. Zukünftige Entwicklungen konzentrieren sich auf die Implementierung dieses Feedback-Kontrollsystems in großflächige Flugzeigrümpfe im Rahmen des CONCERTO-Projekts, das von der Europäischen Kommission unterstützt wird.

Zusammenfassung TWR

Der Time Waveform Replication (TWR) Algorithmus ist ein leistungsstarker iterativer Lernregelungsansatz (Iterative Learning Control, ILC), der sich durch seine Fähigkeit auszeichnet, komplexe Last- und Signalprofile präzise zu replizieren. Sein iterativer Charakter ermöglicht eine kontinuierliche Anpassung des Steuersignals, indem der Fehler zwischen dem gemessenen und dem Referenzsignal in jeder Iteration minimiert wird. Die Genauigkeit und der Erfolg des TWR-Algorithmus hängen stark von der Modellierung des Systems und der richtigen Wahl der Steuerungsparameter ab. Diese Faktoren gewährleisten eine stabile Konvergenz und

verhindern Instabilitäten. Der TWR-Algorithmus findet sowohl bei mechanischen als auch bei akustischen Tests Anwendung, wie beispielsweise in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, wo er zur Simulation von Vibrationen oder akustischen Schallfeldern eingesetzt wird. Der Prozess wird so lange wiederholt, bis der Fehler unter einen vordefinierten Schwellenwert fällt, was zu einer genauen Nachbildung der realen Lastbedingungen führt und so eine effiziente und präzise experimentelle Replikation der Belastungen im Feld ermöglicht.

2.3.3 SISO & und MIMO Vibrationsmethoden Random Vibration control

Im vorherigen Abschnitt wird gezeigt, wie der TWR- und MIMO-Random-Control-Algorithmus in Kombination zur Replikation akustischer Schallfelder auf Flugzeugrümpfen eingesetzt wird. Da die Ergebnisse aus vorherigen Arbeiten aufzeigen, dass der MIMO-Random-Control-Ansatz für diese Aufgabe gut geeignet ist, wird im folgenden Kapitel der Fokus auf die Funktionsweise des SISO- und MIMO-Random-Vibration-Control-Algorithmus gelegt, um deren Einsatzmöglichkeiten und Funktionsweise zu untersuchen.

Einleitung

Der Random Vibration Control Algorithmus (RVC) wird verwendet, um das Anregungssignal so anzupassen, dass es einem vorgegebenen Referenzprofil entspricht. Anders als der Time Waveform Replication Algorithmus, der hauptsächlich im Zeitbereich arbeitet, wird der RVC im Frequenzbereich eingesetzt. Das Ziel des RVC ist es, ein Leistungsdichtespektrum zu replizieren, indem das Referenz-PSD nachgebildet wird [68]. Der RVC ist methodisch in der MIL-STD-810G unter Methode 514.6: „Vibration“ eingeordnet, die speziell Vibrationsprüfungen beschreibt, bei denen realistische Umgebungsbedingungen simuliert werden. Zusätzlich findet der RVC Anwendung in Methode 527: Multi-Exciter, die sich auf Mehrfachanregersysteme bezieht und komplexe Vibrationstests mit mehreren Achsen ermöglicht. Diese Normen dienen als Grundlage für die Bewertung der strukturellen Integrität von Bauteilen unter realen Betriebsbedingungen [58] [69].

Der primäre Einsatz des Random Vibration Control Algorithmus besteht darin, die Fähigkeiten von Produkten und Bauteilen zu bewerten, um ihre ursprüngliche Leistungsfähigkeit unter Vibrationsbedingungen aufrechtzuerhalten. Dabei werden die Zuverlässigkeit der Bauteilstrukturen und die Handhabung unter gewünschten Referenz-Vibrationsbedingungen untersucht und getestet [70]. Es existieren sowohl Offline- als auch Online-Versionen dieses Algorithmus. In der konventionellen Anwendung wird der RVC meist als iterativer Offline-Algorithmus ausgeführt. Bei dieser Methode wird das Eingangssignal durch die Frequenzgangfunktion des Systems vor dem Test angepasst [68]. Die ermittelte Frequenzgangfunktion in Verbindung eines Shaker-Tables-Prüfstands spielt dabei eine entscheidende Rolle, da ihre Bestimmung direkt die Präzision der Schwingungsregelung beeinflusst. Die Genauigkeit der Schwingungssimulation hängt auch maßgeblich von der korrekten Bestimmung der FRF ab [69, 70]. Dieser iterative Prozess ermöglicht es dem Bediener, zwischen den einzelnen Iterationsschritten die Zwischenergebnisse zu analysieren und Rückschlüsse auf die Konvergenz zu ziehen. Der Bediener entscheidet, ob die Parameter des Reglers geändert oder der Prozess fortgesetzt werden sollen. Ein erfolgreicher Test hängt somit stark von der Erfahrung des Bedieners ab. Verändert sich die FRF über die Zeit, ist es für den

konventionellen Einsatz des Offline-Algorithmus schwierig, das gewünschte Ergebnis zu erzielen und das Referenzprofil zufriedenstellend nachzubilden. Um dieses Problem zu beheben, wird ein Online-Random-Vibration-Control-Algorithmus eingesetzt, der in der Lage ist, sich dynamisch an die Veränderungen der FRF während des Tests anzupassen und so eine präzisere Replikation des Referenzsignals in Echtzeit zu gewährleisten. [68]

Random Vibration Controller werden von verschiedenen Unternehmen als Komplettlösungen im Bereich der Messtechnik und Messsoftware angeboten. Die Lösungen beinhalten oft eine Vielzahl an vorgefertigten Softwarepaketen, die speziell für Vibrationsprüfungen entwickelt werden, wobei der Random Vibration Control Algorithmus als optionales Modul beworben wird. Trotz eingehender Recherche bleibt der exakte Regelprozess des Algorithmus sowie die zugrunde liegenden mathematischen Modelle und Blockschaltbilder häufig unklar. Viele Anbieter, wie beispielsweise Siemens, beschreiben lediglich den allgemeinen Ablauf und die Funktionsweise des Algorithmus, ohne jedoch detailliert auf die konkrete Implementierung des Reglers einzugehen. Solche Komplettlösungen, die sowohl den Regler als auch eine umfangreiche Anzahl von Softwarepaketen umfassen, können je nach Umfang und Ausstattung schnell mehrere zehntausend Euro kosten. Dies stellt besonders für Unternehmen und Forschungseinrichtungen eine erhebliche Investition dar, die auf präzise Vibrationsprüfungen angewiesen sind. [71] [72]

Prozessbeschreibung

Im Folgenden wird der Random Vibration Control Algorithmus basierend auf einem detaillierten Blockschaltbild sowie der ausführlichen Beschreibung von Smith et al. [73] für ein SISO-System vorgestellt. Der Algorithmus wird Schritt für Schritt durchlaufen, wobei die Definition des Ziel-Leistungsdichtespektrums, die Messung der Transferfunktion und die iterative Fehlerkorrektur im Mittelpunkt stehen. Das Blockschaltbild verdeutlicht ausführlich den gesamten Prozess von der Berechnung des Fehlerspektrums bis zur Anpassung des Anregungssignals und zeigt die systematische Vorgehensweise zur Reduktion des Fehlers.

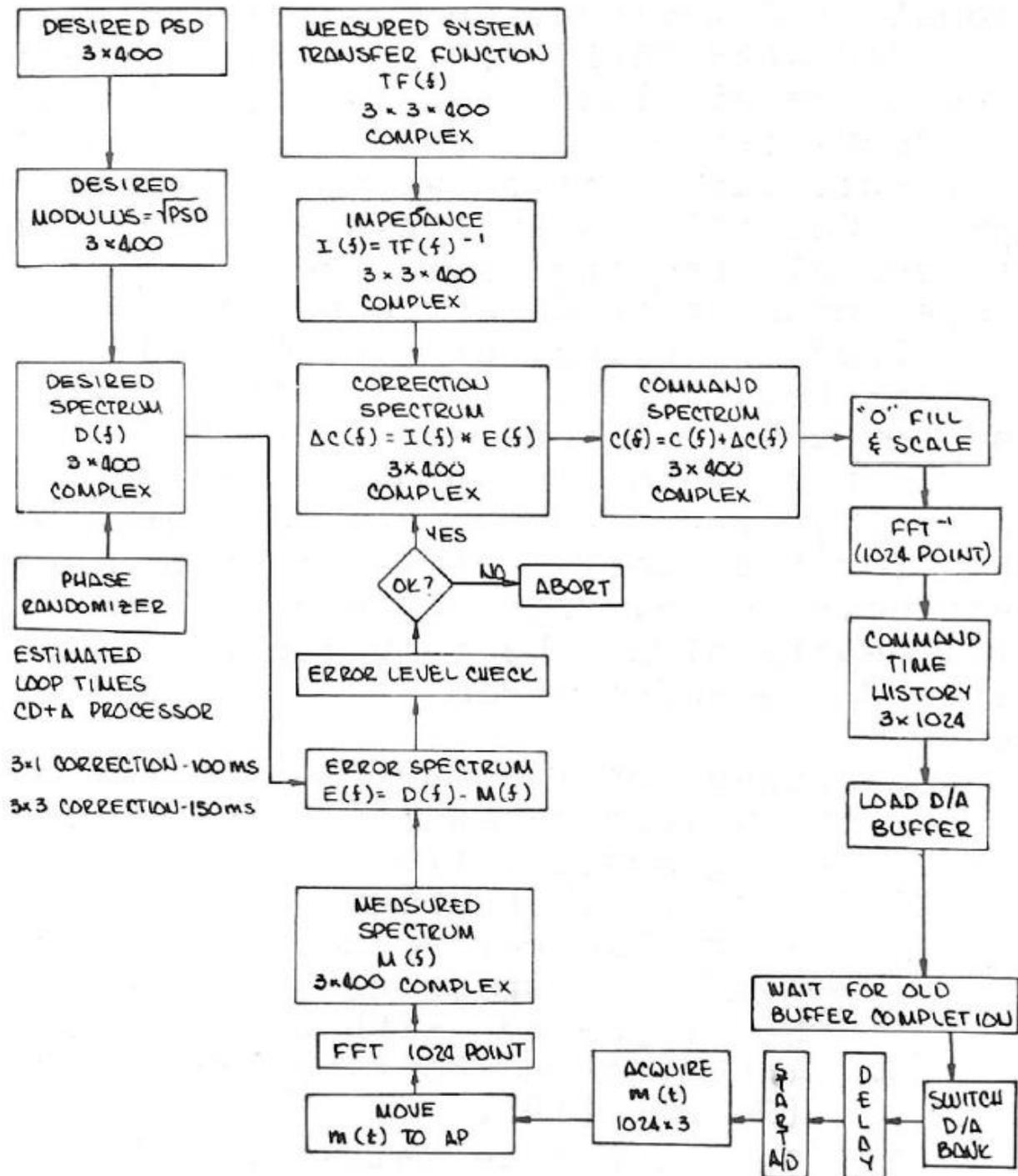


Abbildung 16: Random-control Algorithmus [73]

1. Definition des Ziel-Leistungsdichtespektrums (PSD): Das gewünschte Leistungsdichtespektrum D_f wird festgelegt, um die Zielvorgaben für den Test zu bestimmen. Dies ist die Referenz, die das System während des Tests erreichen soll.
2. Messung der Transferfunktion H_f : Die Frequenzgangfunktion H_f des Systems wird gemessen, um die Reaktion des Systems auf das Eingangssignal zu verstehen. Dies ist entscheidend, um das richtige Anregungssignal zu bestimmen.

3. Berechnung der Impedanzmatrix Z_f : Die Impedanzmatrix wird als Inverse der Transferfunktion $Z_f = H_f^{-1}$ berechnet. Diese Matrix beschreibt, wie das Anregungssignal anzupassen ist um systemische Verzerrungen zu kompensieren.
4. Berechnung des Fehlerspektrums: Der Fehler E_f wird als Differenz zwischen dem gewünschten Spektrum D_f und dem gemessenen Spektrum M_f berechnet:

$$E_f = D_f - M_f \quad (3.12)$$

5. Berechnung des Korrektur- und Befehlsspektrums: Das Korrekturspektrum ΔC_f wird durch Multiplikation der Impedanzmatrix Z_f mit dem Fehlerspektrum E_f berechnet:

$$\Delta C_f = Z_f E_f \quad (3.13)$$

6. Befehlsspektrum: Das neue Anregungssignal ergibt sich aus der Addition des alten Befehlsspektrums mit dem Korrekturspektrum:

$$C_f = C_{\text{alt}} + \Delta C_f \quad (3.14)$$

7. Transformation des Befehlsspektrums in den Zeitbereich: Das Befehlsspektrum wird durch eine Inverse Fourier-Transformation IFFT in den Zeitbereich transformiert, um das Anregungssignal c_t zu generieren.
8. Zeitrandsomisierung des Anregungssignals: Das Anregungssignal c_t wird zufällig variiert, um realistische Schwingungen zu simulieren.
9. Messung des Ausgangssignals: Das System wird angeregt und das resultierende Ausgangssignal M_f gemessen.
10. Vergleich mit dem Referenzspektrum: Das gemessene Ausgangsspektrum wird mit dem Referenzspektrum D_f verglichen, um den Fehler E_f zu berechnen.
11. Iterative Fehlerkorrektur: Der gesamte Prozess wird wiederholt, bis der Fehler E_f innerhalb akzeptabler Toleranzwerte liegt.

Nach der detaillierten Beschreibung des SISO-Regelalgorithmus wird im Folgenden auf den MIMO (Multi-Input Multi-Output) Regelalgorithmus eingegangen. Dieser basiert auf denselben Grundprinzipien, jedoch werden hier mehrere Eingangs- und Ausgangssignale gleichzeitig verarbeitet. Der MIMO-Ansatz erfordert eine präzisere Berücksichtigung der Systemkopplungen und ermöglicht dabei jedoch eine komplexere Steuerung. Das nachfolgende Blockschaltbild in Abbildung 17 illustriert eine vollständige Version eines MIMO-Random Vibration Control

Algorithmus, von der Systemidentifikation bis zur Fehlerkorrektur, und verdeutlicht die Verarbeitung der Signale in diesem Mehrkanalsystem. [69]

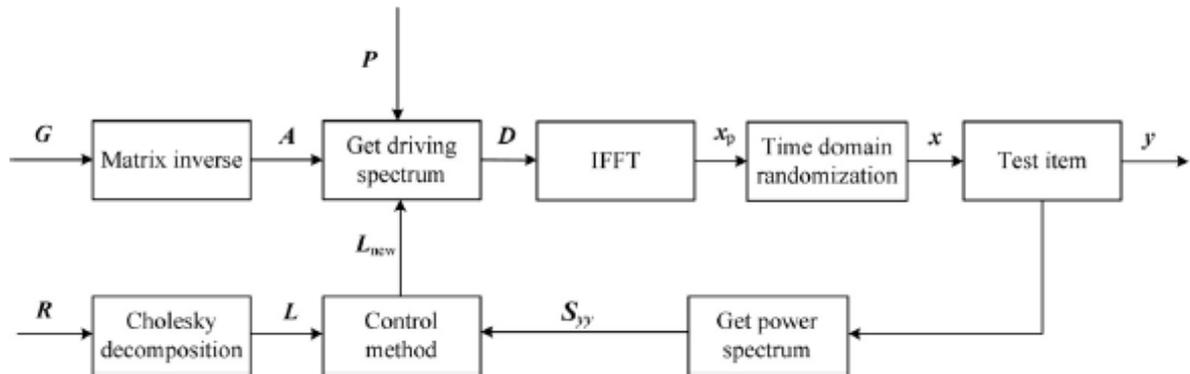


Abbildung 17: Block Diagram MIMO random vibration control [69]

Das Ziel eines n -Eingang n -Ausgang Random Vibration Systems ist es, das Antwortspektrum S_{yy} so zu steuern, dass es dem Referenzspektrum R entspricht, also:

$$S_{yy} = R \quad (3.15)$$

Die Diagonalelemente von S_{yy} und R sind Autoleistungsspektren, während die Nebendiagonalelemente Kreuzspektren sind.

Für ein 3-Achsen-Anregersystem mit den dazugehörigen Achsen x , y und z gilt: Jedes dieser Signale hat sein eigenes Autoleistungsspektrum und Kreuzspektren zu den anderen Achsen. Das Autospektrum für die x -Achse beschreibt, wie viel Energie das Signal $x(t)$ bei verschiedenen Frequenzen enthält, und steht auf der Diagonale der Matrix S_{yy} . Dasselbe gilt für die y - und z -Achsen.

$$S_{yy} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Hier stehen S_{xx} , S_{yy} und S_{zz} für die Autoleistungsspektren der jeweiligen x , y , z Achsen und befinden sich auf der Diagonalen der Matrix.

Die Kreuzspektren S_{xy} , S_{xz} , usw., stehen auf den Nebendiagonalelementen und beschreiben die Wechselwirkungen, wie Kopplungen oder Korrelationen zwischen den verschiedenen Achsen bzw. Signalen. So gibt zum Beispiel S_{xy} die gemeinsame Leistung und Wechselwirkung zwischen den x und y -Achsen an. Diese Nebendiagonalelemente sind des Weiteren symmetrisch, wodurch gilt: $S_{xy} = S_{yx}$.

Um diese Gleichung (3.15) zu erreichen, sollte das entsprechende Anregungsspektrum D wie folgt aussehen:

$$D = ALP \quad (3.17)$$

wobei A die Moore-Penrose-Inverse der Systemmatrix G ist:

$$A = G^+ \quad (3.18)$$

Die Moore-Penrose-Inverse (kurz Pseudoinverse), welche im Regelungsprozess für MIMO Vibration Control Regelungen häufig zum Einsatz kommt, ist eine Erweiterung der Matrixinversen und wird verwendet, wenn Matrizen entweder rechteckig oder singulär sind und somit keine reguläre Inverse besitzen. Sie stellt eine nützliche Methode in der Mathematik und numerischen Analyse dar, um lineare Gleichungssysteme zu lösen, bei denen entweder keine eindeutige oder keine vollständige Lösung existiert.

Die Moore-Penrose-Pseudoinverse einer Matrix $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$ ist eine eindeutig bestimmte Matrix $A^+ \in \mathbb{C}^{n \times m}$, die die folgenden vier Moore-Penrose-Bedingungen erfüllt:

1. $AA^+A = A$ Das Produkt von A mit seiner Pseudoinversen ergibt A^+ selbst, was zeigt, dass A^+ eine verallgemeinerte Inverse ist.
2. $A^+AA^+ = A^+$ Die Pseudoinverse reproduziert sich selbst, wenn sie in die ursprüngliche Matrix A eingesetzt wird.
3. $(AA^+)^T = AA^+$ Das Produkt von A und A^+ ist hermitesch, d.h., es bleibt gleich, wenn es transponiert und konjugiert wird.
4. $(A^+A)^T = A^+A$ Auch das Produkt A^+A ist hermitesch.

Der Unterschied zwischen der Moore-Penrose-Pseudoinversen und der „normalen“ Inversen besteht darin, dass die reguläre Inverse nur für quadratische, nicht-singuläre Matrizen existiert. Das bedeutet, dass die Matrix invertierbar ist und es eine eindeutige Lösung für das lineare Gleichungssystem $Ax=b$ gibt. Die Moore-Penrose-Pseudoinverse hingegen kann auch für rechteckige oder singuläre Matrizen verwendet werden. Sie ermöglicht es, eine Lösung zu finden, wenn keine eindeutige Inverse existiert. Besonders hilfreich ist die Moore-Penrose-Inverse in Situationen, in denen es mehr Gleichungen als Unbekannte gibt (Überbestimmung). In solchen Fällen wird die Pseudoinverse verwendet, um den quadratischen Fehler zwischen den gemessenen und berechneten Werten zu minimieren. Sie liefert also die bestmögliche Annäherung an eine Lösung im Sinne der kleinsten Quadrate, wenn es keine exakte Lösung gibt. Die Moore-Penrose-Inverse ist daher ein wesentliches Werkzeug in der numerischen Analyse,

insbesondere in der linearen Regression, da sie die Lösung von überbestimmten Systemen ermöglicht. Obwohl sie keine „echte“ Inverse ist, approximiert sie das Verhalten einer Inversen für Matrizen, die nicht-invertierbar oder rechteckig sind, und bietet die bestmögliche Lösung für diese Fälle. [74] [75]

L in Gleichung (3.17) ist die untere Dreiecksmatrix aus der Cholesky-Zerlegung der Referenzmatrix R :

$$R = LL^H \quad (3.19)$$

Das hochgestellte H bezeichnet die konjugiert Transponierte, P ist eine zusätzliche zufällige Phasenmatrix, deren Nebendiagonalelemente Nullen und deren Diagonalelemente $\exp(i\theta_i)$ sind, wobei θ_i den Phasenwinkel mit einer gleichmäßigen Verteilung im Intervall $[-\pi, \pi]$ bezeichnet und $i = \sqrt{-1}$.

Die Cholesky-Zerlegung ist ein Verfahren, um eine positiv definite Matrix R in das Produkt einer unteren Dreiecksmatrix L und ihrer Transponierten L^H zu zerlegen, siehe (3.19). Dies ist nützlich, weil sie eine effiziente Möglichkeit bietet, lineare Gleichungssysteme zu lösen, Matrizen zu invertieren und Eigenwerte zu berechnen. Im MIMO Random Vibration Control Algorithmus wird die Cholesky-Faktorisierung vielfach verwendet, um das Referenzspektrum R zu stabilisieren und zu entkoppeln. Dies reduziert die Kopplung der Eingänge und vereinfacht die Steuerung. Da MIMO-Systeme mehrere Eingangs- und Ausgangssignale haben, sorgt die Cholesky-Zerlegung für die Stabilisierung, indem das Anregungssignal in entkoppelte Komponenten zerlegt wird.

Die Cholesky-Zerlegung hilft, Signale zu entkoppeln und die Kopplung zwischen den Kanälen zu reduzieren, wodurch die Steuerung effizienter wird. L dient als Transformationsmatrix, um das Anregungssignal anzupassen und die dynamische Kopplung zu minimieren.

Die Cholesky-Zerlegung lässt sich darstellen als:

$$R = LL^T \quad (3.20)$$

oder als:

$$R = LDL^T \quad (3.21)$$

wobei D eine Diagonalmatrix ist. Diese Zerlegung kann auch folgendermaßen formuliert werden:

$$R = LD^{1/2}(D^{1/2})^T L^T = LL^T \quad (3.22)$$

Die Zerlegung $R = LDL^T$ ermöglicht es, das lineare Gleichungssystem $Rx = b$ effizient in zwei Schritten zu lösen:

1. Vorwärts Lösen des Systems $Ly = b$: In diesem Schritt wird das lineare Gleichungssystem vereinfacht, indem man das Gleichungssystem zunächst auf ein leichter lösbares Teilsystem herunterbricht. Die Matrix R wurde zuvor in die Form $R = LL^T$ zerlegt, wobei L eine untere Dreiecksmatrix ist. Dies erlaubt es, das ursprüngliche Gleichungssystem $Rx = b$ in zwei Teile aufzuteilen. Anstatt dieses direkt zu lösen, wird zuerst das einfachere Gleichungssystem $Ly = b$, wobei L die untere Dreiecksmatrix aus der Cholesky-Zerlegung ist. Das bedeutet, dass zunächst y berechnet wird, welches eine Zwischenvariable ist. Da es sich bei L um eine untere Dreiecksmatrix handelt, ist das Lösen dieses Gleichungssystems relativ einfach, weil man direkt von unten nach oben durch die Matrix gehen kann (das nennt man "Vorwärtseinsetzen").
2. Rückwärts Lösen des Systems $L^Hx = y$ Nachdem y im ersten Schritt bereits gefunden wurde, löst man das zweite Teilsystem, um x , die endgültige Lösung des ursprünglichen Gleichungssystems, zu finden. Daraufhin wird das Gleichungssystem $L^Hx = y$ gelöst, wobei L^H die transponierte Matrix von L ist. Da L^H eine obere Dreiecksmatrix ist, kann dieses Gleichungssystem durch "Rückwärtseinsetzen" (von oben nach unten) gelöst werden. Durch diesen Schritt erhält man die endgültige Lösung x , die somit die Lösung des ursprünglichen Gleichungssystems darstellt.

Die Diagonalelemente D_{jj} lassen sich wie folgt berechnen:

$$D_{jj} = A_{jj} - \sum_{k=1}^{j-1} L_{jk}^2 D_{kk} \quad (3.23)$$

Die Elemente L_{ij} der normierten unteren Dreiecksmatrix L berechnen sich durch:

$$L_{ij} = \frac{1}{D_{jj}} \left(R_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} L_{ik} L_{jk} D_{kk} \right), \quad i > j \quad (3.23)$$

Diese Entkopplung der Signale ist besonders vorteilhaft, da sie die Wechselwirkungen zwischen Ein- und Ausgangssignalen reduziert, was den Rechenaufwand und die numerische Instabilität verringert. Ein weiterer wichtiger Aspekt der Cholesky-Zerlegung ist, dass die dabei beteiligten Matrizen stets positiv definit bleiben. Dies sorgt für eine verbesserte numerische Stabilität während der Berechnungen und erhöht die Effizienz der Steuerungsprozesse in komplexen Systemen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Berechnungen auch bei wiederholter Anwendung stabil und präzise bleiben. Zusätzlich erleichtert die Zerlegung in Dreiecksmatrizen das Lösen von linearen Gleichungssystemen, da diese Matrizen durch einfaches Einsetzen, ohne die Notwendigkeit einer vollständigen Matrixinversion, gelöst werden können. Dies trägt

maßgeblich zur Effizienzsteigerung bei, da die Rechenlast erheblich in diesen Regelungssystemen reduziert wird. [76] [77]

Die theoretische Antwort des MIMO-Systems kann im Frequenzbereich durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$Y = GALP \quad (3.24)$$

wobei Y die Systemantwort, G die Systemmatrix, A die Pseudoinverse von G , L die Cholesky-Dreiecksmatrix, und P eine zufällige Phasenmatrix darstellt.

Das Antwortspektrum lautet dann:

$$S_{yy} = YY^H = GALPP^HL^HA^HG^H \quad (3.25)$$

wobei S_{yy} das tatsächliche Antwortspektrum darstellt und Y^H die konjugiert transponierte Matrix von Y ist.

Da A die Inverse der Systemmatrix G ist, ergibt sich die Antwort Y durch:

$$Y = LP \quad (3.26)$$

Somit kann das Antwortspektrum S_{yy} vereinfacht werden zu:

$$S_{yy} = LPP^HL^H = R \quad (3.27)$$

wobei R das Referenzspektrum darstellt.

Allerdings entspricht A nicht der tatsächlichen Inversen der Systemmatrix G , aufgrund von Rauschen und anderen systembedingten Störungen. Stattdessen gilt:

$$GA = I + E \quad (3.28)$$

wobei E eine Fehlermatrix und I die Einheitsmatrix darstellt.

Durch das Einsetzen von Gleichung (3.27) in Gleichung (3.26) erhält man letztendlich das reale Antwortspektrum:

$$S_{yy} = (I + E)LPP^HL^H(I + E)^H = (I + E)R(I + E)^H \neq R \quad (3.29)$$

Dies zeigt, dass das tatsächliche Antwortspektrum S_{yy} aufgrund der Fehler E nicht exakt dem Referenzspektrum R entspricht. Deshalb wird ein Regelalgorithmus benötigt, um die Fehler zu

korrigieren und das Antwortspektrum an das gewünschte Referenzspektrum anzupassen. [69] [78]

Erkenntnisse wissenschaftlicher Arbeiten mit dem MIMO-Regelungsalgorithmen

Guan et al. untersuchen in ihrer Arbeit [68] den MIMO Random Vibration Control Algorithmus in Zusammenhang mit einem mehrachsigen elektro-hydraulischen Shaker-Tisch. Ihr Hauptziel war es, eine präzisere Steuerung des Anregungssignals zu ermöglichen, die sowohl Korrelationen zwischen mehreren Achsen berücksichtigt als auch Störungen reduziert. Dabei nutzen sie einen Online-MIMO-Steuerungsalgorithmus, der in Echtzeit die Transferfunktion des Systems berechnet und aktualisiert. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Anpassung der Steuerung, um die Referenzleistungsdichtespektren der Ausgabe präzise zu replizieren. Mithilfe von linearer Faltung und der Überlapp-Speicher-Methode werden die Ein- und Ausgangssignale des Systems kontinuierlich angepasst. Ihre Simulationen und experimentellen Tests zeigen, dass die Methode die Leistungsfähigkeit des Systems, insbesondere bei komplexen Mehrkanalanregungen, deutlich verbessert. Im Vergleich zur Offline-Methode, bei der der Bediener manuell eingreifen musste, um die Konvergenz des Systems zu gewährleisten, zeigte sich die Online-Methode als überlegen, da sie sowohl in Bezug auf Genauigkeit als auch Replizierbarkeit effizienter und weniger fehleranfällig war.

Haoyang et al. in ihrem Paper [70] untersuchen die Anwendung eines Random Vibration Control Algorithmus basierend auf dem EV-Modell für eine präzisere Schätzung der Frequenzgangfunktion. Das EV-Modell, kurz für Eigenwert-Modell (Eigenvalue Model), ermöglicht eine verbesserte Schätzung der Frequenzgangfunktion, indem es Rauschquellen sowohl am Ein- als auch am Ausgang des Systems berücksichtigt. Es stellt sicher, dass sowohl das Eingangssignal als auch die Systemantwort korrekt interpretiert werden, um Verzerrungen durch Rauschen zu minimieren. Das Hauptziel der Arbeit ist es, die Genauigkeit bei der Wiedergabe des Leistungsdichtespektrums in Schwingungsexperimenten zu verbessern. Der Algorithmus schätzt die Systemimpedanz als Inverses der Frequenzgangfunktion und nutzt iterative Korrekturen des Anregungsspektrums. Haoyang et al. zeigen, dass das EV-Modell im Vergleich zu herkömmlichen Methoden eine höhere Präzision bei der Reproduktion von Spektren bietet, insbesondere in hochfrequenten Bereichen.

Die Arbeit von Zhidong et al. [79] untersucht die adaptive inverse Regelung von Zufallsvibrationen mithilfe des Filtered-XLMS-Algorithmus. Dabei liegt der Fokus darauf, die Leistungsdichtespektren an bestimmten Kontrollpunkten präzise zu reproduzieren. Die traditionelle Methode der Frequenzspektrum-Equalisierung, die auf der inversen Charakteristik der Frequenzgangfunktion basiert, erfordert oft umfangreiche Mittelwertbildungen, was die Regelungszeit verlängert und die Präzision beeinträchtigen kann. Die Autoren schlagen deshalb einen adaptiven inversen Regelungsansatz vor, der auf dem Filtered-X LMS-Algorithmus basiert.

Dieser Algorithmus kann die FRF in Echtzeit verfeinern und so das Anregungsspektrum direkt aktualisieren. Durch die Nutzung eines adaptiven Mechanismus zur Berechnung der inversen FRF kann der Prozess beschleunigt und gleichzeitig Stabilitätsprobleme während des Iterationsprozesses vermieden werden. Die Arbeit zeigt, dass der adaptive Algorithmus die Präzision verbessert, ohne dass umfangreiche Mittelwertbildungen notwendig sind, und dass er eine schnellere Konvergenzzeit und kürzere Regelkreislaufzeiten ermöglicht. Experimentelle Ergebnisse auf einem hydraulischen Schwingtisch bestätigen die Überlegenheit dieser Methode im Vergleich zu herkömmlichen Ansätzen wie dem Rückkopplungsregelalgorithmus.

In der Arbeit „Digital Control Techniques for a Three-Axis Vibration Test System“ von Strether Smith et al. [73] wird ein umfassendes Steuerungskonzept für ein Drei-Achsen-Schwingungstestsystem (3D-VTS), auch als 3D Shaking Table bekannt, entwickelt und vorgestellt. Das Hauptziel ist es, durch digitale Kontrolltechniken die mechanischen Nichtlinearitäten und die Interferenzen zwischen den Achsen zu kompensieren, um eine präzisere Schwingungssteuerung zu gewährleisten. Drei zentrale Steuerungsalgorithmen werden im Detail beschrieben: Waveform Control, das zur Transienten-Reproduktion dient, Random Vibration Control, das auf Echtzeitberechnungen zur Minimierung zufälliger Störungen basiert, und Sinewave Vibration Control, das eine besonders hohe Präzision bei sinusförmigen Schwingungen sicherstellt. Für jeden dieser Algorithmen werden detaillierte Blockschaltbilder beigefügt, um die Funktionsweise und den Ablauf der Prozesse anschaulich darzustellen. Die Arbeit unterstreicht die Bedeutung von Kreuzachsenkompensationen, um die Genauigkeit des Systems zu verbessern. Digitale Steuerungsmethoden spielen dabei eine entscheidende Rolle, um das Verhalten des 3D-VTS unter verschiedenen Schwingungsbedingungen zu optimieren.

In der Arbeit „Closed-loop Random Vibration Control of a Shaker Table with a Microcomputer“ von M. Wang [80] wird ein Steuerungskonzept für einen Shaker-Tisch vorgestellt, das auf die Reproduktion zufälliger Vibrationen abzielt. Der Fokus liegt auf der Entwicklung einer kostengünstigen Lösung, bei der ein Mikrocomputer zur Regelung verwendet wird. Im Rahmen der Arbeit wird untersucht, wie der Shaker-Tisch durch den Einsatz moderner Steuerungstechniken verbessert werden kann, um präzise zufällige und sinusförmige Schwingungen zu erzeugen. Besonders hervorzuheben ist die detaillierte Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Regelkreises unter verschiedenen Bedingungen. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass der mikrocomputerbasierte Steuerungsansatz erfolgreich war und eine hohe Genauigkeit bei der Reproduktion der gewünschten Schwingungsmuster ermöglichte. Es wird nachgewiesen, dass diese Methode eine kosteneffiziente Alternative zu kommerziellen Lösungen darstellt, ohne die Performance zu beeinträchtigen. Die Arbeit belegt zudem, dass die Mikrocomputerlösung eine robuste und flexible Steuerung in verschiedenen Anwendungsbereichen ermöglicht.

3 Material und Methoden

Dieses Kapitel befasst sich mit der Entwicklung, Architektur und Implementierung des Umweltsimulationsregelkreises zur Nachbildung der Kabinenakustik. Nach einer Einführung in die Anforderungen gemäß VDI 2206 und den grundlegenden Entwicklungsprozessen wird die Systemarchitektur detailliert beschrieben. Ein Vergleich verschiedener Implementierungsansätze sowie eine Darstellung der Gesamtstruktur des Regelkreises verdeutlichen die zugrunde liegende Methodik. Abschließend wird der physische Aufbau des Systems erläutert, einschließlich der Integration, Verifikation und Durchführung der Hauptuntersuchung im HCAT-Versuchsaufbau.

3.1 Entwicklung des Umweltsimulationsregelkreises nach VDI 2206

In diesem Abschnitt wird der Entwicklungsprozess eines akustischen Umweltsimulationsregelkreises detailliert beschrieben, der nach den Richtlinien der VDI 2206 Norm [81] für die systematische Entwicklung mechatronischer Systeme gestaltet wird. Die Norm empfiehlt die Anwendung des V-Modells, welches in der nachfolgenden Abbildung xy dargestellt ist.

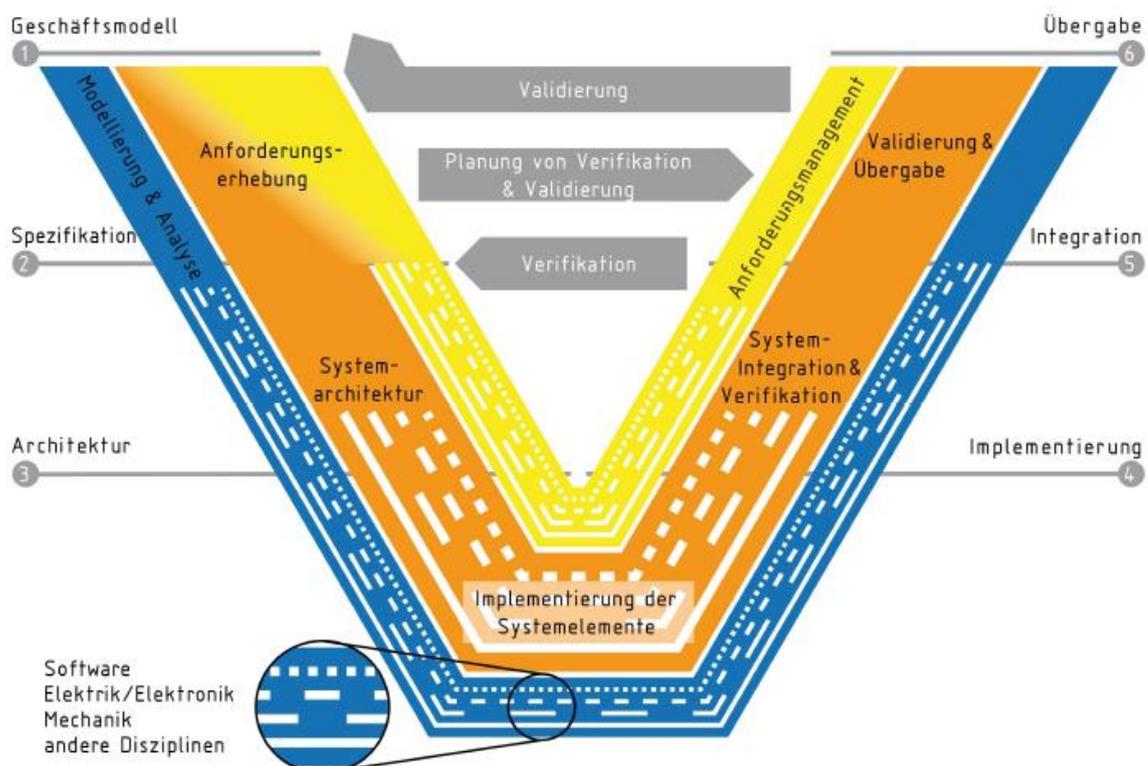


Abbildung 18: V-Modell [81]

Dieses Modell ermöglicht eine effektive Strukturierung des Entwicklungsprozesses in verschiedene Kernphasen welche entsprechend dem Projektumfang angepasst werden. Diese Phasen umfassen die Anforderungserhebung, Systemarchitektur, Implementierung der

Systemelemente, Systemintegration und Verifikation sowie Validierung und Übergabe. Diese Kernphasen bilden den mittleren Strang des V-Modells und werden iterativ und teilweise überlappend bearbeitet, um den spezifischen Anforderungen des zu entwickelnden Regelkreises gerecht zu werden. Dieser Ansatz ermöglichte eine detaillierte und zugleich flexible Entwicklung, die sowohl die technische Machbarkeit als auch die praktische Anwendbarkeit im Laborumfeld berücksichtigt. Durch die Anwendung der VDI 2206 wird eine strukturierte Arbeitsweise gefördert, die eine durchgängige Übersicht während des gesamten Entwicklungsprozesses gewährleistet. Im Folgenden wird der Entwicklungsprozess anhand der Beschreibung der Norm näher erläutert.

3.2 Anforderungserhebung gemäß VDI 2206

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines akustischen Umweltsimulationsregelkreises, der unter Laborbedingungen realgetreue Kabineninnengeräusche für verschiedene Flugzustände reproduzieren soll. Herkömmliche Untersuchungen im Bereich der Lärminderungsmaßnahmen nutzen oft einfache Anregungen durch weißes Rauschen, was jedoch nicht die tatsächlichen akustischen Gegebenheiten in Flugzeugkabinen widerspiegelt. Das Ziel dieses Projekts ist es, eine präzisere Nachbildung der akustischen Bedingungen zu erreichen, um die Aussagekraft von experimentellen Studien, wie Lärminderungs- und Komfortstudien, signifikant zu erhöhen.

Die systematische Anforderungserhebung spielt dabei eine entscheidende Rolle, um die Vielzahl möglicher Regelalgorithmen und Funktionsweisen zu strukturieren und klare Lösungsansätze zu definieren. Eine fundierte und klar formulierte Anforderungserhebung unterstützt den Entwicklungsprozess, indem sie die Interessen aller relevanten Stakeholder erfasst und präzise in technische und funktionale Anforderungen übersetzt. Hauptstakeholder dieses Projekts sind wissenschaftliche Mitarbeiter und Studierende, die den entwickelten Regelkreis in ihren akustischen Untersuchungen einsetzen werden. Für sie ist es besonders wichtig, dass der Regelkreis eine einfache Handhabung ermöglicht und realitätsnahe Ergebnisse liefert, wobei die Abweichung zwischen dem simulierten und dem Referenzschallprofil minimal gehalten werden muss. Da das Projekt im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelt wird, dient die Anforderungserhebung dazu, den Entwicklungsauftrag klar zu definieren und den Regelkreis so zu gestalten, dass er für weiterführende Untersuchungen und Experimente geeignet ist. Die Anforderungen werden während des Entwicklungsprozesses schrittweise erarbeitet und verfeinert, wobei eine tabellarische Dokumentation verwendet wird, die sich an der in der Norm VDI 2206 beschriebenen Hauptmerkmalliste und den dazugehörigen Leitfragen orientiert.

Prozess der Anforderungserhebung

Der Anforderungserhebungsprozess beginnt mit dem klar formulierten internen Entwicklungsauftrag, einen Regelkreis zu entwickeln, der einen realistischen Schalleintrag in ein Airbus-A320-Rumpfsegment simulieren kann. Dieses Segment, bereitgestellt vom Hamburg Center of Aviation Training (HCAT), soll für zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen im Bereich der Lärminderung und Komfortstudien genutzt werden. Die primären Stakeholder werden als wissenschaftliche Mitarbeiter und Ingenieure des Forschungs- und Transferzentrums Akustik (FTZ Akustik), Studierende der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW Hamburg), das HCAT-Laborumfeld sowie zukünftige Forschende identifiziert. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter und Ingenieure benötigen einen präzisen und zuverlässigen Regler, der eine minimale Abweichung zwischen Referenzschallprofil und gemessenem

Schallprofil sicherstellt. Für die Studierenden sind Benutzerfreundlichkeit und die Möglichkeit zur Weiterentwicklung in MATLAB und Simulink von besonderer Bedeutung. Das HCAT-Labor stellte Anforderungen an die Integration des Reglers in die bestehende Laborinfrastruktur und die Kompatibilität mit vorhandenen akustischen Messsystemen. Langfristig soll der Regler als Grundlage für weitere Forschungsarbeiten dienen.

Die Erhebung der Anforderungen erfolgt durch eine Kombination verschiedener Methoden:

- **Direkte Kommunikation:** Durch Gespräche und regelmäßige Meetings mit Ingenieuren und wissenschaftlichen Mitarbeitern wurden technische Anforderungen und Erwartungen geklärt.
- **Analyse wissenschaftlicher Publikationen:** Untersuchungen von Algorithmen und Regelungsverfahren zur Schallfeldreproduktion halfen, sowohl funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen zu identifizieren.
- **Eigene Recherchen:** Überlegungen hinsichtlich Benutzerfreundlichkeit und akademischer Eignung des Reglers ergänzten den Prozess.

Die ermittelten Stakeholder-Anforderungen werden systematisch in konkrete Kundenanforderungen überführt und dokumentiert. Funktionale Anforderungen umfassten unter anderem:

- Präzise Schallfeldreproduktion mit einer maximalen Abweichung von ± 5 dB im mittleren und hohen Frequenzbereich.
- Echtzeitfähigkeit des Reglers.
- Anpassungsfähigkeit an verschiedene Referenzprofile und somit Flugzuständen.

Nicht-funktionale Anforderungen betrafen unter anderem:

- Benutzerfreundlichkeit durch Implementierung in MATLAB und Simulink.
- Modularität für zukünftige Erweiterungen.
- Kosteneffizienz im Vergleich zu kommerziellen Lösungen.

Diese Anforderungen werden in einer tabellarischen Dokumentation festgehalten, die Anforderungs-ID, Beschreibung, Priorität, Erfüllungsgrad und Status enthält. Zur präzisen Reproduktion von Kabineninnengeräuschen werden Referenzprofile aus realen Flugmessungen verwendet, die die exakte Nachbildung unterschiedlicher Flugphasen wie Start, Reiseflug und

Landung ermöglichen. Die Minimierung der Abweichung zum Referenzprofil werden durch Festlegung eines Toleranzbereichs von ± 5 dB angestrebt, basierend auf Ergebnissen vergleichbarer Projekte. Der Regler musste zudem unterschiedliche akustische Bedingungen realitätsnah simulieren und den menschlichen Hörbereich von 20 Hz bis 20 kHz abdecken. Im Verlauf des Projekts werden die Anforderungen kontinuierlich angepasst und verfeinert. Durch regelmäßige Tests mit einfachem Equipment, wie Mikrofon und Lautsprecher, können die Funktionalitäten des Reglers überprüft und Optimierungen vorgenommen werden. Neue Erkenntnisse führen dabei zu iterativen Anpassungen der Anforderungen, um die Leistungsfähigkeit des Reglers zu steigern. Die Interessen aller Stakeholder werden durch kontinuierliche Abstimmung und Feedback während des Entwicklungsprozesses berücksichtigt, um sicherzustellen, dass der Regler den Erwartungen entspricht und optimal in die Laborumgebung integriert werden kann.

Werkzeuge und Methoden & Überprüfung der Anforderungen

Zur systematischen Erhebung und Dokumentation der Anforderungen werden die Methoden der VDI 2206 angewendet. Die Hauptmerkmalliste half, funktionale und nicht-funktionale Anforderungen strukturiert zu identifizieren und technische Aspekte wie Regelgenauigkeit und Anpassungsfähigkeit zu berücksichtigen. Die Leitfragen und Kontrollfragen der VDI 2206 dienen dabei als Leitfaden, um Vollständigkeit und Klarheit der Anforderungen zu gewährleisten. Die Anforderungen werden in einer tabellarischen Dokumentation in Excel festgehalten, die Anforderungs-ID, Beschreibung, Priorität, Erfüllungskriterien und Status umfasste.

Als zentrale Software-Tools für die technische Umsetzung des Reglers wird MATLAB und Simulink genutzt. Spezialisierte Anforderungsmanagement-Tools sind für den Projektumfang nicht erforderlich.

Die Überprüfung der Anforderungen erfolgte durch regelmäßige Tests und Validierungen:

- **Anwendung der Leit- und Kontrollfragen:** Sicherstellung der Vollständigkeit durch systematisches Durchgehen der Fragen der VDI 2206.
- **Abgleich mit Referenzprojekten:** Validierung der Anforderungen durch Vergleich mit ähnlichen Projekten.
- **Klare Formulierung und Erfüllungskriterien:** Präzise Definition der Anforderungen und Festlegung messbarer Kriterien zur Überprüfung.
- **Prototypentests und Simulationen:** Prüfung der Messbarkeit und Realisierbarkeit der Anforderungen in MATLAB und Simulink.

- **Iterative Anpassungen:** Lösung von Unklarheiten oder Konflikten durch kontinuierliche Überarbeitung.

Ein Änderungsmanagement-Prozess wird etabliert, basierend auf regelmäßigen Überprüfungen und Anpassungen, um Ressourcen effektiv zu nutzen und Prioritäten zu setzen. Die Anforderungen werden so gestaltet, dass sie absicherungsfähig sind, und Methoden zur Verifikation und Validierung werden von Beginn an eingeplant. Die Anwendung der VDI-2206-Methoden trägt zur Effizienzsteigerung des Entwicklungsprozesses bei. Durch die klare Struktur und systematische Vorgehensweise können Anforderungen zielgerichtet erfasst und umgesetzt werden, was zu einer effektiven Ressourcennutzung und hoher Qualität des Endprodukts führt.

Fazit & Abschluss der Anforderungserhebung

Der Anforderungserhebungsprozess wird formal abgeschlossen, als alle Anforderungen validiert und in der finalen tabellarischen Dokumentation festgehalten sind. Die finalen Anforderungen fließen direkt in die Systemarchitektur des Reglers ein und definieren die grundlegenden Funktionalitäten, was die Implementierung der Software- und Hardwarekomponenten erleichtert. Die Anforderungserhebung ist somit entscheidend für die Finalisierung der Systemarchitektur, da sie sicherstellt, dass alle wesentlichen Anforderungen berücksichtigt wurden und das System den definierten Spezifikationen entspricht.

Der Abschluss der Anforderungserhebung erleichtert den Übergang zur Systemimplementierung, da klare Vorgaben und Ziele festgelegt sind. Die Zustimmung zu den Anforderungen wird durch erfolgreiche Tests und Validierungen gesichert. Während der Implementierungs- und Testphasen werden die Anforderungen weiterhin verbessert und bei Bedarf angepasst, um optimale Leistung zu gewährleisten.

Aus dem Anforderungserhebungsprozess werden wichtige Erkenntnisse für zukünftige Projekte gewonnen:

- **Bedeutung einer strukturierten Anforderungserhebung:** Eine methodische Vorgehensweise erleichtert die Entwicklung komplexer Systeme erheblich.
- **Notwendigkeit der Iteration:** Kontinuierliche Verbesserung durch Tests und Anpassungen steigert die Qualität des Endprodukts.
- **Wert klarer Dokumentation:** Detaillierte Dokumentation erleichtert die Teamkommunikation und gewährleistet Nachvollziehbarkeit.

Insgesamt war die systematische Anforderungserhebung nach VDI 2206 von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Entwicklung des akustischen Umweltsimulationsregelkreises.

Durch die strukturierte Erfassung, Überprüfung und Integration der Anforderungen kann ein Regler entwickelt werden, der hohen Ansprüchen an Präzision und Benutzerfreundlichkeit gerecht wird. Die gewonnenen Erfahrungen bieten wertvolle Leitlinien für zukünftige Projekte in diesem Themenfeld.

3.3 Systemarchitektur & Implementierung

Im folgenden Abschnitt wird die Systemarchitektur gemeinsam mit dem Implementierungsprozess näher betrachtet

3.3.1 Implementierungsansätze von Regelarchitekturen: Ein Vergleichs- und Entscheidungsprozess

Die Implementierung eines Regelalgorithmus zur Reproduktion von Kabinenakustik erfordert eine fundierte und methodische Auswahl der zugrunde liegenden Architekturen. Aufgrund der Vielzahl möglicher Ansätze muss sichergestellt werden, dass sowohl die Frequenzanpassung als auch die Systemreaktion optimal berücksichtigt werden. In der Entwicklungsphase werden verschiedene Ansätze analysiert, darunter die Zeit- und Frequenzbereichsregelung sowie Online- und Offline-Korrekturstrategien. Zudem wird eine vergleichende Bewertung zwischen Single Input Single Output (SISO)- und Multiple Input Multiple Output (MIMO)-Systemen durchgeführt, um deren Eignung für das Projekt zu ermitteln. Darüber hinaus spielte die Entwicklung eines effizienten Mittelungsverfahrens eine zentrale Rolle, um die Systemleistung zu optimieren und eine präzise Anpassung an das Referenzprofil zu gewährleisten. Dieses Kapitel beleuchtet die entscheidenden Architekturentscheidungen und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem im Detail.

Frequenzbereichs- und Zeitbereichsregelung im Vergleich:

- Zeitbereichsregelung: Eine mögliche Architektur hätte den Algorithmus vollständig im Zeitbereich implementiert, ähnlich wie bei der Time Waveform Replication (TWR). Hierbei wäre das Anregungssignal und die Systemantwort direkt im Zeitbereich verarbeitet worden, was jedoch den Nachteil gehabt hätte, dass frequenzspezifische Anpassungen schwer durchzuführen wären. Die Anpassung einzelner Frequenzbereiche erfordert im Zeitbereich eine wesentlich komplexere Berechnung.
- Frequenzbereichsregelung: Die gewählte Architektur basiert auf der Verarbeitung im Frequenzbereich. Der Vorteil hierbei ist, dass Frequenzkomponenten isoliert und gezielt angepasst werden können. Dies ist besonders wichtig bei der Reproduktion von Kabinenakustik, da verschiedene Frequenzbereiche unterschiedlich auf das System reagieren und gezielt korrigiert werden müssen. Aufgrund dieser Flexibilität wurde die Frequenzbereichsregelung bevorzugt. Zusätzlich ermöglicht diese Regelung, spezifische Frequenzbereiche durch den Einsatz von Filtern und anderen frequenzspezifischen Operationen unterschiedlich zu behandeln. Dies führt zu einer präzisen Steuerung des akustischen Verhaltens und einer optimalen Anpassung an das Referenzprofil.

Online oder Offline-Korrekturen:

- Offline-Korrektur: Eine weitere Architektur wäre die Durchführung des gesamten Regelprozesses offline, also ohne Echtzeit-Korrekturen. Hierbei hätte der Algorithmus die gemessenen Systemantworten nach jedem Durchlauf gespeichert und die Korrekturen separat berechnet. Dies hätte jedoch den Nachteil, dass das System schwerfällig arbeitet und sich nicht auf Veränderungen während der Messungen anpassen kann, wie z.B. variable Umgebungsbedingungen oder sich ändernde Systemantworten im Verlauf des Tests. In der akustischen Umgebung von Flugzeugkabinen, die sich während des Flugs verändert, wäre dies nachteilig.
- Online-Korrektur: Die implementierte Architektur nutzt einen Online-Korrekturprozess. Dadurch kann der Algorithmus während der Laufzeit des Tests auf Veränderungen der Systemantwort in Echtzeit reagieren und die Korrekturen iterativ anpassen. Dies führt zu einer höheren Präzision und Konsistenz bei der Nachbildung des Referenzprofils, da der Algorithmus auf Echtzeit-Daten basiert und Änderungen schnell einfließen können. Die kontinuierliche Anpassung ist entscheidend für die hohe Genauigkeit und Effizienz der Regelung in dynamischen Umgebungen.

Single Input Single Output (SISO) oder Multiple Input Multiple Output (MIMO):

- SISO-Architektur: Eine einfache Architektur wäre ein Single Input Single Output (SISO) System, bei dem ein einzelnes Lautsprechersignal (jedoch mehrere Lautsprecher) als Anregung und ein Mikrophon zur Messung der Antwort verwendet wird. Diese Architektur ist einfacher zu implementieren, hat jedoch den Nachteil, dass räumliche und frequenzspezifische Effekte nicht ausreichend berücksichtigt werden. Sobald ein funktionierender und stabiler Regelkreis etabliert wurde, kann dieser aufgrund der modularen Architektur in Simulink auf ein MIMO-System erweitert werden. Diese Flexibilität der SISO-Architektur ermöglicht es, das System schrittweise zu entwickeln und zu verbessern, bevor es komplexer gemacht wird.
- MIMO-Architektur: Eine alternative Architektur wäre ein Multiple Input Multiple Output (MIMO) System, bei dem mehrere Lautsprecher und Mikrofone eingesetzt werden, um eine präzisere Kontrolle über die räumliche Akustik zu ermöglichen. Obwohl MIMO-Systeme potenziell genauere Ergebnisse liefern können, erhöht sich dadurch die Komplexität erheblich. Insbesondere die Modellierung und Implementierung eines MIMO-Regelkreises ist wesentlich aufwendiger, da mehrere simultane Signale verarbeitet und synchronisiert werden müssen. Aufgrund der Anforderungen des Projekts und der

erhöhten Implementierungskomplexität wurde daher die SISO-Architektur als Ausgangspunkt bevorzugt, da sie einfacher und effizienter zu realisieren war.

Alternative Mittelungsverfahren:

- Frühere Versionen des Mittelungsspeichers: In den frühen Entwicklungsphasen wurde ein FIFO-Speicher (First In First Out) verwendet. Bei diesem Verfahren wurden kontinuierlich neue Spektren gesammelt, während ältere Daten gelöscht wurden, sobald der Speicher voll war. Das FIFO-Prinzip führte jedoch zu Problemen, insbesondere bei der Verarbeitung von weißem Rauschen. Da weißes Rauschen eine große Anzahl von Spektren erfordert, um stabile und verlässliche Mittelwerte zu erhalten, führte der FIFO-Speicher zu einem trägen Systemverhalten. Untersuchungen, bei denen 100 bis 200 Einzelspektren gemittelt wurden, zeigten, dass der Algorithmus nicht effizient genug reagierte. Darüber hinaus konnte der iterative Charakter, der sowohl im TWR- als auch im Random Vibration Control Algorithmus eine zentrale Rolle spielt, mit einem reinen FIFO-Speicher nicht realisiert werden. Der FIFO-Speicher arbeitete kontinuierlich und erlaubte keine gezielte Untersuchung einzelner Iterationsschritte, da die Änderungen in den Spektren über die Zeit ununterbrochen stattfanden.
- Aktuelles Verfahren: Um diese Probleme zu beheben, wurde der FIFO-Ansatz durch einen iterativen Mittelungsalgorithmus ersetzt. Dieser Algorithmus sammelt nun Daten über mehrere Iterationen hinweg und ermöglicht eine gezielte Analyse der Veränderungen in den einzelnen Iterationsschritten. Anstelle eines kontinuierlichen FIFO-Prinzips wird eine feste Anzahl von Spektren gesammelt, die anschließend gemittelt werden. Erst wenn die festgelegte Anzahl von Spektren erreicht ist, wird ein neues Mittelwertspektrum berechnet. Dies führt zu stabileren Ergebnissen, da das System nicht mehr auf ein kontinuierliches Rauschen reagiert, sondern auf die gezielt gemittelten Spektren. Der iterative Charakter des Systems bleibt somit erhalten, und es wird einfacher, die einzelnen Iterationen und ihre Auswirkungen auf die Systemleistung zu analysieren. Diese Methode erlaubt es zudem, die Leistung des Regelkreises schrittweise zu untersuchen und zu optimieren, da in jeder Iteration ein neues gemitteltes Spektrum zur Verfügung steht. Dies führt zu einer effizienteren und präziseren Anpassung des Anregungssignals an das Referenzprofil.

Regelalgorithmus in MATLAB oder Simulink:

- MATLAB-Skriptansatz: Eine alternative Möglichkeit zur Implementierung des Regelalgorithmus bestand darin, diesen in MATLAB zu realisieren, wobei ein Hauptskript für den Ablauf der Iterationen und die Ausführung von Unterskripten verantwortlich war.

Dieser Ansatz bot eine hohe Flexibilität bei der Entwicklung von Algorithmen im Frequenzbereich, da MATLAB eine direkte und einfache Verarbeitung von Frequenzdaten ermöglicht. Dies hätte insbesondere die Umsetzung des TWR-Algorithmus und des SISO-Random-Vibration-Control-Algorithmus vereinfacht. Allerdings wäre dieser Ansatz weniger modular gewesen und hätte für nachfolgende Studierende eine erhöhte Einarbeitungszeit erfordert. Zudem wäre die Implementierung von Anpassungen und Erweiterungen in einem rein skriptbasierten Ansatz komplizierter, da die Struktur nicht die gleiche Abstraktionsebene bietet wie eine grafische Entwicklungsumgebung. Dies hätte die Wartung und Weiterentwicklung des Systems erschwert.

- Simulink-Implementierung: Trotz anfänglicher Herausforderungen bei der Umsetzung eines vollständig im Frequenzbereich arbeitenden Regelkreises in Simulink fiel die endgültige Entscheidung zugunsten dieser Plattform. Die modulare Architektur von Simulink bietet signifikante Vorteile, insbesondere hinsichtlich der Entwicklung und Anpassung einzelner Funktionsblöcke. Darüber hinaus ermöglicht Simulink eine klare visuelle Darstellung und Dokumentation des Regelprozesses, was in interdisziplinären Arbeitsumgebungen besonders hilfreich ist. Ein weiterer wesentlicher Vorteil von Simulink liegt in der verbesserten Zugänglichkeit für zukünftige Studierende, da das blockbasierte System eine einfachere Weiterentwicklung und Anpassung ermöglicht. Diese Modularität vereinfacht es, den bestehenden Regelkreis zu erweitern oder zu modifizieren, beispielsweise um ihn auf komplexere Anwendungsfälle wie ein MIMO-System anzupassen. Durch die Wahl von Simulink wurde sichergestellt, dass der Regelalgorithmus nicht nur effizient, sondern auch flexibel und langfristig erweiterbar ist. Diese Entscheidung erleichtert es nachfolgenden Entwicklern und Forschern, den Regelkreis auf neue Anforderungen abzustimmen, ohne das gesamte System neu entwerfen zu müssen.

3.3.2 Gesamtstruktur des akustischen Umweltsimulationsregelkreises

Der entwickelte Regelkreis lässt sich als hybrider, iterativer Closed-Loop-Regler mit Beobachtersystem klassifizieren. Dieser Regler kombiniert kontinuierliche Datenerfassung mit diskreten, iterativen Anpassungen. Durch das geschlossene Regelprinzip wird das Ausgangssignal kontinuierlich gemessen und mit einem Referenzspektrum verglichen. Auf Basis dieser Rückkopplung erfolgt eine schrittweise Anpassung des Eingangssignals, wobei der iterative Charakter des Reglers eine stufenweise Verfeinerung der Korrekturen ermöglicht. Das integrierte Beobachtersystem, in Form eines kontinuierlichen Mittelungsspeichers, stabilisiert die Systemantwort und erlaubt somit eine präzisere Anpassung an das gewünschte Referenzprofil.

Der hybride Regler wird in der nachfolgenden Abbildung 19 visualisiert. Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau und die Funktionsweise dieses Reglers im Detail dargestellt.

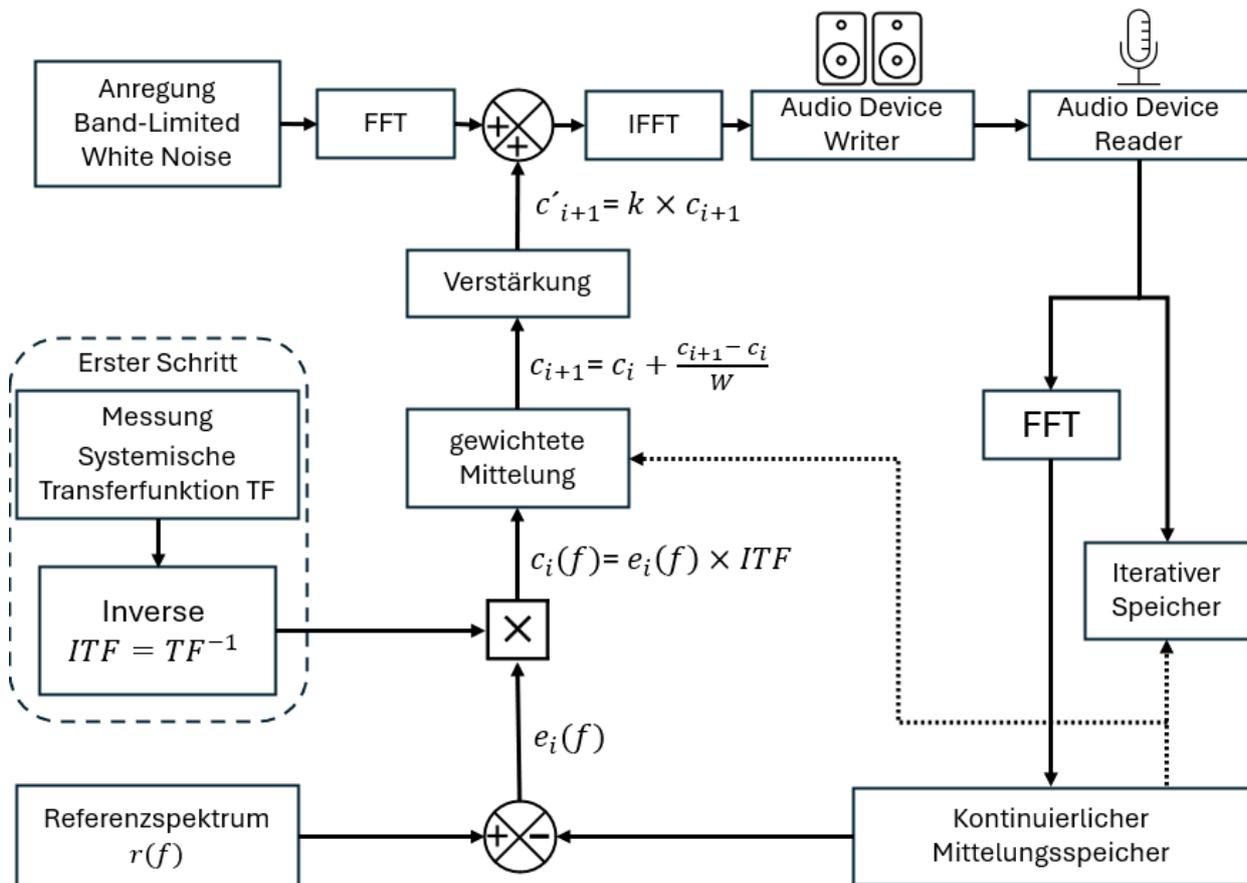


Abbildung 19: Blockdiagramm des entwickelten Regelkreises zur Reproduktion der Kabinenakustik

3.3.3 Ablauf und Prozessschritte einer Iteration im Regelkreis

Messen, Bestimmen und Vorbereiten der TF und ITF: Im ersten Schritt wird die Transferfunktion (TF) des Systems durch die Anregung mit weißem Rauschen und die Aufnahme der Systemantwort in einem separaten Simulink-Modell bestimmt. Die TF wird durch das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsspektrum berechnet. Anschließend wird die Inverse Transferfunktion (ITF) bestimmt, die für die spätere Korrektur systembedingter Verzerrungen benötigt wird. Die TF und ITF werden in MATLAB bereitgestellt, sodass der Regler im weiteren Verlauf auf diese Daten zugreifen und sie für die Berechnung verwenden kann.

Anregung des Systems: Die Iteration beginnt mit der Erzeugung eines breitbandigen weißen Rauschens als Anregungssignal. Dieses Signal wird zunächst durch eine Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich überführt. Diese Transformation in den Frequenzbereich ermöglicht es, das Anregungssignal mit dem Korrekturspektrum anzupassen. Anschließend wird

das korrigierte Spektrum mittels einer Inversen Fourier-Transformation (IFFT) zurück in den Zeitbereich transformiert. Das resultierende Zeitsignal wird schließlich über die Lautsprecher ausgegeben, um das System anzuregen.

Erfassung der Systemantwort: Ein Mikrofon nimmt das vom Lautsprecher ausgegebene akustische Signal auf, um die Systemantwort zu erfassen. Anschließend wird das aufgenommene Signal durch eine Fourier-Transformation in den Frequenzbereich überführt, um das Antwortspektrum des Mikrofonsignals, welches sich im sogenannten Comfortpunkt im Flugzeugrumpf befindet, zu erzeugen. Dieses Spektrum dient als Grundlage für die weitere Verarbeitung, den Vergleich mit dem Referenzspektrum und schließlich für die Berechnung der notwendigen Korrekturen.

Durchschnittsbildung des kontinuierlichen Mittelungsspeichers: Ein MATLAB Function-Block sammelt die FFT-Daten des aufgenommenen Signals und berechnet ein Durchschnittsspektrum aus einer variablen Anzahl von Spektren. Diese Durchschnittsbildung reduziert Zufälligkeiten und liefert ein stabileres Bild der Systemantwort. Der MATLAB Function-Block signalisiert, sobald ein neues Durchschnittsspektrum verfügbar ist, und initiiert somit den nächsten Iterationsschritt. Er fungiert als Taktgeber im Regelprozess und löst die Startsignale für die weiteren Prozesse aus (diese Signalinformation wird als gestrichelte Linie im Blockschaltbild dargestellt). Das gemittelte Antwortspektrum dient anschließend als Grundlage für die Berechnung des Korrekturwertspektrums.

Berechnung der Korrektursignale: Die Differenz zwischen dem gemittelten Antwortspektrum und dem vorgegebenen Referenzprofil wird berechnet, um das erforderliche Korrekturspektrum zu bestimmen. Dieses Korrekturspektrum wird anschließend mit der inversen Transferfunktion skaliert, um systembedingte Verzerrungen zu eliminieren und die erforderlichen Anpassungen des Anregungssignals für die nächste Iteration vorzunehmen.

Anwendung eines Gewichtungsfaktors: Der aus der ITF berechnete Korrekturwert wird in einem MATLAB Function-Block durch einen festen Gewichtungsfaktor angepasst. Dieser Block kombiniert den neuen Korrekturwert mit dem bisherigen, um abrupte Änderungen im Korrekturspektrum zu vermeiden. Durch den festen Gewichtungsfaktor W wird der Übergang zu den neuen Werten sanft gestaltet, was eine stabilere und gleichmäßigere Annäherung an das Zielprofil fördert. Der Block wendet die Gewichtung nur dann an, wenn ein neues Spektrum verfügbar ist, und gibt den aktuellen gewichteten Korrekturwert kontinuierlich aus.

Rückführung und Anpassung des Anregungssignals für den Iterationszyklus: Der gewichtete Korrekturwert kann optional durch einen Verstärkungsfaktor weiter angepasst werden, bevor er zur Anpassung des Anregungssignals des weißen Rauschens verwendet wird. Diese

Anpassung verbessert das Anregungssignal für den nächsten Iterationsdurchlauf, indem spezifische Frequenzbereiche je nach Bedarf verstärkt, abgeschwächt oder unverändert gelassen werden. Dieser Schritt wird durch den kontinuierlichen Mittelungsspeicher (Averaging-Block) gesteuert, der signalisiert, wenn ein neues Durchschnittsspektrum verfügbar ist. Sobald dieses Signal vorhanden ist, startet der nächste Korrekturzyklus. Dadurch beginnt die Iteration von vorne, wobei das verbesserte Anregungssignal als Grundlage für die weitere Optimierung dient.

3.3.4 Funktionale Analyse und Integration der Subsysteme im Umweltsimulationsregelkreis

Bestimmung der Transferfunktion & inversen Transferfunktion

Die Bestimmung und Bereitstellung der Transferfunktion und der Inversen Transferfunktion ist ein wesentlicher Schritt im Regelprozess, um systembedingte Verzerrungen zu identifizieren und zu korrigieren. Im ersten Schritt wird die Transferfunktion des Systems in einem separaten Simulink-Modell bestimmt, indem das System mit weißem Rauschen angeregt und die Systemantwort gemessen wird. Die Transferfunktion wird durch das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsspektrum berechnet. Anschließend wird die ITF berechnet, die für die spätere Korrektur der systembedingten Verzerrungen genutzt wird.

Die Berechnung der TF und ITF erfolgt in mehreren Schritten:

1. Extraktion und Umrechnung der Daten:

- Die Daten werden aus einer 200 Sekunden langen Simulation gewonnen und anschließend in 1-Sekunden-Abschnitte unterteilt. Diese Unterteilung dient dazu, die Berechnung der Frequenzkomponenten zu strukturieren und eine präzise Frequenzanalyse zu ermöglichen.
- Die Abtastrate beträgt dabei, analog zum späteren Regelungsprozess, 44.100 Hz.

2. Berechnung der Transferfunktion (TF):

- Für jeden 1-Sekunden-Abschnitt wird das Ausgangssignal zunächst mithilfe eines Umrechnungsfaktors von Volt in Pascal umgerechnet, bevor die FFT berechnet wird. Dies gewährleistet, dass die Transferfunktion das Verhältnis von Ausgang in Pascal zum Eingang des Amplitudenwertes (Band-Limited White Noise) korrekt darstellt.

- Anschließend wird die FFT des umgerechneten Ausgangssignals und des Eingangssignals berechnet. Die Transferfunktion ergibt sich als Quotient der beiden Spektren.

3. Durchschnittsbildung und Interpolation:

- Nach der Berechnung der Transferfunktion für jeden Abschnitt werden die Ergebnisse über alle Abschnitte gemittelt, um eine stabile und geglättete durchschnittliche Transferfunktion zu erhalten.
- Diese durchschnittliche Transferfunktion wird anschließend invertiert, um die ITF zu erzeugen, die die Grundlage für den Korrekturprozess bildet.

4. Interpolation auf 3600 Punkte für die ITF:

- Die ITF wird auf 3600 Punkte interpoliert, um den Bereich von 0 bis 20.000 Hz gleichmäßig abzudecken.
- Diese interpolierte ITF wird als 3600x1-Array im MATLAB-Workspace bereitgestellt, wie im Unterabschnitt „Bereitgestellte Spektren: ITF & Referenzprofil“ beschrieben.

Die strukturierte Bereitstellung der TF und ITF in MATLAB ermöglicht es dem Regler, gezielte Korrekturen vorzunehmen und systembedingte Eigenschaften zuverlässig zu kompensieren.

Anregungssystem (Band-Limited White Noise):

In der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit wird der Band-Limited White Noise Generator in Simulink verwendet, um das Anregungssignal für den akustischen Umweltsimulationsregelkreis zu erzeugen. Dieses Signal dient als Grundlage für den iterativen Regelprozess, da es eine gleichmäßige Energieverteilung über das gesamte Frequenzspektrum gewährleistet und somit alle relevanten Frequenzen anspricht.

Für die Simulation eines Frequenzspektrums im menschlichen Hörbereich, der von 20 Hz bis 20 kHz reicht, wird die maximale Frequenz f_{max} auf 20 kHz festgelegt. Um eine ordnungsgemäße Simulation zu gewährleisten, wird die Korrelationszeit tc , die ein Maß für die zeitliche Korrelation des Signals ist, nach folgender Formel berechnet:

$$tc \approx \frac{1}{100 \cdot 2 \pi f_{max}} \approx \frac{1}{100 \cdot 125663,71} \approx 7.96 \times 10^{-5} \text{ Sekunden}$$

Dies ergibt eine Korrelationszeit von etwa 7.96 Mikrosekunden. Diese Berechnung stellt sicher, dass das Anregungssignal eine zufällige Abfolge von Werten darstellt, bei der die Korrelation über

sehr kurze Zeiträume nahezu null ist – ideal für die Simulation von weißem Rauschen. Die Sample Time im Simulink-Block wurde auf $1/44100$ Sekunden eingestellt, was einer Abtastrate von 44,1 kHz entspricht. Diese Abtastrate ist gängig für Audioanwendungen und liegt deutlich unter der berechneten Korrelationszeit von 7.96×10^{-5} Sekunden, was die Simulation von Rauschen im Bereich von 0 bis 20 kHz ideal unterstützt. So wird gewährleistet, dass das simulierte Schallsignal im menschlichen Hörbereich vollständig abgedeckt wird. Darüber hinaus wurde der Parameter Noise Power auf 1000 festgelegt, um die Energieverteilung über das Frequenzspektrum zu steuern und eine ausreichende Signalstärke sicherzustellen. Der Seed-Wert des Blocks wurde auf den Default-Wert von 23341 gesetzt, um konsistente und reproduzierbare Ergebnisse in verschiedenen Simulationen zu ermöglichen. Diese Konfiguration stellt sicher, dass das Anregungssignal den menschlichen Hörbereich optimal abdeckt und als verlässliche Grundlage für die iterative Anpassung des Schallspektrums durch den Regler dient.

Buffer-Block

Funktion und Bedeutung im Regelkreis: Der Buffer-Block wird in der Signalverarbeitung verwendet, um sequentielle Daten in Form von „Frames“ zu organisieren. Der Buffer sammelt eine bestimmte Anzahl von Samples, bevor sie zur nächsten Stufe im Regelkreis, in diesem Fall dem FFT-Block, weitergegeben werden. Diese Vorgehensweise ist besonders wichtig, da die FFT (Fast Fourier Transformation) für die Frequenzanalyse eine festgelegte Anzahl von Datenpunkten (Samples) benötigt, um die Umwandlung vom Zeit- in den Frequenzbereich korrekt durchzuführen.

Umsetzung in Simulink: In der Simulink-Umgebung wurde der Buffer-Block verwendet, um die kontinuierlichen, sequenziellen Samples des weißen Rauschens in Frames umzuwandeln, die von der FFT verarbeitet werden können. Wie in Abbildung 20 dargestellt, erhält der Buffer ein kontinuierliches Datenstromsignal (zum Beispiel 1 bis 9) und wandelt es in einen Block von drei aufeinanderfolgenden Datenpaketen um.

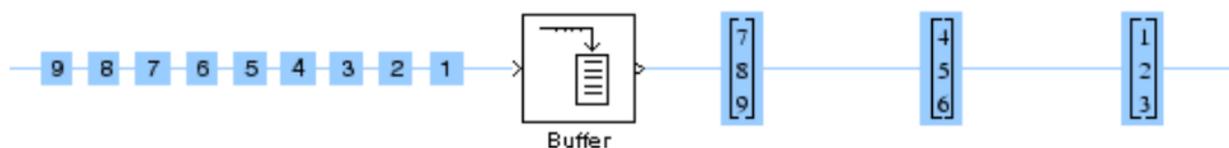


Abbildung 20: Buffer Funktionsweise [82]

In dieser Implementierung wird die Output Buffer Size auf 3600 Samples eingestellt, was bedeutet, dass 3600 Samples gesammelt werden, bevor sie in den FFT-Block eingespeist werden. Dies entspricht der Anzahl von Datenpunkten, die für eine präzise Frequenzanalyse benötigt werden.

Einstellungen und Begründung:

- **Output Buffer Size:** Auf 3600 festgelegt, um die Mindestanzahl an Samples zu gewährleisten, die für eine genaue FFT-Analyse erforderlich sind. Diese Größe ist eng mit der gewünschten Frequenzauflösung und der Leistung der FFT gekoppelt. Output Buffer Size: Die Output Buffer Size wurde auf 3600 festgelegt, um sicherzustellen, dass eine ausreichende Anzahl an Samples für eine präzise FFT-Analyse bereitgestellt wird. Diese Anzahl ist entscheidend, um die gewünschte Frequenzauflösung zu erreichen und die Leistungsfähigkeit der FFT optimal zu nutzen.
- Darüber hinaus ist es in Simulink zwingend erforderlich, dass alle verarbeiteten Signale innerhalb des Regelkreises dieselbe Frame-Größe aufweisen. Dies betrifft insbesondere die Operationen wie Addition, Multiplikation und andere mathematische Verknüpfungen in den Funktionsblöcken. Unterschiedliche Frame-Größen zwischen den Signalen würden zu Fehlermeldungen führen und die Simulation zum Abbruch bringen. Aus diesem Grund muss der Buffer vor dem FFT-Block sicherstellen, dass die Frames korrekt auf die festgelegte Größe von 3600 Samples pro Verarbeitungsschritt angepasst werden, sodass alle nachfolgenden Blöcke konsistente Daten erhalten und verarbeiten können. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung, um einen stabilen und funktionierenden Simulationsablauf zu gewährleisten.
- **Buffer Overlap:** Auf 0 gesetzt, um sicherzustellen, dass keine Überlappung zwischen den Frames auftritt. Dies ist notwendig, um Redundanzen und unnötige Mehrfachverarbeitungen zu vermeiden.

Die Platzierung des Buffer-Blocks vor dem FFT-Block stellt sicher, dass genügend Daten gesammelt werden, um eine vollständige und genaue Frequenztransformation durchzuführen. Ohne einen Buffer-Block könnte der FFT-Block möglicherweise unvollständige oder inkonsistente Daten verarbeiten, was die Genauigkeit der Frequenzanalyse und letztlich die Effektivität des gesamten Regelprozesses beeinträchtigen würde. Durch den Einsatz des Buffer-Blocks wird sichergestellt, dass die kontinuierlichen Signale sinnvoll in Frames unterteilt werden, die dann von den nachfolgenden Funktionsblöcken wie der FFT effizient und korrekt verarbeitet werden können.

FFT Block:

In diesem System wird der FFT-Block verwendet, um das im Zeitbereich generierte Anregungssignal, sei es vom White Noise Generator oder vom Mikrofonsignal, in den Frequenzbereich zu transformieren. Dieser Schritt ist entscheidend für den Regelprozess, da das resultierende Frequenzspektrum mit einem Referenzspektrum verglichen wird. Dies ermöglicht

die Identifizierung von Abweichungen in den einzelnen Frequenzlinien, die pro Frequenzschritt analysiert werden. Diese Differenzen bilden die Grundlage für die Berechnung eines Korrekturspektrums, welches genutzt wird, um das Anregungssignal schrittweise anzupassen, bis das gewünschte Zielprofil erreicht wird. Jede Korrektur wird individuell für die jeweilige FFT-Linie durchgeführt, was eine präzise Anpassung des Signals sicherstellt.

Die Transformation des Signals in den Frequenzbereich ist notwendig, um die einzelnen Frequenzkomponenten des Signals zu zerlegen, zu analysieren und gezielt anzupassen. Ohne diese Umwandlung wäre es unmöglich, das Frequenzspektrum detailliert zu untersuchen oder präzise Korrekturen vorzunehmen, da das Zeitbereichssignal keine ausreichenden Informationen über die Frequenzverteilung liefert. Durch die Überführung in den Frequenzbereich kann der iterative Regelprozess auf Basis der exakten Spektralanalyse optimiert werden. In Simulink wird die Anzahl der Frequenzlinien, auch als FFT-Linien bezeichnet, durch die Größe der FFT bestimmt, die wiederum von der Abtastrate und der Puffergröße beeinflusst wird. In diesem speziellen Fall beträgt die Puffergröße 3600 Samples.

Um die Frequenzauflösung und die Anzahl der Frequenzlinien zu berechnen, wird folgende Formel verwendet:

$$\text{Frequenzauflösung} = \frac{f_s}{N}$$

Dabei ist:

- f_s die Abtastrate (hier 44,1 kHz),
- N die Anzahl der FFT-Punkte (entspricht der Puffergröße, hier 7200).

Die Frequenzauflösung beträgt somit:

$$\text{Frequenzauflösung} = \frac{44100}{7200} = 6,125 \text{ Hz}$$

Dies bedeutet, dass jede Frequenzlinie einen Frequenzbereich von 6,125 Hz repräsentiert. Da die FFT für reale Signale ein symmetrisches Spektrum erzeugt, ist nur die Hälfte der Frequenzlinien eindeutig, da die Daten um die Nyquist-Frequenz (die halbe Abtastrate) gespiegelt werden. Die Anzahl der eindeutigen Frequenzlinien beträgt somit:

$$\frac{N}{2} = \frac{7200}{2} = 3600$$

Das System erzeugt also 3600 eindeutige Frequenzlinien, wobei jede Frequenzlinie einen Bereich von 6,125 Hz abdeckt. Dies ermöglicht eine detaillierte Frequenzanalyse bis zur Nyquist-Frequenz von 22,05 kHz. Die Einstellung „Inherit FFT length from input dimensions“ in Simulink stellt sicher, dass die FFT die gleiche Größe wie der Puffer verwendet, in diesem Fall 7200 Samples. Diese Vorgehensweise garantiert eine optimale Frequenzauflösung und ermöglicht eine präzise Spektralanalyse, was für den iterativen Regelprozess entscheidend ist.

Complex to Magnitude-Angle

Der „Complex to Magnitude-Angle“ Block übernimmt die Funktion, das komplexe Signal aus der Fourier-Transformation in Amplitude und Phase zu zerlegen. Diese Konfiguration ermöglicht es, das System gezielt nur anhand der Amplitudenwerte zu beschreiben, da der Regelalgorithmus ausschließlich mit diesen arbeitet, um Anpassungen vorzunehmen und das gemessene Spektrum an das Referenzprofil anzupassen. In Simulink ist der Block so konfiguriert, dass die „Magnitude“-Werte als direkte Eingabe für den Regler dienen, während die Phaseninformation, die für diesen Anwendungsfall nicht erforderlich ist, unberücksichtigt bleibt. Diese Implementierungsentscheidung reduziert den Rechenaufwand und vereinfacht die Signalverarbeitung, indem nur die Amplitudeninformationen in die Regelung einfließen. Diese Konfiguration wird verwendet, um eine erste vereinfachte Version des Systems in Betrieb zu nehmen und die grundlegende Funktionalität des Regelalgorithmus zu prüfen, bevor eine umfassendere Implementierung angestrebt wird. So trägt der Block zur Effizienz und Genauigkeit der Anpassungen im Frequenzbereich bei und ermöglicht eine gezielte Kontrolle über die relevanten Spektralanteile.

Selector

Der Selector-Block wird eingesetzt, um das symmetrische Spektrum, das nach der Fourier-Transformation (FFT) entsteht, auf die relevanten positiven Frequenzanteile zu reduzieren. Da die FFT für reale Signale ein symmetrisches Spektrum erzeugt, ist die zweite Hälfte des Spektrums redundant und für die weitere Verarbeitung nicht erforderlich. Der Selector-Block ist daher so konfiguriert, dass er nur die positive Hälfte des Spektrums auswählt. In dieser Konfiguration mit einer Eingangsgröße von 7200 wird die erste Hälfte extrahiert, sodass der Block eine Ausgabegröße von 3600 bereitstellt. Durch diese Auswahl wird sichergestellt, dass ausschließlich die relevanten Frequenzinformationen an den Regler weitergeleitet werden, was die Effizienz und Genauigkeit der Signalverarbeitung verbessert und unnötigen Rechenaufwand vermeidet.

IFFT

Der Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) Block wird verwendet, um das Signal nach der Frequenzanpassung wieder in den Zeitbereich zurückzuführen, was für die akustische Ausgabe

des Signals notwendig ist. In dieser Konfiguration ist die FFT-Länge auf 3600 festgelegt, was sicherstellt, dass die Transformationslänge konsistent mit der vorherigen FFT-Konfiguration ist und die korrekte Anzahl an Frequenzkomponenten in den Zeitbereich zurückgeführt wird. Die Option "Wrap input data when FFT length is shorter than input length" ist aktiviert, was bedeutet, dass das Signal umschlossen wird, falls die Länge des Eingangssignals die IFFT-Länge überschreitet. Diese Einstellung verhindert, dass Daten abgeschnitten werden, und stellt sicher, dass die vollständigen Frequenzinformationen im Zeitbereich verfügbar sind. Die Konfiguration des IFFT-Blocks ist somit optimiert, um eine reibungslose und genaue Rücktransformation des Spektrums in den Zeitbereich zu gewährleisten.

Audio Device Writer & Audio Device Reader

Der Audio Device Reader und der Audio Device Writer Block werden zusammen verwendet, um das Audiosignal zu lesen und wiederzugeben. Dabei ist es entscheidend, dass beide Blöcke konsistente Einstellungen haben, um eine reibungslose Simulation zu gewährleisten. Andernfalls kann die Simulation nicht gestartet werden. In dieser Konfiguration sind der Treiber und das Gerät auf „ASIO“ und „Focusrite USB ASIO“ eingestellt, um eine zuverlässige Audioverbindung über das gewählte Interface sicherzustellen. Die Sample Rate ist für beide Blöcke auf 44100 Hz festgelegt, was dem Standard für Audiosampling entspricht und die Konsistenz zwischen Eingabe und Ausgabe gewährleistet.

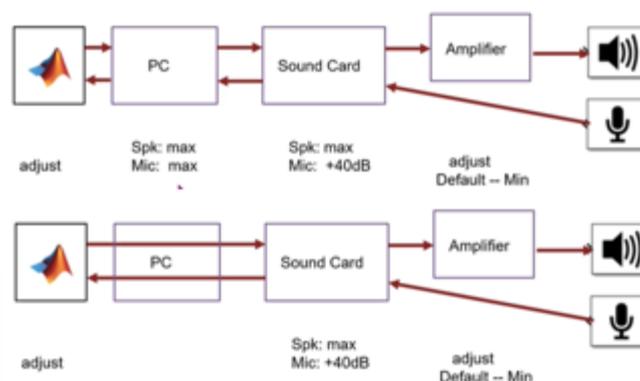


Abbildung 21: Vergleich ASIO & directSound driver [83]

Die Verwendung des ASIO-Treibers bietet den Vorteil, dass die Windows-Soundsteuerung umgangen wird, wodurch eine direkte und optimierte Kommunikation zwischen MATLAB und der externen Soundkarte ermöglicht wird. Diese Konfiguration minimiert Verzögerungen und vermeidet die Abhängigkeit von den Windows-Lautstärke- und Geräteeinstellungen, die das Signal verfälschen könnten. Das ASIO-Setup gewährleistet eine niedrigere Latenz und eine höhere Signalgenauigkeit, die für präzise und konsistente Audioaufnahmen und -wiedergaben unerlässlich sind. Da der ASIO-Treiber direkten Zugriff auf die Hardware ermöglicht, kann die Pegelsteuerung ausschließlich in der Software erfolgen, ohne dass Windows-interne

Lautstärkeregler das Signal beeinflussen, was besonders wichtig für eine stabile und unverfälschte Regelung ist. [83]

Kontinuierlicher Mittelungsspeicher

Der kontinuierliche Mittelungsspeicher übernimmt eine zentrale Rolle im Regelungsprozess, indem er mehrere FFT-Spektren sammelt, um eine Mittelung über diese zu berechnen. Dadurch wird sichergestellt, dass das gemessene Frequenzspektrum durch Mittelung stabilisiert wird, bevor eine Anpassung des Signals vorgenommen wird. Dies ist besonders wichtig, da das Anregungssignal (weißes Rauschen) ein stochastisches Signal ist und ohne eine Mittelung große Schwankungen im Spektrum auftreten werden.

Hauptfunktionen und Funktionsweise des kontinuierlichen Mittelungsspeichers: In Simulink wird dieser Prozess durch einen „MATLAB Function Block“ implementiert, der den Mittelungsprozess steuert. Die Funktion sammelt die Spektren in einem internen Buffer und berechnet nach einer vordefinierten Anzahl von Iterationen das gemittelte Spektrum. Der kontinuierliche Mittelungsspeicher sorgt dafür, dass das System nicht auf ein einzelnes Spektrum reagiert, sondern auf ein gemitteltes Spektrum, das eine bessere Repräsentation des tatsächlichen Schallsignals darstellt. Der MATLAB-Code arbeitet dabei mit „persistenten Variablen“, um den Zustand über mehrere Aufrufe hinweg zu speichern. Dies ermöglicht es dem System, die FFT-Daten (Spektren) über jede Iterationen hinweg zu sammeln und zu mitteln.

1. **Buffer für Spektren:** Der Code definiert einen Buffer, „fftData“, der die FFT-Spektren über mehrere Iterationen hinweg speichert. Dieser Puffer wird mit der Anzahl der FFT-Daten (hier 3600 Punkte) initialisiert. Jedes Mal, wenn ein neues Spektrum empfangen wird, wird dieses in den Puffer eingefügt.
2. **Mittelungsspektrum:** Sobald eine ausreichende Anzahl an Spektren gesammelt wurde (hier 200 Spektren, definiert durch „numAverages“ und welches im function Block frei wählbar ist), wird das gemittelte Spektrum berechnet. Diese Mittelung sorgt dafür, dass zufällige Schwankungen im Signal geglättet werden, was zu einem stabileren Korrekturspektrum führt.
3. **Tackgeber (Feedback):** Nachdem die Mittelung erfolgt ist, gibt der Block ein Signal aus („neues_spektrum_vorhanden“), das den nachfolgenden Systemblöcken mitteilt, dass ein neues gemitteltes Spektrum bereitsteht. Dies ist entscheidend für die Synchronisation mit anderen Blöcken, wie dem Korrekturgewichtungs- und Speichersystem, die auf dieses Signal angewiesen sind, um ihre Berechnungen fortzusetzen.

4. Maximale Iterationen: Der Block ist außerdem so konzipiert, dass er nach einer vordefinierten Anzahl von Iterationen (Variable: „maxIterations“) keine neuen Spektren mehr mittelt. Dies verhindert eine unendliche Schleife und erlaubt dem System, den Regelprozess in einem festgelegten Rahmen durchzuführen.

Wichtige Schleifen und Parameter:

- Zählvariable „count“: Diese Variable zählt die Anzahl der gesammelten Spektren. Sobald die gewünschte Anzahl an Spektren gesammelt wurden, wird die Mittelung durchgeführt, und „count“ wird zurückgesetzt.
- „avgSpectrum“: Diese Variable speichert das aktuell gemittelte Spektrum und wird kontinuierlich als Ausgang des Blocks bereitgestellt.
- „neues_spektrum_vorhanden“: Dieser Parameter ist ein Signal, das den nachgelagerten Blöcken anzeigt, dass ein neues gemitteltes Spektrum berechnet wurde und verarbeitet werden kann.

Durch diesen Prozess wird sichergestellt, dass die Regelung auf einem stabilen und repräsentativen Spektrum basiert, was die Genauigkeit und Robustheit des Regelkreises erheblich verbessert. Der kontinuierliche Mittelungsspeicher ist somit ein wesentliches Subsystem im Regelprozess, das für die Stabilität und Genauigkeit der Frequenzanalyse und Korrektur sorgt.

Iterative Speicherung des Mikrofonsignals

Dieser „MATLAB Function Block“ übernimmt eine zentrale Funktion in der Protokollierung und Analyse der Mikrofonsignale während des gesamten Regelprozesses. Hierbei wird das Mikrofonsignal, das das akustische Verhalten des Systems aufzeichnet, in einem Puffer zwischengespeichert und nach jeder Iteration des Regelkreises in den MATLAB-Workspace exportiert. Diese Daten werden für jede Iteration abgespeichert, was eine detaillierte Nachverfolgung des Regelprozesses ermöglicht und eine spätere Analyse der Anpassungen erlaubt. Der MATLAB Function Block ist so implementiert, dass die Mikrofonsignale für jede Iteration des Regelprozesses gesammelt und im MATLAB-Workspace abgelegt werden. Dieser iterative Prozess erlaubt eine umfassende Analyse, da für jede Iteration die aufgezeichneten Mikrofonsignale separat gespeichert werden, um den Fortschritt des Regelprozesses genau zu verfolgen. Dies ist entscheidend, um den Regelalgorithmus zu validieren und bei Bedarf Anpassungen vorzunehmen.

Umsetzung in Simulink und Code-Details

Der Code verwendet ebenfalls persistente Variablen, um sicherzustellen, dass Daten über mehrere Iterationen hinweg erhalten bleiben. Die Funktionsweise des Blocks lässt sich in folgende wesentliche Schritte unterteilen:

1. Persistente Variablen für den Datenpuffer und den Iterationszähler: Die Variablen „dataBuffer“ und „iterationCount“ speichern die Mikrofondaten und zählen die Anzahl der Iterationen. Diese Variablen sind persistent, was bedeutet, dass ihre Werte zwischen den Aufrufen des MATLAB Function Blocks erhalten bleiben. Dadurch wird sichergestellt, dass der Puffer kontinuierlich Daten sammelt.
2. Sammeln des Mikrofonsignals: Das Mikrofonsignal wird mit jedem Funktionsaufruf in den „dataBuffer“ eingefügt. Dieser Buffer enthält alle Mikrofondaten einer Iteration, bevor sie gespeichert werden.
3. Speicherung des Mikrofonsignals: Sobald ein neues Spektrum verfügbar ist (angezeigt durch das Signal „neues_spektrum_vorhanden“), wird der Inhalt des „dataBuffer“ unter einem eindeutigen Variablennamen im MATLAB-Workspace gespeichert. Der Name der Variablen wird dynamisch generiert (z. B. 'iteration_1', 'iteration_2'), basierend auf der aktuellen Iterationsnummer. Dies ermöglicht eine saubere Trennung der Daten jeder Iteration.
4. Leeren des Puffers für die nächste Iteration: Nach der Speicherung wird der „dataBuffer“ geleert, sodass er bereit ist, die Mikrofonsignale der nächsten Iteration aufzunehmen.

Der beschriebene „MATLAB Function Block“ erhält das Signal „neues_spektrum_vorhanden“ von dem kontinuierlichen Mittelungsspeicher. Dieses Signal informiert den Block darüber, dass ein neues gemittelttes Spektrum verfügbar ist. Erst dann wird die Speicherung der Mikrofonsignale im MATLAB-Workspace ausgelöst. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Signaldaten nur dann protokolliert werden, wenn eine vollständige Iteration abgeschlossen wurde und ein neues Spektrum zur Analyse bereitsteht. Dies garantiert eine exakte Synchronisation zwischen den verschiedenen Subsystemen und verhindert eine unnötige Speicherung unvollständiger Daten. Die gewählte Implementierung mit persistenten Variablen und der Verwendung von „assignin“, um den Datenpuffer im MATLAB-Workspace zu speichern, ist ideal für eine detaillierte und nachvollziehbare Datenspeicherung. Durch diese Methode können die aufgezeichneten Signale jeder Iteration separat gespeichert und später analysiert werden. Dies ist insbesondere für die Validierung und Feinjustierung des Reglers von großer Bedeutung, da die gespeicherten Daten detaillierte Einblicke in den Verlauf des Regelprozesses bieten.

Korrekturgewichtung

Der Korrekturgewichtung Block spielt ebenfalls eine wesentliche Rolle im Regelprozess, indem er das Fehlerspektrum schrittweise anpasst, um eine präzise Anpassung des Anregungssignals zu ermöglichen. Diese Gewichtung ist wichtig, um sprunghafte Veränderungen im Korrekturspektrum zu vermeiden und eine stabile, iterative Anpassung des Signals zu gewährleisten. Der Block führt eine gewichtete Korrektur des Fehlerspektrums durch, die nur dann durchgeführt wird, wenn ein neues gemitteltes Spektrum zur Verfügung steht. Dies stellt sicher, dass das Spektrum schrittweise angepasst wird und die Regelung stabil bleibt. Die Korrektur wird durch den Gewichtungparameter W definiert. Dies bedeutet, dass das neue Korrektursignal immer nur zu einem Teil ($1/W$) in die Anpassung eingeht, während das aktuelle Korrektursignal zu einem Großteil erhalten bleibt.

Der Code arbeitet mit einer persistenten Variablen „korr_aktuell“, die das aktuelle Korrekturspektrum speichert. Diese Variable behält ihren Wert zwischen den Iterationen bei, sodass das Spektrum kontinuierlich angepasst werden kann. Der Block funktioniert in den folgenden Schritten:

1. Initialisierung: Bei der ersten Ausführung wird die Variable „korr_aktuell“ mit Nullen initialisiert, und der Gewichtungsfaktor W wird vor der Simulation auf einen selbst gewählten Wert festgelegt.
2. Die Korrektur basierend auf neuem Spektrum: Wenn das Signal „neues_spektrum_vorhanden“ den Wert „1“ annimmt, wird das neue Korrektursignal berechnet. Der Wert des neuen Korrekturspektrums ergibt sich durch die gewichtete Differenz zwischen dem aktuellen und dem neuen Fehlerspektrum und wird im Code wie folgt definiert:

$$\text{korr_aktuell} = \text{korr_aktuell} + \frac{(\text{korr_signal} - \text{korr_aktuell})}{W}$$

Dies führt dazu, dass das Korrekturspektrum kontinuierlich an das neue Fehlerspektrum angepasst wird, aber nicht sofort vollständig übernommen wird. Dadurch wird eine abrupte Änderung des Anregungssignals vermieden, was zu einer stabileren Regelung führt.

3. Ausgabe des aktuellen Korrekturspektrums: Unabhängig davon, ob ein neues Spektrum vorliegt oder nicht, gibt der Block kontinuierlich das aktuelle gewichtete Korrekturspektrum aus. Dies stellt sicher, dass das Regelsystem in jeder Iteration ein angepasstes Anregungssignal verwenden kann.

Die Verwendung von persistenten Variablen ermöglicht es, das Korrekturspektrum über mehrere Iterationen hinweg zu speichern und kontinuierlich anzupassen. Der Gewichtungsfaktor W sorgt dafür, dass das Korrekturspektrum schrittweise an die Veränderungen des Fehlerspektrums angepasst wird, was zu einer stabilen Regelung und einer präzisen Anpassung des Anregungssignals führt. Durch diese Vorgehensweise wird verhindert, dass sprunghafte Änderungen im Spektrum zu Instabilitäten im Regelprozess führen.

Bereitgestellte Spektren: ITF & Referenzprofil

Der Constant-Block wird verwendet, um das Inverse Transferfunktion-Spektrum und das Referenzspektrum als 3600x1 double Arrays in den Regelkreis einzuspeisen. Da sowohl das Mikrofonsignal als auch das Anregungssignal mit einer Abtastrate von 44.100 Hz arbeiten, liegt die darstellbare Frequenz bei 22.050 Hz, was der Nyquist-Frequenz entspricht. Um das Spektrum korrekt abzubilden, decken das Referenzspektrum und die ITF den Bereich von 0 bis 20.000 Hz ab, da Frequenzen darüber hinaus für diesen Anwendungsfall nicht benötigt werden. Die Frequenzauflösung beträgt 6,125 Hz, was bedeutet, dass etwa 3265 Einträge im Array notwendig sind, um diesen Bereich zu füllen. Die restlichen Einträge bis zur vollen Länge von 3600 werden mit 0 belegt, um sicherzustellen, dass nur relevante Frequenzen im Regelprozess berücksichtigt werden. Obwohl der Constant-Block auf die Abtastrate der zu verarbeitenden Spektren eingestellt ist, die aus dem kontinuierlichen Mittelungsspeicher-Block zur Verfügung gestellt werden, treten zahlreiche Fehlermeldungen auf. Diese Meldungen entstehen durch Diskrepanzen zwischen den Signalraten, die entweder den Start der Simulation verhindern oder zu einem „Stottern“ in der Verarbeitung der Signale führen. Um diese Problematik zu lösen, wird ein Rate Transition-Block eingefügt. Dieser Block stellt sicher, dass die Datenübertragung zwischen Blöcken mit unterschiedlichen Abtastraten konsistent erfolgt, sodass der Regelalgorithmus stabil arbeitet und die Daten ohne Unterbrechungen verarbeitet. Diese Struktur ermöglicht es dem Regler, präzise Anpassungen vorzunehmen, indem ausschließlich die erforderlichen Frequenzkomponenten im Spektrum genutzt werden. Durch die gezielte Null-Füllung der höheren Frequenzen und die Nutzung der 3600x1 Arrays wird eine effiziente und konsistente Grundlage für die Berechnung der Korrekturwerte geschaffen, die den Regelalgorithmus dabei unterstützt, das gemessene Spektrum kontinuierlich an das Referenzprofil anzupassen.

3.4 Integration und Verifikation

Im folgenden wird der Integrations- und Verifikationsprozess anhand einzelner Unterkapitel beschrieben.

3.4.1 Physische Implementierung des Systems in Bezug auf Hardware und Software

Lautsprecher: Vier aktive Turbosound iQ12 Lautsprecher werden verwendet, um das Anregungssignal auszugeben. Mit einer Leistung von 2500 W, einem Abstrahlwinkel von 80° und einem Frequenzgang von 52 Hz bis 18.000 Hz eignen sich diese Lautsprecher hervorragend zur präzisen Reproduktion von Frequenzspektren. Sie decken einen großen Bereich der akustischen Anforderungen ab und gewährleisten eine gleichmäßige Schallverteilung im Raum. [84]

Qsources Qohm: Vier omnidirektionale Oktaederlautsprecher vom Typ Qsources Qohm ergänzen das Setup. Diese Lautsprecher decken ein Frequenzspektrum von 50 Hz bis 16.000 Hz ab und liefern einen Schallpegel von bis zu 122 dB. Mit ihrer Oktaeder-Form und dem hohen Schalldruckpegel sind sie besonders für raumakustische Simulationen und Messungen geeignet, da sie eine gleichmäßige Schallverteilung in alle Richtungen ermöglichen. [85]

Subwoofer: Zwei Behringer B1500XP aktive Subwoofer der Eurolive-Serie werden eingesetzt, um die tieferen Frequenzen abzudecken. Mit einem Frequenzbereich von 32 Hz bis 200 Hz und einer Leistung von 3000 W sorgen diese Subwoofer für eine präzise Wiedergabe der Bassfrequenzen. Sie verfügen über eine interne Frequenzweiche, die eine nahtlose Integration mit den Mid/High-Lautsprechern ermöglicht. [86]

Verstärker: Vier PA1000 Verstärker werden zur Verstärkung der Qohm-Lautsprecher eingesetzt. Diese Verstärker bieten jeweils eine Leistung von 1000 W und sind speziell für raumakustische Messungen ausgelegt. Sie ermöglichen eine präzise Verstärkung der Anregungssignale über einen Frequenzbereich von 50 Hz bis 10 kHz. Die integrierten Hoch- und Tiefpassfilter unterstützen die gezielte Anpassung des Signals. [87]

Audio-Interface: Das Focusrite Scarlett 2i2 (3rd Gen) wird sowohl zur Ausgabe des Anregungssignals als auch zur Aufnahme der Mikrofon-Signale verwendet. Mit einem Dynamikbereich von 110 dB und Abtastraten von bis zu 192 kHz stellt das Interface sicher, dass die analogen und digitalen Signale präzise umgewandelt werden. Es ist aufgrund seiner Erschwinglichkeit und Benutzerfreundlichkeit besonders gut für den Einsatz in studentischen Projekten geeignet. [88]

Mikrofon: Das Behringer ECM8000 ist ein omnidirektionales Messmikrofon mit einem linearen Frequenzgang von 15 Hz bis 20.000 Hz. Es wird verwendet, um das akustische Signal präzise aufzunehmen und ermöglicht genaue Messungen, die für den Regelkreis entscheidend sind. Wie das Audio-Interface handelt es sich um eine kostengünstige Komponente, die sich ideal für studentische Projekte eignet. [89]

Die Hardwarekomponenten sind auf effiziente Weise miteinander verbunden, um den Regelprozess optimal zu unterstützen. Ausgang 1 des Focusrite Scarlett 2i2 Audio-Interfaces ist über eine Daisy-Chain-Verbindung mit den Turbosound iQ12 Lautsprechern und den Subwoofern verbunden. Diese Kette sorgt für eine gleichmäßige Signalverteilung und ermöglicht eine zuverlässige Ansteuerung der Lautsprecher. Ausgang 2 des Interfaces steuert die PA1000-Verstärker, welche über einen Signalsplitter verbunden sind und die Qsources Qohm Lautsprecher ansteuern. Das Mikrofonsignal wird direkt in das Interface eingespeist. Das Scarlett 2i2 verfügt über integrierte Preamps, die das ankommende Mikrofonsignal verstärken, bevor es zur digitalen Verarbeitung an die Software weitergeleitet wird. Zur Steuerung des Systems wird primär Simulink eingesetzt. Simulink ermöglicht die Ausführung des Reglers und die Echtzeitsteuerung der Hardwarekomponenten. MATLAB wird verwendet, um die Transferfunktion (TF) und die Inverse Transferfunktion (ITF) zu berechnen, welche anschließend in den Regelprozess integriert werden. Die Kombination dieser beiden Softwaretools gewährleistet eine präzise Steuerung und Anpassung des Anregungssignals an die Systemantwort. Die Software wird auf einem handelsüblichen Laptop ausgeführt, der die Rechenleistung bereitstellt, um den Regelprozess in Echtzeit zu steuern. MATLAB und Simulink stehen den Studierenden als akademische Lizenz zur Verfügung, sodass die Software jederzeit zugänglich ist und von allen Beteiligten verwendet werden kann. Besondere Anforderungen an die Hardware bestehen nicht. Die gewählten Komponenten wurden bewusst so ausgewählt, dass der Regelkreis auch von nachfolgenden Studierenden problemlos eingesetzt und weiterentwickelt werden kann. Diese Entscheidung ermöglicht eine hohe Flexibilität und erleichtert zukünftigen Studierenden den Zugang zu den notwendigen Ressourcen.

3.4.2 Versuchsaufbau HCAT

Die Messungen werden in der Kabine eines A320-Rumpfausschnitts am HCAT durchgeführt, der sich in einer Akustik- und Klimakammer befindet. Der etwa 4,5 Meter lange Rumpfausschnitt ist zentral in der Kammer positioniert und von einem schallreflektierenden Hallraum umgeben. Es handelt sich um eine standardisierte OEM Airbus A320 Kabine, in der ein separater Bereich durch eine akustische Isolierung, auch als „Bärenhöhle“ bezeichnet, abgetrennt wurde. Dieser Bereich ist durch gezielte Schalldämmmaßnahmen, wie beispielsweise den Einsatz von Basotec, von der restlichen Kabine isoliert. In diesem separaten Abschnitt befindet sich ein Versuchsfeld für VIP-

Ausstattungen sowie erweiterte Lärminderungsmaßnahmen. Dadurch können sowohl in der Standardkabine als auch in den VIP-Kabinenaufbauten vielfältige und separate Untersuchungen durchgeführt werden. Eine detaillierte Darstellung des exakten Versuchsaufbaus und der Signalwege ist in der nachfolgenden Versuchsskizze [Abbildung xy] zu finden..

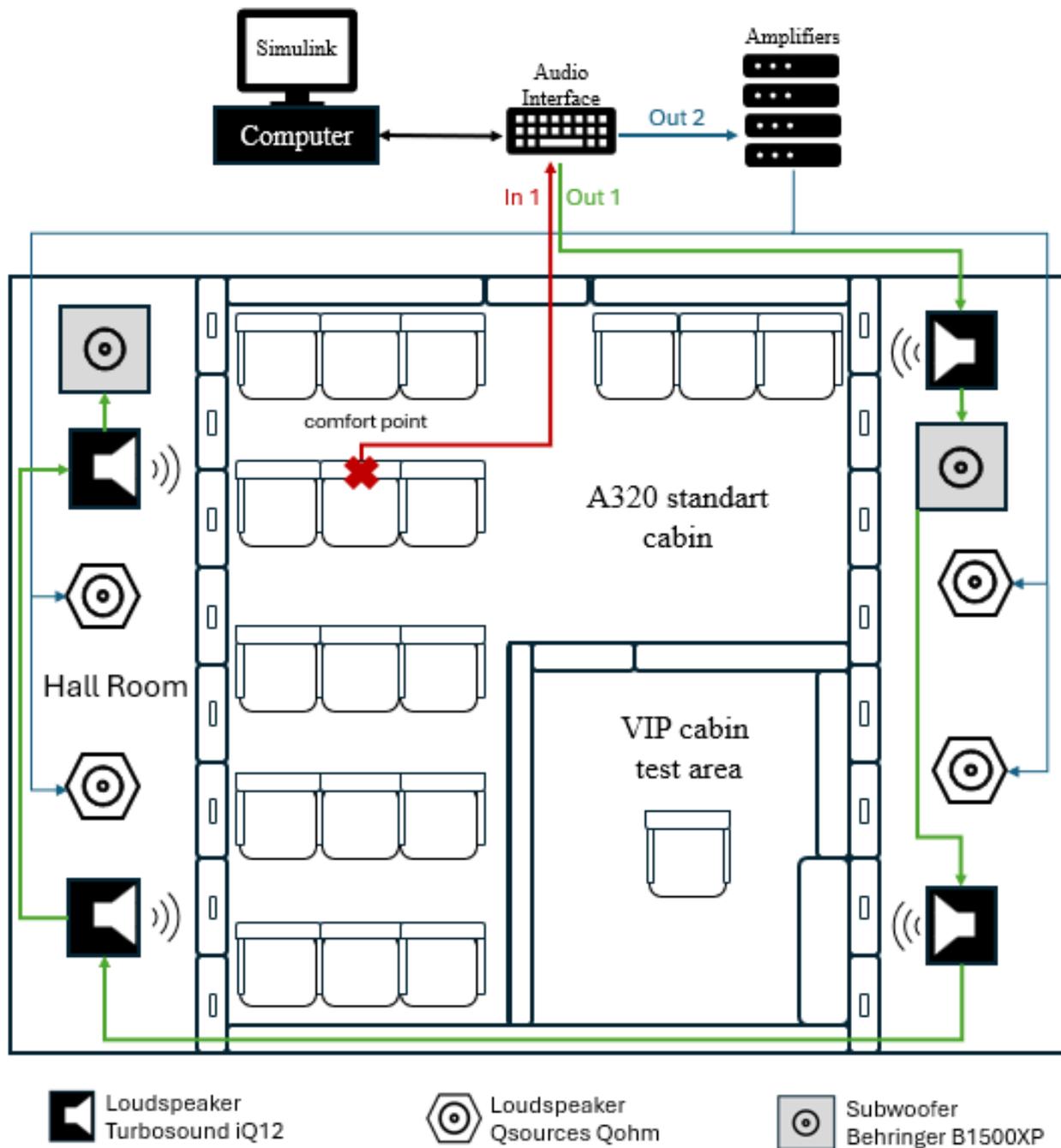


Abbildung 22: Skizze des Versuchsaufbaus & Signalflüsse

Die folgende Abbildung zeigt die Positionierung der Lautsprecher im Hallraum. Die verschiedenen Lautsprecher sind gleichmäßig auf Stativen angeordnet, um eine möglichst homogene Verteilung des Schalls sicherzustellen und somit optimale Voraussetzungen für die nachfolgenden Messungen zu schaffen.



Abbildung 23: Versuchsaufbau HCAT, (links) Rückseite, (rechts) Vorderseite

Die Mikrofonpositionierung spielt eine wichtige Rolle bei der genauen Reproduktion und Messung der Kabinenakustik und bestimmt maßgeblich die Übertragungsfunktion des verwendeten Systemsaufbaus. Die Referenzprofile, die verschiedene Flugzustände repräsentieren, wurden an der Sitzposition E in einem Airbus A320 mit einem B&K Type 2270 Sound Level Meter / Analyzer aufgenommen. Diese Referenzprofile bilden die Grundlage für die akustischen Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts. Die Wahl der Sitzposition E als Messpunkt erfolgte bewusst, da diese Position als repräsentativ für die Schallbelastung von Passagieren während eines Fluges gilt. Die gewonnenen Profile decken verschiedene Flugzustände ab, darunter Start, Steigflug, Reiseflug und Landung. Da die Messungen in einem A320 durchgeführt wurden, dessen Rumpfsegment dem des HCAT-Rumpfausschnitts entspricht, wurde beschlossen, auch für die Komfortpunktmessungen im Experiment die Sitzposition E zu verwenden. Das Mikrofon wurde mittig an der Rückenlehne des Sitzes positioniert, sodass es sich auf der Kopfhöhe eines

sitzenden Passagiers befindet. Diese Platzierung stellt sicher, dass die Schallmessungen unter ähnlichen Bedingungen wie die Referenzmessungen durchgeführt werden. Dadurch wird eine realitätsnahe Reproduktion der akustischen Umwelt ermöglicht und die Vergleichbarkeit zwischen den realen Flugbedingungen und den Messungen im HCAT gewährleistet.

3.4.3 Vorversuche Schalldruckpegelverteilung

In den Voruntersuchungen wird die Schalldruckpegelverteilung im Hallraum analysiert, um einen ersten Eindruck von der Diffusität des erzeugten Schallfeldes zu gewinnen. An mehreren Positionen im Raum werden dazu Schalldruckpegelmessungen durchgeführt. Aufgrund der zuvor beschriebenen Proportionalität zwischen Schalldruck und Schallenergiedichte lässt sich auf Basis dieser Messungen eine erste Aussage über die Gleichmäßigkeit der Schallfeldverteilung treffen. Die Anordnung einer großen Anzahl an Lautsprechern an verschiedenen Seiten des Rumpfsegments birgt das Risiko einer ungleichmäßigen Verteilung des Schallfeldes im Hallraum. Dies kann unter anderem durch Resonanzen oder ungleichmäßige Druckverteilungen verursacht werden, was den Regelungsprozess erheblich erschwert. Da der verwendete Regelalgorithmus als SISO-System (Single Input, Single Output) konzipiert ist, gestaltet sich die Korrektur komplexer Störungen im Schallfeld besonders herausfordernd. Aus diesem Grund wird diese Voruntersuchung durchgeführt, um potenzielle Problemstellen zu identifizieren und vor den eigentlichen Messungen Anpassungen vorzunehmen.

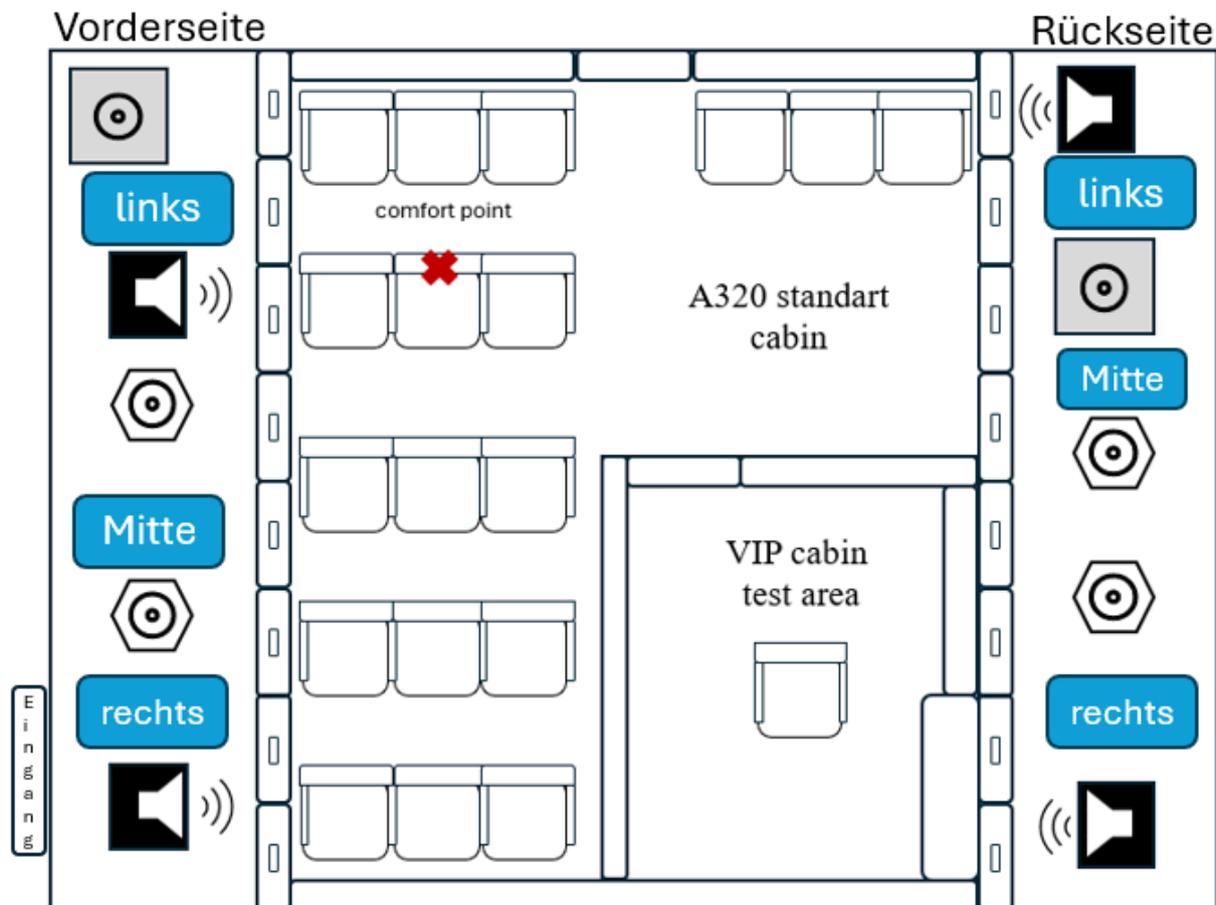


Abbildung 24: Versuchsskizze Messpositionen

Die Messungen erfolgen an definierten Positionen (vgl. Versuchsskizze, Abbildung 24) sowie in unterschiedlichen Höhen (siehe Legende der Ergebnisse), um eine möglichst vollständige Erfassung der Schalldruckverteilung zu gewährleisten. Signifikante Unterschiede im Schalldruck deuten hierbei auf erforderliche Anpassungen der Lautsprecherplatzierung hin, um eine homogene Schalldruckverteilung und damit optimale Bedingungen für die nachfolgenden Regler-Versuche zu erreichen. Zur Unterstützung der Auswertung und Durchführung der Voruntersuchung wird die Norm DIN EN ISO 3741: „Akustik – Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen“ herangezogen. Im Folgenden werden die Anforderungen der Norm an den Messaufbau sowie mögliche Abweichungen von der Norm kurz erläutert

Anforderungen aus der Norm:

Interessierendes Frequenzterzband: Das niedrigste interessierende Frequenzterzband wird gemäß Norm in Abhängigkeit vom Raumvolumen festgelegt. Das geschätzte Raumvolumen des Hallraums beträgt ca. 192 m³, was laut Tabelle einer Mittenfrequenz von 125 Hz entspricht. Das Rumpfsegment hat eine Länge von etwa 4,5 m und einen Durchmesser von 3,95 m, wodurch sich ein Volumen von ca. 55 m³ ergibt. Durch Abzug dieses Volumens vom Gesamtvolumen ergibt

sich ein angepasstes Raumvolumen von etwa 137 m³, was gemäß Norm einer niedrigsten interessierenden Terzbandmittenfrequenz von 160 Hz entspricht. Da der Regler jedoch auch im Bereich tieferer Frequenzen Korrekturen durchführt, wird die Schalldruckpegelauswertung bis 125 Hz berücksichtigt. Die obere Grenze des Betrachtungsbereichs liegt, wie in der Norm beschrieben, bei 10 kHz.

Mindestanzahl an Mikrofonpositionen: Da der Hallraum durch das Rumpfsegment in zwei Bereiche getrennt wird, wurde entschieden, auf beiden Seiten die geforderte Anzahl an Messungen durchzuführen. Die aus den Messdaten ermittelte maximale Standardabweichung lag bei $\pm 2,4$ dB. Um eine gleichmäßige Verteilung der Schalldruckpegelmessungen sicherzustellen und die Anforderungen der Norm zu erfüllen, wurden auf der Rückseite des Rumpfsegments 14 Messpositionen und auf der Vorderseite 15 Messpositionen gewählt.

Die Berechnung der Standardabweichung s_S erfolgt gemäß der in der Norm angegebenen Gleichung:

$$s_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_S} (L_{pi} - L_{pm})^2}{N_S - 1}} \quad (4.1)$$

Dabei gilt:

- L_{pi} : der in Dezibel angegebene zeitlich gemittelte Band-Schalldruckpegel für jede Quellenposition i ,
- L_{pm} : der arithmetische Mittelwert der zeitlich gemittelten Band-Schalldruckpegel über alle Messpositionen,
- N_S : die Anzahl der Quellenpositionen.

Im interessierenden Frequenzbereich von 125 Hz bis 10 kHz zeigte die initiale Messung in jedem Terzband eine Standardabweichung von weniger als 3 dB. Gemäß den Anforderungen der Norm sind daher 15 Mikrofonpositionen für die Messung erforderlich."

Mindestabstand Quelle & Messpunkt: Um die Messgenauigkeit sicherzustellen, gibt die Norm einen Mindestabstand d_{\min} zwischen der Geräuschquelle und der nächstgelegenen Mikrofonposition vor. Dieser Abstand soll störende Reflexionen verhindern und eine präzise Messung im interessierenden Frequenzbereich gewährleisten. Die Berechnung von d_{\min} erfolgt gemäß der folgenden Formel:

$$d_{\min} = D_1 \sqrt{\frac{V}{T_{60}}} \quad (4.2)$$

Hierbei ist:

$D_1 = 0,08$, eine konstante Vorgabe der Norm, bzw. $D_1 = 0,16$ bei Frequenzen unter 5 000 Hz

V : das Raumvolumen in Kubikmetern,

T_{60} : die Nachhallzeit in Sekunden.

Da der Hallraum durch das Rumpsegment in zwei Bereiche geteilt ist, wird das effektive Raumvolumen auf etwa 136,86 m³ reduziert. Da jedoch nur der Wert T_{30} zur Verfügung steht, wurde dieser als Näherung für T_{60} verwendet. Unter Berücksichtigung der geringsten gemessenen Nachhallzeit von $T_{30 \min} = 1,7$ Sekunden ergibt sich somit ein erforderlicher Mindestabstand von etwa 1,44 Metern. Dieser Mindestabstand kann nicht immer vollständig eingehalten werden; es wird jedoch versucht, ihn so gut wie möglich umzusetzen, um die Messgenauigkeit sicherzustellen.

Weitere Anforderungen: Die Norm stellt weitere Anforderungen an die Positionierung der Schallquellen und Mikrofone, um Reflexionen zu minimieren und genaue Messergebnisse zu gewährleisten. Diese beinhalten, dass die Vergleichsschallquelle mindestens 1,5 Meter von den Wänden entfernt auf dem Boden des Hallraums platziert wird, und dass Mikrofone einen Abstand von mehr als 1 Meter zu jeder Raumbofläche einhalten sollen. Zudem sollte der Abstand zwischen den Mikrofonpositionen der halben Wellenlänge der Mittenfrequenz des niedrigsten interessierenden Frequenzbandes entsprechen – bei 125 Hz etwa 1,37 Meter. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten und der hohen Anzahl verwendeter Schallquellen konnten jedoch keine dieser Anforderungen vollständig erfüllt werden.

Versuchsdurchführung Voruntersuchung und Ergebnisse

Nach der Kalibrierung des Messmikrofons mit dem Klasse-1-Schallkalibrator Typ 4231 von Brüel und Kjær wird als Anregungssignal ein weißes Rauschen verwendet, das über die Wiedergabesoftware Audacity und das Focusrite-Audiointerface ausgegeben wird. Das Lautsprecher-setup entspricht der Versuchsskizze (siehe Abbildung 24) und den Fotos (siehe Abbildung 23). Es werden insgesamt 14 Messungen an der Rückseite des Hallraums und 15 Messungen an der Vorderseite durchgeführt, jeweils mit einer Messdauer von ca. 30 Sekunden, wie es die Norm fordert. Auf eine Wiederholung der Messungen wird aufgrund der hohen Anzahl an Messpunkten verzichtet. Da der Fokus primär darauf liegt, einen ersten groben Eindruck über die Gleichmäßigkeit des Schallfelds zu gewinnen, ist diese in der Voruntersuchung nicht zwingend erforderlich. Die Voruntersuchung dokumentiert die Schalldruckverteilung im Hallraum an verschiedenen Messpunkten auf Vorder- und Rückseite, um die Gleichmäßigkeit des Schallfeldes zu bewerten. Die Messergebnisse werden in Terzbändern über den

Frequenzbereich von 125 Hz bis 10 kHz aufgezeichnet. Das Ergebnisdiagramm (Abbildung 25) zeigt die gemittelten Schalldruckpegel in Terzbändern für die Rückseite des Hallraums. Die verschiedenen Farben repräsentieren die einzelnen Messpositionen entlang der Rückseite in unterschiedlichen Abständen zur Schallquelle. Die Positionierung der Messmikrofone ist der Versuchsskizze (Abbildung 24) zu entnehmen, und die verwendeten Messhöhen sind in der Legende angegeben.

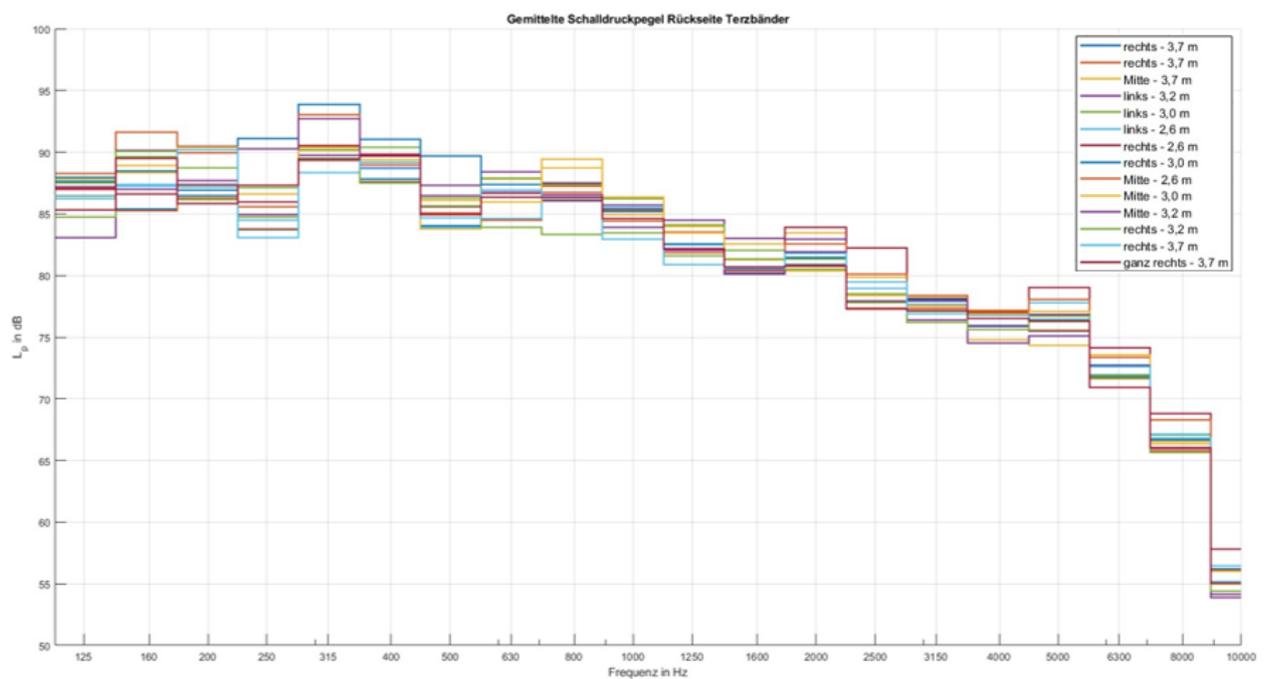


Abbildung 25: Messergebnisse Rückseite in Terzbandschritten

Die Schalldruckpegel zeigen über weite Frequenzbereiche eine weitgehend konstante Verteilung; in einzelnen Frequenzbereichen treten jedoch leichte Abweichungen auf. Diese Schwankungen sind auf die räumliche Verteilung der Lautsprecher und die Nichteinhaltung der in der Norm geforderten Anforderungen zurückzuführen und deuten auf eine geringe Inhomogenität des Schallfeldes im Hallraum hin.

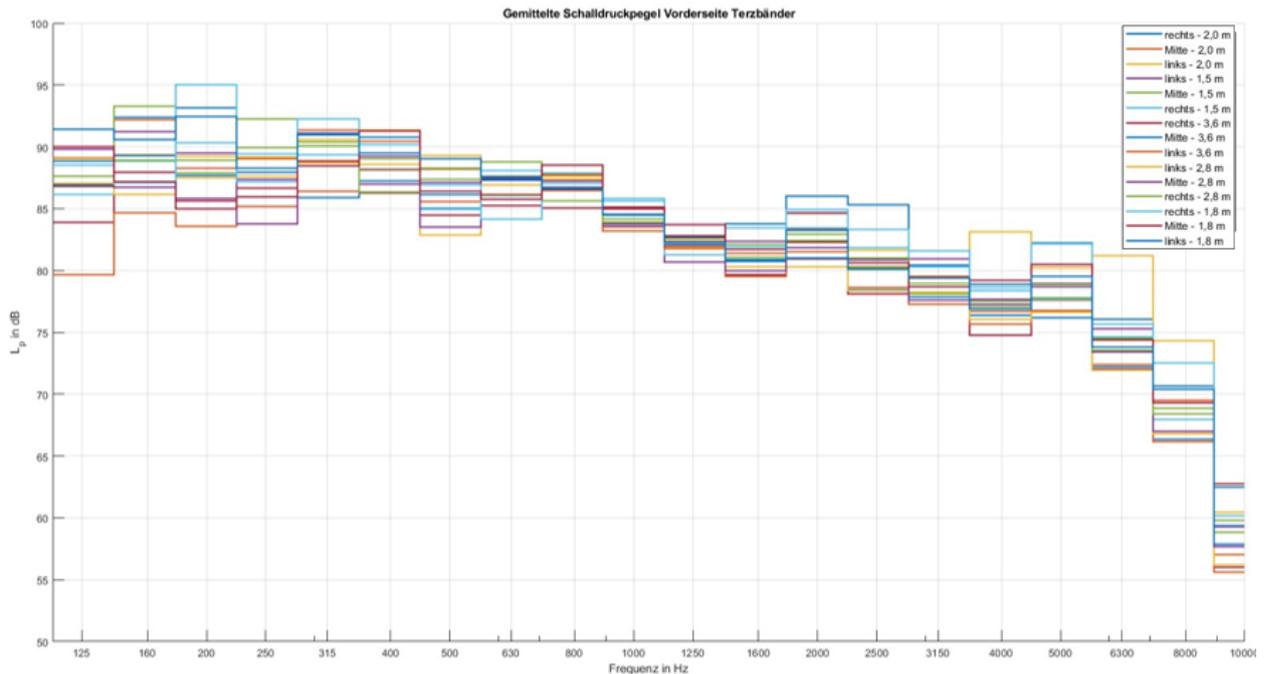


Abbildung 26: Messergebnisse Vorderseite in Terzbandschritten

Die Analyse der Schalldruckpegel in Terzbändern auf der Vorderseite des Hallraums zeigt ebenfalls eine über weite Frequenzbereiche relativ gleichmäßige Verteilung, wobei im mittleren Frequenzbereich leichte Variationen auftreten, die auf Inhomogenitäten hinweisen. Besonders bei den Mittenfrequenzen von 2500, 4000 und 6300 Hz zeigt der Messpunkt 'links, 2 m Höhe' ein ausgeprägteres Terzband des Schalldruckpegels. Diese Abweichungen lassen sich vermutlich ebenfalls auf die Nichteinhaltung der normierten Abstände aufgrund räumlicher Einschränkungen zurückführen. Eine detaillierte Analyse der Messkurven offenbart jedoch keine extremen Ausschläge, die auf Resonanzen hinweisen, was die allgemeine Homogenität des Schallfeldes bestätigt. Im Vergleich zur Rückseite weist die Vorderseite des Hallraums eine stärkere Streuung der einzelnen Messpunkte auf, während die Rückseite insgesamt eine gleichmäßigere Verteilung der Schalldruckpegel zeigt.

In der folgenden Analyse werden die Ergebnisse der Terzbandmessungen im Diagramm mit besonderem Fokus auf die Unterschiede der Schalldruckpegel zwischen Vorder- und Rückseite des Hallraums betrachtet. Die erhobenen Werte umfassen Mittelwerte und zugehörige Standardabweichungen, die eine Einschätzung der Schallfeldhomogenität erlauben.

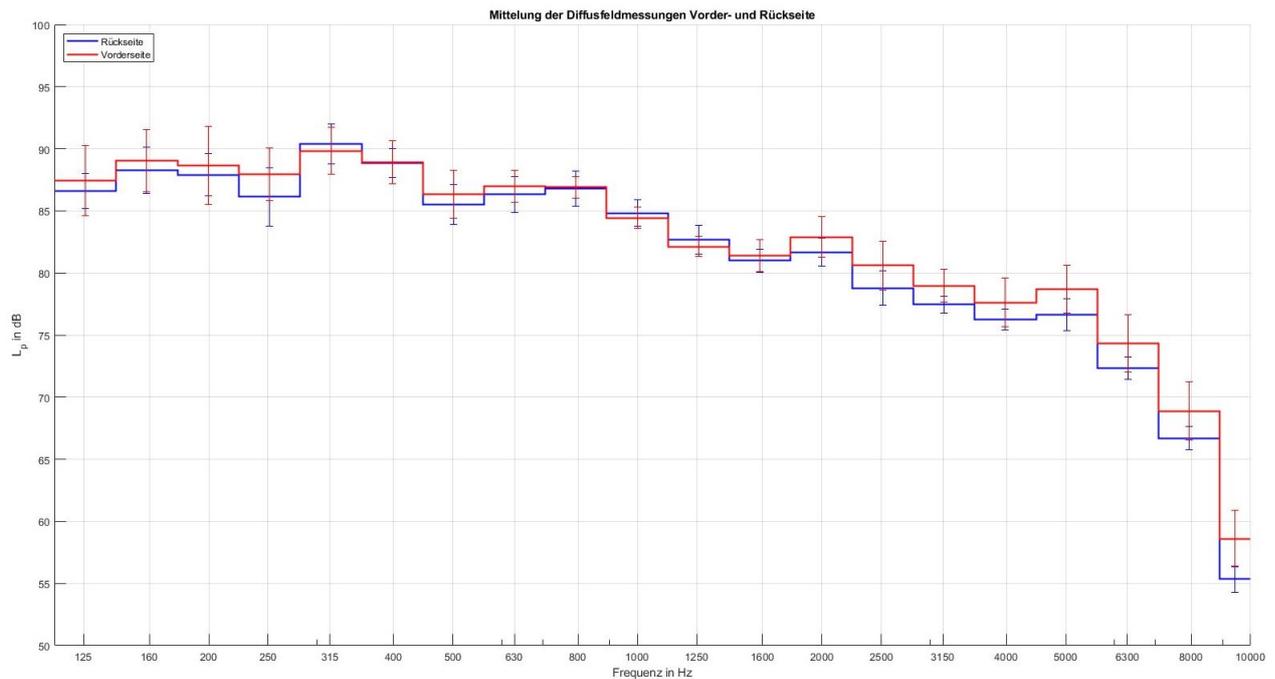


Abbildung 27: Vergleich Messergebnisse Vorder- & Rückseite

Im Frequenzbereich von 125 Hz bis etwa 2000 Hz zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Schalldruckverteilung zwischen Vorder- und Rückseite des Hallraums. Die Differenzen in diesem Bereich sind minimal und deuten auf ein weitgehend homogenes Schallfeld hin. Die mittleren Schalldruckpegel an beiden Seiten sind nahezu identisch, wobei nur geringe Abweichungen innerhalb der Standardabweichung verbleiben. Dies weist auf eine geringe Streuung und eine hohe Konsistenz der Messungen hin und erfüllt die Anforderungen der Homogenität für diesen Frequenzbereich. Ab einer Mittenfrequenz von 2500 Hz treten jedoch merklichere Unterschiede auf. Die Messungen zeigen, dass der Schalldruckpegel an der Vorderseite im Bereich von 2500 Hz bis 10 kHz konstant über den Werten der Rückseite liegt. Bei 2500 Hz beträgt die Differenz etwa 1,24 dB, bei 3150 Hz steigt sie auf 1,54 dB und erreicht bei 8000 Hz einen Maximalwert von etwa 2,19 dB.

Zusammenfassend zeigen die Voruntersuchungen und ausgewerteten Daten eine insgesamt homogene Verteilung des Schalldruckpegels im Hallraum, die auf ein gut diffuses Schallfeld mit gleichmäßiger Energiedichte hindeutet. Im Frequenzbereich von 125 Hz bis 2000 Hz sind die Differenzen zwischen Vorder- und Rückseite minimal, was eine hohe Konsistenz der Messwerte und eine weitgehend gleichmäßige Schallverteilung in diesem Bereich belegt. Ab 2500 Hz treten zwar merklichere Unterschiede auf, jedoch bleibt die maximale Differenz bei 8000 Hz mit 2,19 dB verhältnismäßig gering. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die akustischen Bedingungen im Hallraum für die geplanten Versuche mit dem Regelalgorithmus geeignet sind und ein ausreichend diffuse Schallfeldumgebung zur Verfügung steht.

3.4.4 Hauptuntersuchung - Vorversuche und Optimierung des Regelkreises

In den ersten Kalibrierungsversuchen des Regelkreises wird ein standardisiertes Referenzprofil verwendet, das auf realen Messungen aus kommerziellen Flugkabinen basiert. Diese vorläufigen Tests zeigen jedoch, dass die Reproduktion des Referenzspektrums im Labor vor spezifischen Herausforderungen steht. Um den für das Referenzprofil erforderlichen Schalldruckpegel zu erreichen, ist es notwendig, den Lautstärkeregler des Audiointerfaces auf etwa 75 % einzustellen. Dies führt allerdings dazu, dass der verwendete Lautsprecher (Turbosound iQ12) regelmäßig die Clipping-Grenze erreicht, was durch die vollständige Aussteuerung der „Clipping“- und „Limiting“-Anzeigen sichtbar wird.

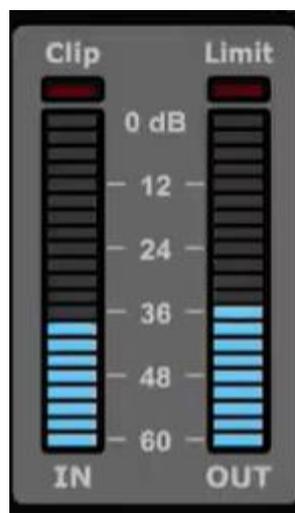


Abbildung 28: Turbosound Clipping & Limiting [90]

Clipping ist eine Schutzfunktion des Lautsprechersystems, die aktiviert wird, sobald das Ausgangssignal die verarbeitbaren Maximalpegel überschreitet. In diesem Fall wird das Signal „abgeschnitten“, wodurch Verzerrungen im Audiosignal entstehen. Diese Funktion schützt den Lautsprecher vor Überlastung und möglichen Schäden. Die zusätzliche Limiting-Funktion bewirkt, dass alle Signalverstärkungen, die über den maximalen Ausgangspegel hinausgehen, nicht an den Lautsprecher weitergeleitet werden. Diese Schutzmaßnahmen verhindern jedoch gleichzeitig, dass Pegelerhöhungen, die der Regelalgorithmus zur Anpassung an das Referenzprofil vornimmt, tatsächlich hörbar umgesetzt werden. Der Regelalgorithmus versucht zwar, das Anregungssignal zu verstärken, um die gewünschte Lautstärke und das Spektrum zu erreichen; jedoch werden diese Anpassungen durch die Clipping- und Limiting-Funktionen des Lautsprechersystems abgefangen, bevor sie den Lautsprecher erreichen, wodurch die gewünschte Regelungseffizienz verloren geht.

Um diesen Effekt zu minimieren und die Betriebssicherheit des Lautsprechers zu gewährleisten, wird der Ausgangspegel des Audiointerfaces auf 25 % reduziert. Diese Einstellung bewirkt, dass

die Clipping- und Limiting-Anzeigen auf etwa 50–75 % ihres Maximalwertes verbleiben und so einen ausreichenden „Headroom“ bereitstellen. Dieser Headroom sorgt dafür, dass der Lautsprecher innerhalb eines sicheren Betriebsbereichs arbeitet und dennoch genügend dynamische Reserve vorhanden ist, um die notwendigen Korrekturen des Regelalgorithmus wirksam umzusetzen. Durch diese Anpassung kann der Regelkreis im vorgesehenen Bereich operieren und die erforderlichen Frequenz- und Pegelanpassungen effizient durchführen, ohne dass die Schutzfunktionen des Lautsprechers die Signalanpassungen begrenzen.

Da der aufgrund der Schutzfunktionen des Lautsprechers erreichbare Lautstärkebereich im Labor begrenzt ist und somit nicht die Pegel der aus den Flugversuchen stammenden Referenzprofile erreicht werden können, wird entschieden, die Referenzprofile um einen Reduktionsfaktor zu verringern. Diese Anpassung stellt sicher, dass die reproduzierten Schallpegel innerhalb der Leistungsgrenzen des Lautsprechersystems bleiben und die Schutzfunktionen nicht wiederholt ausgelöst werden. Der Reduktionsfaktor wird so gewählt, dass die charakteristischen Frequenzverläufe der Referenzprofile beibehalten werden, während die absoluten Pegel reduziert sind. Damit wird gewährleistet, dass der Regelalgorithmus unter realistischen Bedingungen arbeiten und die gewünschten Anpassungen am Anregungssignal wirksam umsetzen kann.

3.4.5 Versuchsdurchführung Hauptuntersuchung

Kalibrierung

Im ersten Schritt der Hauptuntersuchung wird eine sorgfältige Kalibrierung des Regelalgorithmus durchgeführt, um eine genaue Umrechnung des Mikrofonsignals vom Spannungsbereich in den Schalldruck (in Pascal) sicherzustellen. Hierfür wird der Brüel & Kjær TYP 4231 Kalibrator verwendet, der ein Referenzsignal von 94 dB bei 1000 Hz erzeugt. Dieses Signal wird vom Messmikrofon aufgenommen und das Mikrofonsignal vor der FFT mit dem Simulink Spectrum Analyzer analysiert, um die tatsächliche Amplitude (in Volt RMS) des Signals präzise zu erfassen. Anhand des bekannten Schalldruckpegels des Kalibrators (1,002 Pa für 94 dB SPL) wird der Umrechnungsfaktor zwischen der gemessenen RMS-Amplitude (in Volt) und dem Schalldruck (in Pascal) berechnet. Dieser Wert stellt sicher, dass das System in der Lage ist, das Mikrofon-Signal korrekt zu interpretieren und den Schalldruck präzise wiederzugeben. Diese Kalibrierung bildet somit die Grundlage für alle weiteren Messungen und ermöglicht es dem Regelalgorithmus, den gemessenen Schalldruck exakt zu verarbeiten.

Einstellung des Mikrofonvorverstärkers

Um eine Übersteuerung des Signals zu vermeiden und die optimale Funktion des Regelalgorithmus sicherzustellen, wird der Gain-Regler am Mikrofonvorverstärker so eingestellt,

dass während der Messungen die grüne LED-Anzeige am Audiointerface aufleuchtet. Dies zeigt an, dass das Signal im sicheren Bereich liegt, ohne Clipping oder Übersteuerung. Gemäß der Anleitung des Audiointerfaces bedeutet:



Abbildung 29: Audio interface Preamp Einstellungen [91]

- Grün – das Signal befindet sich im optimalen Bereich.
- Gelb – das Signal nähert sich der Clipping-Grenze, und eine weitere Verstärkung könnte zu Übersteuerung führen.
- Rot – das Signal überschreitet die Clipping-Grenze, und eine Reduzierung des Gain-Reglers ist erforderlich.

Durch die richtige Einstellung des Vorverstärkers bleibt das Signal innerhalb des sicheren Bereichs, was die Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit des Regelalgorithmus gewährleistet.

Bestimmung der Transferfunktion und Inversen Transferfunktion

Nach der Kalibrierung und Einstellung der Drehregler am Interface wird die Transferfunktion des Systems bestimmt. Hierfür wird ein minimalistisches Simulink-Modell verwendet, welches die Systemantwort auf das Anregungssignal aufzeichnet. Basierend auf den Messungen und den zuvor kalibrierten Umrechnungsfaktoren wird die Transferfunktion berechnet und anschließend in die Inverse Transferfunktion (ITF) umgewandelt, wie im vorherigen Kapitel 3.3.2 beschrieben. Diese ITF wird dem Regelalgorithmus bereitgestellt, um die exakte Anpassung des Anregungssignals an das Referenzprofil sicherzustellen.

Bereitstellen der Referenzprofile

Für die Hauptuntersuchung werden vier Referenzprofile ausgewählt, die verschiedene Flugphasen repräsentieren: Steigflug (Climb), Reiseflug (Cruise) auf zwei verschiedenen Höhenstufen sowie Sinkflug (Descent). Diese Profile basieren auf Messungen des Schalldruckpegels an Sitzposition 25E in einer kommerziellen Flugkabine unter realen Flugbedingungen. Die einzelnen Referenzprofile unterscheiden sich in Flughöhe und Geschwindigkeit des Flugzeugs und sind somit für die verschiedenen Phasen repräsentativ. Da das Ziel der Untersuchung darin besteht, das akustische Referenzprofil möglichst präzise zu

reproduzieren, wird der Regelalgorithmus in vier Messreihen eingesetzt, wobei jeweils eines der Referenzprofile als Zielwert dient. Aufgrund der zuvor beschriebenen Clipping- und Limiting-Problematik des Lautsprechers wird jedoch eine Anpassung der Referenzprofile notwendig. Die Schalldruckpegel werden mit einem Reduktionsfaktor versehen, um sicherzustellen, dass der Lautsprecher innerhalb seines sicheren Betriebsbereichs bleibt und die Schutzfunktionen (Clipping und Limiting) nicht ausgelöst werden.

Die festgelegten Reduktionsfaktoren betragen 5 oder 10.:

- Messreihe 1: Sitzplatz 25E, Cruise, 10.400m, 920 km/h, Reduktionsfaktor 10
- Messreihe 2: Sitzplatz 25E, Cruise, 11.000m, 840 km/h, Reduktionsfaktor 5
- Messreihe 3: Sitzplatz 25E, Climb, 1.700m, 700 km/h, Reduktionsfaktor 5
- Messreihe 4: Sitzplatz 25E, Descent, 2.000m, 550 km/h, Reduktionsfaktor 5

Diese Referenzprofile werden nach der Reduzierung entsprechend den Regleranforderungen, wie sie in Kapitel 3.3.4 beschrieben sind, im MATLAB-Workspace bereitgestellt, sodass der Regler sie in der Simulation verwenden kann.

Gewählte Parameter für die Hauptuntersuchung

- Für die Durchführung der Hauptuntersuchung werden spezifische Parameter festgelegt, die die Aufzeichnung, Verarbeitung und Anpassung des Anregungssignals sowie der Mikrofonmessungen optimieren:
- Samplerate: Die Abtastrate für das Anregungssignal und die Mikrofonaufnahmen beträgt 44,1 kHz. Diese hohe Samplerate gewährleistet eine präzise Frequenzauflösung, die für die akustische Analyse und Regelung erforderlich ist.
- Noise Power: Die Leistung des Anregungssignals (Weißrauschen) wird auf 1000 eingestellt, um ein ausreichend starkes Eingangssignal für die Systemregelung bereitzustellen.
- Kontinuierlicher Mittelungsspeicher: Zur Reduzierung der stochastischen Variabilität des Signals werden 200 FFT-Spektren kontinuierlich gemittelt. Diese Mittelung stellt sicher, dass das resultierende Spektrum stabil und repräsentativ ist.

- Maximale Iterationen: Der Regelalgorithmus wird auf eine maximale Anzahl von 12 Iterationen beschränkt, um die Konvergenz zur gewünschten Anpassung des Referenzprofils zu gewährleisten.
- Gewichtungsfaktor im Korrektur-Mittelungsblock: Ein Gewichtungsfaktor von 3 wird im Korrektur-Mittelungsblock verwendet, um eine verstärkte Berücksichtigung der Korrektursignale im Regelalgorithmus zu ermöglichen.
- Gain Block Verstärkungsfaktor: Der Verstärkungsfaktor im Gain-Block wird auf 1 gesetzt, was bedeutet, dass keine zusätzliche Verstärkung des Anregungssignals erfolgt.
- Datenverarbeitung und Bereitstellung: Die verarbeiteten Daten werden als 3600x1 double Array bereitgestellt, das die spektralen Informationen in einer geeigneten Form für die Simulations- und Regelalgorithmen enthält.

Diese Parameter haben sich bereits in Voruntersuchungen im heimischen Versuchsaufbau als effektiv erwiesen und konnten gute Ergebnisse erzielen. Sie bieten eine stabile Grundlage für die präzise Regelung und Anpassung an das Referenzprofil in der Hauptuntersuchung. Nach Durchführung der zuvor beschriebenen Vorbereitungen und Einstellungen erfolgen die Untersuchungen für die einzelnen Versuchsreihen. Die Simulationszeit des Regelalgorithmus ist auf 800 Sekunden festgelegt. Nach Erreichen des zwölften Iterationsschritts und der Bestätigung im „Diagnostic Viewer“ von Simulink, dass die Messdaten bis zu dieser Iteration erfolgreich gespeichert sind, wird die Simulation gezielt unterbrochen. Diese Vorgehensweise gewährleistet, dass alle relevanten Messdaten vollständig und konsistent erfasst und im Workspace verfügbar sind, um eine anschließende Auswertung zu ermöglichen.

4 Ergebnisse

Die Auswertung der Messdaten erfolgt durch eine mehrstufige Verarbeitung und Umrechnung der Mikrofonaufnahmen. Zunächst wird das vom Mikrofon aufgezeichnete Signal mit einem Umrechnungsfaktor in Pascal skaliert. Anschließend wird das Signal in Segmente unterteilt, und auf jedes Segment wird eine Fast-Fourier-Transformation angewendet, um es in den Frequenzbereich zu überführen. Um eine stabile Darstellung des Leistungsdichtespektrums zu gewährleisten und das Rauschen zu reduzieren, werden die Amplituden aller FFT-Segmente gemittelt. Die gemittelten Frequenzkomponenten werden dann in Leistungsdichtespektren (PSD) umgerechnet und auf Basis eines Referenzdrucks von 20 μPa in Dezibel (dB) dargestellt. Dieser Prozess wird für jede Iteration separat durchgeführt, um die iterativ gemessenen Spektren einzeln zu analysieren und die Annäherung an das Referenzspektrum zu beurteilen.

Es zeigt sich, dass die Reduzierung des ersten verwendeten Referenzprofils um den Faktor zehn im Vergleich zum ursprünglichen, aus Flugmessungen stammenden Schalldruckprofil zu drastisch ausfällt. Durch diese erhebliche Reduzierung fällt der anzupassende Schalldruckpegel über einen großen Frequenzbereich deutlich unter das Eigenrauschen des Mikrofons. Dies bedeutet, dass das Mikrofon den reduzierten Schalldruck nicht präzise erfassen kann und das Signal im Grundrauschen „verloren geht“. Infolgedessen basiert der Regelalgorithmus auf unzureichenden und verrauschten Messdaten, was seine Funktionalität erheblich beeinträchtigt und eine verlässliche Reproduktion des Referenzprofils verhindert. Aus diesem Grund werden die Daten und die Auswertung dieser Messreihe in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt.

Im Folgenden werden die Daten der Messreihe 4, die das akustische Verhalten während des Sinkflugs repräsentiert, ausführlich dargestellt. Da eine grafische Darstellung aller Iterationsschritte für sämtliche Messreihen den Umfang der Darstellung übersteigen würde, wird in diesem Abschnitt entschieden, die Messreihe 4 detailliert zu analysieren. Der Regelalgorithmus zeigt jedoch ein identisches Reproduktionsverhalten in allen Messreihen, sodass die präsentierten Ergebnisse stellvertretend und repräsentativ für die übrigen Versuchsreihen sind. Die Resultate der anderen Messreihen, die in diesem Abschnitt nicht grafisch dargestellt werden, sind im Anhang B in tabellarischer Form zusammengefasst.

In den folgenden Diagrammen Abbildung 30 ist das Spektrum der ersten und zweiten Iteration dargestellt. Diese beiden Iterationsschritte zeigen die anfänglichen Anpassungen, bei denen der Regelalgorithmus die ersten Korrekturwerte mithilfe der Inversen Transferfunktion berechnet und anwendet. Von der ersten zur zweiten Iteration ist eine deutliche Annäherung an das Referenzprofil zu erkennen, da in diesem Schritt die initialen Abweichungen am größten sind und somit die stärkste Korrektur vorgenommen wird. Die dargestellten Änderungen verdeutlichen, dass der Algorithmus im ersten Anpassungsschritt die Differenzen zum Referenzprofil über das

gesamte Frequenzspektrum hinweg signifikant reduziert und somit die Grundlage für eine präzisere Nachbildung legt.

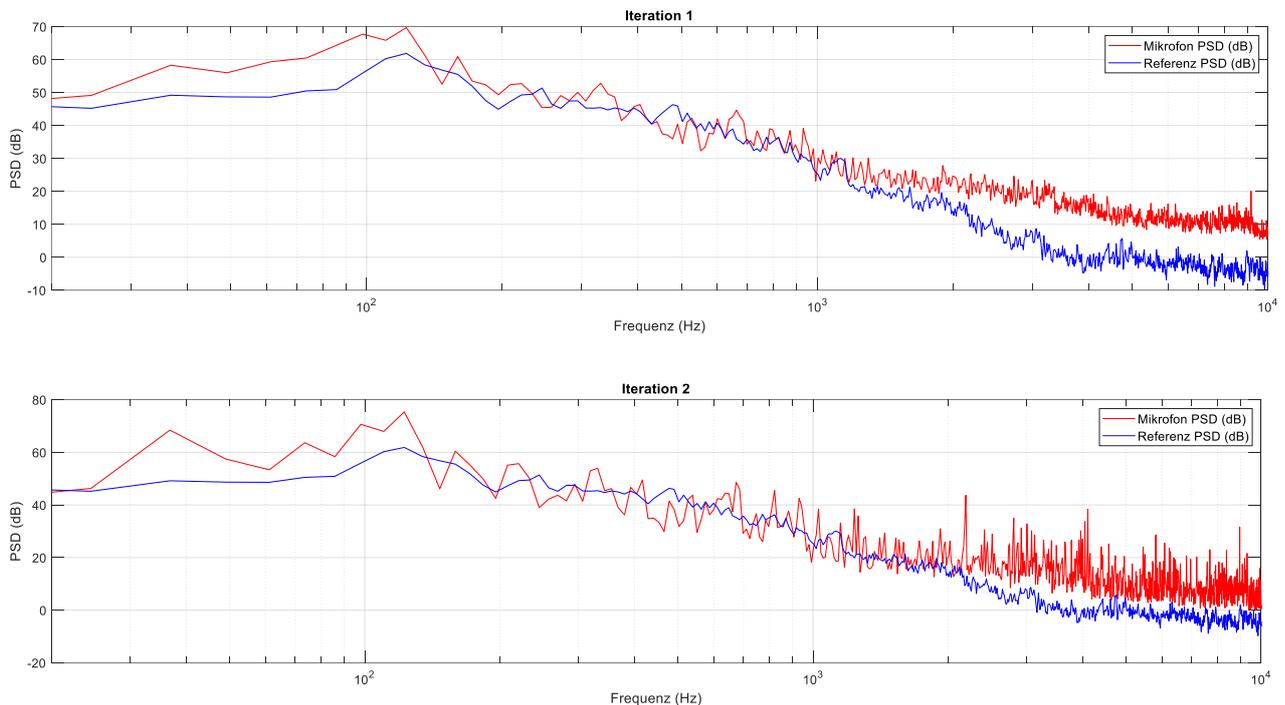


Abbildung 30: Ergebnisse Iteration1 (oben) & Iteration 2 (unten)

Dieses starke Anpassungsverhalten in den ersten Iterationsschritten ist ein erwartetes Verhalten des Regelalgorithmus, da zu Beginn der Regelung die größten Abweichungen zum Referenzprofil bestehen und die Inverse Transferfunktion noch keinen Einfluss auf das Signal ausübt. Der Algorithmus passt daher das Anregungssignal zunächst am stärksten an, um die grundsätzliche Struktur des Spektrums zu korrigieren. In den nachfolgenden Iterationen nimmt die Stärke der Anpassung erwartungsgemäß ab, da der Korrektur-Mittelungsblock das neu ankommende Korrekturspektrum nicht vollständig übernimmt, sondern dieses graduell in das bestehende Spektrum integriert. Trotz der deutlichen Annäherung der gemessenen und gemittelten Iterationsschritte zeigt die dargestellte Kurve (rot) eine auffällige Streuung mit stark schwankenden Amplitudenwerten über das gesamte Frequenzspektrum hinweg. Diese variierende Struktur, die durch häufige und deutliche Ausschläge im gemittelten Mikrofonsignal gekennzeichnet ist, deutet auf eine hohe Signalvariabilität hin.

In dem Frequenzbereich von 100 bis 1000 Hz bleibt die Amplitudenvariabilität nach der ersten Anpassung der gemessenen Daten relativ gering und nur leicht ausgeprägt.

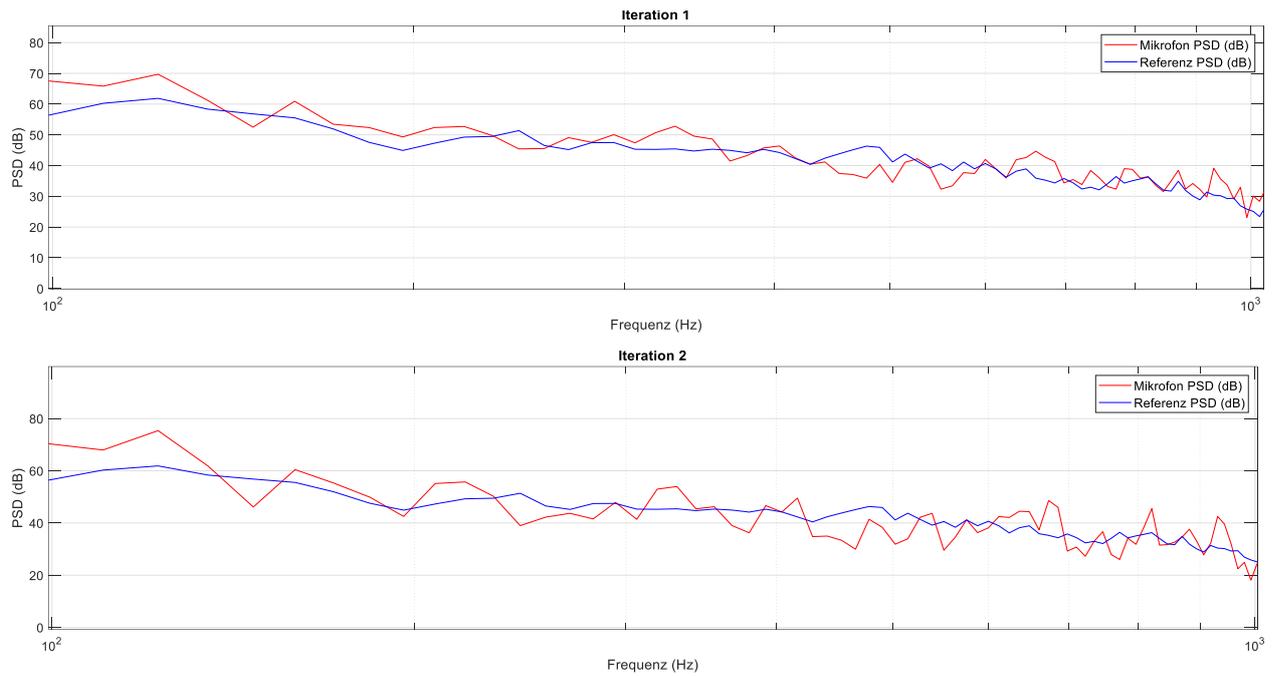


Abbildung 31: Ergebnisse Iteration1 (oben) & Iteration 2 (unten) 100-1000Hz

Im Vergleich dazu zeigt sich in den höheren Frequenzbereichen ab etwa 2000 Hz eine deutlich stärkere Amplitudenschwankung mit ausgeprägten Resonanzspitzen bei Frequenzen um 2200 Hz, 4100 Hz und 8900 Hz.

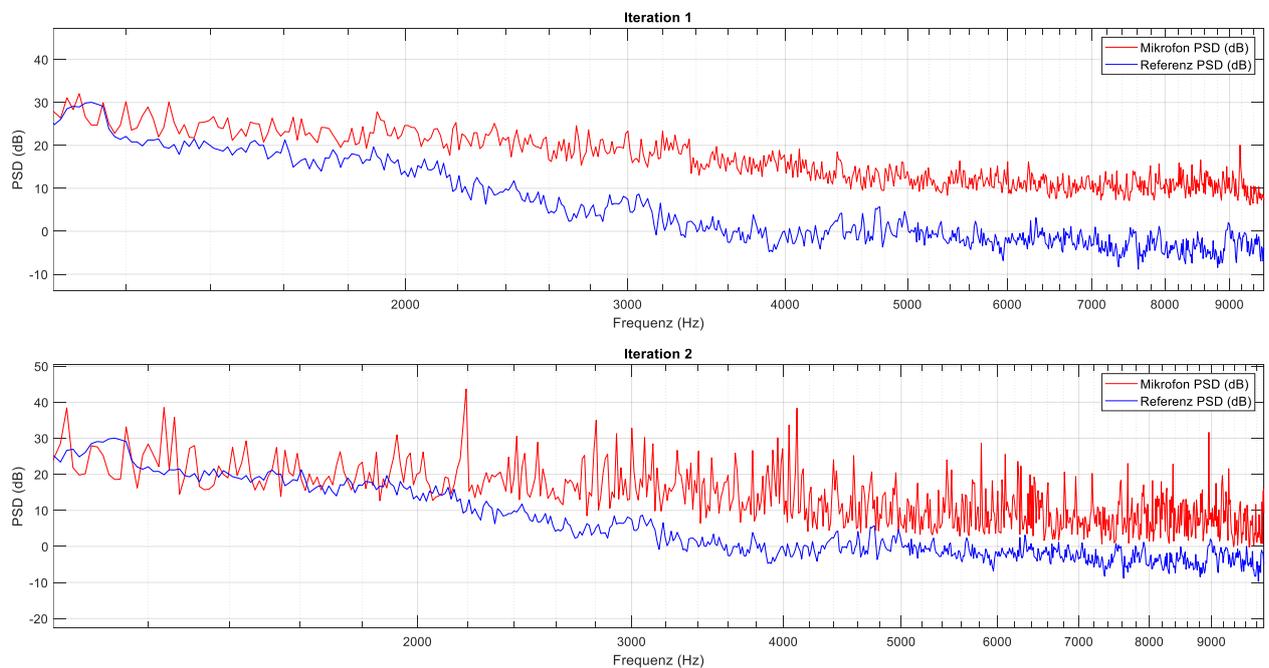


Abbildung 32: Ergebnisse Iteration1 (oben) & Iteration 2 (unten) 1000Hz-10kHz

Jedoch ist auch in diesem Frequenzbereich, trotz starker Amplitudenvariabilität und der Ausbildung von Resonanzspitzen, eine deutliche Annäherung an das Referenzprofil gut zu

erkennen. Der weitere Verlauf der Anpassungen und die Arbeitsweise des Regelalgorithmus werden im Folgenden über die Iterationsschritte 4, 8 und 10 dargestellt.

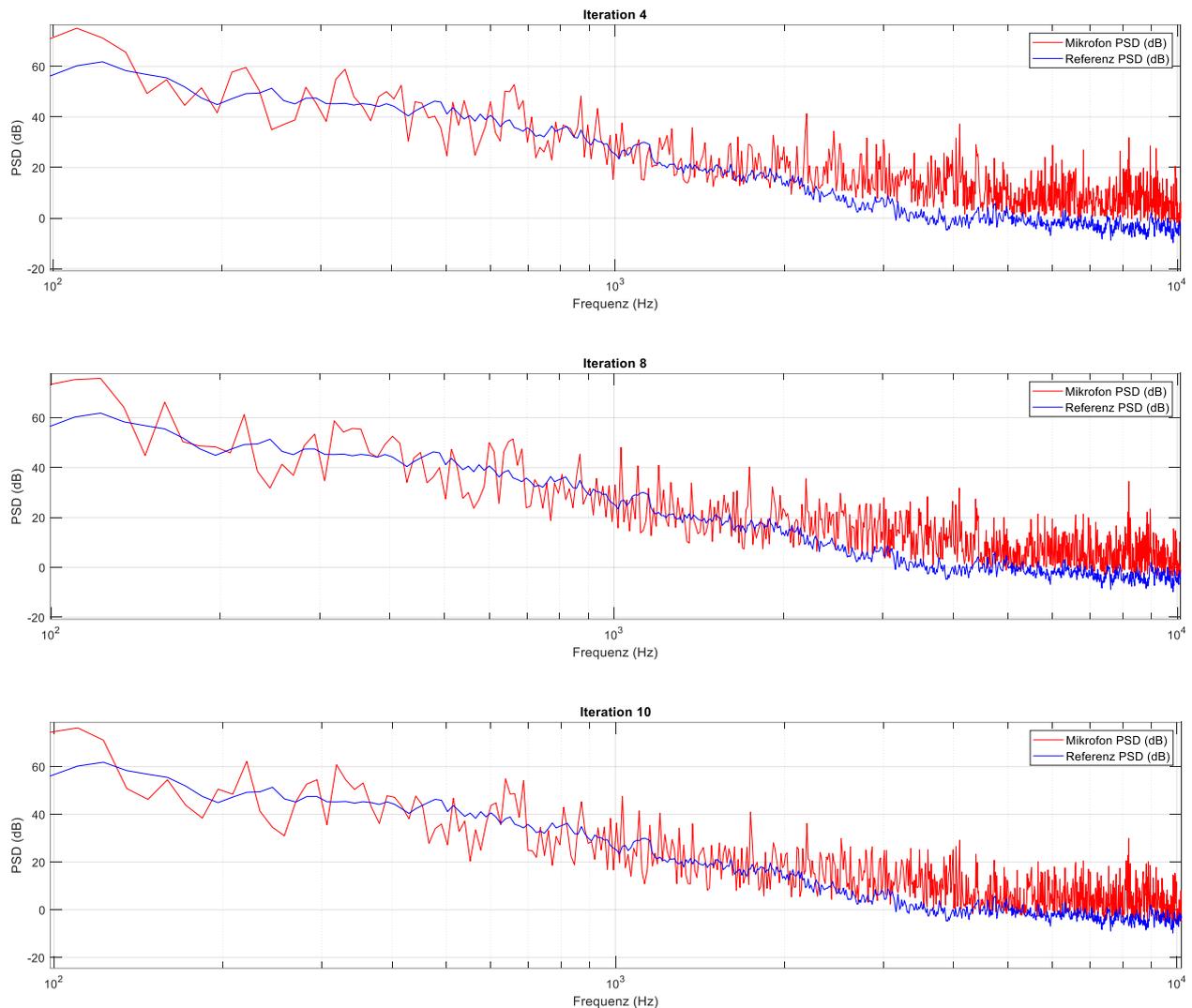


Abbildung 33: Ergebnisse Iteration 4 (oben), Iteration 2 (mitte), Iteration 10 (unten)

Die Diagramme für die Iterationen 4, 8 und 10 zeigen, dass sich das gemessene Schalldruckspektrum im Verlauf der Iterationsschritte weiter an das Referenzprofil annähert. Diese Annäherung fällt jedoch weniger stark aus als in den ersten beiden Iterationen, in denen der Regelalgorithmus die größten Korrekturen vornimmt. In den späteren Iterationen erfolgen die Anpassungen zunehmend feiner und subtiler. Auffällig ist, dass über den gesamten Frequenzbereich hinweg eine tendenziell starke Schwankung der Amplituden bestehen bleibt, die auch durch die fortschreitenden Iterationen nicht reduziert wird. Diese Schwankungen zeigen eine konstante Variabilität im Schalldruckpegel, die sich über die Iterationsschritte hinweg weder weiter verstärkt noch abschwächt. Der Regelalgorithmus erreicht somit eine stabile Annäherung an das Referenzprofil, ohne die natürlichen Schwankungen im gemessenen und gemittelten Signal vollständig zu eliminieren.

In den folgenden Ergebnisdarstellungen wird die gleiche Messreihe 4 als Terzband-Darstellung aufgeführt, die auf folgende Weise umgesetzt wird. Die Umrechnung der Messdaten erfolgt in mehreren Schritten, um das Mikrofon-Signal in eine darstellbare Form als Leistungsdichtespektrum in Dezibel (dB) zu übertragen. Zunächst wird das Mikrofonsignal mithilfe eines Umrechnungsfaktors in Pascal skaliert, wodurch die gemessene Spannung in Schalldruck umgerechnet wird. Anschließend wird das Signal in Segmente aufgeteilt und eine Fast-Fourier-Transformation auf jedes Segment angewendet, um die Frequenzkomponenten des Signals zu ermitteln. Nach der Transformation wird für jedes Segment die Amplitude berechnet, und es erfolgt eine Mittelung über alle Segmente, um das Rauschen zu reduzieren und eine stabile Darstellung des PSD zu erhalten. Der gemittelte PSD-Wert wird schließlich in dB umgerechnet, basierend auf einem Referenzdruck von $20 \mu\text{Pa}$, was die gängige Referenz für Schalldruckpegel darstellt. Die Daten werden daraufhin in Terzbänder unterteilt und auf jedes Band gemittelt, um einen präzisen Vergleich mit dem Referenzspektrum zu ermöglichen. Dieser Prozess stellt sicher, dass das Spektrum auf konsistenter Basis dargestellt und analysiert werden kann. Wie bereits in den Funktionsplots beschrieben, lässt sich auch in der Terzbanddarstellung das Verhalten des Reglers deutlich beobachten und nachweisen. In den Iterationen 1 und 2 zeigt sich eine signifikante Reduzierung der Abweichungen zum Referenzspektrum. Die Δ -Werte in Iteration 1 weisen hohe positive Werte auf, besonders in den höheren Frequenzbereichen. Beispielsweise beträgt die Differenz bei 10.000 Hz in Iteration 1 sogar 18,6 dB, was die anfängliche Notwendigkeit starker Korrekturen durch den Regelalgorithmus unterstreicht.

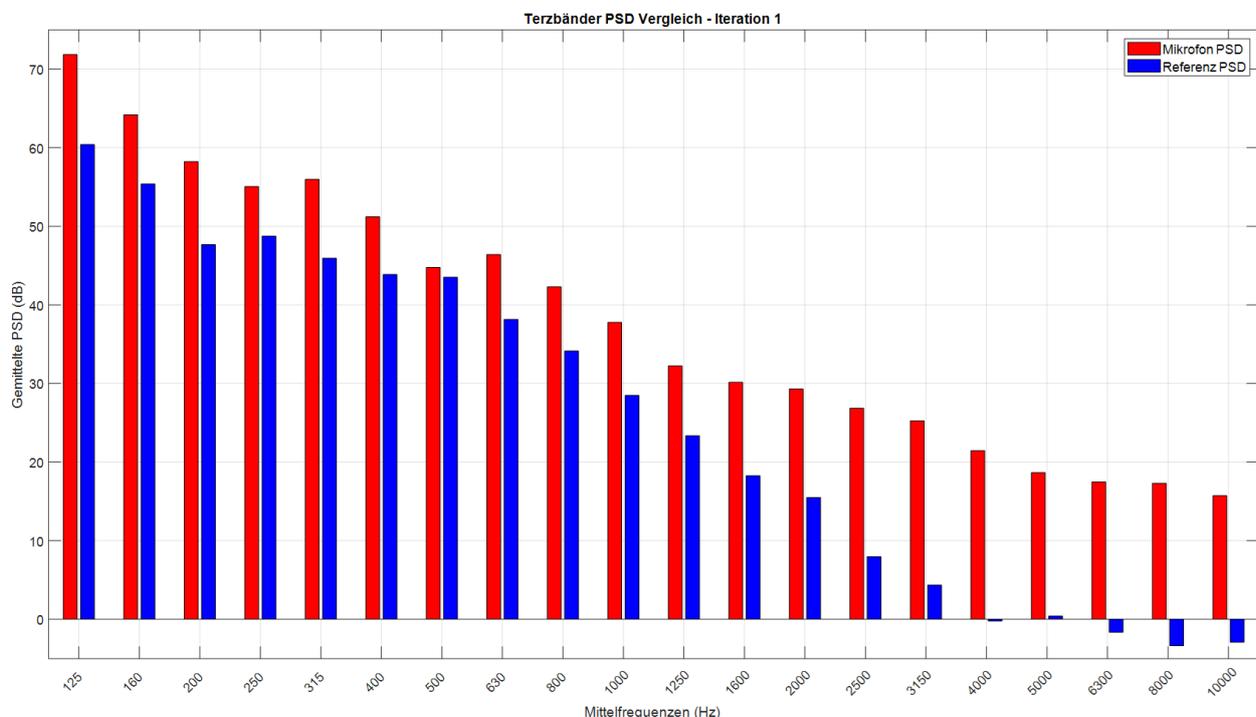


Abbildung 34: Ergebnisse Terzband Iteration 1

Von Iteration 1 zu Iteration 2 ist, wie bereits zuvor ersichtlich, die deutlichste Verringerung der Differenzwerte in mehreren Frequenzbändern zu beobachten. Besonders in den unteren Frequenzbereichen (160 Hz bis 400 Hz) reduzieren sich die Differenzen erheblich, z. B. von 8,8 dB auf 4,3 dB bei 160 Hz, von 10,6 dB auf 7,1 dB bei 200 Hz und von 6,3 dB auf 0,8 dB bei 250 Hz. Dies bestätigt, dass der Algorithmus zu Beginn die größten Abweichungen über das komplette Frequenzspektrum korrigiert und eine erste grobe Annäherung an das Referenzprofil erreicht. Diese starke Anpassung bildet die Grundlage für die weiteren, feineren Korrekturen in den nachfolgenden Iterationen.

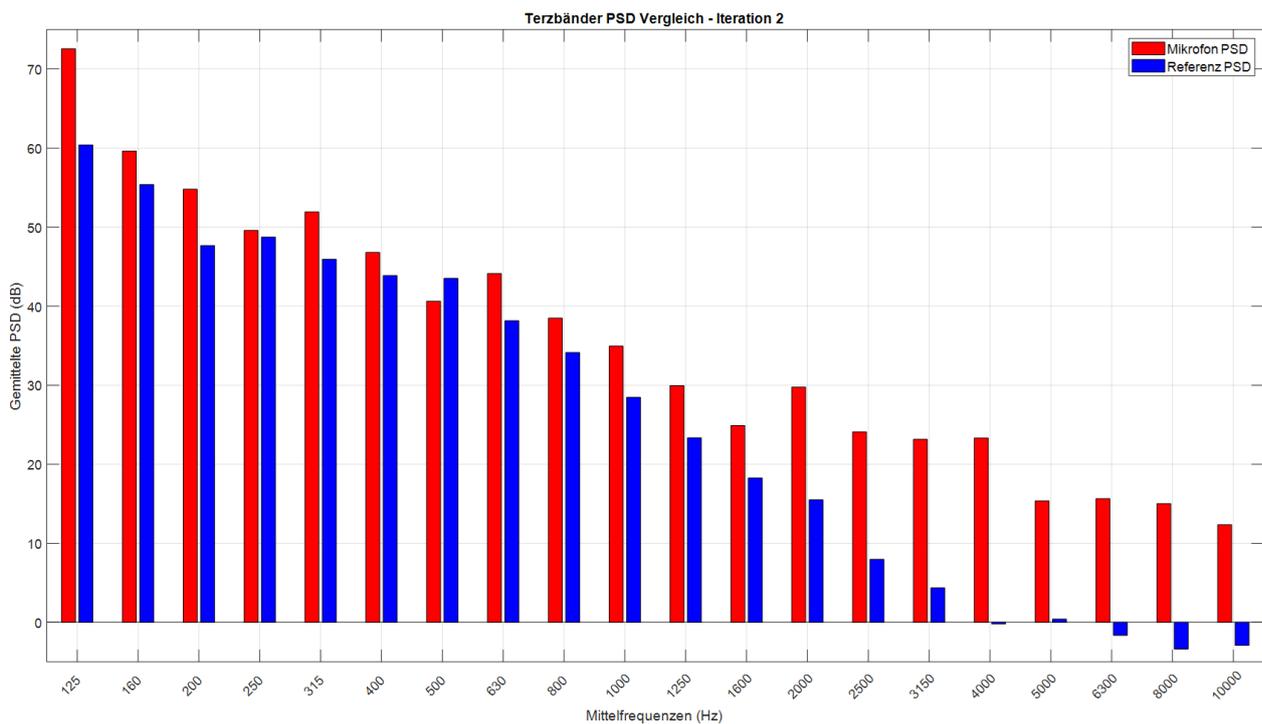


Abbildung 35: Ergebnisse Terzband Iteration 2

Die Analyse zeigt, dass in nahezu allen Mittelfrequenzen von Iteration 1 zu Iteration 2 eine deutliche Korrektur in Richtung des Referenzprofils erkennbar ist, mit Ausnahme der Frequenzen bei 125 Hz und 2000 Hz. Bei diesen beiden Frequenzen erhöht sich die Differenz zum Referenzprofil leicht, was auf eine geringere Anpassung des Regelalgorithmus hinweist. Bei 500 Hz hingegen zeigt sich zwar eine signifikante Reduzierung der Differenz, jedoch greift der Regler hier etwas zu stark ein und überschreitet das Ziel, was zu einer Überkorrektur führt.

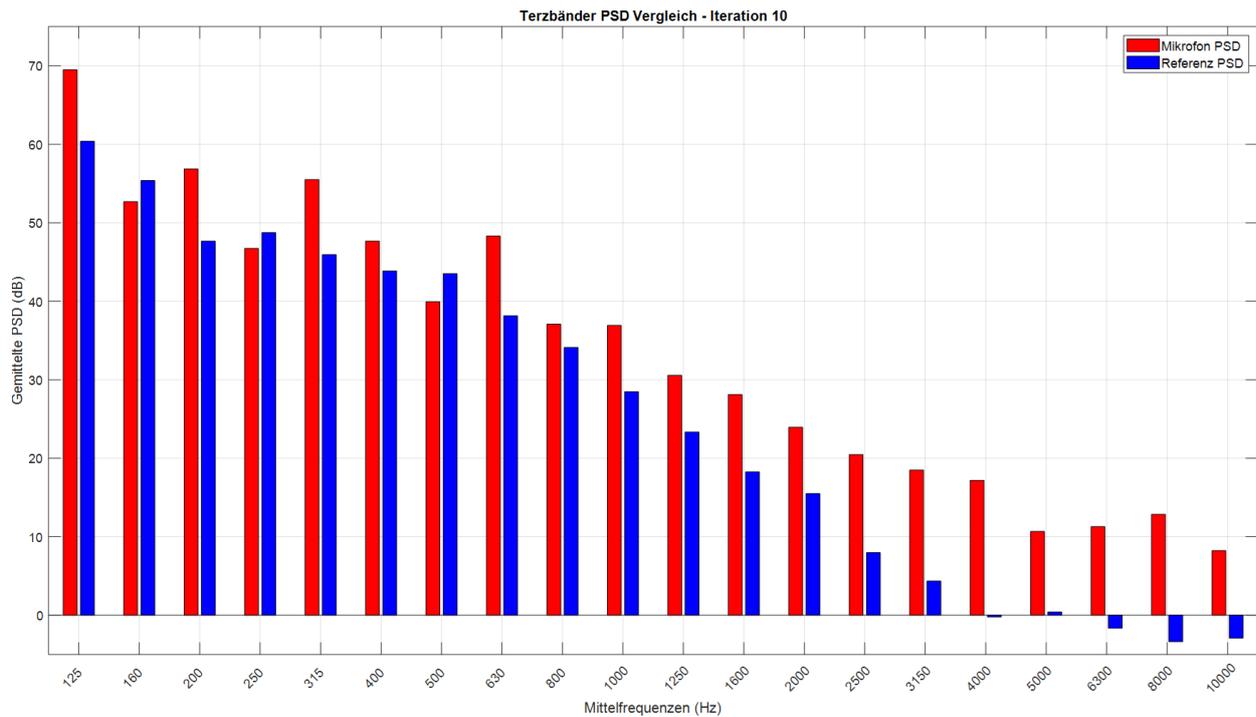


Abbildung 36: Ergebnisse Terzband Iteration 10

Wie bereits zuvor in den Funktionsplots ersichtlich, zeigt der Regelalgorithmus ab der dritten Iteration eine kontinuierliche, wenn auch geringere Anpassung in vielen Frequenzbändern. Ab einer Mittenfrequenz von 2500 Hz bis 10.000 Hz zeigt sich eine nahezu kontinuierliche und konsistente Annäherung an den Referenzwert in jedem Iterationsschritt. Trotz der weiterhin bestehenden großen Differenz zwischen dem Referenzwert und den Differenzwerten in diesen höheren Frequenzbereichen, lässt sich ein schrittweises, deutliches Konvergenzverhalten erkennen. Beispielsweise:

- Bei 2500 Hz verringert sich der Δ -Wert von 18,9 dB in Iteration 1 kontinuierlich auf 12,3 dB in Iteration 11.
- Bei 4000 Hz sinkt der Δ -Wert von 21,7 dB in Iteration 1 auf 17,2 dB in Iteration 12.
- Bei 10.000 Hz zeigt sich eine Reduzierung von 18,6 dB in Iteration 1 auf 10,3 dB in Iteration 12.

Diese sukzessiven Reduktionen in kleinen Schritten sind ein klares Indiz dafür, dass der Algorithmus in diesen hohen Frequenzen konstant Anpassungen vornimmt, um das Referenzprofil besser zu erreichen, auch wenn die vollständige Übereinstimmung nicht erreicht wird. Das konstante Anpassungsverhalten deutet dennoch auf eine effektive, wenn auch langsame Konvergenz des Reglers in diesen Frequenzbereichen hin.

Die zusammenfassende Analyse der Ergebnisse zeigt mehrere wichtige Erkenntnisse über das Verhalten des Regelalgorithmus:

- **Schnelle Anfangskonvergenz:** In den ersten beiden Iterationen werden die größten Korrekturen vorgenommen, da die Abweichungen hier am stärksten sind und erstmals die Inverse Transferfunktion (ITF) zur Anwendung kommt. Dieser Schritt führt zu einer deutlichen Annäherung an das Referenzprofil und bildet die Basis für die weiteren Anpassungen.
- **Abnehmende Korrekturen:** Mit zunehmender Iteration nimmt die Stärke der Korrekturen merklich ab. Der Algorithmus führt in späteren Iterationen feinere Justierungen durch, was unter anderem auf das Verhalten des Korrektur-Mittelungsblocks zurückzuführen ist. Dieser trägt dazu bei, dass das System graduell kleinere Anpassungen vornimmt und sich dem Referenzprofil immer weiter annähert.
- **Persistente Signalvariabilität:** Trotz der kontinuierlichen Anpassungen bleibt eine gewisse Amplitudenschwankung im Signal bestehen, besonders in den höheren Frequenzbereichen. Diese Schwankungen können durch systemische Limitationen, externe Einflüsse oder die Eigenschaften des Regelalgorithmus und des Versuchsaufbaus bedingt sein.

Insgesamt zeigt sich eine stetige Annäherung an das Referenzprofil in großen Teilen des gesamten Frequenzspektrums, auch wenn noch deutliche Differenzen zwischen dem Referenzprofil und dem tatsächlich aufgezeichneten Signal bestehen bleiben.

| Mittelfrequenzen (Hz) | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1k | 1,25k | 1,6k | 2k | 2,5k | 3,15k | 4k | 5k | 6,3k | 8k | 10k |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| Referenz PSD (dB) | 60,4 | 55,4 | 47,7 | 48,7 | 45,9 | 43,9 | 43,5 | 38,1 | 34,1 | 28,5 | 23,3 | 18,3 | 15,5 | 8 | 4,4 | -0,2 | 0,4 | -1,6 | -3,4 | -2,9 |
| Δ Iteration 1 (dB) | 11,5 | 8,8 | 10,6 | 6,3 | 10 | 7,3 | 1,2 | 8,2 | 8,2 | 9,3 | 8,9 | 11,9 | 13,8 | 18,9 | 20,9 | 21,7 | 18,2 | 19,1 | 20,7 | 18,6 |
| Δ Iteration 2 (dB) | 12,2 | 4,3 | 7,1 | 0,8 | 6 | 2,9 | -2,9 | 6 | 4,3 | 6,5 | 6,6 | 6,6 | 14,3 | 16,1 | 18,8 | 23,5 | 15 | 17,3 | 18,4 | 15,3 |
| Δ Iteration 3 (dB) | 12,4 | 1,3 | 8,8 | -1,5 | 8,5 | 3,8 | -3,2 | 6,6 | 5,4 | 5,5 | 5,2 | 6,3 | 13,5 | 16,3 | 18,4 | 23,5 | 14,1 | 17,1 | 18,5 | 15,6 |
| Δ Iteration 4 (dB) | 9,9 | 0 | 9,1 | -0,3 | 8 | 4,7 | -0,9 | 8,5 | 5 | 6 | 5,3 | 7,5 | 12,9 | 15,7 | 16,4 | 22,8 | 13,3 | 17,1 | 18,9 | 16,1 |
| Δ Iteration 5 (dB) | 9,9 | 4,7 | 8,3 | -2 | 4,2 | 5,7 | -0,2 | 9,4 | 6,2 | 4,9 | 5,5 | 7,5 | 12 | 14,8 | 15,5 | 21,8 | 12,9 | 16,5 | 19 | 15,2 |
| Δ Iteration 6 (dB) | 10,4 | 6,7 | 7,5 | -3,2 | 6,2 | 7,1 | -1,2 | 8,6 | 5,5 | 6,9 | 6,3 | 9,2 | 10,9 | 14,5 | 15,4 | 20,9 | 11,8 | 15,7 | 19,3 | 13,8 |
| Δ Iteration 7 (dB) | 11,4 | 7,6 | 7,2 | -3,3 | 6,9 | 6,2 | -1,1 | 7,8 | 2,8 | 7,8 | 5,8 | 9,7 | 10,5 | 14 | 15,4 | 20,1 | 11 | 15,1 | 19,2 | 12,4 |
| Δ Iteration 8 (dB) | 12,6 | 6,6 | 8,4 | -3,1 | 8,8 | 6,4 | -2 | 8,3 | 2,4 | 8,5 | 6,7 | 9,6 | 9 | 13,7 | 15,2 | 19,1 | 10,6 | 13,8 | 18,6 | 11,5 |
| Δ Iteration 9 (dB) | 10,8 | 1,4 | 8,9 | -2,4 | 10,7 | 5,7 | -2,6 | 9,3 | 3,4 | 8,4 | 7,6 | 9,8 | 8,1 | 13,5 | 14,7 | 18,1 | 10 | 13,3 | 17,3 | 11,6 |
| Δ Iteration 10 (dB) | 9,1 | -2,7 | 9,2 | -2 | 9,6 | 3,8 | -3,6 | 10,2 | 3 | 8,5 | 7,2 | 9,9 | 8,5 | 12,5 | 14,1 | 17,4 | 10,3 | 12,9 | 16,2 | 11,1 |
| Δ Iteration 11 (dB) | 5,7 | 1,8 | 9,3 | -2,3 | 8,1 | 4 | -4,9 | 10 | 2,4 | 9,7 | 7,8 | 9,9 | 10,1 | 12,3 | 14,4 | 17 | 10,9 | 13,2 | 15,7 | 10,3 |
| Δ Iteration 12 (dB) | 4,5 | 6,9 | 8,6 | -2,7 | 8,2 | 5,7 | -3,8 | 10,2 | 1,2 | 9,6 | 8,3 | 9,4 | 10,6 | 12,5 | 14,1 | 17,2 | 10,8 | 13,1 | 15,4 | 10,3 |

Tabelle 2: Ergebnistabelle Terzband Messreihe 4

5 Diskussion

In dieser Arbeit wird ein Regelalgorithmus zur Reproduktion von Kabinenakustik entwickelt und experimentell untersucht. Der Regelkreis zeigt eine grundlegende Fähigkeit, sich dem gewünschten Referenzprofil anzunähern, insbesondere in den ersten Iterationen. Dennoch treten Amplitudenschwankungen und Variabilitäten auf, die darauf hindeuten, dass der Algorithmus noch Optimierungspotenzial aufweist. Im Folgenden werden die Limitationen des Systems analysiert, mögliche Ursachen für die beobachteten Ergebnisse diskutiert und Ansätze für Verbesserungen sowie ein Ausblick für zukünftige Arbeiten aufgezeigt. Schließlich wird im darauf folgenden Abschnitt detailliert auf die Validierung des Systems in Anlehnung an die Vorgaben der VDI 2206-Norm eingegangen, um die erreichten Ergebnisse methodisch zu überprüfen.

5.1 Limitationen

In diesem Abschnitt werden die identifizierten Einschränkungen und Schwächen des entwickelten Regelkreises detailliert dargestellt. Dies umfasst sowohl die Analyse spezifischer Schwachstellen in der Verarbeitung und Anwendung der Korrektursignale als auch systembedingte Grenzen im experimentellen Aufbau.

5.1.1 Ursachen der Limitationen

Verarbeitung der Frequenzspektren: Ein zentrales Element des Regelalgorithmus ist die korrekte Verarbeitung der Frequenzspektren in jedem Regelschritt. Die Spektren werden als 3600x1-Arrays behandelt und müssen in allen Schritten korrekt überlagert und verarbeitet werden. Es besteht die Vermutung, dass die Amplitudenschwankungen und die verbleibende Variabilität im System auf mögliche Fehler in der Verarbeitung dieser Arrays zurückzuführen sind. Wenn die Indizes der Arrays nicht korrekt ausgerichtet sind oder bei der Durchführung von Operationen auf den Spektren Ungenauigkeiten auftreten, kann dies zu inkorrekten Korrekturen führen. Während der Entwicklung konnte nicht jeder Schritt des Reglers detailliert überprüft werden, und es wurden nur begrenzte Untersuchungen mit dem Array-Plot durchgeführt. Daher können solche Fehler nicht ausgeschlossen werden. Insbesondere könnten fehlerhafte Bereitstellung oder Weitergabe der Referenz- und ITF-Arrays sowie mögliche Verschiebungen durch den Rate Transition Block dazu führen, dass Berechnungen und Korrekturen nicht korrekt ausgeführt werden.

Anwendung der Korrektursignale: Die Art und Weise, wie die Korrektursignale auf das Anregungssignal angewendet werden, ist entscheidend für die Effektivität des Regelkreises. Wenn die Korrekturwerte nicht korrekt skaliert oder übertragen werden, kann dies zu unzureichenden oder übermäßigen Anpassungen führen. Die Gewichtung der Korrektursignale

und ihre Integration in das Anregungssignal müssen präzise abgestimmt sein, um eine stabile und konvergente Regelung zu erreichen. Es gibt zahlreiche Möglichkeiten für Fehler in diesem Bereich. Eine fehlerhafte Skalierung der Korrekturwerte oder eine ungenaue Implementierung des Gewichtungsfaktors können die Wirksamkeit der Korrekturen beeinträchtigen. Zudem könnte die Verarbeitung der Korrektursignale durch Softwarekomponenten wie den Rate Transition Block beeinflusst werden, was zu Verschiebungen oder Verzerrungen führt.

Normalisierung des Ausgangssignals: Eine weitere Limitation ist die Beobachtung, dass unabhängig von der eingestellten Amplitude im White-Noise-Block das Lautsprechersignal stets mit der gleichen Lautstärke ausgegeben wird. Dies deutet darauf hin, dass irgendwo im System eine Normalisierung oder automatische Pegelanpassung stattfindet, die nicht explizit berücksichtigt wurde. Diese ungewollte Normalisierung kann dazu führen, dass die vom Regelalgorithmus berechneten Anpassungen am Anregungssignal nicht effektiv umgesetzt werden, da die Amplitudenänderungen durch die Normalisierung kompensiert werden. Diese Normalisierung könnte softwareseitig in Simulink, durch das Audiointerface oder im Lautsprechersystem erfolgen. Ohne genaue Kenntnis darüber, wo und wie diese Pegelanpassung stattfindet, ist es schwierig, die tatsächliche Wirkung der Korrektursignale auf das Ausgangssignal zu beurteilen. Um dieses Verhalten zu analysieren, könnte das Ausgangssignal über die Kanaluweisung des Interfaces direkt wieder in Simulink eingelesen werden, um Rückschlüsse auf das Normalisierungsverhalten zu ziehen.

Linearisierungsannahme und potenzielle Nichtlinearitäten: Ein grundlegendes Prinzip des entwickelten Regelalgorithmus ist die Annahme eines linearen Systemverhaltens. Diese Linearisierungsannahme ist für die Anwendung der Transferfunktion und der inversen Transferfunktion sowie für die Kalibrierung und Korrekturanwendung in jedem Schritt essenziell. In der Praxis können jedoch mehrere Quellen von Nichtlinearitäten auftreten, die diese Annahme beeinträchtigen. Nichtlinearitäten können die Genauigkeit des Systems beeinflussen und dazu führen, dass die Korrekturen nicht wie erwartet wirken.

Begrenzter Schalldruckpegel im Labor: Aufgrund der technischen Grenzen des Lautsprechers und der Sicherheitsmechanismen konnte der im Labor erreichbare Schalldruckpegel nicht mit den Pegeln der realen Flugmessungen übereinstimmen. Dies erforderte eine Reduktion der Referenzprofile um Faktoren von 5 oder 10, was wiederum zu Messungen führte, bei denen das Mikrofonsignal teilweise unter dem Eigenrauschen lag. Dies beeinträchtigt die Messgenauigkeit und die Fähigkeit des Systems, das Referenzprofil präzise zu reproduzieren.

5.1.2 Auswirkungen der Limitationen auf die Ergebnisse

Die genannten Limitationen beeinflussen die Fähigkeit des Regelkreises, das Referenzprofil genau zu reproduzieren. Fehler in der Verarbeitung der Frequenzspektren und die ungewollte Normalisierung des Ausgangssignals können zu den beobachteten Amplitudenschwankungen und der verbleibenden Variabilität führen. Obwohl der Regelalgorithmus einen konvergierenden Charakter aufweist und sich das gemessene Spektrum dem Referenzprofil annähert, wird die Genauigkeit der Anpassung durch diese Faktoren eingeschränkt.

Die Variabilität zeigt sich in Form von häufigen und deutlichen Ausschlägen im gemessenen Spektrum, die auch durch fortschreitende Iterationen nicht vollständig reduziert werden. Dies deutet darauf hin, dass die Korrektursignale nicht optimal wirken oder dass die Signalverarbeitung im Regelkreis noch Fehler aufweist. Zudem führen der begrenzte Schalldruckpegel und das mögliche Untergehen des Mikrofonsignals im Eigenrauschen zu Einschränkungen in der Messgenauigkeit.

5.1.3 Erklärung der Ergebnisse

Die Ergebnisse können durch die Kombination der oben genannten Limitationen erklärt werden:

- Fehler in der Spektrenverarbeitung: Ungenauigkeiten bei der Überlagerung und Verarbeitung der Frequenzspektren führen zu inkorrekten Korrekturen, wodurch die Anpassung an das Referenzprofil beeinträchtigt wird.
- Ungewollte Normalisierung: Die Normalisierung des Signals verhindert, dass die Amplitudenänderungen, die der Regelalgorithmus vornimmt, tatsächlich am Lautsprecher ankommen. Dadurch bleibt die Lautstärke des Ausgangssignals konstant, und die Anpassungen wirken sich nicht wie erwartet aus.
- Nicht überprüfte Regelschritte: Da nicht alle Schritte des Reglers detailliert geprüft wurden, können unentdeckte Fehler oder Ungenauigkeiten im Algorithmus vorhanden sein, die das Gesamtergebnis beeinflussen.
- Nichtlinearitäten: Die Annahme eines linearen Systems wird durch mögliche Nichtlinearitäten beeinträchtigt, was die Effektivität der ITF und der Korrekturen reduziert.
- Begrenzte Messgenauigkeit: Der reduzierte Schalldruckpegel und das mögliche Untergehen des Mikrofonsignals im Eigenrauschen beeinträchtigen die Messdatenqualität, was die Regelung erschwert.

5.1.4 Überwindung der Limitationen

Um die identifizierten Limitationen zu adressieren und die Genauigkeit des Regelkreises zu verbessern, können folgende Ansätze verfolgt werden:

Detaillierte Überprüfung der Signalverarbeitung: Eine gründliche Analyse der Verarbeitung der 3600x1-Arrays in allen Regelschritten ist notwendig. Dabei sollten die Indizes der Arrays auf korrekte Ausrichtung überprüft und die mathematischen Operationen validiert werden. Der Einsatz von Debugging-Tools und detaillierten Signalplots kann helfen, mögliche Fehlerquellen zu identifizieren und zu beheben. Obwohl es keine einfache Methode gibt, jeden Regelschritt effektiv und effizient zu untersuchen, ist diese Analyse entscheidend für die Verbesserung des Systems.

Identifikation und Eliminierung der Normalisierung: Die Quelle der ungewollten Normalisierung muss gefunden und adressiert werden. Dies kann durch eine Überprüfung der Simulink-Blöcke, des Audiointerfaces und des Lautsprechersystems erfolgen. Sobald die Normalisierung lokalisiert ist, kann sie entweder deaktiviert oder explizit in den Regelalgorithmus integriert werden, um die Kontrolle über die Signalpegel zu gewährleisten. Eine mögliche Methode ist das Rückführen des Ausgangssignals in das Simulink-Modell, um das Normalisierungsverhalten zu analysieren.

Optimierung der Korrekturanwendung: Die Methode zur Anwendung der Korrektursignale auf das Anregungssignal sollte optimiert werden. Dies beinhaltet die Skalierung der Korrekturwerte, die Anpassung des Gewichtungsfaktors und die Überprüfung der Korrekturalgorithmen. Eine präzisere Anwendung der Korrektursignale kann die Effektivität des Regelkreises erhöhen und die Amplitudenschwankungen reduzieren.

Erweiterte Validierung des Reglers: Um sicherzustellen, dass der Regler korrekt funktioniert, sollten umfassende Tests und Validierungen durchgeführt werden. Dies kann durch Simulationen mit bekannten Signalen, Vergleich mit theoretischen Modellen und Analyse der Konvergenzgeschwindigkeit erfolgen. Eine detaillierte Dokumentation der einzelnen Regelschritte kann ebenfalls hilfreich sein, um Fehler zu identifizieren und zu beheben.

Berücksichtigung von Phaseninformationen: Die Erweiterung des Regelalgorithmus zur Verarbeitung von Amplitude und Phase kann die Genauigkeit der Signalrekonstruktion erhöhen. Durch die Berücksichtigung der Phaseninformation könnten Frequenzkomponenten präziser angepasst und Interferenzeffekte reduziert werden.

Erweiterte Mittelungsverfahren und dynamische ITF: Die Implementierung adaptiver Mittelungsverfahren oder die Erhöhung der Anzahl gemittelter Spektren kann die Variabilität

reduzieren. Eine dynamische Anpassung der ITF könnte ebenfalls dazu beitragen, Nichtlinearitäten und systemische Veränderungen besser zu kompensieren.

Erhöhung der zu verarbeitenden FFT-Linien: Durch die Erhöhung der Anzahl der zu verarbeitenden FFT-Linien kann die Frequenzauflösung verbessert werden, was zu einer genaueren Spektralanalyse führt. Obwohl dies den Regler langsamer machen kann, könnte die erhöhte Genauigkeit die Effektivität des Regelkreises steigern.

5.1.5 Ausblick für zukünftige Arbeiten

Die identifizierten Limitationen bieten eine Vielzahl wertvoller Ansatzpunkte für zukünftige Arbeiten:

- **Detaillierte Fehleranalyse:** Durch eine systematische Überprüfung und Optimierung der Signalverarbeitung können die Amplitudenschwankungen reduziert und die Genauigkeit verbessert werden.
- **Integration einer bewussten Signalnormalisierung:** Die Implementierung einer kontrollierten Normalisierung im Regelalgorithmus kann helfen, die Signalpegel konsistent zu halten und die Wirkung der Korrektursignale sicherzustellen.
- **Erweiterung des Regelkreises:** Die Implementierung eines Multiple Input Multiple Output (MIMO)-Systems kann die räumliche Akustik besser abbilden und die Ergebnisse weiter verbessern.
- **Hardware-Optimierung:** Der Einsatz von Hardware ohne ungewollte Normalisierungsfunktionen oder mit transparenten Signalwegen kann die Kontrolle über das Ausgangssignal erhöhen.
- **Iterative Anpassung der Inversen Transferfunktion:** Eine kontinuierliche, iterative Anpassung der Inversen Transferfunktion könnte helfen, dynamische Veränderungen im System auszugleichen und eine stabilere Replikation des Referenzsignals zu gewährleisten.

5.2 Validierung des Systems nach VDI 2206

Die Validierung des entwickelten Regelalgorithmus zur Reproduktion von Kabinenakustik erfolgt gemäß den Richtlinien der VDI 2206, welche einen methodischen Ansatz für die Entwicklung mechatronischer Systeme vorschreiben. Ziel dieser Validierung ist es, die korrekte

Implementierung des Systems zu überprüfen, die Erfüllung der Anforderungen zu bestätigen und die Zufriedenheit der Stakeholder zu gewährleisten.

Der Regelalgorithmus wurde erfolgreich nach dem Vorbild eines SISO (Single Input Single Output) Random Vibration Control Algorithmus entwickelt und in Simulink implementiert. Alle geplanten Komponenten konnten integriert werden, sodass ein funktionierender Regelkreis entstand, der ohne Warnmeldungen ausführbar ist. Die Implementierung umfasste unter anderem:

- Frequenzbereichsregelung: Durch den Einsatz von FFT und IFFT wurde eine präzise Anpassung einzelner Frequenzkomponenten ermöglicht.
- Online-Korrekturprozess: Der Regler reagiert in Echtzeit auf Veränderungen der Systemantwort und führt iterative Anpassungen während der Laufzeit durch.
- Iterativer Mittelungsalgorithmus: Ein kontinuierlicher Mittelungsspeicher wurde implementiert, um das Spektrum zu stabilisieren und zufällige Schwankungen zu reduzieren.
- Verwendung von ASIO-Treibern: Die direkte Hardware-Kommunikation wurde ermöglicht, um Latenzen zu minimieren und die Signalgenauigkeit zu erhöhen.

Die Implementierung dieser Komponenten entspricht den festgelegten Anforderungen und spiegelt die in der Anforderungstabelle Anhang A definierten Prioritäten wider. Der Regelalgorithmus konnte trotz anfänglicher Schwierigkeiten bei der Implementierung im Frequenzbereich erfolgreich umgesetzt werden. Die experimentelle Untersuchung im Laborumfeld zeigte ein konvergentes Verhalten des Systems hin zum Referenzprofil. Obwohl das Referenzprofil nicht vollständig erreicht wurde, bestätigt die grundlegende Funktionalität des Reglers die Wirksamkeit der entwickelten Methoden. Schwierigkeiten traten insbesondere bei der Handhabung von Simulink auf. Die fehlende umfangreiche Dokumentation innerhalb der Matlab-Community erschwerte die Implementierung. Zudem erwies sich das System als äußerst empfindlich gegenüber kleinen Veränderungen, was zu einer hohen Anzahl von Fehlermeldungen und Abstürzen führte. Dies machte den Entwicklungsprozess zeitintensiv und erforderte eine sorgfältige Abstimmung aller Parameter und bereitgestellten Spektren.

Die Bedürfnisse der Stakeholder, insbesondere die Bereitstellung eines kostengünstigen und mit den vorhandenen Mitteln realisierbaren Regelalgorithmus, wurden erfüllt. Das entwickelte System stellt eine solide Ausgangsbasis für zukünftige Forschungen und Studien dar. Studierende und Forschende können auf dem bestehenden Regelkreis aufbauen und ihn weiter optimieren. Spezifische Bedürfnisse der Stakeholder, wie die Implementierung eines Reglers im

Frequenzbereich und die Nutzung von Simulink zur Ermöglichung einer modularen Architektur, wurden berücksichtigt. Die Anforderung, eine konvergente Anpassung an das Referenzprofil zu erreichen, wurde teilweise erfüllt. Obwohl die Reproduktionsgenauigkeit von ± 5 dB in der Terzbandanalyse nicht erreicht wurde, zeigt das System dennoch ein positives Anpassungsverhalten.

Einige Anforderungen konnten aus Zeitgründen nicht vollständig umgesetzt werden:

- Reproduktionsgenauigkeit: Die angestrebte Genauigkeit von ± 5 dB wurde nicht erreicht. Die Gründe hierfür liegen in den zuvor diskutierten Limitationen, wie der ungewollten Signalnormalisierung und möglichen Fehlern in der Signalverarbeitung.
- Benutzeroberfläche (UI): Aus Zeit- und Aufwandsgründen wurde keine benutzerfreundliche Oberfläche zur Parameterwahl und Ausgabe der Messwerte implementiert.
- Automatisiertes Hauptskript: Ein Hauptskript zur Parameterabfrage und automatisierten Simulation befindet sich noch in Bearbeitung und wurde nicht vollständig abgeschlossen.

Trotz dieser nicht vollständig erfüllten Anforderungen bietet das System eine robuste Grundlage für weitere Arbeiten. Die iterative Anpassung der Anforderungsliste während des Entwicklungsprozesses half, die wichtigsten Prioritäten zu identifizieren und zu adressieren.

Die Validierung nach VDI 2206 zeigt, dass das System korrekt gebaut wurde und die Kernanforderungen erfüllt. Der Kunde, in diesem Fall vertreten durch die Stakeholder aus Forschung und Lehre, ist mit dem erzielten Ergebnis zufrieden. Das entwickelte System ermöglicht es, grundlegende Funktionen des Regelalgorithmus zu demonstrieren und dient als Ausgangspunkt für weiterführende Untersuchungen und Optimierungen. Die Bedürfnisse der Stakeholder wurden weitgehend berücksichtigt, und die implementierten Lösungen entsprechen den gestellten Anforderungen. Bereiche, in denen die Bedürfnisse nicht vollständig erfüllt wurden, bieten Potenzial für zukünftige Arbeiten und Verbesserungen.

6 Zusammenfassung und Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Regelalgorithmus zur Reproduktion von Kabinenakustik entwickelt, implementiert und experimentell untersucht. Ausgangspunkt war die Anforderung, ein System zu schaffen, das in der Lage ist, akustische Referenzprofile, die realen Flugbedingungen entsprechen, in einem Laborumfeld präzise nachzubilden. Hierzu wurden folgende Schritte unternommen:

1. Anforderungsanalyse: Basierend auf den Vorgaben der Stakeholder wurde eine detaillierte Anforderungstabelle erstellt, die die Grundlage für die Entwicklung bildete.
2. Entwicklung des Regelalgorithmus: Als Vorlage wurde ein SISO Random Vibration Control Algorithmus gewählt und in Simulink implementiert. Die Entscheidung für eine Frequenzbereichsregelung ermöglichte dabei eine gezielte Anpassung einzelner Frequenzkomponenten.
3. Implementierung der Komponenten: Alle geplanten Komponenten, einschließlich der Online-Korrekturstrategie, des iterativen Mittelungsalgorithmus und der Nutzung des FFT/IFFT Prinzips, wurden erfolgreich integriert.
4. Experimentelle Untersuchung: Der Regelkreis wurde im Laborumfeld getestet. Die Ergebnisse zeigten eine grundlegende Fähigkeit des Systems, sich dem Referenzprofil anzunähern, insbesondere in den ersten Iterationen.
5. Analyse der Limitationen: Trotz positiver Ergebnisse wurden Limitationen identifiziert, darunter Amplitudenschwankungen, mögliche Fehler in der Signalverarbeitung und ungewollte Signalnormalisierung.
6. Validierung nach VDI 2206: Die Validierung bestätigte die korrekte Umsetzung des Systems und die weitgehende Erfüllung der Stakeholder-Anforderungen.

Die vorliegende Arbeit legt den Grundstein für eine erfolgreiche Reproduktion der Kabinenakustik im Laborumfeld und zeigt auf, dass durch gezielte Entwicklung und Implementierung wesentliche Fortschritte erzielt werden können. Die identifizierten Limitationen bieten wertvolle Hinweise für die weitere Forschung und Entwicklung und eröffnen Perspektiven für die kontinuierliche Optimierung und Erweiterung des Systems. So kann langfristig eine noch präzisere und realitätsnahe Nachbildung akustischer Umgebungen erreicht werden, was sowohl für die Forschung als auch für mögliche industrielle Anwendung von großem Interesse ist. Mit der erfolgreichen Entwicklung eines Regelalgorithmus zur Nachbildung von Kabinenakustik unter Verwendung bestehender Ressourcen und Tools zeigt diese Arbeit eine praxistaugliche Lösung auf. Die Implementierung des Regelkreises in Simulink erwies sich dabei als vorteilhaft für eine

modulare Gestaltung und künftige Erweiterungen. Die erzielten Ergebnisse bestätigen, dass das System in der Lage ist, eine Annäherung an das gewünschte Referenzprofil zu erreichen. Besonders hervorzuheben ist die schnelle Anfangskonvergenz, die die Effektivität des gewählten Ansatzes unterstreicht. Dennoch verbleiben Herausforderungen, die die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Systems beeinflussen. Zukünftige Arbeiten können hier ansetzen, um die identifizierten Limitationen zu überwinden und die Systemleistung weiter zu steigern.

7 Literaturverzeichnis

- [1] U. Orrenius und V. Cotoni, "Analysis of sound transmission through aircraft fuselages excited by turbulent boundary layer or diffuse acoustic pressure fields," Institute of Noise Control Engineering, 2009.
- [2] M. Pflüger und F. Brandl, "Fahrzeugakustik," Wien: Springer, 2010. (Der Fahrzeugantrieb)
- [3] G. Gäbel, "Akustik [Vorlesungsfolien]," 2022.
- [4] P. Zeller, "Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch," 3., aktualisierte Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. (ATZ/MTZ-Fachbuch)
- [5] M. Möser, "Technische Akustik," 9., aktualisierte Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [6] K. Genuit, "Sound-Engineering im Automobilbereich: Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen," Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [7] R. Guski, "Wahrnehmen: Ein Lehrbuch," Stuttgart: Kohlhammer, 1996.
- [8] G. R. Sinambari und S. Sentpali, "Ingenieurakustik: Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele," 5., völlig überarb. und erw. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [9] Brüel & Kjær, "Basics of Sound," [Online]. Verfügbar unter: www.bruelkjaer.de. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [10] W. M. Willems, "Formeln und Tabellen Bauphysik: Wärmeschutz - Feuchteschutz - Klima - Akustik - Brandschutz," 5. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [11] R. Lerch, G. M. Sessler und D. Wolf, "Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen," Berlin: Springer, 2009.
- [12] W. M. Willems, K. Schild und D. Stricker, "Schallschutz: Bauakustik: Grundlagen, Luftschallschutz, Trittschallschutz," Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012. (Praxis)
- [13] J. Quehl, "Comfort studies on aircraft interior sound and vibration," Aachen: Shaker, 2001. (Berichte aus der Psychologie)
- [14] K. Genuit, "Background and Practical Examples of Sound Design," 1997.
- [15] P. Vink und S. Hallbeck, "Editorial: Comfort and discomfort studies demonstrate the need for a new model," in *Applied Ergonomics*, Bd. 43, Nr. 2, 2012, S. 271–276.
- [16] V. Mellert, I. Baumann, N. Freese und R. Weber, "Impact of sound and vibration on health, travel comfort and performance of flight attendants and pilots," in *Aerospace Science and Technology*, Bd. 12, Nr. 1, 2008, S. 18–25.
- [17] C. Patsouras et al., "Privacy versus sound quality in high speed trains," 2000.

- [18] S. Kuwano, S. Namba und T. Okamoto, "Sound Environment in a Cabin in Relation to Speech Communication and Annoyance," 2002.
- [19] M. S. Khan, "Effects of Masking Sound on Train Passenger Aboard Activities and on Other Interior Annoying Noises," 2003, S. 711–717.
- [20] C. Thomas und H. Scheel, "Kabinenakustik in der Luftfahrtforschung," 2018.
- [21] H. Scheel und P. Lempereur, "Next generation Aircraft - A challenge for Interior Acoustics Developments," 2016.
- [22] K. Ozcan und S. Nemlioglu, "In-cabin noise levels during commercial aircraft flights," in *Canadian Acoustics - Acoustique Canadienne*, Bd. 34, 2006.
- [23] L. L. Beranek, "Acoustics," New York, NY: American Inst. of Physics, 1986.
- [24] B. Plaumann, T. Ziegner, T. Tews, J. Hansen und HAW Hamburg (Mitarb.), "Untersuchung und Optimierung der Schallpfade in die VIP-Kabine," 2023.
- [25] J. F. Wilby, "Interior Noise of General Aviation Aircraft," in *SAE Transactions*, Bd. 91, 1982, S. 3133–3144. Verfügbar unter: <http://www.jstor.org/stable/44644316>.
- [26] N. Hu, H. Buchholz, M. Herr, C. Spehr und S. Haxter, "Contributions of Different Aeroacoustic Sources to Aircraft Cabin Noise," in *19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [27] J. Mixson und J. Wilby, "Interior Noise," in *Aeroacoustics of Flight Vehicles: Theory and Practice*, Bd. 2: Noise Control, S. 271–352.
- [28] H. Scheel und P. Lempereur, "Next generation Aircraft - A challenge for Interior Acoustics Developments," 2016.
- [29] R. Winter, "Geräusch- und Vibrationsquellen und deren Übertragungswege bis in die Flugzeugkabine zum Empfänger," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dlr.de/de/ae/aktuelles/fachartikel/fachartikel-2021/wie-laut-wird-es-die-kabinenakustik-zukuenftiger-flugzeuge>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [30] D. E. Bishop, "Cruise Flight Noise Levels in a Turbojet Transport Airplane," in *Noise Control*, Bd. 7, Nr. 2, 1961, S. 37–42.
- [31] J. Bouwens, L. Fasulo, S. Hiemstra-van Mastriigt, U. W. Schultheis, A. Naddeo und P. Vink, "Being in Control of Noise Levels Improves the Perception of Airplane Seat Comfort," in *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, Bd. 12, Nr. 1, 2022, S. 3–11.
- [32] K. D. Frampton und R. L. Clark, "Power flow in an aeroelastic plate backed by a reverberant cavity," in *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 102, Nr. 3, 1997, S. 1620–1627.
- [33] M. D. Rao, "Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes," in *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 262, Nr. 3, 2003, S. 457–474.

- [34] Skandia, "The Science of Acoustic Engineering and Materials," [Online]. Verfügbar unter: <https://skandiainc.com/services/acoustic-solutions/>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [35] A. Kumar und S. Panda, "Design of a 1-3 viscoelastic composite layer for improved free/constrained layer passive damping treatment of structural vibration," in *Composites Part B: Engineering*, Bd. 96, 2016, S. 204–214.
- [36] D. I. G. Jones, "Handbook of viscoelastic vibration damping," Chichester: Wiley, 2001.
- [37] B. C. Nakra, "Structural dynamic modification using additive damping," in *Sadhana*, Bd. 25, Nr. 3, 2000, S. 277–289.
- [38] P. K. Roy und N. Ganesan, "Dynamic Studies on Beams with Unconstrained Layer Damping Treatment," in *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 195, Nr. 3, 1996, S. 417–427.
- [39] E. E. Ungar und E. M. Kerwin, "Plate-Damping due to Thicknesswise Deformations in Attached Viscoelastic Layer," in *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 35, 5_Supplement, 1963, S. 802.
- [40] A. Yildiz und K. Stevens, "Optimum thickness distribution of unconstrained viscoelastic damping layer treatments for plates," in *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 103, Nr. 2, 1985, S. 183–199.
- [41] S. Rothe, "Design and placement of passive acoustic measures in early design phases," Shaker Verlag. Dissertation.
- [42] F. Rieg und R. Steinhilper, "Handbuch Konstruktion," 2., aktualisierte Aufl., München: Hanser, 2018.
- [43] W. Gleine und H. Hoppen, "Konzeptstudien für neue Flugzeugkabinenisolierungen," Poster.
- [44] H. Hoppen und W. Gleine, "Abschlussbericht für das LuFo V-2 Vorhaben Flight-LAB: Flugtest im Labor," 2020.
- [45] D. Frankovich, "The basics of vibration isolation using elastomeric materials," Society of Manufacturing Engineers, 2000.
- [46] C. Hopkins, "Introduction to Designing Elastomeric Vibration Isolators," OPTI, 2009.
- [47] J. Yang, M. Wu und L. Han, "A Review of Sound Field Control," in *Applied Sciences*, Bd. 12, Nr. 14, 2022, S. 7319.
- [48] D. Wang, G. Feng, G. Ma und X. Li, "Sound field reproduction in a cabin using loudspeakers," Universitätsbibliothek der RWTH Aachen, 2019.
- [49] T. Ziemer, "Wave Field Synthesis," in *Psychoacoustic Music Sound Field Synthesis*, Bd. 7, Cham: Springer International Publishing, 2020. (Current Research in Systematic Musicology), S. 203–243.

- [50] J. Blauert, "3-d-Lautsprecher-Wiedergabemethoden," in Fortschritte der Akustik—DAGA, Bd. 8, 2008, S. 25–26.
- [51] A. J. Berkhout, D. de Vries und P. Vogel, "Acoustic control by wave field synthesis," in The Journal of the Acoustical Society of America, Bd. 93, Nr. 5, 1993, S. 2764–2778.
- [52] Z. Liu und C. Cai, "Multi-exciter vibration control for spatial orbit motion," 2017.
- [53] P. Gauthier und C. Camier, "Experiments of sound field reproduction inside aircraft cabin mock-up," Audio Engineering Society, 2012.
- [54] P.-A. Gauthier, C. Camier, O. Gauthier, Y. Pasco und A. Berry, "Aircraft sound environment reproduction: Sound field reproduction inside a cabin mock-up using microphone and actuator arrays," in The Journal of the Acoustical Society of America, Bd. 133, 5_Supplement, 2013, S. 3251.
- [55] P. Gauthier und C. Camier, "Sound field reproduction of real flight recordings in cabin mock-up," Audio Engineering Society, 2013.
- [56] P.-A. Gauthier, C. Camier, F.-A. Lebel, Y. Pasco, A. Berry, J. Langlois, C. Verron und C. Guastavino, "Experiments of multichannel least-square methods for sound field reproduction inside aircraft mock-up: Objective evaluations," in Journal of Sound and Vibration, Bd. 376, 2016, S. 194–216.
- [57] B. Cornelis und A. Toso, "Improved MIMO FRF estimation and model updating for robust Time Waveform Replication on durability test rigs," 2014.
- [58] MIL-STD-810G, "Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests," US Military, 2000.
- [59] A. Steinwolf, "Random vibration testing beyond PSD limitations," 40, 2006.
- [60] U. Musella, L. Zanellati, M. Grotoli, F. Celiberti, B. Peeters, F. Marulo und P. Guillaume, "Driving a Motion Platform with a Vibration Control Software for Multi-Axis Environmental Testing: Challenges and Solutions," in N. Dervilis (Hrsg.): Special Topics in Structural Dynamics, Volume 5, Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 215–231.
- [61] R. Schultz und S. Carter, "A MIMO Time Waveform Replication Control Implementation," in J. Harvie (Hrsg.): Dynamic Environments Testing, Volume 7, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, S. 131–140.
- [62] G. Shen, G.-m. Lv, Z.-m. Ye, D.-c. Cong und J.-w. Han, "Feed-forward inverse control for transient waveform replication on electro-hydraulic shaking table," in Journal of Vibration and Control, Bd. 18, Nr. 10, 2012, S. 1474–1493.
- [63] G. Shen, Z.-C. Zhu, L. Zhang, T. Yu, C.-F. Yang, J.-S. Zhao, G.-D. Liu und J.-W. Han, "Adaptive feed-forward compensation for hybrid control with acceleration time waveform replication on electro-hydraulic shaking table," in Control Engineering Practice, Bd. 21, Nr. 8, 2013, S. 1128–1142.

- [64] J. Cuyper, "Linear Feedback Control for Durability Test Rigs in the Automotive Industry (Lineaire controle op basis van terugkoppeling voor industriële vermoeingsproefstanden voor de automobielnijverheid)," 2006.
- [65] M. Dal Borgo und S. Ophem, "Design of an innovative fuselage cabin noise testing system for regional aircraft," Gliwice, Poland: Silesian University Press, 2021.
- [66] M. Dal Borgo, M. Alvarez, S. Blanco, S. Ophem, H. Denayer, P. Dell'Aversana, T. Polito, L. Staibano, R. Bianco, B. Peeters, B. Pluymers und W. Desmet, "Development of an innovative noise generation system for turboprop aircraft fuselage testing," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bd. 1226, 2022, S. 12053.
- [67] M. Dal Borgo und U. Musella, "MULTIPLE-INPUT MULTIPLE-OUTPUT ACOUSTIC TESTING OF TURBOPROP FUSELAGE STRUCTURES," Forum Acusticum, Turin, 2023.
- [68] G.-f. Guan, H.-t. Wang und W. Xiong, "Multi-input multi-output random vibration control of a multi-axis electro-hydraulic shaking table," in Journal of Vibration and Control, Bd. 21, Nr. 16, 2015, S. 3292–3304.
- [69] S. Cui, H. Chen, X. He und W. Zheng, "Multi-input multi-output random vibration control using Tikhonov filter," in Chinese Journal of Aeronautics, Bd. 29, Nr. 6, 2016, S. 1649–1663.
- [70] Y. Haoyang und G. Guangfeng, "Research on Random Vibration Control Algorithm Based-on EV Model," Atlantis Press, 2012.
- [71] Hottinger Brüel & Kjær, "Vibration Controllers," [Online]. Verfügbar unter: https://www.hbkworld.com/en/products/vibration-testing/controllers#!ref_bksv.com. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [72] IMV, "Vibration Controller," [Online]. Verfügbar unter: <https://we-are-imv.com/en/business/products/item/vibrationtest-k2/>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [73] S. Smith, R. Stroud, G. Hamma und L. Johnson, "Digital Control Techniques for a Three-Axis Vibration Test System," in SAE Technical Paper Series, 1980.
- [74] R. Penrose, "A generalized inverse for matrices," in Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Bd. 51, Nr. 3, 1955, S. 406–413.
- [75] Wikipedia, "Pseudoinverse," [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Pseudoinverse>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [76] "Numerik linearer Gleichungssysteme: Eine Einführung in moderne Verfahren; mit MATLAB-Implementierungen," 2., überarb. Aufl., Wiesbaden: Vieweg, 2005.
- [77] Wikipedia, "Cholesky-Zerlegung," [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Cholesky-Zerlegung>. [Zugriff am: 1. November 2024].

- [78] X. Cui, H. Chen, X. He und S. Jiang, "Matrix Power Control Algorithm for Multi-input Multi-output Random Vibration Test," in Chinese Journal of Aeronautics, Bd. 24, Nr. 6, 2011, S. 741–748.
- [79] Z. Yang, Q. Huang, J. Han und H. Li, "Adaptive inverse control of random vibration based on the filtered-X LMS algorithm," in Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Bd. 9, Nr. 1, 2010, S. 141–146.
- [80] M. L. Wang, "Closed-loop random vibration control of a shaker table with a microcomputer," in Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Bd. 13, Nr. 4, 1994, S. 259–266.
- [81] VDI 2206, "Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme," 2024.
- [82] MathWorks, "Buffer," [Online]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/help/dsp/ref/buffer.html>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [83] F. Tiong, "Measuring Audio Amplifiers With MATLAB," [Online]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/videos/measuring-audio-amplifiers-with-matlab-setting-up-systems-1710739953535.html>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [84] Turbosound, "iQ12," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.turbosound.com/product.html?modelCode=0313-AEM>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [85] Qsources, "Qohm," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.qsources.be/infra-qsources/qohm/>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [86] Behringer, "B1500XP Subwoofer," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.behringer.com/product.html?modelCode=0313-AGO>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [87] Sinus Messtechnik GmbH, "Verstärker PA1000," [Online]. Verfügbar unter: <https://sinus-leipzig.de/de/produkte/pa1000-amplifier>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [88] Focusrite Audio Engineering Ltd., "Audio Interface Scarlett 2i2 [3rd Gen]," [Online]. Verfügbar unter: <https://focusrite.com/products/scarlett-2i2-3rd-gen>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [89] Behringer, "Messmikrofon ECM8000," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.behringer.com/product.html?modelCode=0506-AAA>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [90] Turbosound, "Videotutorial iQ12 Clipping & Limiting," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=sWc87NiYh6A>. [Zugriff am: 1. November 2024].
- [91] Focusrite Audio Engineering Ltd., "Scarlett 2i2 User Guide," [Online]. Verfügbar unter: <https://userguides.focusrite.com/hc/en-gb/sections/19640363031570-Scarlett-2i2-4th-Gen-User-Guide>. [Zugriff am: 1. November 2024]

Anhang

Anhang A – Anforderungstabelle

Anhang B – Messergebnisse

| ID | Kategorie | Titel | Beschreibung | Alternativen | Bemerkungen | Getroffene Auswahl | Priorität | Stand |
|----|----------------------|--------------------------|--|---|--|--------------------------|-----------|----------------|
| 1 | Regelungsalgorithmus | Reproduktionsgenauigkeit | Der Regelalgorithmus erreicht einen ± 5 dB Schalldruck Mindendifferenz in der Terbnadanalyse zu dem Referenzprofil | - | - | - | Mittel | nicht erledigt |
| 2 | Regelungsalgorithmus | Frequenzbereichsregelung | Implementierung des Reglers im Frequenzbereich, um gezielte Anpassungen einzelner Frequenzkomponenten zu ermöglichen. | Zeitbereichsregelung | Frequenzbereichsregelung ermöglicht präzise Steuerung des akustischen Verhaltens und optimale Anpassung an das Referenzprofil. | Frequenzbereichsregelung | Hoch | erledigt |
| 3 | Korrekturstrategie | Online-Korrekturprozess | Echtzeitreaktion des Reglers auf Veränderungen der Systemantwort mit iterativen Anpassungen während der Laufzeit. | Offline-Korrektur ohne Echtzeit-Anpassungen | Online-Korrektur erhöht Präzision und Konsistenz in dynamischen Umgebungen möglich. | Online-Korrektur | Hoch | erledigt |
| 4 | Systemarchitektur | SISO-Architektur | Verwendung eines Single Input Single Output Systems zur Reduzierung der Komplexität und für eine effizientere Implementierung. | MIMO-System für präzisere Kontrolle | SISO kann modular erweitert werden; Beginn mit SISO erleichtert Entwicklung und Testen. | SISO-Architektur | Mittel | erledigt |

| | | | | | | | | |
|---|---------------------------|--|--|---------------------------------------|---|----------------------------------|--------|----------|
| 5 | Mittelungsverfahren | Iterativer Mittelungsalgorithmus | Einführung eines iterativen Mittelungsverfahrens zur Stabilisierung des Spektrums und präziseren Anpassung an das Referenzprofil. | FIFO-Speicher | Iteratives Verfahren ermöglicht gezielte Analyse von Iterationsschritten und verbessert Systemleistung. | Iterativer Mittelungsalgorithmus | Hoch | erledigt |
| 6 | Implementierungsplattform | Implementierung in Simulink | Nutzung von Simulink für eine modulare Architektur und bessere Visualisierung des Regelprozesses. | MATLAB-Skriptbasierte Implementierung | Simulink erleichtert zukünftige Anpassungen und Erweiterungen; besser für interdisziplinäre Teams geeignet. | Simulink-Implementierung | Mittel | erledigt |
| 7 | Regelkreisstruktur | Hybrider Closed-Loop-Regler mit Beobachter | Kombination von kontinuierlicher Datenerfassung mit diskreten, iterativen Anpassungen in einem geschlossenen Regelkreis. | standart closed loop | Ermöglicht präzise Anpassung des Ausgangssignals und Stabilisierung durch Beobachtersystem. | Hybrid Regelung | Hoch | erledigt |
| 8 | Signalverarbeitung | Verwendung von FFT und IFFT | Einsatz von Fourier-Transformationen zur Umwandlung zwischen Zeit- und Frequenzbereich für genaue Frequenzanalyse und Signaloptimierung. | Direkte Verarbeitung im Zeitbereich | Erlaubt detaillierte Frequenzanalyse und gezielte Anpassungen; unerlässlich für Frequenzbereichsregelung bei stochastischen Signalen. | Verwendung von FFT und IFFT | Hoch | erledigt |

| | | | | | | | | |
|----|--------------------|-------------------------------------|---|---|---|------------------------------------|---------|----------|
| 9 | Signalpufferung | Einsatz von Buffer-Blöcken | Verwendung von Buffer-Blöcken in Simulink zur Organisation sequentieller Daten und Sicherstellung ausreichender Datenmenge für die FFT. | Keine spezifischen Alternativen genannt | Verhindert unvollständige Datenverarbeitung; erhöht Genauigkeit der Frequenzanalyse. | Einsatz von Buffer-Blöcken | Mittel | erledigt |
| 10 | Signalumwandlung | Nutzung von Amplitudenwerten | Extraktion und Verwendung der Amplituden aus dem komplexen FFT-Signal für den Regelalgorithmus. | Verarbeitung von Amplitude und Phase | Reduziert Rechenaufwand; Phaseninformation für diesen Anwendungsfall nicht erforderlich. | Verwendung der Amplitudenwerte | Niedrig | erledigt |
| 11 | Datenaufnahme | Einsatz von ASIO-Treibern | Nutzung von ASIO-Treibern für direkte Hardware-Kommunikation, minimierte Latenz und höhere Signalgenauigkeit. | Standard-Windows-Treiber | Umgeht Windows-Soundsteuerung; verhindert Signalverfälschungen durch interne Lautstärkeregelung. | Verwendung von ASIO-Treibern | Mittel | erledigt |
| 12 | Mittelungsspeicher | Kontinuierlicher Mittelungsspeicher | Implementierung eines Mittelungsspeichers mittels MATLAB Function Block zur Sammlung und Mittelung mehrerer FFT-Spektren. | Softwareinterne Simulinkblöcke | Stabilisiert das gemessene Spektrum und reduziert zufällige Schwankungen; verbessert Genauigkeit der Regelung. Reine Simulinkblöcke zu komplex. | Verwendung des Mittelungsspeichers | Hoch | erledigt |

| | | | | | | | | |
|--------|------------------------|--|--|---|---|---------------------------------------|--------|----------------|
| 1 3 | Datenspeicherung | Iterative Speicherung der Mikrofondaten | Speicherung der Mikrofonssignale jeder Iteration für detaillierte Analyse und Nachverfolgung des Regelprozesses. | Softwareinterne Simulinkblöcke | Erlaubt genaue Validierung und Feinjustierung des Reglers; verbessert Transparenz des Prozesses. | Iterative Datenspeicherung | Mittel | erledigt |
| 1 4 | Korrekturalgorithmus | Anwendung eines Gewichtungsfaktors | Einsatz eines festen Gewichtungsfaktors zur schrittweisen Anpassung des Korrekturspektrums und Vermeidung sprunghafter Änderungen. | Sofortige vollständige Anpassung des Korrektursignals | Sichert stabile Regelung und verhindert Instabilitäten durch abrupte Signaländerungen. | Verwendung des Gewichtungsfaktors | Hoch | erledigt |
| 1 5 | Spektrumbereitstellung | Nutzung von Constant- und Rate Transition-Blöcken | Einbindung der inversen Transferfunktion und des Referenzspektrums als Arrays; Verwendung von Rate Transition-Blöcken zur Anpassung der Abtaststraten. | Keine spezifischen Alternativen gefunden | Stellt konsistente Datenübertragung sicher; ermöglicht präzise Anpassung an das Referenzprofil. | Gewählte Implementierung der Spektren | Mittel | erledigt |
| 1 6 | Auswertung | Bereitstellung Auswertungsskripts zur Untersuchung der Iterationen | Entwicklung eines MATLAB-Skripts zur automatischen Auswertung und Analyse der einzelnen | Manuelle Auswertung einzelner Iterationsdaten | Automatisierte Auswertung ermöglicht präzise Analyse über alle Iterationen hinweg und reduziert den | Automatisiertes Auswertungsskript | Mittel | in Bearbeitung |

| | | | | | | | | |
|--------|-------------------------|---|---|--|--|---------------------------------|---------|----------------|
| | | | Iterationen, um Abweichungen und Anpassungen des Reglers systematisch zu untersuchen. | | Aufwand im Vergleich zur manuellen Untersuchung. | | | |
| 1 7 | Simulationssteuerung | Bereitstellung eines Hauptskripts zur Parameterabfrage und automatisierten Simulation | Erstellung Matlab-Hauptskripts, das Benutzereingaben für die Simulation abfragt, die Parameter festlegt und die Simulink-Simulation selbstständig startet. | Alternativen: Manuelle Eingabe der Parameter und manuelles Starten der Simulation | Das Hauptskript verbessert die Benutzerfreundlichkeit und gewährleistet eine konsistente Parametereinstellung für wiederholbare Simulationen. | Hauptskript zur Automatisierung | Niedrig | in Bearbeitung |
| 1 8 | Benutzeroberfläche (UI) | Erstellung eines UI für den Regler zur Parameterwahl und Ausgabe der Messwerte | Implementierung einer benutzerfreundlichen UIs (User Interface) für den Regler, das die Auswahl der Regelparameter ermöglicht und Messwerte der Simulation darstellt. | Direkte Anpassung der Parameter in Simulink ohne UI | UI erleichtert die Bedienung und Überwachung des Reglers, indem sie eine intuitive Schnittstelle zur Verfügung stellt und den Zugang zu den Parametern und Messwerten vereinfacht. | UI für den Regler | Niedrig | nicht erledigt |

Anhang B

| Mittelfrequenzen (Hz) | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1k | 1,25k | 1,60k | 2k | 2,5k | 3,15k | 4k | 5k | 6,3k | 8k | 10k |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|
| Referenz PSD (dB) | 52,9 | 54,8 | 47 | 47,8 | 45,4 | 44,9 | 41,78 | 40,47 | 36,6 | 34,8 | 30,3 | 24,7 | 24,45 | 16,8 | 12,11 | 8,7 | 3,9 | -1,4 | -3,5 | -0,9 |
| Δ Iteration 1 (dB) | 18,9 | 9,3 | 11,1 | 7,1 | 10,5 | 6,3 | 3 | 6,1 | 5,7 | 2,9 | 1,9 | 5,3 | 4,9 | 9,9 | 13,1 | 12,8 | 14,7 | 19,1 | 20,8 | 16,5 |
| Δ Iteration 2 (dB) | 18,7 | 5,4 | 7,1 | 3 | 5,8 | 1,2 | -2,1 | 2,6 | 1,4 | -0,8 | -2,6 | 0,5 | 4,4 | 5,6 | 10,6 | 14,6 | 10,7 | 17,2 | 19 | 12,6 |
| Δ Iteration 3 (dB) | 13,3 | 3,6 | 8,2 | 1,6 | 9 | 3,3 | -1,7 | 1,9 | 1 | -0,2 | -0,8 | 0,4 | 3,9 | 4,2 | 10,1 | 15,4 | 9,8 | 17,8 | 19,8 | 11,9 |
| Δ Iteration 4 (dB) | 16 | 7,7 | 8,1 | -1,2 | 8,1 | 4 | -1,9 | 5,3 | 1,1 | -1,6 | 0,6 | 1,3 | 3,3 | 4,7 | 9,2 | 16,2 | 8,7 | 17,9 | 20,6 | 11,2 |
| Δ Iteration 5 (dB) | 16,3 | 10,1 | 7,9 | -1,9 | 9,7 | 4,9 | -1,5 | 7,1 | 0,3 | -3,7 | 1,6 | 2,1 | 2,3 | 4,4 | 7,8 | 15,7 | 8,3 | 17,3 | 20,5 | 11,3 |
| Δ Iteration 6 (dB) | 9,6 | 10,7 | 6,3 | -1,4 | 12,3 | 4,8 | -0,9 | 7 | 0,4 | -3,4 | 1,4 | 2,1 | 1,6 | 4 | 7,2 | 15,5 | 8 | 16,1 | 20,3 | 10,7 |
| Δ Iteration 7 (dB) | 17,5 | 9,5 | 4,1 | -2,8 | 14,1 | 3,8 | -1,1 | 8 | 1,2 | -2,9 | 1,9 | 2,7 | 0,8 | 4 | 7,5 | 16 | 8 | 14,8 | 20,4 | 10,8 |
| Δ Iteration 8 (dB) | 21 | 7,4 | 6,7 | -2,7 | 13,7 | 3,1 | 0 | 9,5 | 1,7 | -0,7 | 1,8 | 2,1 | 0,4 | 4,5 | 7,2 | 16,7 | 7,6 | 14,4 | 19,8 | 10,1 |
| Δ Iteration 9 (dB) | 20,9 | 3,2 | 6,2 | -3 | 13,3 | 1,7 | -0,2 | 9,6 | 1,7 | 1,3 | 1,9 | 2,5 | -0,3 | 4,2 | 6,4 | 17,2 | 7,5 | 14,4 | 18,9 | 9,5 |
| Δ Iteration 10 (dB) | 20,8 | 1,6 | 5,5 | -3,2 | 12,3 | 0,1 | -0,3 | 9,8 | 2,7 | 0,8 | 1,8 | 1,6 | -1,2 | 4,4 | 6 | 17,1 | 7 | 14,1 | 18,3 | 8,8 |
| Δ Iteration 11 (dB) | 20,7 | -1,1 | 6,8 | -2,8 | 11,5 | -0,1 | -1,6 | 9,6 | 1,8 | -0,3 | 1,2 | 1 | -1,3 | 4,2 | 5,3 | 15,8 | 6,6 | 13,1 | 17,7 | 8,8 |
| Δ Iteration 12 (dB) | 20,1 | -1,8 | 6,7 | -3,3 | 11,6 | 1 | -0,3 | 9,6 | 0,7 | -0,3 | 0,9 | 0,6 | -0,9 | 3,9 | 4,9 | 14,6 | 7,1 | 13,5 | 17,3 | 8,9 |

Tabelle Anhang: Messreihe 2

Anhang B

| Mittelfrequenzen (Hz) | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1k | 1,25k | 1,6k | 2k | 2,5k | 3,15k | 4k | 5k | 6,3k | 8k | 10k |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| Referenz PSD (dB) | 51,9 | 51,9 | 47,7 | 51,1 | 47,5 | 44,2 | 46,2 | 41,7 | 36,6 | 32,9 | 29,7 | 24,3 | 20,5 | 17 | 11,1 | 6,4 | 4,2 | 0 | -1 | -1,7 |
| Δ Iteration 1 (dB) | 19,9 | 12,3 | 10,6 | 4,1 | 8,5 | 7 | -1,4 | 4,9 | 5,7 | 4,8 | 2,4 | 5,7 | 8,8 | 9,6 | 14,2 | 14,8 | 14,2 | 17,6 | 18,2 | 17,4 |
| Δ Iteration 2 (dB) | 14,4 | 9,3 | 8,1 | -2,4 | 7,7 | 2,7 | -5,5 | 1,6 | 2,6 | 2,5 | -0,7 | 1,3 | 8 | 6,3 | 11,2 | 16,6 | 9,8 | 15,6 | 15,3 | 15,1 |
| Δ Iteration 3 (dB) | 13,5 | 7,4 | 7,2 | -1,4 | 9,4 | 5,2 | -4,8 | 5,3 | 2 | 0,6 | -1,2 | 0,9 | 6,8 | 7 | 9,9 | 16,7 | 9,9 | 15,6 | 15,4 | 14 |
| Δ Iteration 4 (dB) | 16 | 6,3 | 6 | 0,2 | 10,1 | 6 | -4,6 | 7,4 | 3 | 0,5 | -1,1 | -0,2 | 5,5 | 7,1 | 9,5 | 16,3 | 9,7 | 15,6 | 16,2 | 13,2 |
| Δ Iteration 5 (dB) | 14,6 | 3,2 | 5,6 | -0,9 | 10,2 | 5,5 | -4,1 | 8,8 | 3,3 | 0,4 | -1,1 | -0,7 | 4,4 | 6,4 | 9,8 | 15,2 | 9 | 15,7 | 16,5 | 13,3 |
| Δ Iteration 6 (dB) | 13,9 | 2,5 | 4,3 | -1,7 | 8,6 | 2,5 | -4,5 | 9,2 | 3,6 | -0,8 | 0,1 | 0,1 | 3,9 | 6 | 10 | 13,7 | 8,9 | 15,8 | 17 | 13,2 |
| Δ Iteration 7 (dB) | 13,7 | 5,9 | 3,1 | -2,3 | 8,8 | 0,6 | -3,9 | 8,9 | 3 | -0,8 | 0 | 0,9 | 2,6 | 5,6 | 9,7 | 12,9 | 8,6 | 15,5 | 16,3 | 13,1 |
| Δ Iteration 8 (dB) | 15,6 | 3,4 | 3,2 | -4,7 | 9,6 | 1,5 | -4,3 | 8 | 1,9 | 0,8 | -0,4 | 0,9 | 1,6 | 5,6 | 9,1 | 12,5 | 8,6 | 14,8 | 15,3 | 13,6 |
| Δ Iteration 9 (dB) | 17,5 | 1 | 1,4 | -5,5 | 8,2 | 1,1 | -4,3 | 7,1 | -0,1 | 0,4 | -0,3 | 0,4 | 1,2 | 5,8 | 7,9 | 11,6 | 8,2 | 13,8 | 14,1 | 13,8 |
| Δ Iteration 10 (dB) | 16,5 | 0,1 | -1,1 | -4,2 | 4,7 | -0,7 | -4,4 | 5,7 | -2 | -0,5 | -0,4 | -0,9 | 0,9 | 5,7 | 7 | 11,5 | 7,3 | 12,5 | 13,3 | 12,6 |
| Δ Iteration 11 (dB) | 12,7 | 0,1 | -3 | -4 | 4,4 | -2,4 | -5,1 | 4,9 | -2,2 | 0,9 | -0,8 | -0,4 | 0,6 | 6 | 7,6 | 10,7 | 7,1 | 11,6 | 13,3 | 12 |
| Δ Iteration 12 (dB) | 7,9 | 0,1 | -2,8 | -5 | 4,9 | -1,5 | -4,8 | 4,5 | -2,7 | 2,9 | -1,2 | -0,7 | 1,4 | 5,3 | 8 | 10 | 7,2 | 11,5 | 13,2 | 11,9 |

Tabelle Anhang: Messreihe 3

