
BACHELORARBEIT

Herr

Carsten Rössel

**Validierung und
Weiterentwicklung eines
Innengeräusch-
prognosemodells für
Schienenfahrzeuge**

2023

BACHELORARBEIT

Validierung und Weiterentwicklung eines Innengeräuschprognosemodells für Schienenfahrzeuge

Autor/in:

Herr Carsten Rössel

Studiengang:

Media and Acoustical Engineering

Seminargruppe:

MG19wC-B

Erstprüfer:

Hübelt, Jörn, Prof. Dr.-Ing.

Zweitprüfer:

Schott, Max, Dipl. - Ing. (FH)

Einreichung:

Mittweida, 30.06.2023

Faculty of Media

BACHELOR THESIS

Validation and further development of an interior noise prediction model for rail vehicles

author:

Herr Carsten Rössel

course of study:

Media and Acoustical Engineering

seminar group:

MG19wC-B

first examiner:

Hübelt, Jörn, Prof. Dr.-Ing.

second examiner:

Schott, Max, Dipl. - Ing. (FH)

submission:

Mittweida, 30.06.2023

Bibliografische Angaben

Rössel, Carsten:

Validierung und Weiterentwicklung eines Innengeräuschprognosemodells für Schienenfahrzeuge

Validation and further development of an interior noise prediction model for rail vehicles

103 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2023

Abstract

Die Geräusche im Fahrgastraum von Schienenfahrzeugen sind ein wesentlicher Faktor für den Komfort der Fahrgäste. Da die messtechnische Bestimmung solcher Geräusche während des Entwicklungsprozesses meist nicht möglich ist, sind Prognosemethoden notwendig, um die Einhaltung vorgegebener Zielwerte im Laufe des Entwicklungsprozesses sicherzustellen. In der vorliegenden Arbeit wird ein bestehendes Verfahren für die Prognose von Schalldruckpegeln im Fahrgastraum von Straßenbahnen während des Fahrzeugstillstandes erweitert und mithilfe von Messungen an einem realen Fahrzeug validiert. Aus den Messungen werden neben Referenzwerten zur Validierung der Prognose auch Eingangsdaten für das Prognosemodell gesammelt. Zusätzlich zur Einordnung der Genauigkeit des Verfahrens erfolgt auch eine Charakterisierung des Schallfelds im Fahrgastraum.

Sperrvermerk

Der Anhang der vorliegenden Bachelorarbeit mit dem Titel:

***Validierung und Weiterentwicklung eines Innengeräuschprognosemodells für
Schienenfahrzeuge***

beinhaltet interne und vertrauliche Informationen des Unternehmens:

HÖRMANN Vehicle Engineering GmbH

Aus diesem Grund ist eine Einsicht in den Anhang dieser Arbeit nicht gestattet. Ausgenommen davon sind die betreuenden Dozenten sowie die befugten Mitglieder der Hochschule. Sollte die Bachelorarbeit Dritten zugänglich gemacht werden, bitte ich darum den Anhang vollständig zu entfernen.

Ort, Datum

Unterschrift des Autors/der Autorin

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Formelverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen.....	2
2.1 Nachhallzeit	2
2.2 Schallausbreitung in Langräumen	3
2.3 Bestimmung abgestrahlter Schalleistung im Nahfeld.....	4
2.4 Statistischen Energieanalyse	5
2.4.1 Grundlagen	5
2.4.2 Validität des Koppelverlustfaktor in langen Räumen.....	7
2.5 Stand der Technik Innengeräuschprognoseverfahren	7
3 Aufbau des Fahrzeugs	11
3.1 Layout des Fahrgastraums.....	11
3.2 Klimatisierung	12
4 Prognosemodell	14
4.1 Ausgangssituation.....	14
4.2 Eingangsdaten	14
4.2.1 Geometrische Eingangsdaten	14
4.2.2 Akustische Daten	16
4.3 Funktionsweise	17
4.3.1 Berechnung weiterer Eingangsdaten.....	17
4.3.2 Berechnung durch die SEA	18
4.4 Anwendung auf reales Fahrzeug.....	19
4.4.1 Schalldruckpegelabfall	20
4.4.2 Schalldruckpegelverteilung im FGR	20
5 Messung	23
5.1 Schalldruckpegel im Fahrgastraum	23
5.1.1 Messanforderungen	23

5.1.2	Messaufbau	25
5.1.3	Fremdschalldruckpegel	26
5.1.4	Datenauswertung	27
5.1.5	Ergebnisse	28
5.2	Longitudinaler Schalldruckpegelabfall	31
5.2.1	Messaufbau	31
5.2.2	Datenauswertung	32
5.2.3	Ergebnisse	33
5.3	Nachhallzeit	37
5.3.1	Messanforderungen	37
5.3.2	Messaufbau	38
5.3.3	Datenauswertung	39
5.3.4	Ergebnisse	40
5.4	Schalleistungspegel der Luftauslässe	43
5.4.1	Messaufbau	44
5.4.2	Datenauswertung	46
5.4.3	Ergebnisse	46
6	Auswertung	48
6.1	Diffusität des Schallfeldes im Fahrgastraum	48
6.1.1	Variation des Schalldruckpegels	48
6.1.2	Variation der Nachhallzeit	49
6.2	Vergleich Prognosemodelle mit Messung	50
6.3	Verbesserungsansätze	53
6.3.1	Anpassung des Schalldruckpegelabfalls	53
6.3.2	Aufbau eines Referenzfahrzeugs	53
6.3.3	Querschnittsflächenänderung des FGR im Modell	53
7	Fazit	55
	Literaturverzeichnis	IX
	Anhang A – Messprotokoll	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Anhang B – Auswertungsskript	Fehler! Textmarke nicht definiert.
	Anhang C – Prognoseskript	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Eigenständigkeitserklärung IX

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Vollständige Bezeichnung
A	äquivalente Absorptionsfläche
A_0	Bezugsschallabsorptionsfläche (4 m ²)
c_0	Schallgeschwindigkeit
E_i	Schallenergie im Subsystem
f_s	Schröder-Eck-Frequenz
FGR	Fahrgastraum
FR	Fahrerraum
HVE	HÖRMANN Vehicle Engineering
i	Laufindex für Segmente / Subsysteme (z.B.: V_i ... Volumen im Segment i)
l_m	mittlere freie Weglänge
l_x, l_y, l_z	Maße eines quaderförmigen Raumes
L_p	Schalldruckpegel
$\overline{L_p}$	mittlerer Schalldruckpegel
L_{pAeq}	äquivalenter Dauerschalldruckpegel
ΔL_p	Schalldruckpegeldifferenz
$\widehat{\Delta L_p}$	Schalldruckpegelabfall aus der Regression
L_W	Schalleistung
N	Anzahl der SEA-Subsysteme
P	Schalleistung
P_{in}	Eingehende Schalleistung
P_{ij}	Schalleistungsverlust innerhalb eines SEA-Subsystems
P_{ij}	Schalleistungsverlust bei der Verbindung zwischen zwei SEA-Subsystemen
R^2	Bestimmtheitsmaß
S	Fläche
S_G	Oberfläche aller Raumbegrenzungsflächen

S_0	Bezugshüllfläche
S_{2D}	Querschnittsfläche
SQR	Residuenquadratsumme
T	Nachhallzeit
U	Umfang
V	Volumen
α	Absorptionsgrad
$\bar{\alpha}$	mittlerer Absorptionsgrad
Δ	Schalldruckpegelabfall pro m
η	Verlustfaktor in der SEA
η_{ii}	interner Verlustfaktor
η_{ij}	Koppelverlustfaktor
ρ_0	Dichte der Luft
τ	Transmissionsgrad
ω	Kreisfrequenz

Formelverzeichnis

(2.1) Nachhallzeitgleichung nach Sabine.....	2
(2.2) äquivalente Absorptionsfläche	2
(2.3) mittlere freie Weglänge	2
(2.4) angepasste mittlere freie Weglänge für Langräume	3
(2.5) angepasste Nachhallzeitgleichung für Langräume	3
(2.6) Schalldruckpegelabfall	3
(2.7) angepasster Schalldruckpegelabfall.....	4
(2.8) Schalleistungspegel auf einer Hüllfläche	4
(2.9) Statistische Energieanalyse SEA	5
(2.10) interner Leistungsverlust der SEA	6
(2.11) Leistungsverlust bei Kopplung SEA	6
(2.12) Interner Verlustfaktor.....	6
(2.13) mittlerer Absorptionsgrad	6
(2.14) Koppelverlustfaktor	7
(2.15) Koppelverlustfaktor für Langräumen.....	7
(4.1) Schalldruckpegel aus Schallenergie im Raum.....	19
(4.2) Schröder-Eck-Frequenz	19
(4.3) Schalldruckpegel aus Schalleistung im Raum	21
(5.1) Pegelmittelung	24
(5.2) Bestimmtheitsmaß	32
(5.3) Residuenquadratsumme	32
(5.4) Zusammenhang zwischen Schalldruckpegelabfall und Nachhallzeit	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des Versuchsfahrzeugs	11
Abbildung 2: Layout des Fahrgastraums 1 - Tür zum FRR, 2 - Sitzgruppe bestehend aus vier Einzelsitzen, 3 - Tür mit Windfang seitlich am Einstiegsbereich, 4 - Multifunktionsbereich mit Klappsitzen (nur Sitze in Richtung Fahrzeugmittellinie), 5 - Übergang mit Faltenbalg	12
Abbildung 3: Darstellung des Klimatisierungssystems.....	13
Abbildung 4: Schalldruckpegelabfall des SEA-Modells in Oktaven.....	20
Abbildung 5: Gesamtschalldruckpegelverteilung des SEA-Modells (Berechnung in Oktavpegeln) im FGR im Vergleich zum Schalldruckpegel ohne SEA-Kopplung.....	22
Abbildung 6: Oktavschalldruckpegelverteilung des SEA-Modells im FGR	22
Abbildung 7 Messpositionen Schalldruckpegelmessung im Fahrgastraum.....	26
Abbildung 8: Schalldruckpegelverteilung im Fahrgastraum bei eingeschaltetem A - Deckenkanalsystem, B - Bodenkanalsystem ; Gesamtpegel aus Oktaven 63 bis 4000 Hz	30
Abbildung 9: Messaufbau Schalldruckpegelabfall.....	31
Abbildung 10: Gesamtschalldruckpegelabfall im FGR	34
Abbildung 11: Schalldruckpegelabfall im FGR in Oktavbänder von 125 bis 4000 Hz...35	
Abbildung 12: Schalldruckpegelabfall in Terzen (blau) und dazugehöriges Bestimmtheitsmaß (orange)	36
Abbildung 13: Messaufbau Nachhallzeit.....	39
Abbildung 14: Nachhallzeit im FGR.....	41
Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Nachhallzeit in Terzen von 50 bis 5000 Hz ($R^2 = 0,72$ Regression HVE).....	42
Abbildung 16: Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Nachhallzeit in Oktaven von 63 bis 4000 Hz ($R^2 = 0,92$).....	43
Abbildung 17: Messpositionen Deckenkanalsystem (Ansicht von unten).....	44
Abbildung 18: Messpositionen Bodenkanalsystem.....	44
Abbildung 19: Querschnitt des Luftauslasses im Sitzbereich.....	45
Abbildung 20: Schalleistungspegel in Terzen an Luftauslässen des Bodenkanalsystems	46
Abbildung 21: Schalleistungspegel im Deckenkanal	47
Abbildung 22: Maximale Pegeldifferenz in einzelnen Segmenten des FGR.....	49
Abbildung 23: Standardabweichung der Nachhallzeit in einzelnen Terzen.....	50
Abbildung 24: Schalldruckpegeldifferenz zwischen Messung und Prognose; Gesamtschalldruckpegel aus den Oktaven 500 bis 4000 Hz.....	51
Abbildung 25: Pegeldifferenz zwischen Prognose und Messung in Oktavbändern	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechnung weitere Daten für die SEA aus Eingangsdaten der Prognose .17	
Tabelle 2: Übersicht über ausgegebene Daten des Programms zur Auswertung des Schalldruckpegels im Fahrgastraum	28
Tabelle 3: Mindestanzahl der Messpunkte und Messungen bei der Nachhallzeitmessung nach DIN EN ISO 3382-2 (DIN EN ISO 3382-2)	37
Tabelle 4: Zusammenfassung der Curve-Fitting-Ergebnisse und Ergebnis von Sun (Sun et al., 2022)	43
Tabelle 5: Vergleich Schalldruckpegelabfall aus Messung und Prognose	52

1 Einleitung

Der Schalldruckpegel, der sich im Innenraum von Straßenbahnen während des Betriebs einstellt, ist ein wesentlicher Faktor für den Komfort der Fahrgäste. Da für Fahrzeuge dieser Art nur vereinzelt Prototypen gebaut werden, kann diese Größe nicht messtechnisch im Entwicklungsprozess bestimmt werden. „HÖRMANN Vehicle Engineering“ HVE entwickelt daher ein Verfahren, um den Schalldruckpegel im Fahrgastraum FGR während der Entwicklung prognostizieren zu können. Das Prognosemodell soll dabei mit möglichst wenig Aufwand an Änderungen des Fahrzeugs im Entwicklungsprozess angepasst werden können. Dadurch, dass die Länge des FGR meist die Breite und Höhe des Raums deutlich übersteigt ist es nicht möglich die Schallausbreitung in diesem Raum mit den klassischen Formeln für das diffuse Schallfeld zu beschreiben (Kang, 1996b). Aus diesem Grund wurde in einer vorangegangenen Arbeit eine Methode, basierend auf der Statistischen Energieanalyse SEA, gesucht um die Schalldruckpegelverteilung im Innenraum von Straßenbahnen zu beschreiben und diese in das Prognoseverfahren integriert (Rössel, 2022). Aufgrund starker Abweichungen zu ersten Validierungsversuchen soll diese Methode in der hier vorliegenden Arbeit erweitert werden. Ziel dieser Arbeit ist es das verbesserte Modell mit Messungen zu validieren und die Anwendbarkeit in der Praxis zu prüfen. Aufgrund technischer und organisatorischer Limitationen ist das Prognosemodell aktuell nur für den Schalldruckpegel während des Fahrzeugstillstands implementiert, weshalb sich auch die Messungen zur Validierung auf diesen Zustand beschränken. Bei den Messungen werden neben dem Schalldruckpegeln im Innenraum auch andere Parameter bestimmt, die als Eingangsdaten für das Prognosemodell dienen sollen, um mögliche Abweichungen durch Annahmen zu reduzieren. Zusätzlich soll das Schallfeld im Innenraum aufgrund der Messung charakterisiert werden, um die gegebenen Rahmenbedingungen zu prüfen und mit den Voraussetzungen der Prognose abzugleichen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit T ist eine raumakustische Größe und gibt die Zeit an, in der der stationäre Schalldruckpegel im Raum nach dem sprunghaften Abschalten der Schallquelle um 60 dB abfällt. Die Messung der Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen ist in der DIN EN ISO 3382-2 (DIN EN ISO 3382-2) genormt. Anforderungen an die Nachhallzeit sind abhängig von der Nutzungsart des Raumes in der DIN EN ISO 18041 (DIN EN ISO 18041) festgelegt, um die Hörsamkeit in Räumen zu gewährleisten. Da die Nachhallzeit in dieser Arbeit nur als Parameter für Berechnungen dient und keine Bewertung der Hörsamkeit stattfindet, wird im Folgenden kein Bezug zur DIN EN ISO 18041 hergestellt. Die Berechnung der Nachhallzeit erfolgt meist über die Nachhallzeitgleichung von Sabine (2.1).

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{A} \quad \begin{array}{c|c|c} T & V & A \\ \hline \text{s} & \text{m}^3 & \text{m}^2 \end{array} \quad (2.1)$$

In der Gleichung (2.1) entspricht V dem Volumen des Raumes. Die äquivalente Absorptionsfläche A errechnet sich mit Gleichung (2.2) aus den einzelnen Flächen S des Raumes und deren Absorptionsgrad α . Der Faktor 0,163 in Gleichung (2.1) bezieht sich auf eine Schallgeschwindigkeit von 340 m/s wodurch die Gleichung (2.1) auf eine Temperatur von ca. 14 °C ausgelegt ist.

$$A = \sum_i S_i \cdot \alpha_i \quad (2.2)$$

Die Nachhallzeitgleichung nach Sabine (2.1) beruht auf der Grundlage der mittleren freien Weglänge l_m . Diese beschreibt die Distanz, die Schallwellen in einem Raum durchschnittlich zurücklegen, bevor sie auf eine Begrenzungsfläche treffen. Berechnet werden kann sie in Bezug auf die Summe aller Raumbegrenzungsflächen S_G über Gleichung (2.3). Zu beachten ist, dass die Gleichung nur für Quader Räume, deren längste und kürzeste Raumkannte maximal ein Verhältnis von 1:3 zueinander aufweisen, gilt.

$$l_m = \frac{4V}{S_G} \quad (2.3)$$

In Räumen, bei denen eine Raumdimension deutlich länger ist als die anderen beiden Seiten ist, kann die Nachhallzeitgleichung nach Sabine nur bei Hohe Streuungskoeffizienten plausible Ergebnisse liefern. Bei niedrigen Streuungskoeffizienten unterschätzt sie die Nachhallzeit im Vergleich zu Ray-Tracing-Simulationen um einen Faktor von bis zu 2,5 (Sun et al., 2022). In

solchen Räumen ist nach Picaut (Picaut et al., 1999) die Gleichung der mittleren freien Weglänge (2.4) besser geeignet.

$$l_m = \sqrt{S_G/4\pi} \quad (2.4)$$

Durch die angepasste Gleichung der mittleren freien Weglänge ergibt sich die angepasste Gleichung für die Nachhallzeit (2.5) für Räume dieser Art. In dieser Gleichung werden statt der äquivalente Absorptionsfläche A der gemittelte Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ und die gesamte Oberfläche des Raumes S (im leeren Raum gilt $S = S_G$) verwendet.

$$T = \frac{0.163}{4 \bar{\alpha}} \sqrt{\frac{S}{4\pi}} \quad (2.5)$$

Die Gleichung (2.5) erzielt bei niedrigen Streuungskoeffizienten genauere Ergebnisse als die Nachhallzeitgleichung nach Sabine. Bei hohen Streuungskoeffizienten ist sie diesen jedoch auch langen Räumen unterlegen (Sun et al., 2022).

2.2 Schallausbreitung in Langräumen

In Räumen, in denen eine Raumdimension die anderen beiden deutlich überschreitet, können klassische Raumakustische Formeln, die auf dem diffusen Schallfeld basieren nicht angewendet werden (Kang, 1996b). Zur Beschreibung der Ausbreitung eines stationären Schalldruckpegels über die Länge des Langraums existieren mehrere Modelle und Gleichungen. Diese beziehen sich meist auf diffuse oder geometrische Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen. (Kang, 1996a). Dabei werden von Kang (Kang, 1996a) vor allem Methoden basierend auf geometrischen Reflexionen als praktisch eingeordnet. Kuttruff (Kuttruff, 1989) beschrieb die Schallausbreitung in Räumen mit teilweise diffus reflektierenden Wänden und zeigte, dass der der Schalldruck mit wachsender Distanz zur Quelle langsamer abfällt.

Redmore (Redmore, 1982) entwickelte die empirische Formel (2.6) für in der der Schalldruckpegelabfall über die Länge Δ konstant in dB/m angegeben wird. Die zugrunde liegenden Daten beschränken sich dabei auf Korridore mit einer Länge von ca. 18 bis 38 m, eine maximale Breite von 3,2m und einer maximalen Höhe von 2,8 m. Die Anwendbarkeit ist aber möglicherweise auf die genannten Raumdimensionen beschränkt. (Kang, 1996a)

$$\Delta = 1.7 \frac{U \cdot \bar{\alpha}}{S_{2D}} \quad (2.6)$$

Die Gleichung (2.6) nutzt den Querschnitt $S_{2D} = l_y \cdot l_z$, aus Breite l_y und Höhe l_z des Korridors und den Umfang $U = 2(l_y + l_z)$.

Die Gleichung (2.6) wurde später angepasst und der Schalldruckpegelabfall über Gleichung (2.7) beschrieben (Sun et al., 2022).

$$\Delta = \frac{10 \cdot U \cdot \bar{\alpha}}{\ln(10) \cdot \pi \cdot S_{2D}} = 1.38 \frac{U \cdot \bar{\alpha}}{S_{2D}} \quad (2.7)$$

Auf Grundlage dieser Gleichung konnten gute Ergebnisse für den Schalldruckpegelabfall im FGR von Schienenfahrzeugen erreicht werden.

2.3 Bestimmung abgestrahlter Schalleistung im Nahfeld

Die Bestimmung der Schalleistung von Geräuschquellen erfolgt in der Regel über Verfahren aus der Normenreihe DIN EN ISO 3740 (DIN EN ISO 3740) bzw. DIN EN ISO 9614 (DIN EN ISO 9614). Die DIN EN ISO 3740 beschreibt Verfahren zu Bestimmung des Schalleistungspegels aufgrund von Messungen des Schalldruckpegels an der Geräuschquelle. Die DIN EN ISO 9614 hingegen beschreibt die Messung des Schalleistungspegel durch die Messung der Schallintensität an der Schallquelle.

Eines der Verfahren zur Bestimmung der Schalleistung ist das Hüllflächenverfahren. Bei diesem wird die Schallquelle im Freifeld platziert und auf einer genormten Hüllfläche, die die Schallquelle umgibt, der Schalldruckpegel bestimmt. Die Messung des Schalldruckpegels erfolgt an vielen Punkten auf der Hüllfläche, um den mittleren Schalldruckpegel auf dieser zu bilden. Alternativ kann die Messung des Schalleistungspegels erfolgen, wenn der Schalldruck auf einer von der Schallschnelle senkrecht durchsetzten Fläche gemessen wird. Der Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Schalleistung ergibt sich nach Gleichung (2.8). (Schirmer & Hübelt, 2022)

$$L_W = \bar{L}_p - 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (2.8)$$

Zur genaueren Analyse von Geräuschquellen bzw. zur Lokalisation dominierender Geräuschquellen an Maschinen gibt die DIN EN ISO 11688-2 (DIN EN ISO 11688-1) einige Verfahren vor. Eines davon ist die Nahfeldmessung, bei der der Schalldruckpegel in sehr geringem Abstand (2 bis 10 cm) zur Quelle gemessen wird. Hieraus kann dann der in die Ferne abgestrahlte Schalleistungspegel bestimmt werden. Auch wenn die Größe der Teilfläche berücksichtigt wird, gilt dieses Verfahren nur als grobe Abschätzung der in das Fernfeld abgestrahlten Schalleistung. (Schirmer & Hübelt, 2022)

2.4 Statistischen Energieanalyse

2.4.1 Grundlagen

Die Statistische Energieanalyse SEA ist ein Ansatz zur Lösung von akustischen Problemen in komplexen Systemen. Sie kann für die Beschreibung der Schallausbreitung in Luftvolumen und Festkörpern wie Platten oder Balken verwendet werden, sowie die Interaktion zwischen diesen Systemen abbilden. Anwendung findet sie bei der Beschreibung von Schalltransmission in Gebäuden, Schiffen, Flugzeugen, Autos und Schienenfahrzeugen.

Um ein System mit der SEA zu beschreiben, wird es in miteinander verbundene Subsysteme unterteilt. Einzelne Elemente wie Platten, Balken, oder Luftvolumen des Gesamtsystems bilden dabei jeweils ein eigenes Subsystem. In den meisten strukturellen Elementen wie beispielsweise Platten können mehrere Wellenarten vertreten sein, die jeweils eigene Modengruppen mit unterschiedlichen Eigenschaften enthalten. Für jede Wellenart, wie Biege- oder Dehnwellen, muss ein einzelnes Subsystem definiert werden. (Craik, 2003) Im hier vorliegenden Anwendungsfall werden nur Luftvolumen beschrieben, die durch jeweils ein Subsystem dargestellt werden. Um einzelne Elemente des Systems in Teilelemente mit jeweils eigenen Subsystemen zu unterteilen, müssen diese schwach gekoppelt sein. Eine schwache Kopplung ist dann gegeben, wenn das lokale, modale Verhalten eines Subsystems nicht zu kohärentem Verhalten im gekoppelten Subsystem führt. Also dann, wenn die Energie nicht ungehindert vom einen ins andere Subsystem fließen kann. Diese Bedingung kann mit dem Verhältnis zwischen dem internen Verlustfaktor η_i und dem Koppelverlustfaktor η_{ij} zwischen den Subsystemen beschrieben werden. Die Bedingung gilt als erfüllt, wenn $\eta_i / \eta_{ij} \gg 1$. Diese Bedingung wird in der Regel nicht erfüllt, wenn verbundene Luftvolumen betrachtet werden. Fahy erläutert (Fahy, 2004), dass im Falle verbundener Luftvolumen die Diffusität des Schallfeldes, das ausschlaggebende Kriterium für die Genauigkeit der statistischen Energieanalyse ist und somit die Forderung nach einer schwachen Kopplung vernachlässigt werden kann. Dadurch ist es möglich, Räume mit komplexen Geometrien in Subsysteme zu unterteilen und ihr Verhalten mithilfe der SEA zu beschreiben.

$$\begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \eta_{1n} & -\eta_{21} & \dots & -\eta_{N1} \\ -\eta_{12} & \sum_{n=1}^N \eta_{2n} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ -\eta_{1N} & & & \sum_{n=1}^N \eta_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_{in,1}}{\omega} \\ \frac{P_{in,2}}{\omega} \\ \vdots \\ \frac{P_{in,N}}{\omega} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Die Berechnung eines SEA-Modells mit N Subsystemen erfolgt auf Grundlage der Gleichung (2.9). Dabei sind η_{ii} die internen Verlustfaktoren des Subsystems i und η_{ij} der Koppelverlustfaktor für die Kopplung der Subsysteme i und j . Im Falle von Korridoren würden durch die Aneinanderreihung der Subsysteme die Koppelverlustfaktoren η_{ij} nur für $\eta_{n, n\pm 1}$ größer als Null sein, da die anderen Subsysteme nicht direkt miteinander verbunden sind. Die Energie innerhalb eines Subsystems entspricht E . P_{in} ist dabei die Leistung, die einem Subsystem zugeführt wird.

Der Leistungsverlust innerhalb eines Subsystems ergibt sich dann durch Gleichung (2.10).

$$P_{ii} = \omega \cdot \eta_{ii} \cdot E_i \quad (2.10)$$

Der Leistungsverlust bei der Verbindung zwischen zwei Subsystemen ist gegeben durch Gleichung (2.11).

$$P_{ij} = \omega \cdot \eta_{ij} \cdot E_i \quad (2.11)$$

Die Verlustfaktoren η sind abhängig von den zugehörigen Subsystemen und variieren je nach Anwendungsfall und Typ des Subsystems. Der interne Verlust in einem Luftvolumen entsteht hauptsächlich durch Energie, die in Wärme umgewandelt wird oder in nicht im Modell beschriebene Bereiche übergeht und wird über Gleichung (2.12) berechnet. (Craik, 2003; Jang, 2017)

$$\eta_{ii} = \frac{c_0 S_G \bar{\alpha}}{4\omega V_i} \quad (2.12)$$

Der gemittelten Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ wird nach Gleichung (2.13) berechnet.

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S_G} \sum_i S_i \alpha_i \quad (2.13)$$

Die Koppelverlustfaktoren unterscheiden sich je nach Art des abgebildeten Subsystems und dem spezifischen Anwendungsfall, sodass die genaue Bestimmung der Koppelverlustfaktoren ausschlaggebend für die Genauigkeit der SEA ist. Daher werden diese oft durch Messungen oder separate Simulationen bestimmt, wenn sie sich nicht oder nur ungenau analytisch beschreiben lassen. (Sarradj, 2004)

Der Koppelverlustfaktor η_{ij} für die Verbindung zwischen den Subsystemen i und j und kann über die Gleichung (2.14) berechnet werden, wenn der Transmissionsfaktor τ bekannt ist. Für Subsysteme innerhalb eines Luftvolumens wird $\tau = 1$ angenommen. (Craik, 2003)

$$\eta_{ij} = \frac{c_0 S_{ij}}{4\omega V_i} \tau \quad (2.14)$$

2.4.2 Validität des Koppelverlustfaktor in langen Räumen

Zur Beschreibung des akustischen Verhaltens in langen Räumen eignet sich der Koppelverlustfaktor nach Gleichung (2.14) nur bedingt. Wird beispielsweise versucht den Schalldruckpegelabfall zu beschreiben, der entsteht, wenn an einem Ende des Korridors eine Schallquelle platziert wird, ist das Ergebnis von der gewählten Anzahl der Subsysteme abhängig. Sun (Sun et al., 2022) hat dies am Beispiel eines Raumes dargestellt, indem die Länge und Anzahl der Subsysteme variiert wurden. Die Länge des Raumes änderte sich dabei nicht. Mit sinkender Länge und steigender Anzahl der Subsysteme wurde die Minderung des Schalldruckpegels über die Länge immer höher. Betrachtet man Subsysteme in den Dimensionen, in denen sie im FGR von Schienenfahrzeugen üblicherweise gewählt werden (ähnlich denen der Korridore) mit einer Länge von 2 bis 4 m, wird der Schalldruckpegelabfall überschätzt und dadurch der Schalldruckpegel in den einzelnen Subsystemen unterschätzt. Wird die Länge der gewählten Subsysteme erhöht, kehrt sich dieser Effekt um, sodass nach der Überschreitung einer unbekanntenen, optimalen Länge der Schalldruckpegelabfall unterschätzt wird. Eine Unterschätzung des Schalldruckpegelabfalls ist zum Beispiel in Subsystemen mit einer Länge von bis zu 7,6m bei Forssén (Forssén et al., 2012) aufgetreten und vermutlich auf diesen Effekt zurück zu führen.

Um diesem Problem zu entgehen, leitet Craik (Craik, 2003) aus einem analytischen Korridormodell einen modifizierten Koppelverlustfaktor ab. In der Annahme, dass sich alle Subsysteme in Längen und Absorption gleichen, kann der Koppelverlustfaktor, unabhängig von der Anzahl und Länge l_x der Subsysteme mit Gleichung (2.15) beschrieben werden.

$$\eta_{ij} = \frac{100 c_0 A}{(\ln 10)^2 8 \pi S_{2D} l_x^3 \Delta^2} \quad (2.15)$$

Der Schalldruckpegelabfall Δ entspricht dem aus Abschnitt 2.2.

2.5 Stand der Technik Innengeräuschprognoseverfahren

Viele Schienenfahrzeughersteller oder Ingenieurdienstleister nutzen Verfahren, um den Schalldruckpegel im Inneren von Fahrzeugen vor dem Bau von Prototypen zu prognostizieren. Diese werden unter anderem dazu verwendet Designentscheidungen (verwendete

Materialien, Form, Layout) zu treffen und das Einhalten vorgegebener Grenzwerte sicherzustellen. Die Prognoseverfahren umfassen dabei in der Regel die Schallausbreitung von Schallquellen außerhalb des FGR, die Transmission des Schalls in den FGR und die Schallausbreitung im FGR. Um die Anwendbarkeit im Beschriebenen Einsatzgebiet zu gewährleisten, ist es nötig, bei geringer Verfügbarkeit von Eingangsdaten mit wenig Erstellungs- und Anpassungsaufwand, Prognosemodelle erstellen und an die Fahrzeugentwicklung anpassen zu können. (Frid et al., 2012; Gabet et al., 2009) Basierend auf diesen Anforderungen wurden über die letzten Jahrzehnte diverse Simulationsverfahren auf ihre Eignung geprüft, angewendet, validiert und an den Anwendungszweck angepasst. Oft wurden dabei Hybridverfahren verwendet, um beispielsweise Limitationen im Frequenzbereich zu umgehen oder um Körper- und Luftschallausbreitung über verschiedene Simulationsmethoden zu beschreiben (Gabet et al., 2009; Zhao et al., 2015; Zheng et al., 2019). Die Abweichungen zwischen diesen Verfahren und Messwerten sind oft unter 3 dB in den einzelnen Terzbändern und zwischen 1 bis 3 dB für Gesamtschalldruckpegel. (Dai et al., 2019; Gabet et al., 2009; Kohrs et al., 2021; Li et al., 2021; Zhao et al., 2015; Zheng et al., 2019)

Zur Beschreibung des FGR werden hauptsächlich die SEA oder Ray-Tracing-Verfahren verwendet. In den meisten Modellen wird die SEA im Frequenzbereich über 500 Hz verwendet, um den Schalldruckpegel im Innenraum zu simulieren. (Atmaja et al., 2018; Kohrs et al., 2021) (Li et al., 2021). Diese unter Grenze ist dabei durch die Forderung der SEA nach einer ausreichenden Modendichte gesetzt und kann je nach Größe der festgelegten Subsysteme variieren. Die SEA berechnet einen räumlichen Mittelwert der Energie im Subsystem. Abgesehen von der Gesamtenergie können mit der SEA auch Energieflüsse analysiert werden. Zudem ist der Rechenaufwand der SEA sehr gering. (Shift2Rail – FINE1 – Deliverable 7.1, 2017) Um den Frequenzbereich unter 500 Hz abzudecken, werden zusätzlich zur SEA oft FE-Analysen durchgeführt. Diese sind aber aufgrund ihres Rechenaufwandes auf die Anwendung in den tiefen Frequenzbereichen beschränkt. (Lalor & Prietsch, 2007) Ray- bzw. Beam-Tracing wird beispielsweise in der Prognosesoftware OSCAR von Alstom (Gabet et al., 2009) verwendet. Bei diesem Simulationsverfahren werden Schallwellen als einzelne Strahlen simuliert und in ihrer Ausbreitung durch den Raum verfolgt. Treffen die Strahlen auf ein Raumbegrenzungsfläche wird ein Teil von ihnen absorbiert und der andere Teil reflektiert. (Jang, 2017) Dadurch, dass bekannt ist, auf welchen Flächen einzelne Strahlen auftreffen, ist es mit dieser Methode möglich einzelnen Flächen verschiedene Absorptionsgrade zuzuweisen. Dadurch können zum Beispiel die Auswirkungen von Änderungen im Absorptionsverhalten einzelner Elemente sehr einfach untersucht werden (Gabet et al., 2009). Weitere Vorteile des Ray-Tracing liegen gegenüber der SEA vor allem in der Möglichkeit den Raum geometrisch genauer abzubilden und das Direktschallfeld einzelner Quellen zu beschreiben. Zusätzlich entsprechen die Ergebnisse keinem räumlichen Mittelwert, sondern können für bestimmte Messpunkte errechnet werden. Aus diesem Grund wird das Verfahren

auch an Stelle von Messungen oder in Kombination mit Messungen zur Verifizierung der Ergebnisse anderer Simulationsverfahren, wie z.B. der SEA verwendet. (Forssén et al., 2012; Sun et al., 2022) Gabet führte sowohl Messungen während der Fahrt (konstante Geschwindigkeit in einem Tunnel) als auch Messungen unter einem einzelnen Klimagerät als Schallquelle durch, um die Ergebnisse aus der Ray-Tracing Simulation zu validieren. Die Terzschalldruckpegel der Simulation und Messung während der Fahrt unterschieden sich dabei im Mittel um ca. 1 dB mit größeren Abweichungen unter 200 Hz. Im Vergleich zwischen Messung und Ray-Tracing-Simulation mit nur dem Klimagerät als Schallquelle wurden keine Abweichungen im Gesamtschalldruckpegel und eine mittlere Abweichung von ca. 3 dB in den Terzschalldruckpegeln festgestellt. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist der Rechenaufwand. Damit dieser nicht zu groß wird, können nur wenige Reflexionen und eine begrenzte Anzahl an Strahlen betrachtet werden. (Gabet et al., 2009; Shift2Rail – FINE1 – Deliverable 7.1, 2017) Um die Genauigkeit von Modellen zur Schallausbreitung im FGR abzuschätzen, wird häufig die Schalldruckpegelabnahme von einer Quelle über die Längsachse des Fahrzeugs simuliert und mit Messungen verglichen. Forssén (Forssén et al., 2012) betrachtete mit dieser Methode ein SEA-Modell, dessen Subsysteme die den Abteilen eines Regionalzugs glichen, im Vergleich zu einer Ray-Tracing-Simulation und Messungen am Modellnachbau des Fahrzeugs. Um den Schalldruckpegelabfall innerhalb der bis zu 7,6 m langen Abteile des Fahrzeugs abzubilden (der Schalldruckpegel innerhalb von Subsystemen wird durch die SEA als konstant ausgegeben), werden aus der Literatur bekannte Formeln für den Schalldruckpegelabfall in Korridoren benutzt. Das SEA-Modell von Forssén zeigt eine leichte Unterschätzung der Schalldruckpegelabnahme, wohingegen die Ray-Tracing-Simulation eine leicht verbesserte Übereinstimmung mit den Messwerten zeigt. (Forssén et al., 2012) Craik (Craik, 2003) publizierte einen angepassten Verlustfaktor für die SEA, welcher den Koppelverlust der SEA zwischen zwei Subsysteme „zwingt“, der aus analytischen Formeln bekannten Schalldruckpegelabnahme in Korridoren zu folgen. Mit diesem angepassten Verlustfaktor und weiteren Anpassungen, u.a. bei der Bestimmung der Absorptionsfläche im Fahrzeug kann Sun (Sun et al., 2022) eine gute Übereinstimmung der Schalldruckpegelabnahme eines SEA-Modells mit realen Messungen erreichen. Ein SEA-Modell, welches mithilfe der Software BRAINS erstellt wurde, zeigte in den Oktavbändern über 250 Hz eine exzellente Übereinstimmung zu Messungen der Schalldruckpegelabnahme. Die Abweichung der vorhergesagten Schalldruckpegel zwischen Berechnungen durch BRAINS und Ray-Tracing-Simulationen, welche zum Vergleich verwendet wurden, liegt bei ca. 1 dB. (Kohrs et al., 2021) Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch Gabet (Gabet et al., 2009). Hier konnte im Gesamtschalldruckpegel kein Unterschied zwischen der SEA und der Ray-Tracing Simulation festgestellt werden. In der Betrachtung der Terzschalldruckpegel kommt Gabet zu dem Ergebnis, das die Ergebnisse der Ray-Tracing Simulation etwas näher an den Messergebnissen liegen als an den Ergebnissen der SEA. Leider sind in diesem Fall keine Messreihen verfügbar, in denen beide Simulationsverfahren direkt mit einer Messung verglichen werden können, um das genauere der beiden zu bestimmen.

Für das hier beschriebene Prognosemodell eignet sich die SEA, da die Implementierung und Integration in die Gesamtprognose deutlich weniger aufwändig sind als die Implementierung von Ray-Tracing-Algorithmen. Zusätzlich ist die Anbindung an das Gesamtmodell bzw. an andere Simulationsverfahren, welche zur Beschreibung des Außengeräuschs und der Schalltransmission verwendet werden, umfangreicher in der Literatur beschrieben. Die Vorteile, wie die Bestimmung von Werten an konkreten Positionen im Fahrzeug, sind für den geplanten Anwendungsfall der Prognose nicht relevant. Da unklar ist welche Messpositionen bei der Typprüfung einzelner Fahrzeuge gewählt werden, wird der räumlich gemittelte Erwartungswert der SEA hier bevorzugt. Kennwerte für die Schallabsorption einzelner Materialien sind zudem selten vorhanden, weshalb auch die inhomogene Verteilung von Absorptionsflächen in der Anwendung keinen Mehrwert bieten würde.

3 Aufbau des Fahrzeugs

Zur Generierung von Messwerten aus einem realen Fahrzeug, welche im späteren Verlauf mit den Prognosewerten verglichen werden, dient ein Stadtbahnfahrzeug aus einer aktuellen Produktionsserie. Das Fahrzeug ist ein zweiteiliges Hochflurfahrzeug mit einer Gesamtlänge von 28 m. Die beiden Teile des Fahrzeugs sind fast vollständig identisch, sodass die Wagenteile von außen betrachtet spiegelsymmetrisch zueinander aufgebaut sind. Das Fahrzeug verfügt an beiden Wagenteilen über einen Fahrerraum FR und ist daher nicht an eine Fahrtrichtung gebunden. Eine qualitative Darstellung des Fahrzeugs befindet sich in Abbildung 1.

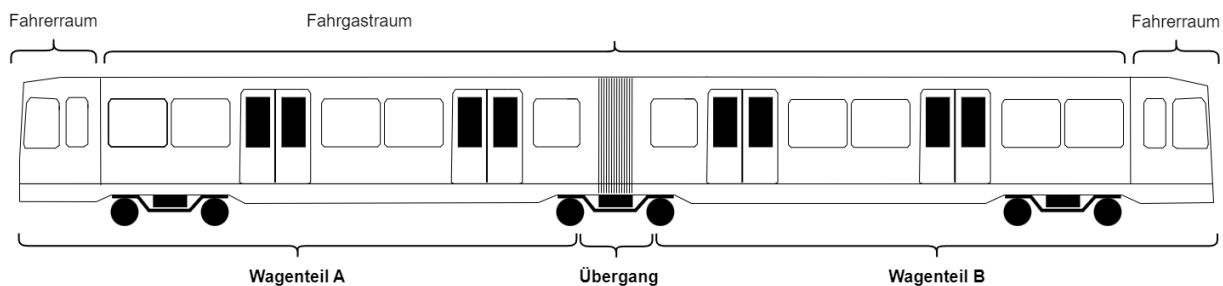


Abbildung 1: Darstellung des Versuchsfahrzeugs

3.1 Layout des Fahrerstroms

Das Layout des FGR von Wagenteil A ist punktsymmetrisch zu Wagenteil B. Dabei liegt der Symmetriepunkt im Mittelpunkt des Übergangs. In der Abbildung 2 ist das Layout des FGR im Wagenteil A zu sehen. Zur besseren Erklärung wurden einige markante Punkte beispielhaft nummeriert. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird hauptsächlich der Wagenteil A betrachtet. Um Richtungsangaben zu vereinfachen, dient der Pfeil in Abbildung 2 (in Richtung FRR des Wagenteils A) als angenommene Fahrtrichtung. Sämtliche Richtungsangaben im FGR sind daher im Folgenden auf diese angenommene Fahrtrichtung bezogen.

Der FGR des Fahrzeugs hat zwischen den Seitenwänden eine Breite von rund 2,5 m und eine Höhe von rund 2,2 m. Im Übergang verengt sich die Breite auf 1,4 m und die Höhe wird auf ca. 2 m reduziert. Es befindet sich keine Tür im Übergang, die die Fahrzeughälften voneinander trennt. Um das Fahrzeug in Simulationen und Diagrammen darzustellen, wird der FGR in acht Segmente in Längen zwischen 1,3 und 1,7 m unterteilt. Diese Unterteilung wurde anhand akustischer Barrieren ausgewählt, die die freie Schallausbreitung über die Längsachse des Fahrzeugs einschränken. Diese Barrieren bestehen hauptsächlich aus Windfängen, Sitzlehnen und der Verkleidung des Faltenbalgs im Übergang. Die Benennung erfolgt in Bezug auf Objekten in der Fahrzeugaußenhülle im jeweiligen Segment wie Fenster, Türen und

Übergang. Bei Mehrfachnennung eines Objekts erfolgt eine Nummerierung in aufsteigender Reihenfolge entgegengesetzt der Fahrrichtung. So ergeben sich beispielsweise Bezeichnungen wie „F1“ für das erste Segment am ersten Fenster im Fahrgastraum oder „T2“ für den zweiten Türbereich. Alle Segmente inklusive Bezeichnung sind in Abbildung 2 eingetragen.

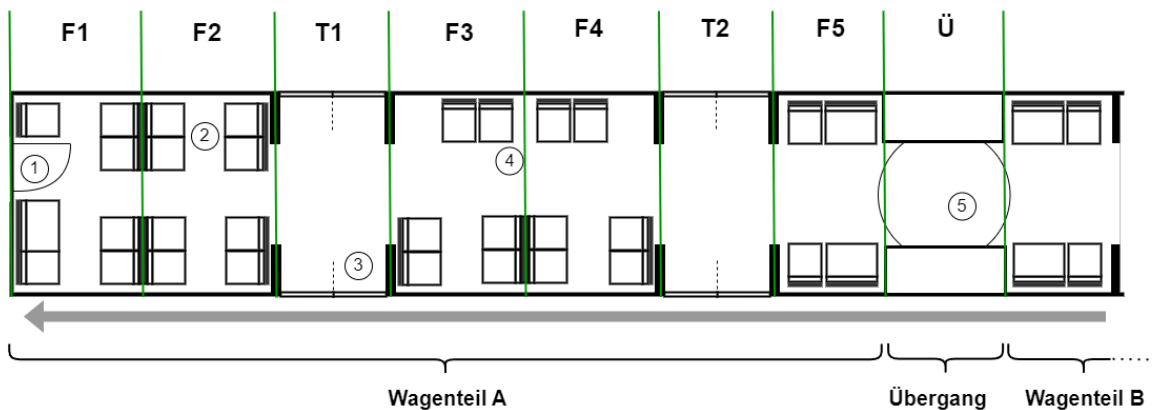


Abbildung 2: Layout des Fahrgastraums 1 - Tür zum FRR, 2 - Sitzgruppe bestehend aus vier Einzelsitzen, 3 - Tür mit Windfang seitlich am Einstiegsbereich, 4 - Multifunktionsbereich mit Klappsitzen (nur Sitze in Richtung Fahrzeugmittellinie), 5 - Übergang mit Faltenbalg

3.2 Klimatisierung

Im Fahrzeugstillstand bilden die Klimageräte die primäre Schallquelle an diesem Fahrzeug, da durch das Kanalsystem eine direkte Verbindung zwischen dem FGR und dem Klimagerät besteht. Andere Schallquellen, wie etwa Hilfsbetriebeumrichter, sind zwar aktiv, aber tragen durch deutlich geringer Schalleistung und Abschirmung durch die Fahrzeugkarosserie nicht wesentlich zum Schalldruckpegel im Innenraum bei. Das Klimatisierungssystem des FGR teilt sich in diesem Fahrzeug auf zwei Klimageräte pro Wagenteil auf, die jeweils ein unabhängiges Kanalsystem versorgen. Eines der Geräte ist auf dem Dach des Fahrzeugs angebracht und dient ausschließlich zum Lüften des FGR und verfügt daher nicht über Heizelemente oder einen Klimakompressor. Dieses Gerät speist einen Rechteckkanal in der Decke, aus welchem die Luft über ein Lochblech in den FGR gelangt. Das andere Gerät ist ein Heizlüfter und sitzt unterflur. Es dient zum Heizen des FGR und speist zwei voneinander getrennte Kanäle an der rechten und linken Seite des Fahrzeugs. Dieses Kanalsystem ist komplexer als der Deckenkanal und wird abstrahiert in Abbildung 3 dargestellt. Das Gerät hat zusätzlich die Aufgabe im Betriebszustand „Lüften Vollast“ das Deckenkanalsystem zu unterstützen.

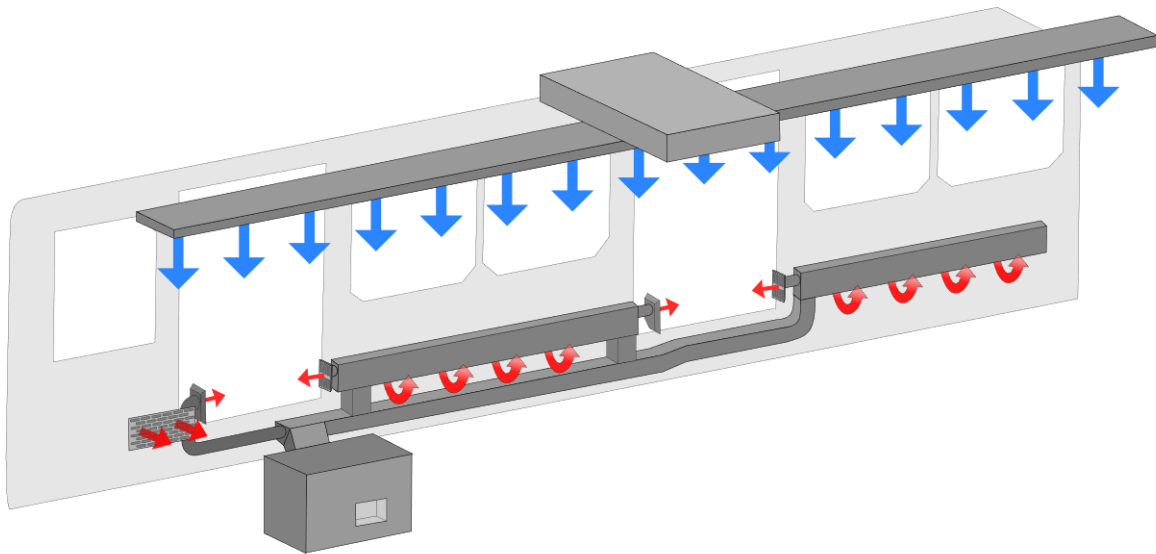


Abbildung 3: Darstellung des Klimatisierungssystems

In der vorliegenden Arbeit werden die beiden Geräte nur einzeln betrieben, sodass entweder das Bodensystem oder der Deckenkanal versorgt wird. Die Kanalsysteme sind auf 100% Zuluft eingestellt, sodass die Umluftansaugung nicht berücksichtigt wird. Die Geräte werden dabei jeweils auf die maximale Lüfterdrehzahl eingestellt und weichen damit von üblichen Vorgaben der VDV oder DIN ab. Nach VDV (VDV 154) ist der Volllastbetrieb als der Betrieb definiert, bei dem die Klimaanlage bei Nennleistung im Dauerbetrieb gemäß der klimatechnischen Auslegungskriterien nach DIN EN 14750-1 (DIN EN 14750-1) betrieben wird. Der Teillastbetrieb wird dann in der Regel mit der halben Lüfterdrehzahl des Volllastbetriebs definiert. Grund für die Abweichung von diesen Vorgaben sind fehlende Parameter, die für das Feststellen des Klimageräts auf diesen Zustand nötig sind. Die dadurch entstehenden Schalldruckpegel weichen von dem im Normalfall bzw. nach VDV eingestellten Zuständen ab und sind daher nicht repräsentativ für die akustische Leistung des Fahrzeugs. Vergleiche mit vorherigen Messungen aus (Rössel, 2022) sind aus diesem Grund ebenfalls nicht möglich.

4 Prognosemodell

4.1 Ausgangssituation

Das in dieser Arbeit vorgestellte Prognosemodell soll eine Möglichkeit darstellen, um den Schalldruckpegel im Innenraum von Straßen- und Stadtbahnen vorherzusagen. Um dies in frühen Entwicklungsstufen umzusetzen, liegt der Fokus darauf mit beschränkten Eingangsdaten valide zu prognostizieren, ob vorgeschriebene Grenzwerte für Schalldruckpegel eingehalten werden können. Ein Verfahren dazu existierte bereits, konnte aber aufgrund diverser Schwachstellen keine validen Ergebnisse liefern. Ein konkretes Problem war die Beschreibung der Schallausbreitung im Innenraum. Der Innenraum wurde in einzelne Segmente unterteilt, ähnlich denen aus Abschnitt 3.1. Die verwendeten Segmente wurden aber deutlich größer gewählt. In diesen Segmenten konnte jeweils ein Schalldruckpegel bestimmt werden, eine Ausbreitung zwischen den Segmenten war aber nicht möglich. Dadurch war der Schalldruckpegel in den Einzelsegmenten unter anderem stark von der Auslegung der Segmente abhängig. Um dem entgegenzuwirken, wurde in einer vorangegangenen Arbeit die SEA als ein mögliches Verfahren festgestellt, mit dem die Ausbreitung im Innenraum beschrieben werden kann. Dabei wurde die Berechnung zeitgleich aus Excel in MATLAB überführt. Die SEA wurde in verschiedenen Varianten getestet und im Modell umgesetzt. Die Ergebnisse konnten aber aus diversen Gründen nur bedingt mit der Realität verglichen werden (Rössel, 2022).

Durch neue Erkenntnisse, Präzisierung und vereinfachten Handhabung wird das Modell in dieser Arbeit angepasst und weiterentwickelt. Das Ziel ist es aber nicht die Verbesserung gegenüber der vorherigen Version zu quantifizieren, sondern allgemein die Funktionsweise des Verfahrens zu prüfen. In dieser Arbeit wird dabei die Problemstellung eingegrenzt, sodass nur die Ausbreitung im Innenraum und während des Fahrzeugstillstandes betrachtet wird. Daher beschränkt sich die Beschreibung des Prognoseverfahrens auch nur auf den dafür relevanten Teil. Die Einleitung von Schalleistung durch Klimageräte über das Klimakanalsystem wurde im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls untersucht, wird hier aber nicht ausgeführt.

4.2 Eingangsdaten

4.2.1 Geometrische Eingangsdaten

Bei der Beschränkung der Prognose auf die Schallausbreitung im Innenraum entfällt die Schalltransmission über die Fahrzeugkarosserie. Dadurch werden die Eingangsdaten stark reduziert und beschränken sich im Wesentlichen auf grobe Daten der

Raubegrenzungsflächen des FGR und das Layout des Innenraums. Alle Maße sind prinzipiell in Metern gegeben.

Raubegrenzungsflächen

Zur Beschreibung des FGR ist vor allem die Beschreibung der raumbegrenzenden Flächen des FGR relevant. Diese werden grundlegend über den Querschnitt des FGR definiert. Für diesen wird in das Programm manuell die Höhe L_z und Breite L_y des FGR eingegeben. In der Regel wird die Höhe des FGR nicht durch die Fahrzeugkarosserie begrenzt, sondern durch eine Zwischendecke, über der elektrische Leitungen oder Klimakanäle verlegt sind. In der Prognose ist die Höhe daher über den Abstand zwischen Boden und Zwischendecke definiert. Im Falle von Fahrzeugen mit variierender Bodenhöhe sollte nach Möglichkeit ein repräsentativer Mittelwert gefunden werden. Die Breite wird als Abstand zwischen den Seitenwände definiert. Abweichungen, beispielsweise an Türen oder Fenstern, wurden nicht berücksichtigt. Sowohl Höhe als auch Breite werden für das gesamte Fahrzeug festgelegt.

Segmentierung

Der Innenraum des Fahrzeugs wird entlang der x-Achse in verschiedene Segmente unterteilt. Die Segmentierung sollte dabei, wie bereits am Beispiel des hier verwendeten Fahrzeugs in 3.1 beschrieben, erfolgen. Demnach wird das Fahrzeug an charakteristischen Stellen, wie z.B. Querschnittsänderungen, unterteilt. Die Größe dieser Segmente ist dabei nicht relevant und wird basierend auf der geforderten räumlichen Auflösung oder dem Layout des FGR definiert. Die Längen der einzelnen Segmente müssen nicht identisch sein. Nach der Segmentierung werden die Längen der einzelnen Segmente l_x als Vektor in chronologischer Reihenfolge, von FRR bis einschließlich des Übergangs, in die Prognose eingetragen. Die Auflösung ist dabei auf 0,1 m limitiert. Die Segmentlängen können zwar genauer angegeben werden, werden aber im weiteren Verlauf gerundet. Zur Ergebnisdarstellung werden die Bezeichnungen der Segmente ebenfalls in vektorieller Form (Cell-Array in MATLAB) in das Programm eingegeben.

Querschnittsänderungen

Entlang der x-Achse ergeben sich immer wieder sprunghafte Änderungen der Querschnittsfläche. Diese können beispielsweise an Sitzen, Windfängen oder Übergänge auftreten. Wenn Querschnittsänderungen an den Grenzflächen zwischen zwei Segmenten, oder in nächster Nähe zu dieser Fläche auftreten, werden diese in einem Vektor an der Stelle der Segmentverbindung eingetragen. Querschnittsänderungen unter $0,2 \text{ m}^2$ können vernachlässigt werden, da diese keinen signifikanten Einfluss auf die Prognose haben. Alternativ kann der Vektor als Nullvektor eingetragen werden.

4.2.2 Akustische Daten

Frequenzbereich

Der Frequenzbereich der Prognose wird durch die Eingabe von Terz -bzw. Oktavmittenfrequenzen für jeweils untere und obere Grenzfrequenz festgelegt. Zusätzlich wird, in Abhängigkeit der anderen Eingangsdaten ausgewählt, ob die Berechnung in Terz- oder Oktavbändern stattfinden soll. Eine automatische Beschränkung auf den validen Frequenzbereich der SEA für das modellierte Fahrzeug findet nicht statt.

Nachhallzeit

Die Nachhallzeit dient zur Berechnung der Absorptionsfläche im FGR. Anstelle der Absorptionsfläche wird die Nachhallzeit ins Programm eingetragen, da die Abschätzung der Absorptionsfläche anhand der verbauten Komponenten schwierig ist. In der Regel ist zum Zeitpunkt der Prognose nicht bekannt, welche Absorptionsgrade die verschiedenen Flächen haben. Dazu fehlt es zusätzlich meist an Referenzwerten für die verbauten Materialien, da sich diese grundlegend von den typischen, in der Bau- und Raumakustik verwendeten, Materialien unterscheiden. Zusätzlich fällt die Entscheidung über verwendete Sitzvarianten, Bodenplatten o.ä. zum Teil erst sehr spät im Entwicklungsprozess oder verändert sich währenddessen. Die Nachhallzeit bietet somit eine komfortablere Lösung, um die Absorption im Innenraum zu beschreiben. Da während der Entwicklung keine Messwerte der Nachhallzeit zur Verfügung standen, wird auf Referenzwerte aus ähnlichen Fahrzeugen zurückgegriffen. In MATLAB ist im Prognosemodell eine Funktion integriert, in der der Nutzer die Nachhallzeit über ein Dropdown-Menü auswählen kann. Zur Verfügung steht hier eine Auswahl an Nachhallzeiten aus den von Sun (Sun et al., 2022) veröffentlichten Daten, Messwerten von HVE und Referenzwerten von externen Dienstleistern. Diese sind für teilweise verschiedene Ausbauvarianten des Fahrzeugs verfügbar - beispielsweise für Fahrzeuge ohne Sitze und Fahrzeuge mit Stoffgepolsterten, sowie ungepolsterten Sitzen. Bei der Auswahl wird außerdem in Terz und Oktavdaten unterschieden, die je nach Format der anderen Eingangsdaten gewählt werden. Die Nachhallzeitdaten liegen in den Frequenzbereichen von 100 bis 5000 Hz vor. Somit decken diese den üblichen Frequenzbereiche für Typprüfungen ab (DIN EN ISO 3381) und unterschreiten auch die untere Anwendungsgrenzfrequenz der SEA in üblichen Schienenfahrzeugen (Li et al., 2021).

Schalleistung

Die Schalleistung im Standbetrieb von Straßenbahnen wird üblicherweise hauptsächlich durch die Klimageräte über den Klimakanal in den FGR geleitet. Da dieser Transmissionsweg hier nicht betrachtet wird, gelten die eingegebenen Schalleistungsdaten direkt für die Einleitung in den FGR. Die gesamte in ein Segment eingespeiste Schalleistung wird segmentweise in Terz- oder Oktavpegel (je nach Verfügbarkeit) in eine Matrix eingetragen. Schalleistungsanteile von einzelnen Geräten oder mehreren Luftauslässen in einem Segment müssen vor der Eingabe aufsummiert werden.

4.3 Funktionsweise

4.3.1 Berechnung weiterer Eingangsdaten

Aus den durch den Nutzer eingegebenen Daten werden vom Prognosemodell zuerst weitere Eingangsdaten generiert. Eine kurze Auflistung der simplen geometrischen Berechnungen ist in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Berechnung weitere Daten für die SEA aus Eingangsdaten der Prognose

Größe	Formelzeichen	Berechnung
Querschnittsfläche des FGR (yz-Ebene)	S_{2D}	$S_{2D} = l_y \cdot l_z$
Umfang des FGR (yz-Ebene)	U	$U = 2(l_y \cdot l_z)$
Volumen	V	$V = l_x \cdot S_{2D}$
Gesamtoberfläche der Raumbegrenzungsflächen im ganzen Fahrzeug	S_G	$S_G = 2 \cdot S_{2D} + U_{2D} \cdot \sum_i^N l_{x,i}$
Gesamtoberfläche der Raumbegrenzungsflächen im Segment	$S_{G,i}$	$S_{GS} = U_{2D} \cdot l_{x,i}$

Frequenzen

Aus den eingegebenen Frequenzgrenzen generiert das Programm mithilfe einer Funktion einen Vektor, der die üblichen Normfrequenzen nach DIN EN 60196 (DIN EN 60196) enthält. Abhängig von der Eingabe des Nutzers werden die Frequenzen in Terzen oder Oktaven ausgegeben. Für die Verwendung abweichender Frequenzen müsste diese Funktion deaktiviert werden, und die entsprechenden Frequenzen durch den Nutzer eingetragen werden.

Äquivalente Absorptionsfläche

Durch die gegebene Nachhallzeit kann aus der Gleichung (2.5) der mittlerer Schallabsorptionsgrad bestimmt werden. Mithilfe der Raumbegrenzungsflächen S_G bzw. $S_{G,i}$, auf denen die ganze Schallabsorption angenommen wird, ergibt sich so die Äquivalente Absorptionsfläche des Fahrzeugs bzw. des Segments.

Vervollständigung des Fahrzeugs

Die bereits genannten Eingangsdaten werden bei symmetrischen Fahrzeugen (oder Fahrzeugen mit identischen Wagen) nur einmal in das Programm eingegeben. Beim hier vorliegenden Beispielfahrzeug werden alle Segmente nach dem Übergang in umgekehrter Reihenfolge an den eingegebenen Wagen angehängen, um die Symmetrie im Übergang abzubilden. Dieser Prozess ist wichtig, da sonst Schalleistung und Schallausbreitung nur in einem Wagenteil berücksichtigt werden würde. Dadurch würde der Einfluss von Schallquellen in den anderen Wagenteilen nicht mit abgebildet werden.

4.3.2 Berechnung durch die SEA

Anpassung der Segmente an die SEA

Die Forced SEA nach Craik (Craik, 2003) mit den Koppelverlustfaktoren (2.15) setzt gleich lange Subsysteme in der Berechnung voraus, was den festgelegten Segmenten aus 4.2.1 widersprechen würde. Ohne diese ergeben sich unplausible Ergebnisse, wie beispielsweise ein Pegelanstieg in einigen Segmenten bei der Simulation des Schalldruckpegelabfalls nach Abschnitt 5.2. Um nicht die Unterteilung des Innenraums anpassen oder die Segmentlängen grob runden zu müssen, wurde eine andere Lösung entwickelt. Da die Forced SEA, im Gegensatz zum Standardverfahren der SEA, unabhängig von Anzahl und Länge der einzelnen Subsysteme, bei gleichbleibendem Gesamtsystem, auch gleich Ergebnisse abbildet, kann die Länge der SEA-Subsysteme kleiner gewählt werden als die Segmentlängen. Dafür werden die einzelnen Segmente in Subsysteme mit je 0,1 m Länge zerlegt. Alle Eingangsdaten, wie die Segmentlänge und Absorptionsfläche, werden auf diese Subsysteme aufgeteilt bzw. neu berechnet. Um die Schalleistungseinträge in die Segmente nicht räumlich zu verschieben, werden die Teilschalleistungspegel auf alle Subsysteme eines Segments aufgeteilt, die in Summe den Gesamtschalleistungspegel im Segment bilden. Die veränderten Querschnitte an den Segmentgrenzen werden an der Stelle der Segmentgrenzen zwischen zwei Subsystemen eingesetzt. Alle anderen Querschnitte entsprechen der Querschnittsfläche des FGR. Dadurch würden sich aus einem 11 m langen Gesamtsystem 110 Subsysteme ergeben. Nach der abgeschlossenen SEA-Berechnung werden die Subsysteme zusammengefasst. Der Mittelwert der entstehenden Schalldrücke aus allen Subsystemen des Segments ergibt den Schalldruckpegel im Segment.

Verlustfunktionen

Die SEA verwendet verschiedenen Verlustfaktoren für Dissipation in Subsystemen und Transmission von Energie zwischen Subsystemen. Die internen Verlustfaktoren nach Gleichung (2.12) werden für jedes Subsystem einzeln berechnet und in einem Vektor gespeichert. Für die Koppelverlustfaktoren nach Gleichung (2.14) wird für jede Ausbreitungsrichtung ein separater Vektor angelegt. Dies wäre nach in der aktuellen Variante des Skripts nicht mehr nötig, da die zwei benachbarten Subsysteme immer auf identische Daten zurückgreifen, wurde aber beibehalten, da der berechnungsaufwand nicht spürbar

verändert wird und somit eventuell notwendige Änderungen am Skript einfacher implementiert werden können.

Aufbau der Matrix

Die Matrix mit den Verlustfaktoren aus Gleichung (2.9) wird in einer Programmschleife besetzt. Dabei werden nur die Diagonalen und die ersten Nebendiagonalen besetzt, da ein Subsystem in diesem Fall nur mit maximal zwei weiteren Subsystemen verbunden sein kann. Alle anderen Elemente werden mit Null besetzt. Mit Hilfe des Vektors, in dem die eingehende Schalleistung enthalten ist, kann die Energie in den einzelnen Segmenten berechnet werden. Daraus ergibt sich anschließend der Schalldruck im Subsystem.

Diese Prozedur wird ab der Berechnung der Verlustfunktionen für jede Frequenz wiederholt, sodass für jedes festgelegte Frequenzband ein separates Ergebnis entsteht. Die entstehenden Werte für die Schallenergien in den einzelnen Segmenten E_i können mit der Gleichung (4.1) in mittlere Schalldruckpegel im Segment umgerechnet werden.

$$\bar{L}_p = 10 \cdot \lg \left(\frac{\rho_0 \cdot c_0^2 \cdot E_i}{V_i \cdot p_0^2} \right) \quad (4.1)$$

In Gleichung (4.1) und allgemein in der Berechnung wurde die Referenzwerte für den Bezugsschalldruckpegel $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, die Dichte der Luft $\rho_0 = 1204$ kg/m³ und die Schallgeschwindigkeit in Luft $c_0 = 343$ m/s verwendeten.

4.4 Anwendung auf reales Fahrzeug

Um die Prognose an einem realen Fahrzeug zu erproben, wurde das in Abschnitt 3 beschriebene Fahrzeug mit dem beschriebenen Prognoseverfahren modelliert. Als Eingangsdaten dienen die in Abschnitt 5 bestimmten Werte für die Nachhallzeit und Schalleistung. Die Anwendung der SEA ist auf das diffuse Schallfeld begrenzt. Die Schröder-Eck-Frequenz nach Gleichung (4.2) wurde verwendet, um abzuschätzen, ab welcher Frequenz das Schallfeld als ausreichend diffus bezeichnet werden kann. (Kuttruff, 2005)

$$f_s \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (4.2)$$

Nach dieser Rechnung würde der gesamte FGR etwa ab eine Frequenz von ca. 120 Hz als diffus gelten, wenn die Nachhallzeit bei 1000 Hz aus der Messung aus 5.3 verwendet wird. Da sich die Schallausbreitung in Langräumen aber nicht wie im diffusen Feld verhält, wird angezweifelt, dass im vorliegenden Fall bereits ab diesem Punkt valide Ergebnisse abrufbar sind (Kang, 1996b). Als Ersatz dient hier die Diffusität in den einzelnen Segmenten des Fahrzeugs. Diese wird ab ca. 500 Hz in allen Segmenten erreicht. Um die folgenden

Ergebnisse übersichtlich zu halten, wird die Auswertung daher nur in Oktaven und im Frequenzbereich von 500 bis 4000 Hz dargestellt.

4.4.1 Schalldruckpegelabfall

Für die Simulation des Schalldruckpegelabfalls wurde an einem Ende des FGR analog zu Abschnitt 5.2 eine Schallquelle mit einem angenommenen Schalleistungspegel von 100 dB eingesetzt. In allen anderen Segmenten wurde der eingehende Schalleistungspegel auf 0 dB gesetzt. Das Ergebnis ist in Abbildung 1 dargestellt. Hier wurden zu besserer Visualisierung die Abstände in Metern angegeben und nicht durch die Segmente des FGR beschrieben. Erkennbar ist, dass sich in Abhängigkeit der Nachhallzeit bzw. der mit der Nachhallzeit zusammenhängenden Absorptionsfläche der Schalldruckpegelabfall ändert, sodass sich ein Frequenzabhängigkeit ergibt. Die angegebenen Werte für den Schalldruckpegelabfall in dB/m entsprechen dem Mittelwert der Quotienten von Pegeldifferenz und Abstand zu Quelle. Im ersten und letzten Segment ergeben sich Abweichungen vom sonst linearen Verlauf. Diese entstehen dadurch, dass die abschließenden Segmente nur mit einem weiteren Segment verbunden sind und daher weniger Energie transmittiert wird.

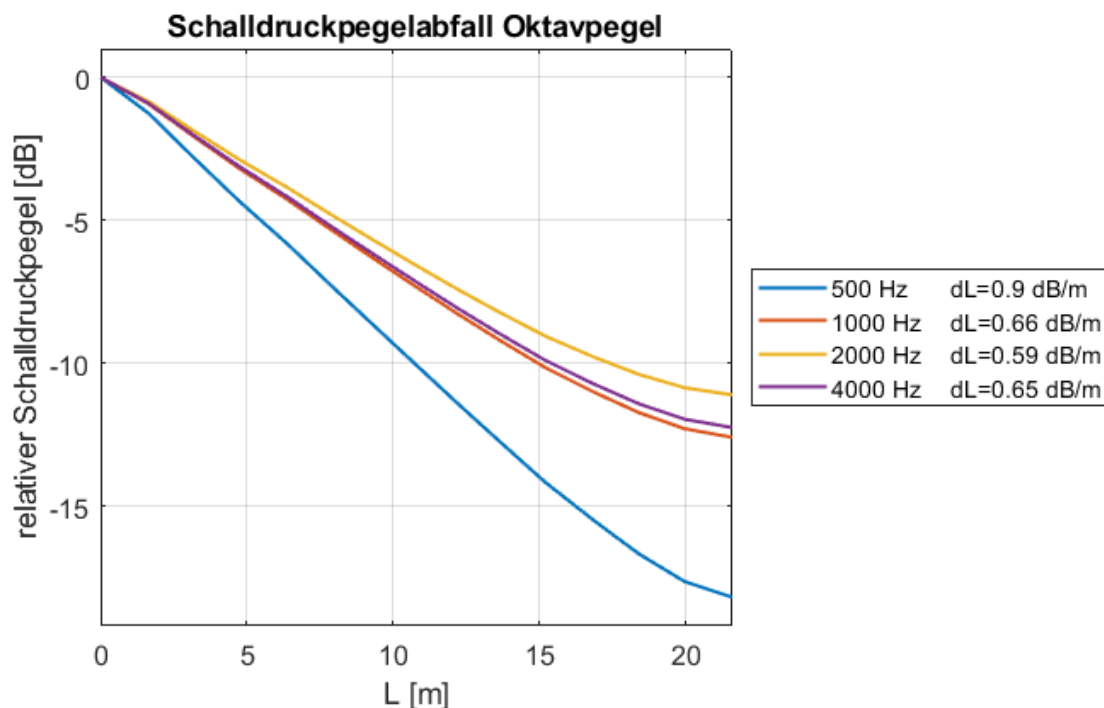


Abbildung 4: Schalldruckpegelabfall des SEA-Modells in Oktaven

4.4.2 Schalldruckpegelverteilung im FGR

Zu Modellierung der Schalldruckpegelverteilung im FGR wurde nur die Schalleistung aus den Segmenten mit den dominanten Schallquellen, also F3 bei der Messung des Deckenkanals und F5 beim Bodenkanal, verwendet. Dies hat den Hintergrund, dass die anderen Messungen

von diesen Quellen verfälscht wurden (siehe 5.2). Da die dominanten Quellen hauptsächlich für den Schalldruckpegel im FGR verantwortlich sind, wurden hier nur diese verwendet.

In Abbildung 5 sind die Gesamtschalldruckpegel des Prognosemodells zu sehen und in der Abbildung 6 die dazugehörigen Oktavschalldruckpegel. Zu den Gesamtschalldruckpegeln wurden zusätzlich die Schalldruckpegel ohne Segmentkopplung dargestellt (aus der Variante des ursprünglichen Prognosemodells) diese berechnen sich aus der Schallleistung nach Gleichung (4.3) mit den äquivalenten Absorptionsfläche A des Segments und der Referenzabsorptionsfläche $A_0 = 4 \text{ m}^2$.

$$L_p = L_w - 10 \cdot \lg(A/A_0) \quad (4.3)$$

In den beiden Abbildungen sind die Skalen der Ordinaten jeweils identisch. Das obere Skalenlimit der Gesamtpegel liegt 15 dB über dem oberen Limit der Oktavpegel. In den Diagrammen, in denen der Gesamtpegel abgebildet ist, lässt sich gut erkennen, dass sich ein Maximum in den Segmenten mit der eingebrachten Schallleistung ergibt. Dass die Schalldruckpegel der SEA deutlich unter denen des ungekoppelten Modells liegen, ist nicht überraschend, da im ungekoppelten Modell keine Ausbreitung des Schalldrucks stattfindet. Die Maxima prägen sich ähnlich in den Oktavschalldruckpegeln aus. In den Oktavpegeln ist zusätzlich gut zu erkennen, dass die Kopplung in Oktaven mit niedrigem Schalldruckpegelabfall zu gleichmäßiger verteilten Schalldruckpegeln führt als in Oktaven mit hohem Schalldruckpegelabfall. Sowohl in Terz- als auch Oktavpegel ist der Unterschied zwischen maximalem und minimalem Schalldruckpegel jedoch gering.

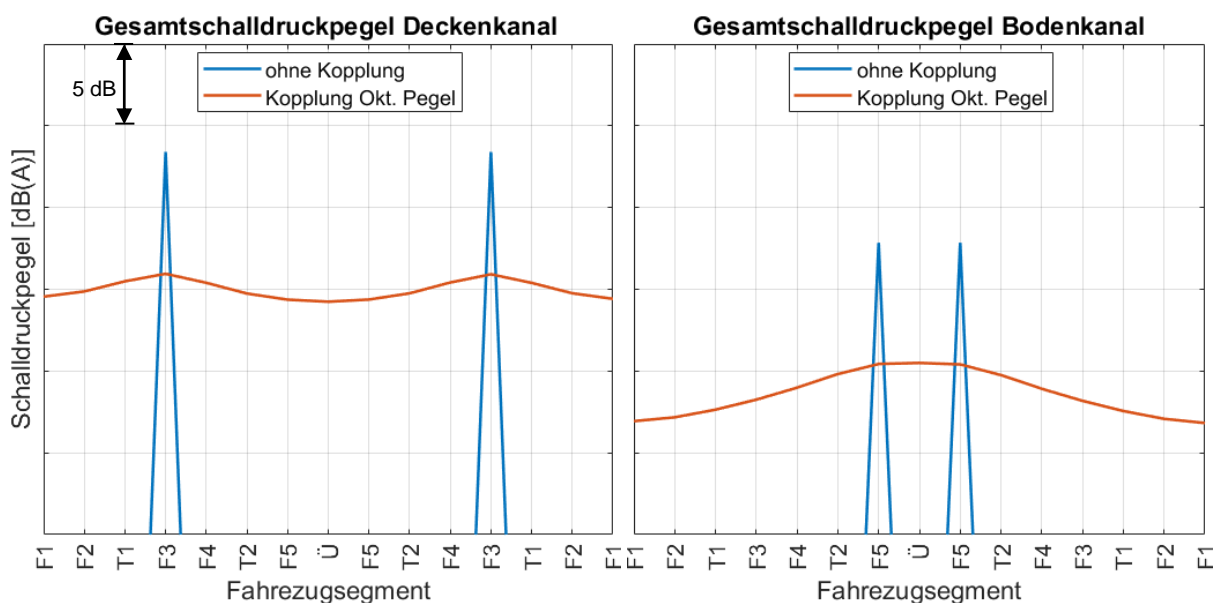


Abbildung 5: Gesamtschalldruckpegelverteilung des SEA-Modells (Berechnung in Oktavpegeln) im FGR im Vergleich zum Schalldruckpegel ohne SEA-Kopplung

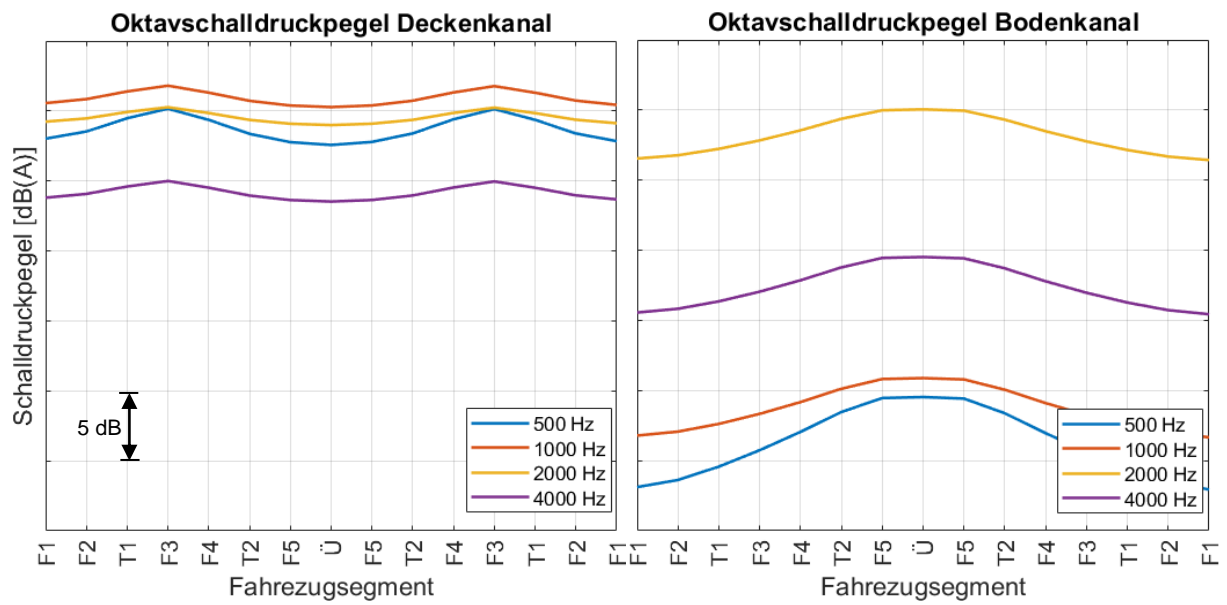


Abbildung 6: Oktavschalldruckpegelverteilung des SEA-Modells im FGR

5 Messung

In diesem Abschnitt werden Messverfahren, Messaufbauten und Auswertung sowie Ergebnisse der einzelnen Messungen beschrieben. Die genauen Messpositionen, Ergebnisse und sonstige Daten sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** eingetragen. Zur besseren Zuordnung der Messergebnisse zu den Positionen wird die Bezeichnung der einzelnen Messpositionen jeder Messreihe kurz erklärt. Eine Übersicht über die verwendeten Geräte ist ebenfalls im Messprotokoll zu finden.

5.1 Schalldruckpegel im Fahrgastraum

Die Messung des Schalldruckpegels diene zur Beschreibung des Geräuschs im Fahrgastraum. Dieser Parameter entspricht der Vorhersage des Prognosemodells, weshalb diese Messung Vergleichswerte zu den Prognoseergebnissen liefern sollte. Gemessen wurde der A-Bewertet, äquivalente Dauerschalldruckpegel L_{pAeq} .

5.1.1 Messanforderungen

Anforderungen nach DIN EN ISO 3381 und VDV 154

Die DIN EN ISO 3381 (DIN EN ISO 3381) ist eine Norm für die Geräuschmessung in spurgebundenen Fahrzeugen und dient vor allem als Norm für Typprüfungen, deren Ziel es ist, die Einhaltung von festgelegten Emissionswerten zu untersuchen. Die beschriebenen Messverfahren dienen dazu das Geräusch im Inneren des Fahrzeugs zu beschreiben, können jedoch nicht für die Beschreibung der Hörbarkeit oder Verständlichkeit akustischer Signale genutzt werden. Neben der für diese Arbeit relevanten Messung im Fahrzeugstillstand, umfasst die Norm auch Messverfahren bei konstanter Geschwindigkeit und bei der Beschleunigung des Fahrzeugs aus dem Stillstand bzw. beim Abbremsen des Fahrzeugs bis zum Stillstand. Im Fokus der Norm stehen Geräusch die durch den Betrieb des Fahrzeugs entstehen. Die Bestimmung von Parameter wie der Nachhallzeit oder der Sprachverständlichkeit sind nicht in der Norm enthalten.

Die DIN EN ISO 3381 (DIN EN ISO 3381) sieht die Messung des äquivalenten Dauerschalldruckpegels L_{pAeq} über eine Mittelungsdauer von mindestens 20 Sekunden vor. Die Messung des äquivalenten Dauerschalldruckpegels L_{pAeq} wird an jeder Messposition dreimal durchgeführt und die Ergebnisse anschließend mit der Gleichung (5.1 energetisch gemittelt.

$$\overline{L_p} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right] \text{ dB} \quad (5.1)$$

Um die Messergebnisse nicht zu beeinflussen, muss der äquivalente Dauerschalldruckpegel des Fremdgeräuschs an jeder Messposition 10 dB unter dem Endergebnis der Messung des Fahrzeuggeräuschs liegen. Bei Frequenzanalysen muss diese Bedingung in jedem interessierenden Frequenzband gegeben sein.

Zur Wahl der Messpositionen wird das Fahrzeug anhand der Nutzung und der akustischen Eigenschaften in Bereiche unterteilt. Sitz-, Steh-, und Multifunktionsbereich sind Beispiele für verschiedene Bereichsarten. In Straßenbahnen ist es, aufgrund der Dichte der verschiedenen Bereiche, oft angemessen einen „Fahrgastbereich“ zu definieren, der alle Bereiche umfasst. Eine Unterteilung der Bereiche anhand akustischer Eigenschaften erfolgt hauptsächlich durch akustische Grenzen wie Trennwände, Windfänge, Innentüren oder Decks von Doppelstockfahrzeugen. Sollten mehrere vergleichbare Bereiche im Fahrzeug vorhanden sein, muss die Messung nur in einem der Bereiche durchgeführt werden oder wird über alle vergleichbaren Bereiche gemittelt. Die Norm sieht eine weitere Unterteilung der Bereich in gleichlange Segmente vor, die jeweils nicht länger als 5 m sein dürfen und jeweils mindestens eine Messposition enthalten. Die Wahl der Mikrofonhöhe erfolgt nach der Nutzungsart der Bereiche. Für Sitzbereiche wird eine Höhe von 1,2 m gewählt und für Stehbereiche 1,6 m. Die genaue Wahl einzelner Messpunkte ist ab der DIN EN ISO 3381:2022 (DIN EN ISO 3381) freigestellt. Die VDV 154:2011 (VDV 154), welche sich explizit auf die Anforderung und Messung von Geräusche in Schienenfahrzeugen im öffentlichen Personen-Nahverkehr bezieht und DIN EN ISO 3381:2011 (DIN EN ISO 3381) sehen eine Messung auf der Fahrzeugmittellinie bzw. in der Mitte von stehenden Passagieren zugänglichen Flächen vor. Messpositionen müssen generell einen Abstand von mindestens 0,3 m zur nächsten Wand, Tür oder Trennfläche haben.

Abweichende Anforderungen zur Validierung der Prognose

Da das in diesem Abschnitt beschriebene Messverfahren der Validierung der SEA-Prognose aus Abschnitt 4 dient, ist es hilfreich die Messung des Schalldruckpegels an das Format der Prognoseergebnisse anzupassen. Die Ergebnisse der SEA sind räumlich gemittelte Erwartungswerte in den einzelnen Segmenten bzw. Subsystemen. Eine einzelne Messposition pro Segment kann daher, vor allem im nicht diffusen Schallfeld, vom räumlichen Mittelwert abweichen und somit das Ergebnis des Validierungsversuchs verfälschen. Um dies zu vermeiden, sollen mehrere, im Raum verteilte Messpunkte gewählt werden, deren Ergebnisse räumlich gemittelt werden. Dazu gehört auch die Variation der Mikrofonhöhe, um sowohl Sitz- als auch Stehplätze abzubilden, zwischen denen die SEA nicht unterscheiden kann. Durch die Wahl mehrere Messpunkte im Raum, kann zudem der Einfluss von Raummoden auf das Endergebnis abgeschwächt werden.

Die Segmente der Validierungsmessung sollen identisch mit den Subsystemen der SEA-Prognose sein. Für die vollständige Prognose einer Messung nach DIN EN ISO 3381 (DIN EN ISO 3381) wäre es möglich die kleineren SEA-Subsysteme über die räumliche Mittelwertbildung zusammenzufassen und die Bedingungen der Abnahmemessung nachzubilden. Zur genaueren Betrachtung der Unterschiede zwischen Realität und der SEA-Prognose, werden hier die einzelnen Zwischenergebnisse verglichen und nicht das Endergebnis. Grund dafür ist, dass das Endergebnis der Prognose, durch die Mittelung, zufällig nah am Endergebnis der Messung liegen könnte, obwohl die Mess- und Prognosewerte in den Einzelsegmenten voneinander abweichen.

Andere Bedingungen der DIN EN ISO 3381 (DIN EN ISO 3381), wie die Mittelungsdauer, der geforderte Störpegelabstand und der Abstand zu reflektierenden Flächen, werden für die Messung zur Validierung der Prognose übernommen.

5.1.2 Messaufbau

Die Grundlage für den Messaufbau stellten die Segmente der Prognose dar, welche auch zu Beschreibung des Fahrzeugs in Abschnitt 3.1. erklärt wurden. Um nicht nur Stichprobenartig ein Messwert pro Segment zu erhalten und somit auch die Variation des Schalldruckpegels in den einzelnen Segmenten abbilden zu können, wurden die Anzahl der Messpunkte gegenüber einer vorangegangenen Messung aus (Rössel, 2022) auf drei Messpunkte pro Segment erhöht. Zusätzlich sollte die Vergleichbarkeit mit einer vorherigen Messung erhalten bleiben. Bei dieser Messung wurde jeweils ein Messpunkt pro Segment, nahe der Fahrzeugmittellinie, gewählt. Daher sollte bei dieser Messung ebenfalls ein Messpunkt pro Segment in diesem Bereich platziert werden. Zudem wurde, ähnlich wie bei Messungen der Nachhallzeiten nach (DIN EN ISO 3382-2), vermieden die symmetrisch zueinander liegenden Messpositionen zu wählen. Dies gilt insbesondere für Messpositionen innerhalb eines Segments und die Symmetrie an der Fahrzeugmittellinie, da hier gerade bei Segmenten, die eine Symmetrie an der Mittellinie aufweisen, auch gleiche ähnliche Schalldruckpegel erwartet wurden. Um alle Anforderungen an diese Messung zu vereinen, wurde der FGR zusätzlich zu den Segmenten entlang der Längsachse in drei Bereiche geteilt. Diese Unterteilung wird in der Abbildung durch die roten Linien dargestellt. Der mittlere Bereich, der mit „m“ gekennzeichnet wurde, enthält die Messpositionen an der Fahrzeugmittellinie. Die beiden äußeren Bereiche enthalten jeweils eine der beiden zusätzlichen Messpositionen und sind mit „r“ oder „l“ für die rechte oder linke Seite des Fahrzeugs betitelt. Durch die Einteilung in die Segmente und die weitere Unterteilung in y-Richtung ergibt sich ein Raster aus Rechtecken. Jedes Rechteck enthält genau einen Messpunkt. Daraus wurde dann ebenfalls die Bezeichnung der Messpunkte abgeleitet. Die Bezeichnung für den rechten Messpunkt in F1 wäre demnach beispielsweise „ML_F1_r“. Das vorgesetzte „ML“ bezeichnet die Mikrofonposition in der Schalldruckpegelmessung. Die genaue Wahl der Messpunkte innerhalb dieses Rechtecks, erfolgte möglichst unsystematisch, sodass sich im Gesamtaufbau keine eindeutige Symmetrie abbildet. Dabei wurden aber auch

der Abstand zu reflektierenden Flächen, wie Wänden oder Sitzen, bedacht und versucht die einzelnen Messpunkte benachbarter Segmente nicht zu nah aneinander zu legen. Im Segment „Ü“, also im Übergang, wurden nur zwei Messpunkte gewählt, da bei gefordertem Wandabstand die Dichte der Messpunkte deutlich höher wäre und damit die Variation der Pegel deutlich niedriger als in den anderen Segmenten. Die Mikrofonhöhe wurde für jeweils ein Messpunkt pro Segment auf 1,3 m und für alle anderen Messpunkte auf 1,6 m eingestellt.

Die in Abbildung 7 dargestellten Messpositionen, wurden für zwei Betriebszustände jeweils einmal gemessen. Bei den Messungen waren entweder das Decken- oder das Bodenkanalsystem aktiv und auf die maximale Lüfterdrehzahl eingestellt. Als Aufnahmegerät diente ein NTi XL2 Schalldruckpegelmesser mit einem 1/4“ NTi M4261 Messmikrofon, welche über ein 5 m langes NTi ASD-Kabel verbunden waren.

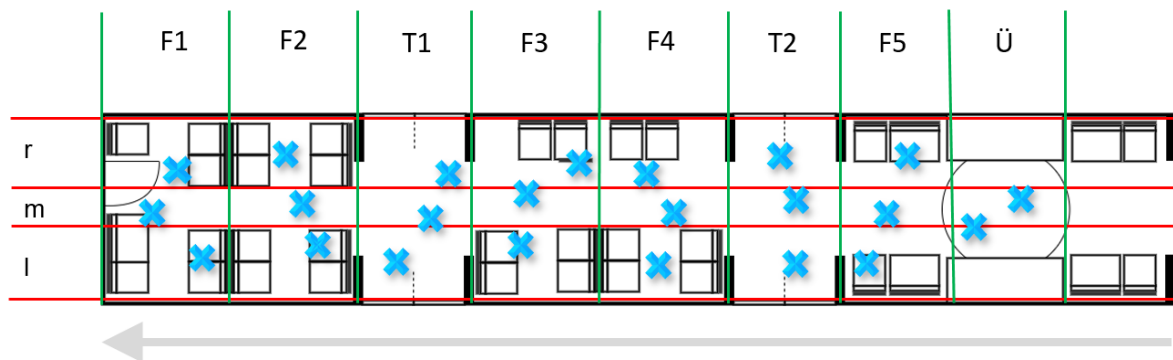


Abbildung 7 Messpositionen Schalldruckpegelmessung im Fahrgastraum

5.1.3 Fremdschalldruckpegel

Der Fremdschalldruckpegel wurde jeweils an der mittleren Position der einzelnen Segmente gemessen und anschließend als Referenz für das gesamte Segment genutzt. Die Erfassung erfolgte dabei analog zur Messung des Schalldruckpegels im Innenraum mit einer Mittelungsdauer von 20 s und drei Einzelmessungen pro Messposition, die zu einem Wert gemittelt wurden. Der Fremdschalldruckpegel zeigte im gesamten FGR ein deutliches Maximum in der Terz mit der Mittenfrequenz von 200 Hz. In Kombination mit niedrigen Pegeln der Klimageräte in diesem Bereich, war es daher nicht immer möglich den geforderten Störpegelabstand von 10 dB pro Frequenzband einzuhalten. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass der Störpegel sich außerhalb des angegebenen Dynamikbereichs des Mikrofons bewegte. Dadurch hatte das Eigenrauschen, des Mikrofons einen Einfluss auf den gemessenen Schalldruckpegel, weshalb der reale Schalldruckpegel noch unter dem Messwert gelegen haben könnte. Genaue Aussagen darüber sind aber ohne Informationen über die

Charakteristik des Eigenrauschens nicht möglich. Aus diesem Grund wird hier nur Bezug auf den erhaltenen Messwert genommen.

5.1.4 Datenauswertung

Die Auswertung der Daten erfolgt teilautomatisiert über ein Auswertungsskript. Grundlage für die Auswertung stellt eine Ordnerstruktur dar. Dabei wurde für jede Messreihe ein separater Ordner angelegt. In diesem sind alle Textdateien des NTi XL2 abgelegt, die die jeweiligen Messwerte an den einzelnen Messpositionen enthalten. In einem weiteren Unterordner wurden zusätzlich alle Textdateien mit den Daten der Fremdschalldruckpegelmessung abgelegt. Die Textdateien in beiden Ordnern wurden zusätzlich in der Reihenfolge der Segmente sortiert. Durch die automatisch fortlaufende Nummerierung durch das Messgerät, entstand kein zusätzlicher Aufwand. Aus dem Verhältnis der Dateianzahlen im Fremdgeräuschpegel- und Messwertordner konnte das Programm selbstständig bestimmen, wie viel Messpunkte zu einem Fremdgeräuschpegel gehören. Durch die Einhaltung der Reihenfolge, kann eine Zuordnung der Fremdgeräuschpegel zur Messung stattfinden.

In den einzelnen Dateien sind jeweils drei vollständige Einzelmessungen enthalten sowie meist eine zusätzliche Messung, die dadurch entsteht, dass das Messgerät fortlaufend misst. Um nur die vollständigen Messungen zu erhalten, liest das Auswertungsprogramm neben den Terzschalldruckpegeln auch die Messdauer ein und gleicht diese mit dem vorgegebenen Wert ab. Sollte die vorgegebene Messdauer unterschritten werden, wird das Messergebnis nicht mitberücksichtigt. Verfälschte Einzelmessungen (z.B. durch ungewöhnlich hohe Störpegel) wurden im Messprotokoll notiert und beim Sortieren der Messergebnisse aus der Datei entfernt. Die verbleibenden drei Einzelmessungen werden vom Programm nach Gleichung (5.1) gemittelt und bilden so anschließend den Messwert des Schalldruckpegels an der entsprechenden Messposition. Dieses Verfahren wurde auch auf die Messung der Fremdgeräuschpegel angewendet. Zusätzlich kann durch den Nutzer angegeben werden, in welchem Frequenzbereich die Auswertung stattfinden soll. Terzbänder außerhalb der angegebenen Frequenzbänder werden danach entfernt. Dies ist unter anderem notwendig, um die Messwerte mit denen des Prognosemodells vergleichen zu können, da der gemessene Frequenzbereich, den der Prognose deutlich übersteigt und somit auch bei Identischen Terzschalldruckpegel andere Werte des Gesamtschalldruckpegels entstehen würden.

Anschließend wird der Fremdgeräuschpegelabstand aus der Differenz zwischen Fremdgeräuschpegel und Messwert gebildet. Sollte der Fremdgeräuschabstand den geforderten Wert unterschreiten, wird eine Warnung ausgegeben, in welcher die zugehörige Textdatei (und damit auch die Messposition) und alle Terzbänder, in denen eine Unterschreitung auftritt, genannt werden. Zusätzlich werden die genauen Fremdgeräuschabstände an jeder Messposition und jeder Terz in einer Tabelle ausgegeben, damit der Nutzer diese einsehen kann, um die Auswirkungen abzuschätzen und mögliche

Maßnahmen zu ergreifen. Auf Grundlage der eingelesenen Daten gibt das Programm die in Tabelle 2 beschriebenen Daten zur Auswertung aus.

Tabelle 2: Übersicht über ausgegebene Daten des Programms zur Auswertung des Schalldruckpegels im Fahrgastraum

Ausgegebene Daten	Format
Terzschalldruckpegel aller Messpositionen und mittlerer Fremdgeräuschpegel	Diagramm
Mittlerer Gesamtschalldruckpegel im Fahrzeug	Einzahlwert
Terzschalldruckpegel aller Messpositionen in einem Segment und Fremdgeräuschpegel im Segment	Diagramme
Gesamtschalldruckpegel an den einzelnen Messpositionen im Segment	Einzahlwerte
Mittelwert Gesamtschalldruckpegel im Segment	Einzahlwert
Schalldruckpegelverteilung im Fahrzeug	Diagramm
Terzschalldruckpegeldifferenz zwischen Messwerten in einzelnen Segmenten	Diagramm

5.1.5 Ergebnisse

Aus dem in Abschnitt 5.4.2 beschriebenen Programm kann unter anderem die Schalldruckpegelverteilung im FGR des Fahrzeugs ausgegeben werden. Diese ist sowohl in den einzelnen Oktaven als auch als Gesamtpegel in Abbildung 8 dargestellt. Obwohl die Auflösung, der auf der Ordinate, in beiden Diagrammen identisch ist, sind die absoluten Schalldruckpegel an der gleichen Stelle in Diagramm A 15 dB höher als in Diagramm B. Die Messwerte des Wagenteils A wurden im Übergang gespiegelt, um das gesamte Fahrzeug abbilden zu können. Dies erleichtert im weiteren Verlauf den Vergleich mit der Prognose, da bei dieser das ganze Fahrzeug simuliert werden muss, um den Einfluss des Wagenteil B abzubilden.

Sowohl beim Gesamtpegel als auch bei den einzelnen Terzpegel, sind bei aktivem Deckenkanalsystem deutliche Maxima im Segment F3, in denen sich die Klimageräte befinden, zu sehen. Im Falle des Bodenkanalsystems ist dies ähnlich, aber nicht so deutlich. Durch das komplexere Kanalsystem wird hier der Schalldruckpegel gleichmäßiger verteilt. Im Bereich des Übergangs und umliegenden Segmenten stellt sich der höchste Pegel ein. Grund dafür sind die Luftauslässe, die den kürzesten Weg zum Lüfter haben. Diese befinden sich in

den Segmenten F5 und T2. Der Schalldruckpegel bei eingeschaltetem Deckenkanalsystem setzt sich hauptsächlich aus den Oktaven mit den Mittenfrequenzen von 500 bis 2000 Hz zusammen. Mit sinkender Frequenz nimmt auch der Beitrag zum Gesamtschalldruckpegel der einzelnen Frequenzbänder ab. Der Beitrag der Oktavbänder von 63 bis 250 Hz ist so gering, dass der Gesamtpegel maximal um 0,6 dB abfällt, wenn diese nicht hinzuaddiert werden. Beim Bodenkanalsystem ergibt sich ein ähnlicher Trend mit dem Unterschied, dass die Oktavbänder hier deutlich näher beieinander liegen. Die dominante Komponente im Gesamtpegel ist jedoch die Oktave mit der Mittenfrequenz 2000 Hz bzw. die Terz mit der Mittenfrequenz 2000 Hz (nicht in Abbildung 8 ersichtlich). Dies entsteht durch ein tonales Geräusch in diesem Bereich, welches aus einer Undichtigkeit in der Umluftansaugung hervorgeht.

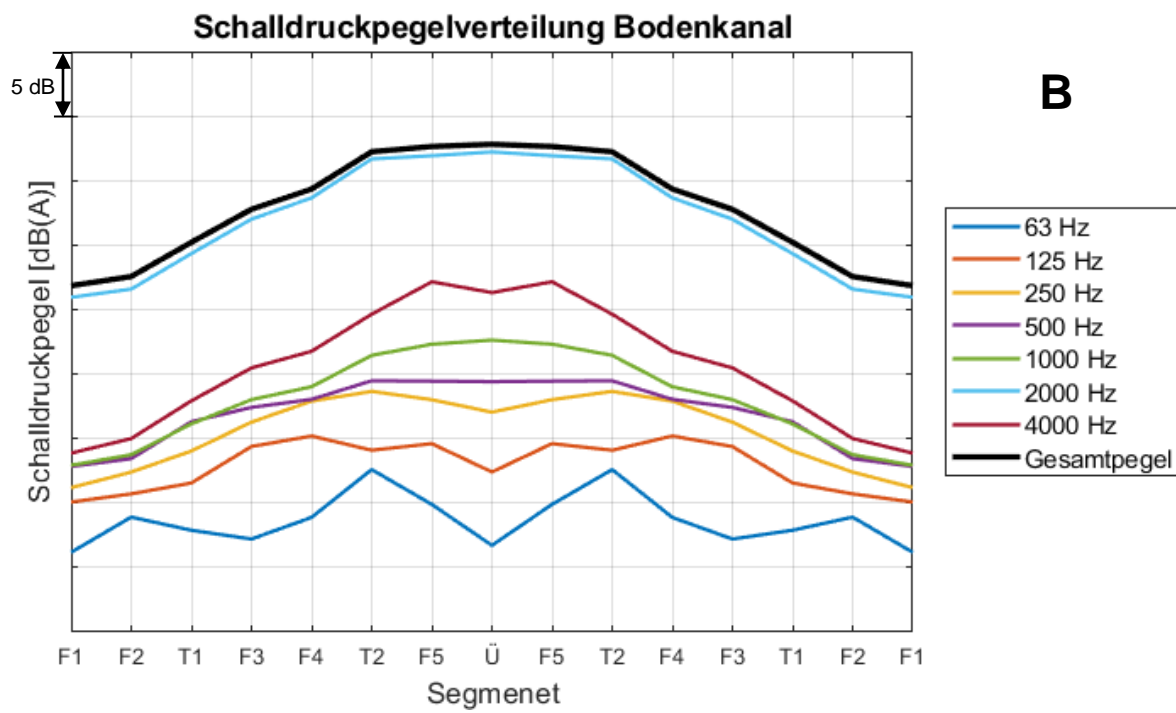
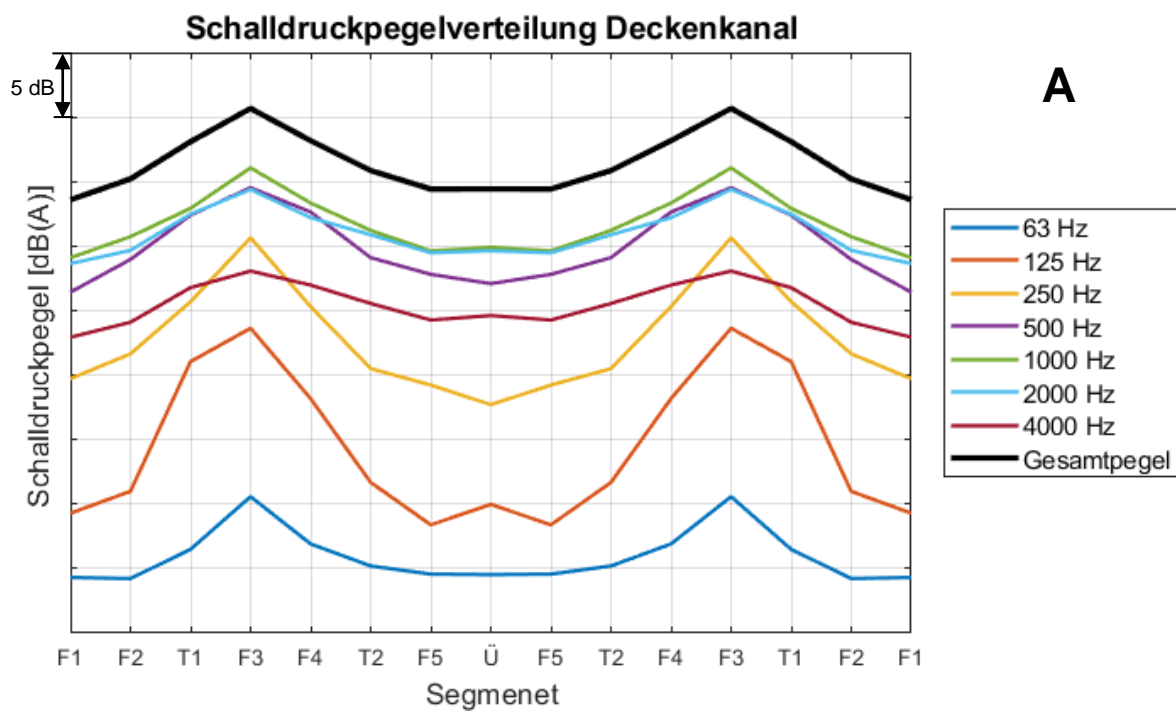


Abbildung 8: Schalldruckpegelverteilung im Fahrgastraum bei eingeschaltetem A - Deckenkanalsystem, B - Bodenkanalsystem ; Gesamtpegel aus Oktaven 63 bis 4000 Hz

5.2 Longitudinaler Schalldruckpegelabfall

Der Schalldruckpegelabfall über die Längsachse des Fahrzeugs ist eine Möglichkeit, um das Prognosemodell mit dem realen Fahrzeug zu vergleichen, ohne dass Daten zu den einzelnen Schallquellen am Fahrzeug notwendig sind. Es wird der Schalldruckpegelverlauf über die Längsachse eines Fahrzeugs ermittelt, der sich ergibt, wenn an einem Ende des FGR eine Schallquelle platziert wird. Für die Messung des Schalldruckpegelabfalls existieren keine Normen. Da das Verfahren mehrfach erfolgreich für diesen Anwendungszweck angewendet wurde (Forssén et al., 2012; Jang, 2017), dienen hier andere erfolgreiche Messaufbauten als Referenz.

5.2.1 Messaufbau

Bei der Messung des Schalldruckpegelabfalls unterschied sich der Messaufbau maßgeblich von allen anderen Messungen. Bei dieser Messung wurden die in Abschnitt 3.1 definierten Segmente ignoriert, da hier der Schalldruckpegel nach fest definierten Längenabschnitten von Interesse war. Des Weiteren wurde die Schalldruckpegelmessung hier nicht nur im Wagenteil A durchgeführt, sondern über den Übergang hinaus bis in Segment T2 des Wagenteil B. Grund dafür war die Vermutung aus vorangegangenen Messungen, dass der Übergang durch die Querschnittsänderung eine abschirmende Wirkung hat und so die Schallausbreitung zwischen den Wagenteilen vermindert (Rössel, 2022).

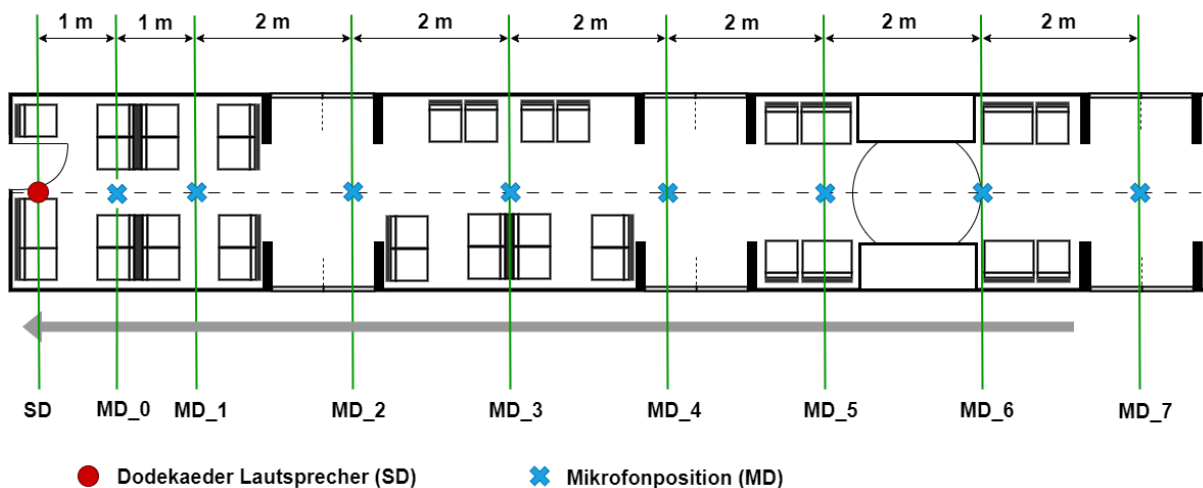


Abbildung 9: Messaufbau Schalldruckpegelabfall

Die Abbildung 9 zeigt die gewählten Messpositionen im FGR. Der rote Kreis markiert die Position des Dodekaederlautsprechers, welcher ca. 30 cm entfernt von der Trennwand zwischen FGR und FRR platziert wurde. Die Messpositionen wurden alle auf der Fahrzeugmittellinie platziert. Die erste Messposition befindet sich im Abstand von einem Meter

zur Schallquelle. Da die Schallleistung der Quelle nicht bekannt ist, dient dieser Messpunkt als Referenzwert für den Pegelunterschied an allen anderen Positionen und ist mit MD_0 betitelt. Das M steht dabei für die Mikrofonposition und das D für die Messreihe des Pegelabfalls (D vom engl. decay). Nach dem Referenzpunkt folgt in einem Meter Entfernung der erste Messpunkt MD_1, an dem tatsächlich eine Pegeldifferenz gemessen werden kann. Alle weiteren Punkte folgen in einem Abstand von jeweils zwei Metern. Der letzte Messpunkt MD_7 befindet sich in Segment T2 des Wagenteils B. Ein geringerer Abstand zwischen den Messpunkten bzw. das Fortführen der Messpunkte durch das gesamte Fahrzeug hätten die Genauigkeit der folgenden Auswertung erhöhen können. Jedoch musste bei der Messung ein Kompromiss aus Zeitaufwand und Nutzen gefunden werden, weshalb die Menge der Messpositionen begrenzt wurde. Die Höhe der Mikrofone und des Dodekaeders wurde auf 1,6 m eingestellt. Um an allen Messpositionen einen ausreichenden Störpegelabstand zu erreichen, wurde die Schallquelle auf ca. 96 dB(A) an Messposition MD_0 eingepegelt. An derselben Messposition konnte ein Fremdgeräuschpegel von ca. 34 dB(A) gemessen werden. Der Störpegelabstand lag an keiner Messposition unter 45 dB.

5.2.2 Datenauswertung

Die Auswertung erfolgt basierend auf dem in Abschnitt 5.1.4 beschriebenen Auswertungsskript. Dies übernimmt, wie auch beim Schalldruckpegelabfall, das Einlesen und Sortieren der Daten. Um dann aus den gemessenen Schalldruckpegelwerten zum Schalldruckpegelabfall zu kommen, wurde die Differenz aus dem Schalldruckpegel an der jeweiligen Messposition und der Referenzmessposition MD_0 gebildet. Anschließend wurde diese Schalldruckpegeldifferenzen ΔL_p gegenüber dem Abstand zum Referenzmesspunkt aufgetragen (Abbildung 10 und Abbildung 11) und über die MATLAB-Funktion „polyfit“ (basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate) eine Regressionsgerade $\widehat{\Delta L_p}$ auf Basis dieser Messwerte erzeugt. Die Steigung dieser Gerade ergab dann den Schalldruckpegelabfall in dB/m. Zur Abschätzung der Güte dieser Funktion wurde zusätzlich das Bestimmtheitsmaß R^2 (quadrierter Korrelationskoeffizient) berechnet. Da die verwendete polyfit-Funktion diesen nicht automatisch berechnet, wurde er manuell über die Gleichung (5.2) bestimmt.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta L_{p,i} - \widehat{\Delta L_{p,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\Delta L_{p,i} - \overline{\Delta L_{p,i}})^2} \quad (5.2)$$

Die Residuenquadratsumme (die Summe im Dividenden der Gleichung (5.2))

$$SQR = \sum_{i=1}^n (\Delta L_{p,i} - \widehat{\Delta L_{p,i}})^2 \quad (5.3)$$

wird dabei (radiziert) als Teilergebnis der polyfit-Funktion ausgegeben und muss nicht separat bestimmt werden (Fahrmeir et al., 2016; Mathworks). Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 erreichen. Ein Bestimmtheitsmaß von 1 entspricht dem Optimum und würde im hier vorliegenden Fall bedeuten, dass alle Messwerte genau auf der Regressionsgerade liegen. Ein Bestimmtheitsmaß von 0 hingegen sagt aus, dass die einzelnen Messungen nicht durch die Regressionsgerade erklärt werden können und demnach keine Korrelation zwischen Regression und Messpunkten vorliegt (Fahrmeir et al., 2016). Das Verfahren zur Bestimmung des Schalldruckpegelabfalls wurde sowohl in Terz- und Oktavbändern als auch für den Gesamtschalldruckpegel durchgeführt. Die Berechnung des Schalldruckpegelabfalls in Oktavbändern erfolgte über die Mittelung der Schalldruckpegeldifferenzen in den einzelnen Terzen und geht nicht aus einer Umrechnung der Terz- in Oktavpegel hervor.

5.2.3 Ergebnisse

Die Abbildung 11 zeigt den Schalldruckpegelverlauf im FGR in den Oktavbändern von 125 bis 4000 Hz. Der Verlauf des Gesamtpegels ist in gleicher Darstellung in Abbildung 10 dargestellt. In diesen Darstellungen wurde zusätzlich die Funktion der linearen Regression abgebildet und der das dazugehörige Bestimmtheitsmaß angegeben. Die Steigung der Funktion entspricht dem Schalldruckpegelabfall pro Meter. Sowohl bei den dargestellten Oktaven als auch beim Gesamtschalldruckpegel bewegen sich die Werte des Bestimmtheitsmaßes in einem Bereich zwischen 0,97 und 0,99 und deuten damit eine gute Übereinstimmung der Messwerte mit der Regressionsgeraden an. Bei der Betrachtung der einzelnen Messpunkte fällt auf, dass in allen Diagrammen ein deutlich niedrigerer Pegelunterschied zwischen den Messpunkten bei 7 und 9 m ist als bei den meisten anderen Messpunkten. Zwischen den Messpunkten bei 9 und 11 m befindet sich der Übergang. In einer vorangegangenen Arbeit wurde bereits vermutet, dass dieser eine abschirmende Wirkung hat, also die Schallausbreitung zwischen den beiden Fahrzeughälften begrenzt (Rössel, 2022). Dies hätte durch vermehrte Reflektionen am Übergang einen Pegelanstieg im Segment vor dem Übergang zur Folge und würde gleichzeitig für einen erhöhten Pegelabfall im Segment hinter dem Übergang sorgen. In fast allen Diagrammen, mit Ausnahme der 250 und der 4000 Hz Oktave, kann ein geminderte Pegeldifferenz zwischen den Messpunkten bei 7 und bei 9 m beobachtet werden. In der 500 Hz Oktave scheint das Phänomen verschoben zwischen 9 und 11 m aufzutreten in der 4000 Hz Oktave hingegen ist eine Verschiebung in die andere Richtung (zwischen die Messpunkte bei 5 und 7 m) erkennbar. Die genaue Ursache für die Abweichung ist nicht bekannt. Neben Messfehlern könnte sich hier auch der Einfluss der Windfänge bemerkbar machen, welche sich an der anderen Seite der am Übergang angrenzenden Segmente befinden und ebenfalls akustische Barrieren darstellen. Zusätzlich scheint der Schalldruckpegelabfall in nahezu allen Oktaven und auch beim Gesamtpegel vor dem Übergang höher zu sein als von der Regression angegeben. Dies ist unter anderem an daran erkennbar, dass sich fast alle Messpunkte unter der Regressionsgeraden befinden. Dieser Effekt ist aber gering. Der Einfluss auf die Steigung der Regression, wenn nur die Messwerte

vor dem Übergang betrachten werden, ist nicht eindeutig. Allgemein ist aber die vermutete Wirkung des Übergangs erkennbar, aber aufgrund der begrenzten Anzahl der Messwerte nicht genau beschreibbar. Auch, wenn die Veränderung der Pegelabweichung zwischen den Messwerten gering ist, sollte dieser Effekt, vor allem in Abhängigkeit von der Platzierung der Quelle, nicht außer Acht gelassen werden, wenn im Bereich des Übergangs ein unerwartetes Verhalten des Schalldruckpegels vermutet wird.

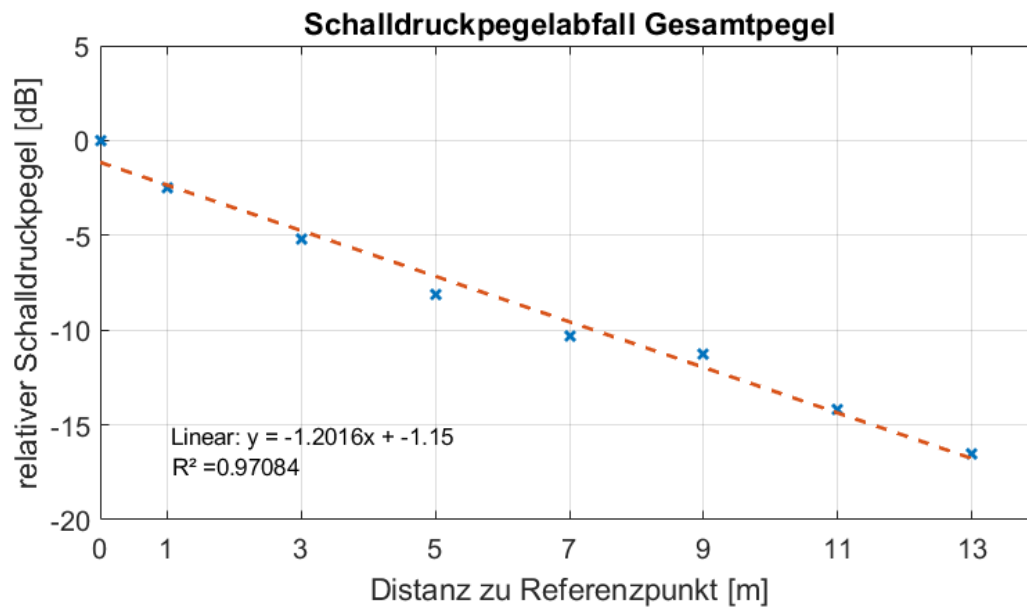


Abbildung 10: Gesamtschalldruckpegelabfall im FGR

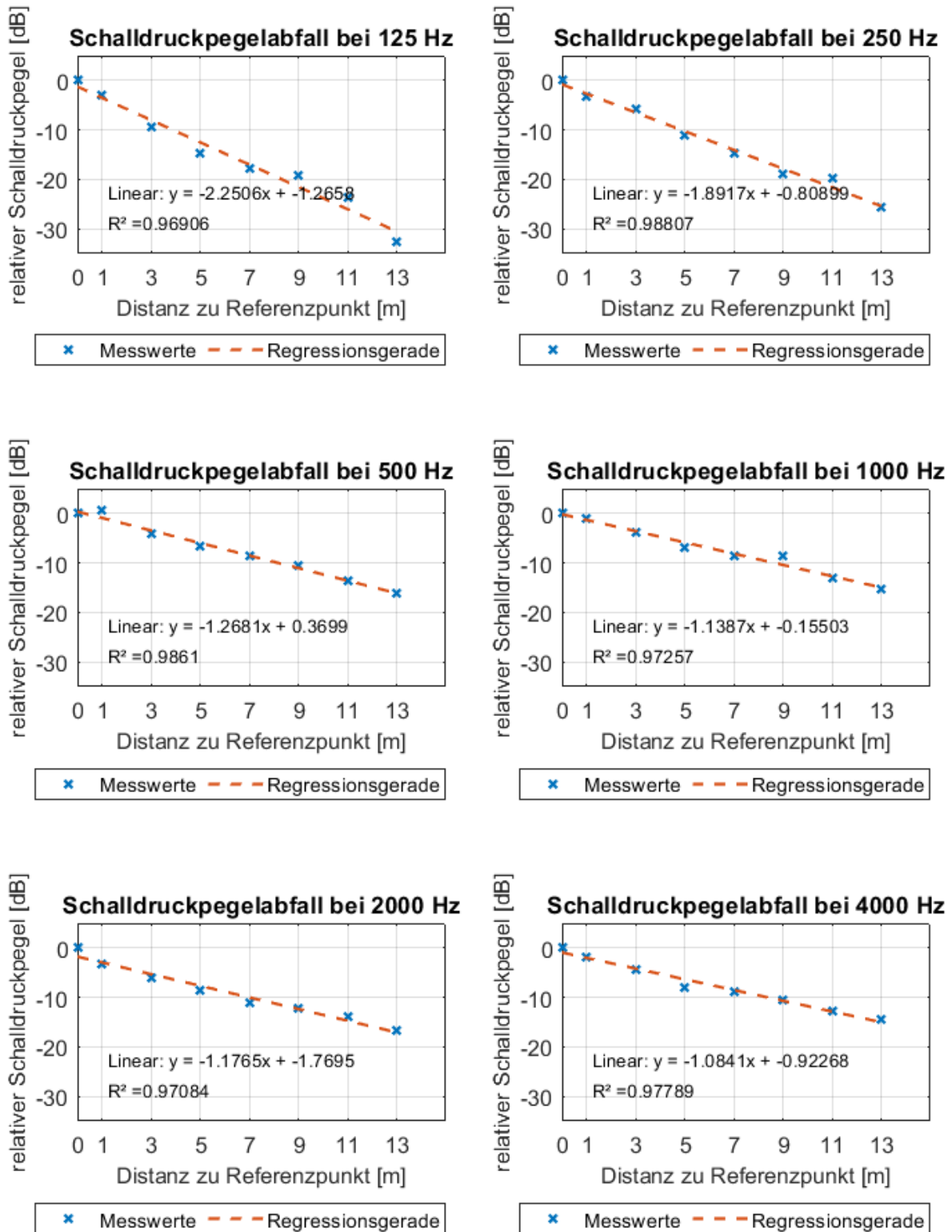


Abbildung 11: Schalldruckpegelabfall im FGR in Oktavbänder von 125 bis 4000 Hz

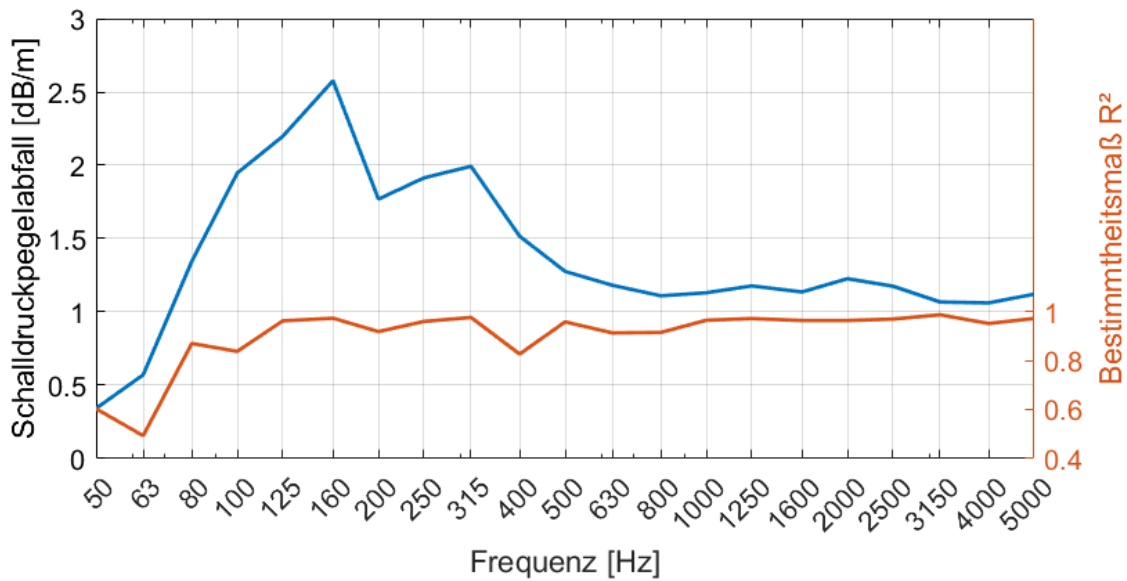


Abbildung 12: Schalldruckpegelabfall in Terzen (blau) und dazugehöriges Bestimmtheitsmaß (orange)

In Abbildung 12 ist der Schalldruckpegelabfall in dB/m für die einzelnen Terzen dargestellt. Zusätzlich wurde das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgeraden, aus denen dieser Wert hervorgeht, dargestellt. Der Schalldruckpegelabfall bewegt sich in allen Terzen zwischen 0,5 und 2,5 dB/m. In den tiefen Frequenzen bis 100 Hz liegt das Bestimmtheitsmaß bei Werten unter 0,8 und deutet somit eine verringerte Korrelation zwischen Messwerten und Regression an, als beispielsweise in den Funktionen in Abbildung 11. Bis auf die Terz bei 400 Hz werden in allen anderen Frequenzen Werte über 0,9 erreicht. Der Schalldruckpegelabfall steigt von 50 bis 160 Hz von unter 0,5 auf ca. 2,5 dB/m an und nimmt sonst mit steigender Frequenz ab. Angesichts der niedrigeren Werte des Bestimmtheitsmaßes im tieffrequenten Bereich können hier Messfehler vermutet werden. Zusätzlich ist das Schallfeld im tieffrequenten Bereich meist modendominiert, wodurch die Schalldruckpegelverteilung im Raum nicht gleichmäßig ist. Der Verlauf des Schalldruckpegelabfalls mit steigender Frequenz entspricht außerdem nicht dem Erwartungswert. Nach dem Modell von Redmore (Redmore, 1982) sollte der Schalldruckpegelabfall mit steigendem Absorptionsgrad ansteigen. Dies konnte unter anderem von Sun (Sun et al., 2022) und Jang (Jang, 2017) beobachtet werden. Dabei stellte aber auch Sun Abweichungen von dieser Erwartung in den Oktaven mit den Mittenfrequenzen 250 Hz und 4000 Hz fest. Dies entsprach der tiefsten und höchsten abgebildeten Oktave (Sun et al., 2022). Dadurch sollte sich in Abbildung 12 eine Funktion abbilden, die sich gegensätzlich zur Nachhallzeit im Raum bewegt. Dieser Trend ist hier nicht erkennbar. Die Nachhallzeit variiert aber über 250 Hz nur gering und folgt keinem eindeutigen Aufwärts- oder Abwärtstrend, weshalb ein solcher Zusammenhang hier schwer erkennbar wäre. Hierzu wäre eine größere Variation der Absorptionsfläche hilfreich.

5.3 Nachhallzeit

Die Nachhallzeitmessung dient in dieser Arbeit hauptsächlich zur Ermittlung passender Eingangsdaten für die Prognose. Ohne eine Messung der Nachhallzeit müssten Referenzwerte aus ähnlichen Fahrzeugen angenommen werden, die eine Bestimmung der Prognosegenauigkeit erschweren würden, da in diesem Fall nicht bekannt wäre, ob die Nachhallzeit im realen Fahrzeug anders ist und somit eventuelle Abweichung der Nachhallzeiten die Prognosegenauigkeit beeinflussen. Zusätzlich kann die bestimmte Nachhallzeit mit den Referenzwerten abgeglichen werden, um die Auswirkung in der Prognose zu bestimmen.

5.3.1 Messanforderungen

Da keine Normen für die Nachhallzeitmessungen in Schienenfahrzeugen existieren, wurde bei dieser Messung auf die DIN EN ISO 3382-2 (DIN EN ISO 3382-2), die die Nachhallzeitmessung in gewöhnlichen Räumen beschreibt, zurückgegriffen. Für die Messung der Nachhallzeit existieren nach dieser Norm verschiedene Varianten. Demnach wird in Kurz-, Standard-, und Präzisionsmessung unterscheiden. Der Unterschied zwischen diesen Verfahren besteht hauptsächlich in der Anzahl der gemessenen Kombinationen aus Sender- und Empfängerpositionen. Zusätzlich wird mit steigenden Genauigkeitsansprüchen die Anzahl der Abklingvorgänge des Signals erhöht. Beim Kurzverfahren wird daher nur ein Abklingvorgang vorausgesetzt. Beim Präzisionsverfahren hingegen müssen 3 Abklingvorgänge gemessen und gemittelt werden. Eine vollständige Auflistung an die Anforderungen der Sender und Mikrofonpositionen ist in Tabelle 3 dargestellt. Bei komplexen Raumgeometrien sind zusätzliche Sender-Mikrofon-Positionen zu wählen.

Tabelle 3: Mindestanzahl der Messpunkte und Messungen bei der Nachhallzeitmessung nach DIN EN ISO 3382-2 (DIN EN ISO 3382-2)

	Kurz	Standard	Präzision
Sender-Mikrofon-Kombinationen	2	6	12
Senderpositionen	≥1	≥2	≥2
Mikrofonpositionen	≥2	≥2	≥3
Anzahl der Abklingvorgänge an jeder Position	1	2	3

Um die Nachhallzeit ausreichend genau bestimmen zu können, sollen in der hier vorliegenden Arbeit mindestens die Anforderungen für das Standardmessverfahren erfüllt werden. Die Messgröße der Nachhallzeit ist der Abfall des stationären Schalldruckpegels im Raum um 60 dB. In der Praxis ist es aufgrund des Einflusses von Fremdschall selten möglich diesen Dynamikumfang zu messen, weswegen auf die Messung des Pegelabfalls von 20 oder 30 dB ausgewichen wird und die Ergebnisse auf 60 dB interpoliert werden. Diese Nachhallzeiten werden mit T_{20} oder T_{30} gekennzeichnet. Bei der Messung wird ein Fremdpegelabstand von 10 dB vorausgesetzt. Zusätzlich werden die ersten 5 dB des Pegelabfalls als Auslöser für den Messbeginn benötigt und danach erst der Abfall über den gewählten Dynamikbereich gemessen. Aus diesen Voraussetzungen ergibt sich ein Fremdpegelabstand von 35 dB bei Messung der T_{20} bzw. 45 dB bei der Messung der T_{30} Nachhallzeit. Als Signal kann ein weißes oder rosa Rauschen verwendet werden, welches von einer ungerichteten Schallquelle ausgegeben wird. Das Signal soll den Raum bei einem Präzisionsmessverfahren mindestens mit der halben Nachhallzeit angeregt werden, damit das Schallfeld einen stationären Zustand erreichen kann. Bei großen Raumvolumen sollte die Anregungsphase einige Sekunden dauern. Beim Kurzverfahren ist es ausreichend, den Raum mit einer Impulsquelle anzuregen. Die Messpunkte können im Raum weitestgehend frei gewählt werden. Im Optimalfall sind Sende- und Mikrofonposition an die übliche Nutzung des Raumes angepasst. Der Abstand der Messpositionen zu reflektierenden Flächen soll mindestens ein Viertel der Wellenlänge der tiefsten betrachteten Frequenz betragen. Bei einer Messung ab 100 Hz aufwärts werden hier meist 1 m gewählt. Im FGR einer Straßenbahn sind durch die geringe Breite und Höhe sowie zahlreiche Objekte im Raum solche Abstände zwischen Messposition und reflektierenden Flächen oft nicht realisierbar, weswegen in diesem Fall auf einen verringerten Mindestabstand ausgewichen werden muss. Zusätzlich sollten Messpositionen außerhalb des Direktschallfelds der Quelle platziert werden. (DIN EN ISO 3382-2)

5.3.2 Messaufbau

Die Nachhallzeit in der hier vorliegenden Arbeit in Form der T_{20} Nachhallzeit gemessen. Es sollten mindestens die Anforderungen für ein Standardverfahren erfüllt sein. Da die DIN EN ISO für komplexe Raum Geometrien mehr als die in Tabelle 3 vorgegebene Sender-Mikrofonpositionen vorschreibt aber nicht weiter darauf eingeht welche Räume in diese Kategorie fallen, wurde der FGR der Straßenbahn als solche komplexe Raumgeometrie angenommen. Der Aufbau der Raumbegrenzungsflächen gleicht zwar dem eines Quaders, aber durch die erhöhte Länge und die hohe Anzahl an Objekten im Innenraum wird die Raumgeometrie komplexer. Als Referenz für einen normalen Raum diente die Vorgaben der Gleichungen (2.1) und (2.3). Diese basieren jeweils auf einem maximalen Verhältnis von längster zu kürzester Raumdimension von 3:1. Dieses Verhältnis liegt im vorliegenden Fahrgastraum ca. von 6:1. Daher wurde die Anzahl der Sender-Mikrofonpositionen verdoppelt, um mindestens das Niveau des Standardverfahrens zu erreichen. Dadurch ergaben sich, wie in Abbildung 13 dargestellt, 4 Mikrofon- und 3 Senderpositionen. Es wurden zudem 3

Abklingvorgänge des Signals an jedem Messposition gemessen, da der Zeitaufwand für diesen Präzisionsgewinn deutlich geringer ist als eine weitere Messpositionen zu wählen. Die einzelnen Mikrofonpositionen gleichen einzelnen Mikrofonpositionen der Schalldruckpegelmessung aus Abschnitt 5.1. Es wurde versucht mit den verschiedene Mikrofon- und Senderpositionen den Fahrgastraum möglichst vollständig abzubilden. Daher wurden in allen Funktionsbereichen des Fahrzeugs, also Sitz-, Tür-, und Übergangsbereich Sender und Empfängerpositionen gewählt. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass sowohl Sender als auch Mikrofone nicht nur am Rand, sondern auch mit mindestens einer Position in der Fahrzeugmitte, gemessen wurden. Alle Messpositionen dieser Messung wurden auf einer Höhe von 1,6 m durchgeführt. Als Anregungssignal diente ein rosa Rauschen. Die Benennung der Positionen erfolge mit „M“ oder „S“ für Mikrofon oder Sender, einem T für die Nachhallzeit und dem Segment, in dem sich die Messposition befand. Dadurch ergibt sich beispielsweise die Benennung „ST_F1“ für die Position des Dodekaeders im Segment F1.

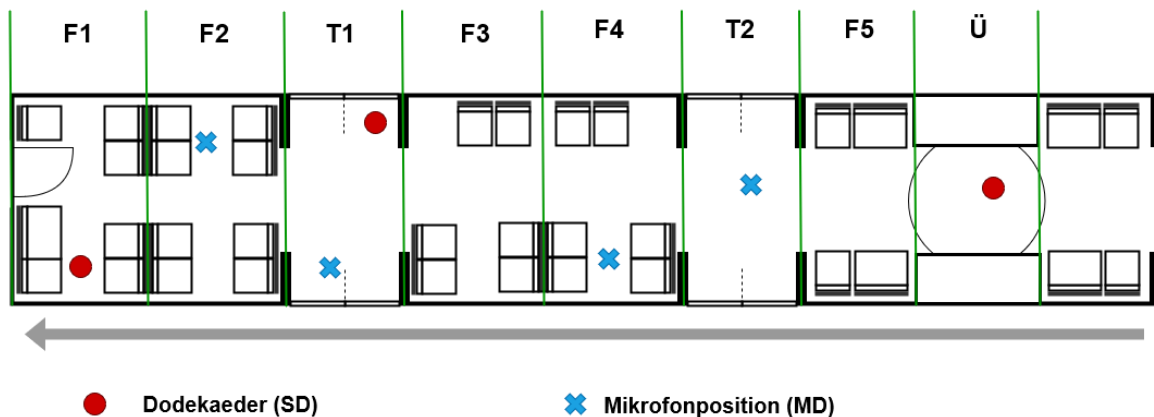


Abbildung 13: Messaufbau Nachhallzeit

5.3.3 Datenauswertung

Das Einlesen der Daten erfolgte mit dem Auswertungsskript, welches bereits in Abschnitt 5.1.4 beschrieben wurde. Das Darstellen der Nachhallzeitwerte wurden für das gesamte Fahrzeug gemittelt und in Terzen dargestellt. In tiefen Frequenzen dominiert das Abklingverhalten der einzelnen Raummoden den Nachhall. Da die Nachhallzeitwerte in tiefen Frequenzen stark von Nachhallzeiten in Referenzfahrzeugen abwichen, wurden zusätzliche Maßnahmen zur Auswertung vorgenommen. Sun (Sun et al., 2022) konnte aus 5 gemessenen Fahrzeugen einen Zusammenhang zwischen Schalldruckpegelabfall und Nachhallzeit feststellen. Dieser wurde aus dem Curve-Fitting der Daten für den Schalldruckpegelabfall und der Nachhallzeit in Oktaven bestimmt und mit Gleichung (5.4) angegeben.

$$\Delta = 0.75 \cdot T^{-0.75} \quad (5.4)$$

Um diesen Zusammenhang zu prüfen und die Nachhallzeiten zu verifizieren, wurden auch für das hier dargestellte Fahrzeug die Oktav- und Terzbandwert der Nachhallzeit und des Schalldruckpegelabfalls in einem Diagramm neben der Funktion aus Gleichung (5.4) dargestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 zu sehen. Im weiteren Verlauf wurden Datenpunkte die mehr als 0.5 dB/m vom vorgegebenen Zusammenhang nach Gleichung (5.4) abwichen markiert und in der weiteren Auswertung ignoriert. Wie bereits vermutet betraf dies vor allem Werte aus den tiefen Frequenzen. Mithilfe der MATLAB Curve-Fitting-Toolbox wurde nun über die Methode der kleinsten Quadrate eine Funktion erzeugt, die den Zusammenhang zwischen Nachhallzeit und Schalldruckpegelabfall darstellt. Die Wahl der Toolbox, gegenüber der vorher verwendeten polyfit-Funktion erfolgte hier, da die Toolbox zusätzlich zu Polynomen auch andere Funktionen, wie die hier verwendet Potenzfunktion unterstützt. Als Referenz wurde eine Potenzfunktion ersten Grades, wie auch in Gleichung (5.4), verwendet. Die entstandene Funktion wurde ebenfalls in das Diagramm mit eingezeichnet. Das Bestimmtheitsmaß R^2 (hier direkt aus dem Ergebnis entnehmbar) lag bei 0,92 für den Fit der Oktavdaten und bei 0,72 beim Fit der Terzdaten.

5.3.4 Ergebnisse

Die gemessenen Nachhallzeit ist gemittelt über alle Messpositionen in Abbildung 14 dargestellt. Wie bereits erwähnt entspricht der Anstieg in tiefen Frequenzen nicht der Erwartung und deckt sich auch nicht mit Referenzwerten. Ab 400 Hz stimmen die Messergebnisse gut mit Referenzwerten überein. Hingegen sind die Nachhallzeiten unter 200 Hz zum Teil doppelt so hoch wie in vergleichbaren Fahrzeugen. Zwar könnte dies auch auf das Abklingverhalten von Moden zurückzuführen sein, da das Schallfeld im tieffrequenten Bereich nicht als diffus angenommen wird, jedoch sollte dann auch in ähnlichen Fahrzeugen ein solcher Effekt beobachtet werden können. Zu weiteren Verifizierung der Nachhallzeiten dient das in Abschnitt 5.3.3 beschriebene Verfahren.

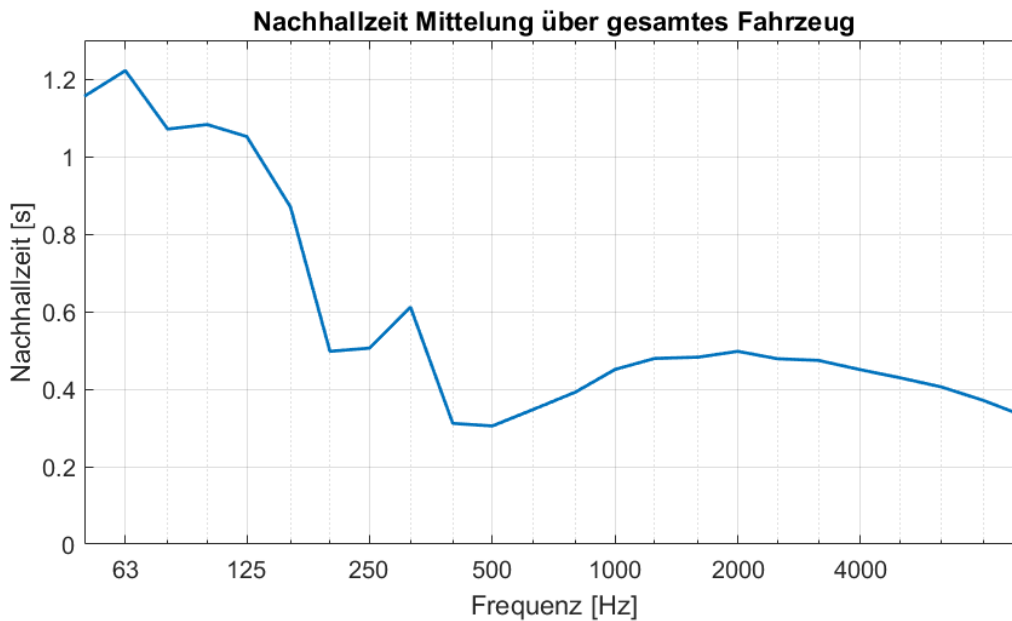


Abbildung 14: Nachhallzeit im FGR

In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind Ergebnisse des in Abschnitt 5.3.3 beschriebenen Auswertungsverfahrens mit den Daten aus Terzen und Oktaven dargestellt. In Tabelle 4 sind zusätzlich die Ergebnisse und die entfernten Datensätze zusammengefasst. Beim Vergleich der Regressionen aus der Messung und mit dem von Zusammenhang aus Gleichung (5.4) ist eine Ähnlichkeit zwischen den Funktionen erkennbar. Die Regression aus den Terzdaten scheint dabei im betrachteten Bereich fast parallel zur Referenzfunktion zu verlaufen. Bei den Oktavpegeln liegen die Funktionen im Bereich der kurzen Nachhallzeiten (mittlere und hohe Frequenzen) näher beieinander, die Exponenten der Funktion unterscheiden sich aber stärker. Durch die Streuung der Werte, vor allem im Terzbereich, wird klar, dass diese Gleichung nicht zur Umrechnung zwischen Nachhallzeit und Schalldruckpegelabfall dient. Dies geht bereits aus den Daten von Sun (Sun et al., 2022) hervor, bei denen erkennbar ist, dass die einzelnen Fahrzeuge zum Teil deutlich von der Regression abweichen. Zur Verdeutlichung wurde in Abbildung 16 die Regression für, dass ähnlichste der fünf vermessenen Fahrzeuge dargestellt. Es ist erkennbar, dass diese deutlich vom vorgegebenen Zusammenhang abweicht. Aus den Messdaten der hier vorliegenden Arbeit sind vor allem die Werte aus den tiefen Frequenzbereichen weit von der vorgegebenen Gleichung entfernt. Die könnte unter anderem daran liegen, dass das Schallfeld im FGR in diesem Bereich nicht diffus ist. Einige der tieffrequenten Messwerte (bei 50 bis 80 Hz) liegen jedoch im gewählten Toleranzbereich. Unter der Annahme, dass das modendominierte Schallfeld im tieffrequenten Bereich der Grund für die starken Abweichung ist, gibt es keinen ersichtlichen Grund, dass dieser Messwerte besser mit der vorgegebenen Regression korrelieren. Hier ist davon auszugehen, dass die Messwerte zufällig, so gut übereinstimmen. Würden diese Messwerte ebenfalls aus

der Auswertung entfernt werden, entspräche die Regression näherungsweise der von der Regression des Referenzfahrzeugs von Sun (Sun et al., 2022). Die Regressionen der Terz- und Oktavwerte liegen erwartungsgemäß nah beieinander, trotz dem niedrigeren Wert des Bestimmtheitsmaßes der Terzdaten. Die Daten der tiefen Frequenzen liegen jedoch in jedem betrachteten Fall, weit entfernt von den Erwartungswerten, wodurch sich die Vermutung bestätigt, dass diese nicht plausibel sind. Neben der bereits genannten, fehlenden Diffusität kommt hier zusätzlich ein geringer Fremdgeräuschabstand als Fehlerquelle hinzu. Der verwendete Dodekaederlautsprecher kann tieffrequent nur wenig Leistung abstrahlen. Dadurch konnte der geforderte Fremdpegelabstand in tiefen Frequenzen in einzelnen Messungen nicht erreicht werden und bringt eine zusätzliche Unsicherheit mit ein. Ab ca. 400 Hz liegen alle Werte nah am Erwartungswert und stimmen mit Referenzwerten überein.

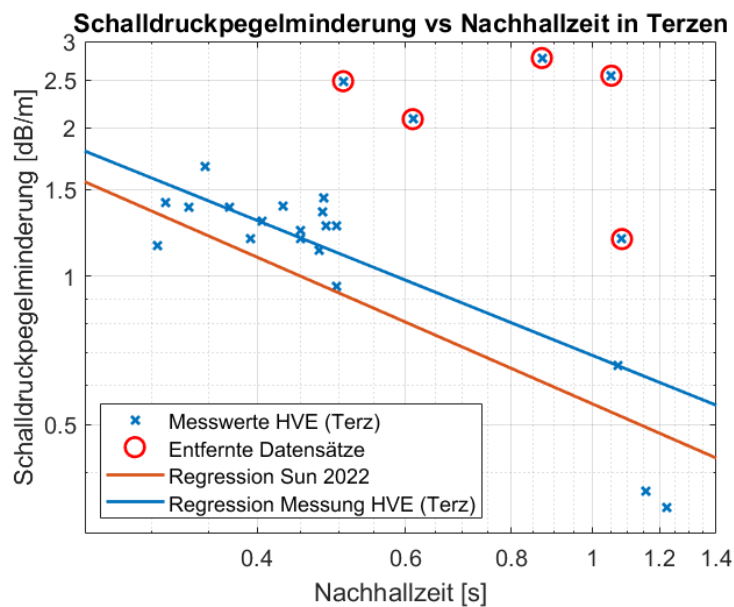


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Nachhallzeit in Terzen von 50 bis 5000 Hz ($R^2 = 0,72$ Regression HVE)

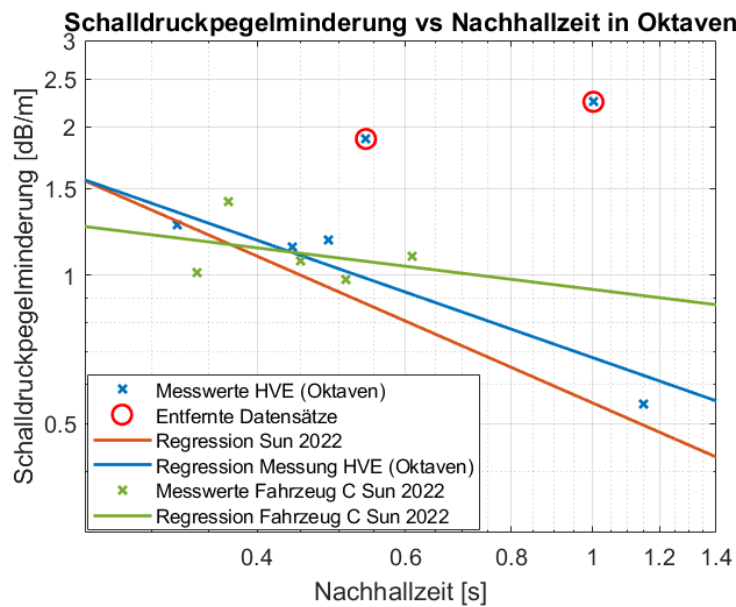


Abbildung 16: Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Nachhallzeit in Oktaven von 63 bis 4000 Hz ($R^2 = 0,92$)

Tabelle 4: Zusammenfassung der Curve-Fitting-Ergebnisse und Ergebnis von Sun (Sun et al., 2022)

Datensatz	Regression	Bestimmtheitsmaß	entfernte Datensätze [Hz]
Terzen	$\Delta = 0.69 \cdot T^{-0.69}$	0,72	100, 125, 160, 250, 315
Oktaven	$\Delta = 0.68 \cdot T^{-0.6}$	0,92	125, 250
Sun (Oktaven)	$\Delta = 0.55 \cdot T^{-0.75}$	-	-

5.4 Schalleistungspegel der Luftauslässe

Die Schalleistung der der Luftauslässe soll als Eingangswert für die Prognose dienen und charakterisieren, welche Schalleistung an welchem Punkt in den FGR eingeleitet wird. Dies ist notwendig, um das Prognosemodell mit realen Daten aufzubauen. Es existieren zwar Schalleistungswerte für die Klimageräte, durch die unbekannte Auswirkung des angeschlossenen Kanalsystems ist jedoch unklar wie groß die tatsächlich im FGR ankommende Leistung ist. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ebenfalls versucht die Durchgangsdämpfung der Klimakanäle durch Finite-Element-Analysen und analytische

Rechnungen zu bestimmen. Dies wird aber aufgrund des Umfangs und der begrenzten zeitlichen Rahmung nicht in dieser Arbeit abgebildet.

5.4.1 Messaufbau

Das Deckenkanalsystem verteilt die Luft über Lochbleche im FGR. In Abbildung 17 ist das Deckenkanalsystem zu sehen, in dem die Bereiche mit Lochung markiert wurden. Das Klimagerät leitet die Luft in Segment F3 in das Kanalsystem ein. Von dort aus verteilt sich auch der Schalldruckpegel in beide Richtungen. Um die von den einzelnen Lochflächen ausgehende Schalleistung zu messen, wurde an jeder Lochfläche zwei Messpositionen angesetzt. Eine Messposition an der nächsten Stelle zur Quelle und eine weitere an der entferntesten. Mit einer Mittelwertbildung aus den beiden, soll so der mittlere Schalldruckpegel an der Lochfläche bestimmt werden. Im Segment F3, über dem das Klimagerät sitzt, wurde eine zusätzliche Messposition direkt unter dem Klimagerät gewählt, da dort in diesem Segment der maximale Pegel vermutete wurde. Die Messpositionen befanden sich ca. 10 cm unter der Lochplatte und ca. 5 bis 10 cm vom Rand der Lochfläche in Richtung der Flächenmitte entfernt. Dabei wurde beachtet, dass an den Messpositionen des Mikrofons kein Luftstrom spürbar ist.

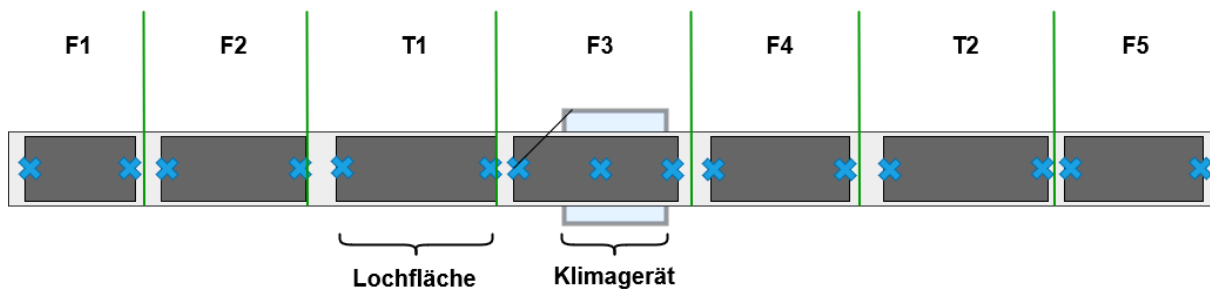


Abbildung 17: Messpositionen Deckenkanalsystem (Ansicht von unten)

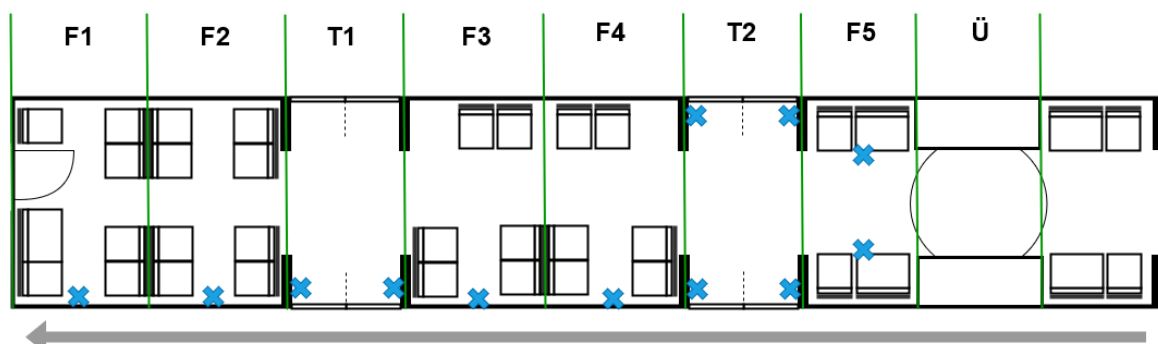


Abbildung 18: Messpositionen Bodenkanalsystem

Die Abbildung 18 zeigt die Messpunkte am Bodenkanalsystem. Höhe der Messposition wurde auf der Höhe der Mitte, der Luftauslässe gewählt. Dieser Betrag zwischen 5 und 25 cm über dem Boden des FGR. Das Mikrofon wurde an allen Positionen ca. 10 cm entfernt vom Luftauslass positioniert. Eine Ausnahme bildeten hier die Messpositionen zwischen den Sitzen in F1 bis 4. Das Kanalsystem bläst hier die Luft nach unten aus. Unter dem Klimakanal ist die Verbindung zwischen Seitenwand und Boden abgerundet, sodass eine Platzierung des Mikrofon direkt unter dem Kanalauslass erschwert wird. Stattdessen wurde angenommen, dass die Fläche vertikal unter der Seitenwand des Klimakanals den neuen Luftauslass bildet. Diese Fläche ist vollständig offen und hat keinerlei Auslassgitter. Die Messposition wurde ca. 5 cm entfernt von dieser Fläche gewählt. Der Aufbau ist in Abbildung 19 verdeutlicht. Das Bodenkanalsystem besteht aus zwei Kanälen, die weitestgehend identisch sind. In den Segmenten T2 und F5 gibt es jedoch Abweichungen, die von aus dem FGR nicht ersichtlich sind. Unter anderem befindet sich in F5 nur auf der linken Seite des FGR ein Luftauslass des Bodenkanals. Auf der rechten Seite befindet sich ebenfalls ein Lüftungsgitter hinter dem die Umluftansaugung liegt. Aus diesem Grund wurden in F5 und T2 auch Messpositionen am rechten Bodenkanal festgelegt. An den weiteren Positionen war keine Änderung der ausgehenden Schalleistung zu erwarten. Dies konnte durch Finite Element-Simulationen bestätigt werden. Auch am Bodenkanal wurde darauf geachtet, dass an allen Mikrofonpositionen kein spürbarer Luftstrom vorhanden ist.

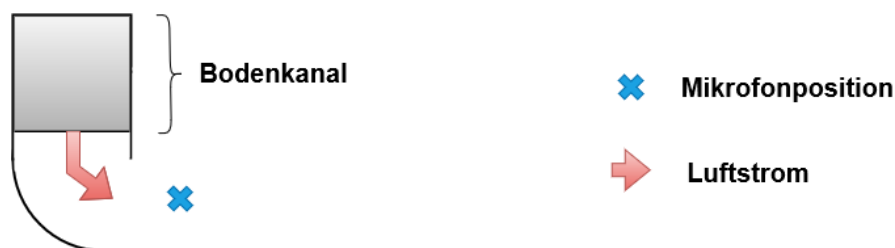


Abbildung 19: Querschnitt des Luftauslasses im Sitzbereich

Bei der Messung fiel subjektiv auf, dass die primäre wahrnehmbare Schallquelle im Deckenkanal der Luftauslass in F3 ist. Selbst am an den Enden des Deckenkanals F1 und F5 war nur der Luftauslass aus F3 hörbar. Aus Finiten-Element-Simulationen des Kanalsystems war zusätzlich bekannt, dass die Durchgangsdämpfung im Deckenkanal größer ist als der Schalldruckpegelabfall bei Ausbreitung im FGR. Aus diesem Grund konnte der Schalldruckpegel, der vom Auslass des Deckenkanals ausgeht, nicht isoliert bestimmt werden. Es wurden trotzdem an allen geplanten Messpositionen gemessen. Die Messung hätte durch eine Abschirmung der einzelnen Luftauslässe oder durch die Verwendung von Messgeräten, die die Richtcharakteristik des Schalls erfassen, wie z.B. einer Schallintensitätssonde, verbessert werden können. Die war zum Zeitpunkt der Messung jedoch nicht möglich.

Im Bodenkanal ergaben sich ähnliche Probleme. Hier war ein tonales Geräusch, welches von der Umluftansaugung ausging, an den meisten Messpositionen dominant. Die Messpositionen, an denen das Geräusch aus den Luftauslässen wahrnehmbar war, wurden im Messprotokoll vermerkt.

5.4.2 Datenauswertung

Die Dateneinlese erfolgte basierend auf dem Auswertungsskript aus 5.1.4. Kanäle auf der rechten und linken Seite des FGR wurden getrennt voneinander ausgewertet. An Luftauslässen, an denen mehrere Messpunkte vergeben waren (dies betraf nur den Deckenkanal), wurden die Schalldruckpegel der Einzelmessungen gemittelt. Die Zuweisung der Messungen zu einzelnen Luftauslässen erfolgte manuell. Im rechten Kanal wurde angenommen, dass die Werte, der nicht vermessenen Luftauslässe identisch mit denen am linken Kanal sind. Anschließend wurde aus dem Schalldruckpegel die Schalleistung mit Gleichung (2.8) bestimmt. Als Fläche der Quelle wurde die gesamte mit Löchern durchsetzt Fläche verwendet. Die jeweils äußeren Löcher bildeten dabei die Außenbegrenzung. Im Bodenkanal wurde anschließend die Schalleistungen aller Auslässe in einem Segment summiert. Das Addieren der Schalleistung aus den beiden Bodenkanäle erfolge erst im Prognosemodell.

5.4.3 Ergebnisse

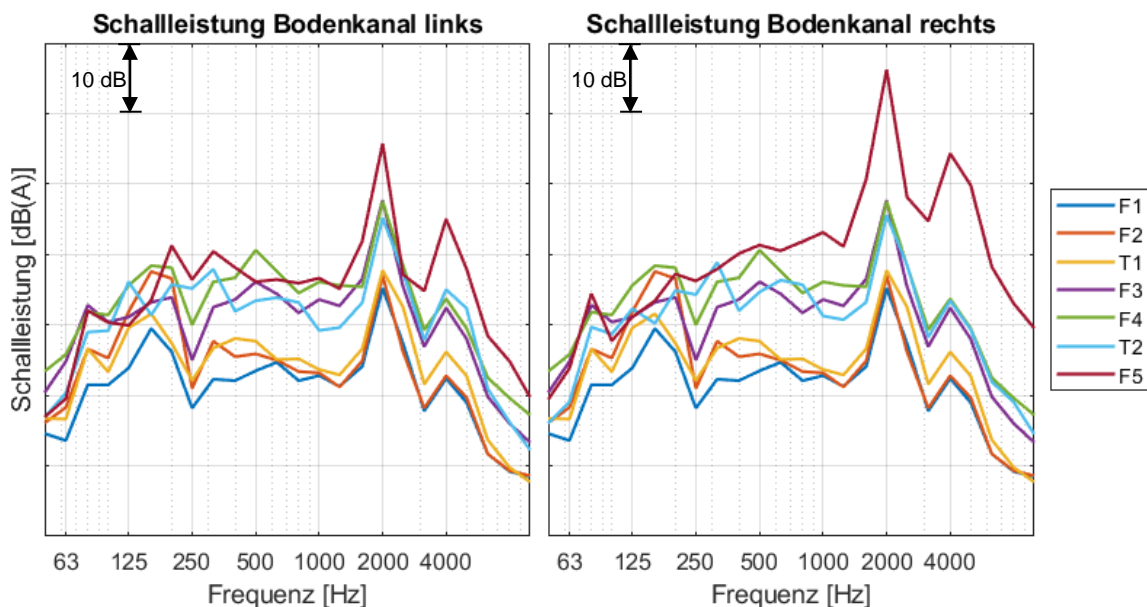


Abbildung 20: Schalleistungspegel in Terzen an Luftauslässen des Bodenkanalsystems

In Abbildung 20 sind die Schalleistungspegel ausgehend vom Bodenkanalsystem zu sehen. Die Skalen der Ordinaten sind in beiden Diagrammen identisch, sodass ein Direktvergleich der Pegel möglich ist. Auffällig ist vor allem die Schalleistung in Segment F5. Diese entstammt der Umluftansaugung, die auch als primäre Schallquelle wahrgenommen wurde. Das tonale Geräusch liegt in der 2000-Hz-Terz und übersteigt die Schalleistung in den anderen Terzen deutlich. Auch an allen anderen Messpositionen ist der Einfluss dieses Geräusches zu erkennen. Aus vorherigen Messungen an einem Fahrzeug, derselben Baureihe ist bekannt, dass diese Pegelspitze bei 2000 Hz nicht vom Klimagerät ausgeht, sondern nur durch das Geräusch der Umluftansaugung entsteht. An diesem Fahrzeug konnte zudem beobachtet werden, dass durch das Beheben der Undichtigkeit, die Pegelspitze bei 2000 Hz verschwand, das restliche Spektrum sich aber nur geringfügig veränderte. Mit steigender Distanz zur Umluftansaugung konnten hier auch vermehrt Einflüsse der einzelnen Luftauslässe gemessen werden. Dies ist daran ersichtlich, dass sich das Spektrum verändert. Deutlich zu erkennen ist dies vor allem in den Segmenten F1, F2, und T1. Ein Berechnen der tatsächlichen Schalleistung der einzelnen Luftauslässe ist aber weiterhin nicht möglich.

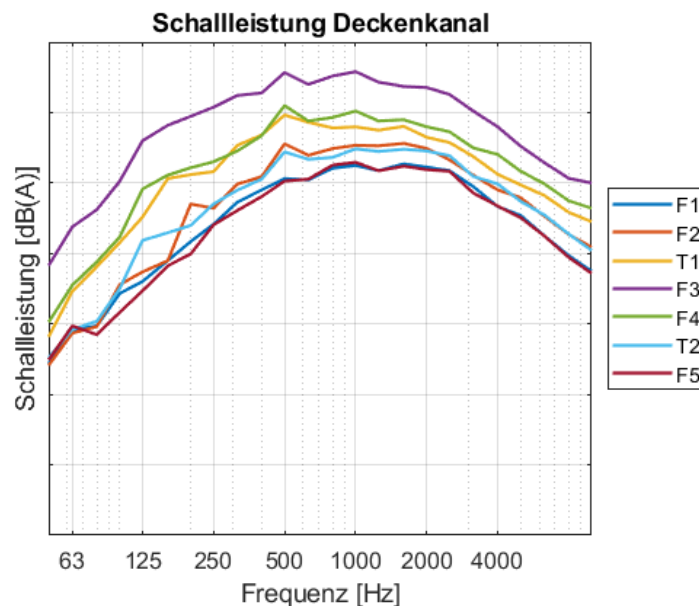


Abbildung 21: Schalleistungspegel im Deckenkanal

In der Abbildung 21 ist das Ergebnis der Schalleistungsmessung im Deckenkanal zu sehen. Wie bereits subjektiv wahrgenommen, wird die Schalleistung hauptsächlich in F3 dem FGR zugeführt. In den anderen Segmenten wird deutlich, dass der gemessene Schalldruckpegel gleichmäßig mit der Entfernung abnimmt. Gut zu erkennen ist, dass Segmente, die weiter von der Quelle in F3 entfernt sind, einen verringerten Pegel bei einem kaum veränderten Spektrum zeigen. Segmente mit ähnlichen Distanzen zur Quelle weisen einen ähnlichen Pegel auf.

6 Auswertung

6.1 Diffusität des Schallfeldes im Fahrgastraum

6.1.1 Variation des Schalldruckpegels

Die Abbildung 22 zeigt die Differenz zwischen maximal und minimal gemessenen Schalldruckpegel innerhalb eines Segments. Diese Werte wurden bei der Auswertung der Schalldruckpegeldaten aus Abschnitt 5.1 gesammelt. In der Abbildung ist dann der Maximal-, Minimal-, und Mittelwert dieser Differenz aus allen Abschnitten in der entsprechenden Oktave dargestellt. Im optimalen, diffusen Schallfeld ist der Schalldruckpegel bei ausreichendem Abstand zu Schallquelle und zu reflektierenden Flächen, an jedem Ort im Raum identisch (Schirmer & Hübelt, 2022). In der Realität werden Schallfelder meist ab einer bestimmten Frequenz (Schröder-Eck-Frequenz) nur als ausreichend diffus deklariert - entsprechen also nicht dem optimalen Diffusfeld. Um zu prüfen, ob die Variation des Schalldruckpegels im FGR in den einzelnen Segmenten klein genug ist, um mit räumlichen Mittelwerten näherungsweise den Schalldruckpegel für ein ganzes Segment zu beschreiben, wurde der Zusammenhang in Abbildung 22 aufgetragen. In der Abbildung ist zu erkennen, dass sowohl der Mittelwert als auch die Extremwerte der Schalldruckpegelvariation mit steigender Frequenz sinken. Ab 1000 Hz ist der Mittelwert unterhalb von einem dB und scheint sich nahe einem Grenzwert zu befinden. Die Pegelvariation sinkt ab diesem Punkt nur noch minimal. Ab ca. 500 Hz ist mit einer maximalen Schalldruckpegelvariation von 2,5 dB oder weniger zu rechnen. Damit ist der Schalldruckpegel nicht an jedem Ort im Segment gleich. Die Abweichungen zwischen den verschiedenen Positionen sind aber klein genug, um den Schalldruckpegel im vorliegenden Beispiel über einen räumlichen Mittelwert zu beschreiben. Zusätzlich stützt dies die These einer ausreichend Diffusität in einzelnen Segmenten.

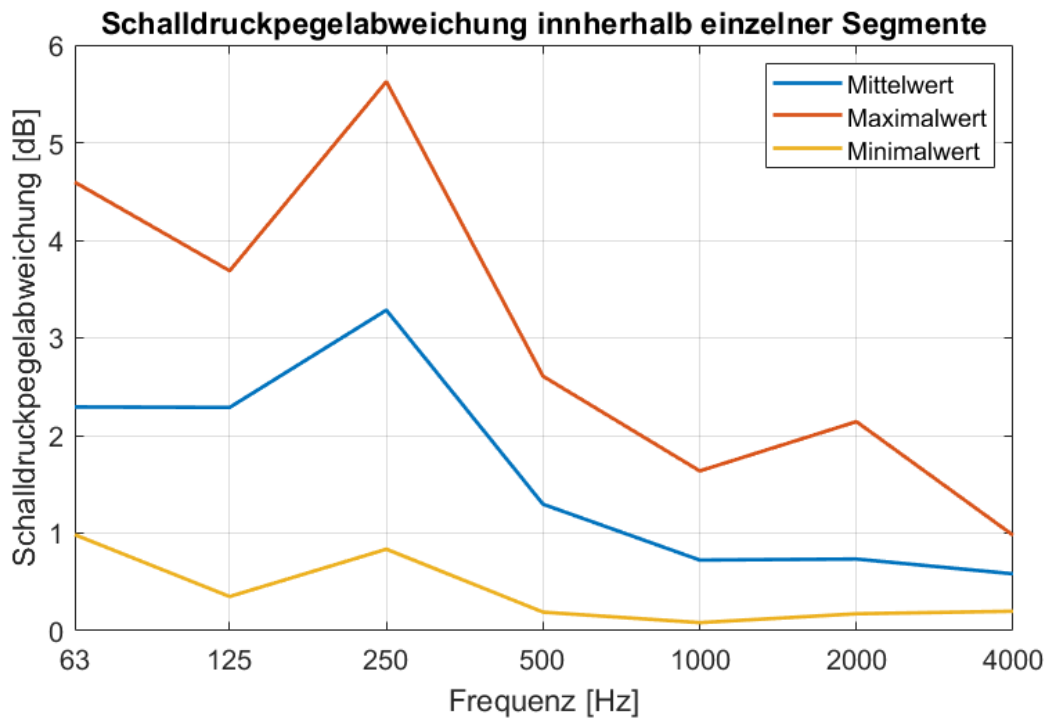


Abbildung 22: Maximale Pegeldifferenz in einzelnen Segmenten des FGR

6.1.2 Variation der Nachhallzeit

Die Variation der Nachhallzeit im Raum ist ein mögliches Kriterium zur Beurteilung der Diffusität des Schallfeldes. Mit steigender Diffusität verringert sich die Differenz der Nachhallzeit zwischen verschiedenen Messpunkten. In Hallräumen, in denen versucht wird ein optimales diffuses Schallfeld zu erzeugen, eignet sie sich nur bedingt zur Charakterisierung der Diffusität und dient eher dazu den Einfluss punktuell eingebrachter Schallabsorption auf das Schallfeld zu beschreiben (Staubach, 2023). In der hier vorliegenden Arbeit dient die Variation der Nachhallzeit nicht zur genauen Beschreibung der Diffusität, sondern nur zur Abschätzung des Frequenzbereichs, in dem eine ausreichende Diffusität im Raum erreicht wird. In Abbildung 23 ist die Standardabweichung der Nachhallzeit aus den in Abschnitt 5.3 beschriebenen Messungen zu sehen. Die Bestimmung der Standardabweichung erfolgte aus den Mittelwerten der Nachhallzeiten an den einzelnen Messpositionen und wurde mit der MATLAB-Funktion „std“, durchgeführt. Eindeutig erkennbar ist, dass die Nachhallzeit im tiefrequenten, modendominierten Bereich deutlich stärker variiert als in den mitten- und hochfrequenten Bereichen. Ab 400 Hz verringert sich die Standardabweichung der Nachhallzeit deutlich, bleibt unter 0,1 s und nähert sich somit einem Bereich an, der auch in leeren, bzw. nicht mit Diffusoren versehenen (Modell-)Hallräumen gemessen wurden (Staubach, 2023). Demnach wird der FGR in der hier vorliegenden Arbeit als ab 400 Hz als ausreichend diffus angenommen. Diese Beobachtung deckt sich mit der Abschätzung aus Abschnitt 4.4 und der Absenkung der Pegeldifferenz in einzelnen Segmenten in Abschnitt 6.1.1.

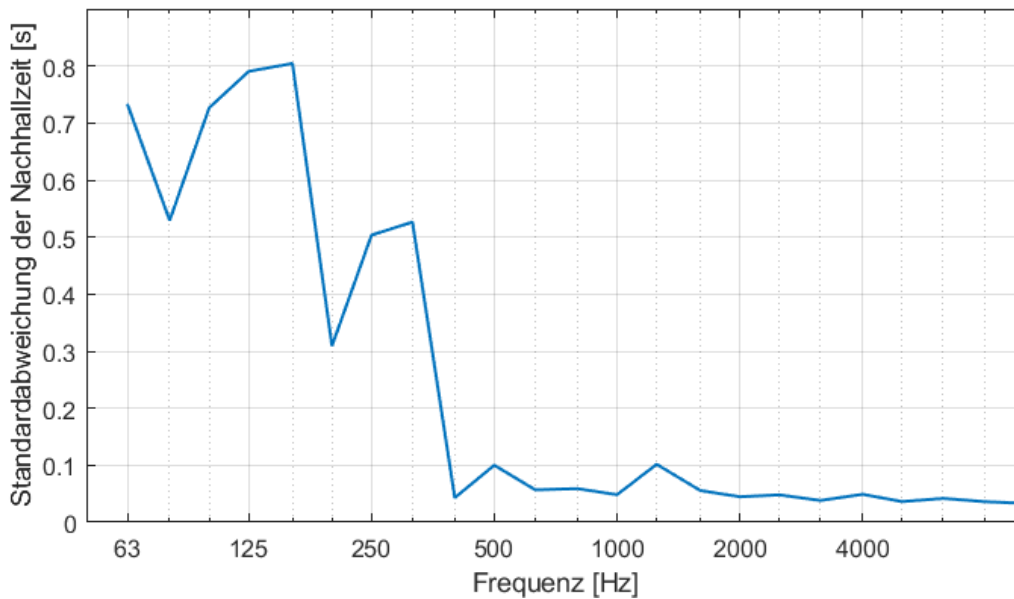


Abbildung 23: Standardabweichung der Nachhallzeit in einzelnen Terzen

6.2 Vergleich Prognosemodelle mit Messung

Die Abbildung 24 zeigt die Schalldruckpegeldifferenz zwischen Messwerten und Ergebnissen der Prognoseverfahrens (Messwert subtrahiert vom Prognosewert) im Decken- und im Bodenkanal für den Gesamtschalldruckpegel aus den Oktaven von 500 bis 4000 Hz. Es ist eindeutig erkennbar, dass Prognose und Messung in beiden Situationen deutlich voneinander abweichen. Der maximale Unterschied zwischen Prognose und Messung beträgt ca. 5 dB. Bei der Modellierung des Deckenkanals unterscheidet sich vor allem im Segment F3, in das die Schallleistung eingespeist wird, die Messung von der Prognose. In diesem Segment liegt der Prognosewert ca. 4 dB unter dem Messwert. Mit steigender Entfernung zur Schallquelle relativiert sich der Pegelunterschied und nähert sich im Übergang nahezu dem Messwert an. Bei der Modellierung des Bodenkanals liegen die Segmente, in denen sich die primäre Schallquelle befindet, sowie die benachbarten Segmente, ebenfalls unter den Messwerten. Mit steigender Distanz zu Quelle nähern sich Messung und Prognose am Bodenkanal an, überschreiten aber den Nullpunkt und distanzieren sich in Richtung der äußeren Segmente wieder voneinander. Im Vergleich zwischen Abbildung 5 und Abbildung 8 ist erkennbar, dass die Differenz zwischen dem Maximal- und Minimalpegel im FGR in der Prognose deutlich kleiner ist als in den Messergebnissen. Dies ist Anlass zu Vermutung, dass der Schalldruckpegelabfall in der Prognose deutlich niedriger ist als in der Messung. Zusätzlich scheint eine Abweichung des Schalldruckpegels im Quellsegment aufzutreten.

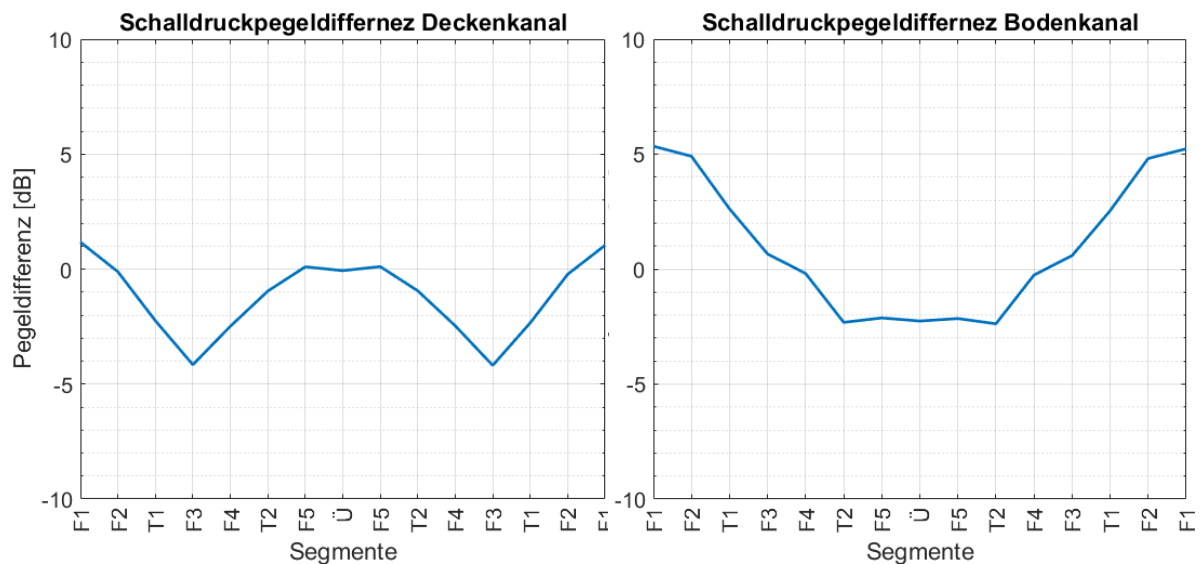


Abbildung 24: Schalldruckpegeldifferenz zwischen Messung und Prognose; Gesamtschalldruckpegel aus den Oktaven 500 bis 4000 Hz

Bei der Betrachtung der Differenzen zwischen Prognose und Messung in den einzelnen Oktaven ergibt sich aufgrund der starken Differenz zwischen Bodenkanal und Deckenkanal kein eindeutiges Muster. In der Modellierung des Deckenkanals ist die Schalldruckpegeldifferenz in allen Oktaven ähnlich. Die Schalldruckpegeldifferenz und der Verlauf der Graphen ist dabei sehr nah an dem der Gesamtpegel. Beim Bodenkanal unterscheiden sich die Schalldruckdifferenzen in den verschiedenen Oktaven stark. Der Verlauf der Differenz ist dabei, mit Ausnahme der Oktave bei 500 Hz, immer ähnlich. Der Schalldruckpegelunterschied in den Segmenten, in denen die Schallquellen platziert wurden, unterscheidet sich in den einzelnen Oktavbändern um bis zu 4 dB.

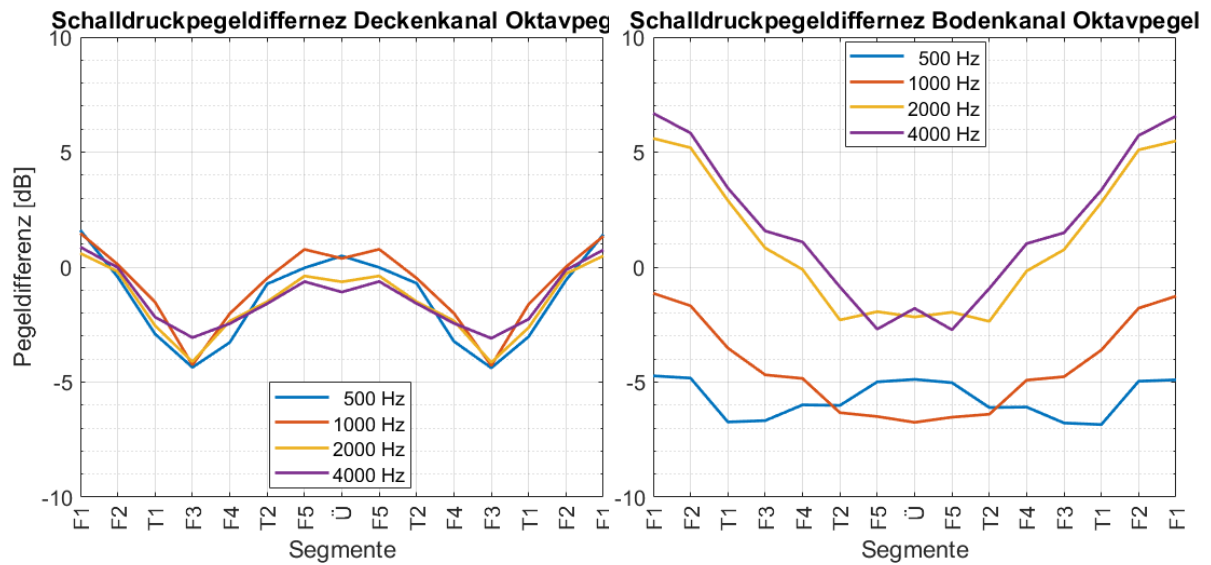


Abbildung 25: Pegeldifferenz zwischen Prognose und Messung in Oktavbändern

Um zu untersuchen, ob ein unterschiedlicher Schalldruckpegelabfall zwischen Prognose und Messung eine Ursache für die Pegelunterschiede sein könnte, wurden in Tabelle 5 die Schalldruckpegelabfälle der einzelnen Verfahren in den relevanten Oktaven aufgelistet und miteinander verglichen. Darin ist zu erkennen, dass der Schalldruckpegelabfall sich deutlich zwischen Prognose und Messung unterscheidet. Der Schalldruckpegelabfall der Prognose unterschätzt den realen Messwert stark, sodass der Messwert zum Teil dem doppelten Prognosewert entspricht. Da der Schalldruckpegelabfall direkten Einfluss auf den Koppelverlust der SEA nach Gleichung (2.15) hat, ist es möglich, dass die geringe Differenz zwischen Maximal- und Minimalpegel im Prognosemodell auf diesen zurückzuführen ist.

Tabelle 5: Vergleich Schalldruckpegelabfall aus Messung und Prognose

Frequenz [Hz]	$\Delta_{Prognose}$ [dB/m]	$\Delta_{Messung}$ [dB/m]	Differenz [dB/m]
500	0,9	1,27	0,37
1000	0,66	1,14	0,48
2000	0,59	1,18	0,59
4000	0,65	1,08	0,43

6.3 Verbesserungsansätze

In vorherigen Abschnitt wurden Abweichungen zwischen Messungen und Prognose diskutiert. Um die Abweichung des Prognosemodells zu verringern, sodass dieses in der Praxis angewendet werden kann, werden hier kurz mehrere Varianten zur Identifikation oder Lösung von Problemen dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass im vorliegenden Fall nicht bekannt ist, ob Probleme aus den grundlegenden Gleichungen und Verfahren stammen oder ob es sich um Fehler in der Implementierung des Prognoseverfahrens in MATLAB handelt. Da das Verfahren bereits erfolgreich in Schienenfahrzeugen angewendet wurde (Sun et al., 2022), ist zu erwarten, dass die Anwendbarkeit der SEA in diesem Einsatzfeld, trotz der hier abweichenden Ergebnisse, gegeben ist.

6.3.1 Anpassung des Schalldruckpegelabfalls

Da sich der Schalldruckpegelabfall im FGR zwischen Messung und Prognose stark unterscheidet, wird empfohlen diesen Unterschied zuerst genauer zu betrachten. In kurzen Tests wurde der zu niedrige Schalldruckpegelabfall im Prognosemodell in Gleichung (2.15) verdoppelt. Die Ergebnisse zeigten dann eine vergrößerte Differenz zwischen maximalem und minimalem Schalldruckpegel in der Prognose. Der dargestellte Schalldruckpegelabfall nach der Berechnung mit der SEA änderte sich ebenfalls ca. im gleichen Verhältnis wie der angepasste Eingangswert. Die absolute Pegeldifferenz zwischen Prognose und Messung schien sich in den Segmenten, in denen sich die Schallquelle befand, jedoch zu vergrößern. Wodurch die Abweichung des Schalldruckpegelabfalls entsteht, ist jedoch unklar.

6.3.2 Aufbau eines Referenzfahrzeugs

Um die grundlegende Funktion des Prognosemodells zu verifizieren, ist es möglich ein weiteres Fahrzeug, oder möglicherweise auch einen ähnlichen Raum, wie beispielsweise einen Korridor, zu modellieren. Sun (Sun et al., 2022) gibt einige Daten zu den Maßen und akustischen Daten verschiedener Fahrzeuge frei. Mit diesen Daten wäre es möglich eines der beschriebenen Fahrzeuge zu modellieren und zumindest den Schalldruckpegelabfall im FGR mit den ebenfalls gegebenen Messwerten zu vergleichen. Sollten sich so gute Übereinstimmungen zwischen Prognose und gegebenen Messwerten erzielen lassen, können mögliche Fehler in der Implementierung des grundlegenden Verfahrens ausgeschlossen werden.

6.3.3 Querschnittsflächenänderung des FGR im Modell

Im hier vorliegenden Verfahren wird die Querschnittsfläche des Modells nur in den Subsystemen, in denen eine Segmentverbindung vorliegt, angepasst. Sun (Sun et al., 2022) hingegen änderte über die Höhe des FGR die gesamte Querschnittsfläche im Modell und konnte damit eine Verbesserung des prognostizierten Schalldruckpegelabfalls feststellen. Hier

wäre zu untersuchen, ob eine Umstellung auf dieses Subsystem zu besseren Ergebnissen führt. Dabei sollte beachtet werden, dass die von Sun erzielte Verbesserung eher gering ist. Diese Anpassung würde daher nicht, die starke Abweichung des hier vorliegenden Prognosemodells erklären.

7 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wird ein bestehendes, SEA-basiertes Verfahren für die Schalldruckprognose im FGR von Straßenbahnen erklärt. Das Ziel dieses Prognoseverfahrens ist es den Schalldruckpegel im Fahrzeug während des Fahrzeugstillstandes vorauszusagen. Zur Validierung des Verfahrens am realen Fahrzeug wurden Messungen durchgeführt und ein Prognosemodell basierend auf diesem Fahrzeug aufgebaut. Neben der zu validierenden Schalldruckpegel im Innenraum und dem Pegelabfall über die Länge des FGR gehen aus den Messungen auch die Schalleistung der primären Geräuschquellen und die Nachhallzeit hervor. Die bestimmte Nachhallzeit und die Schalleistung der Geräuschquellen dienen hier als Eingangsdaten für das Prognosemodell, um mit diesem möglichst genau das originale Fahrzeug abbilden zu können. Dabei kann mit den Messergebnissen auch das Schallfeld im FGR charakterisiert werden. Während über die Fahrzeuglänge der Schalldruckpegel deutlich variiert ist in den einzelnen, kurzen Segmenten im mitten- und hochfrequenten Bereich nur wenig Variation der Schalldruckpegel zu beobachten. Auswertungen der Standardabweichung der Nachhallzeit deuten hier konkret darauf hin, dass das Schallfeld ab ca. 400 Hz als ausreichend diffus beschrieben werden kann und somit ab dieser Frequenz auch valide Ergebnisse der Prognose zu erwarten sind.

Im Vergleich zwischen Prognose und Messung sind, in beiden abgebildeten Betriebszuständen, deutliche Abweichungen sowohl im Schalldruckpegel als auch der Schalldruckpegelverteilung zu erkennen. Vor allem mit steigender Entfernung zur Quelle verhält sich der Pegelverlauf in der Prognose anders als im realen Fahrzeug. Dabei entstehen zwischen Prognose und Messung Abweichung von bis zu 5 dB. Beim Vergleich des Schalldruckpegelabfalls fällt außerdem auf, dass der Schalldruckpegelabfall in der Prognose deutlich unterschätzt wird. Der Schalldruckpegelabfall der Messung ist in manchen Frequenzbändern doppelt so hoch wie der der Prognose. Um zu testen ob dies auch der Auslöser für die Abweichung des Schalldruckpegels ist, wird vorgeschlagen den gemessenen Schalldruckpegelabfall im Prognosemodell zu verwenden. Des Weiteren sollte ein Referenzfahrzeug, bei dem die Übereinstimmung zwischen Prognose und Messung nachgewiesen wurde, aufgebaut werden. Anhand von diesem kann der Schalldruckpegelabfall modelliert und mit den Referenzwerten verglichen werden, sodass hier mögliche Probleme bei der Berechnung des Schalldruckpegelabfalls nachgewiesen werden können. Zusammengefasst ist das Prognosemodell aufgrund der Abweichung von den realen Werten im aktuellen Zustand nicht in der Praxis anwendbar.

Literaturverzeichnis

- DIN EN ISO 9614. *Akustik - Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 3382-2. *Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen*. Beuth Verlag GmbH.
- Atmaja, B. T., Puabdillah, M. F., Farid, M. N. & Asmoro, W. A. (2018). Prediction and simulation of internal train noise resulted by different speed and air conditioning unit. *Journal of Physics: Conference Series*, 1075, 12038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1075/1/012038>
- DIN EN ISO 3381 (2011-05). *Bahnanwendungen - Akustik - Geräuschmessungen in spurgebundenen Fahrzeugen*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 3381 (2022-09). *Bahnanwendungen - Akustik - Geräuschmessungen in spurgebundenen Fahrzeugen*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 14750-1 (2006-08). *Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs -Teil 1: Bahaglichkeitsparameter*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 3740. *Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen - Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen*. Beuth Verlag GmbH.
- Craik, R. J. M. (2003). *Sound transmission through buildings: Using statistical energy analysis* (Reprint). Ashgate.
- Dai, W., Zheng, X., Le Luo, Hao, Z. & Qiu, Y. (2019). Prediction of high-speed train full-spectrum interior noise using statistical vibration and acoustic energy flow. *Applied Acoustics*, 145, 205–219. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.10.010>
- Fahrmeir, L., Heumann, C., Künstler, R., Pigeot, I. & Tutz, G. (2016). *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse* (8. Aufl.). *Springer-Lehrbuch*. Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer Spektrum.
- Fahy, F. J. (2004). A note on the subdivision of a volume of air in a vehicle enclosure into sea subsystems. *Journal of Sound and Vibration*, 271(3-5), 1170–1174. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00632-1](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00632-1)
- Forssén, J., Tober, S., Corakci, A. C., Frid, A. & Kropp, W. (2012). Modelling the interior sound field of a railway vehicle using statistical energy analysis. *Applied Acoustics*, 73(4), 307–311. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.09.012>
- Frid, A., Orrenius, U., Kohrs, T. & Leth, S. (2012, 23. April). *BRAINS the concepts behind a quick and efficient tool for prediction of exterior and interior railway vehicle noise*. Acoustics Nantes Conference; Congrès Français d'Acoustique;,,
- Gabet, P., Drobecq, V., Noe, N. & Jean, P. (2009). *Prediction of Acoustic Comfort of a Trainset using Ray-Tracing Technology*.
- VDV 154 (2011). *Geräusche in Schienenfahrzeugen des Öffentlichen Personen-Nahverkehrs (ÖPNV)*.

- DIN EN ISO 18041. *Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 60196. *IEC-Normfrequenzen*.
- Jang, H. (2017). *Prediction of sound transmission in elongated or compact acoustic cavities* [University of Liverpool Repository]. DataCite.
- Kang, J. (1996a). Sound attenuation in long enclosures. *Building and Environment*, 31(3), 245–253. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0360-1323(95)00046-1)
- Kang, J. (1996b). The Unsuitability of the Classic Room Acoustical Theory in Long Enclosures. *Architectural Science Review*, 39(2), 89–94. <https://doi.org/10.1080/00038628.1996.9697363>
- Kohrs, T., Kirchner, K.-R., Brick, H., Fast, D. & Guiral, A. (2021). Industrial Engineering Framework for Railway Interior Noise Predictions. In G. Degrande, G. Lombaert, D. Anderson, P. de Vos, P.-E. Gautier, M. Iida, J. T. Nelson, J. C. O. Nielsen, D. J. Thompson, T. Tielkes & D. A. Towers (Hrsg.), *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems* (Bd. 150, S. 158–166). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70289-2_15
- Kuttruff, H. (1989). Stationäre Schallausbreitung in Langräumen. *Acustica : international journal on acoustics*(2), 53–62.
- Kuttruff, H. (2005). *Room acoustics* (4. ed., reprint., transferred to digital print. 2005). Spon Press.
- Lalor, N. & Priebsch, H.-H. (2007). The prediction of low- and mid-frequency internal road vehicle noise: A literature survey. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 221(3), 245–269. <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO199>
- Li, H., Thompson, D., Squicciarini, G., Liu, X., Rissmann, M., Bouvet, P., Denia, F. D., Baeza, L., Martín Jarillo, J. & Moreno García-Loygorri, J. (2021). A framework to predict the airborne noise inside railway vehicles with application to rolling noise. *Applied Acoustics*, 179, 108064. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108064>
- Mathworks. *polyfit: Polynomial curve fitting*. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>
- Picaut, J., Simon, L. & Polack, J.-D. (1999). Sound field in long rooms with diffusely reflecting boundaries. *Applied Acoustics*, 56(4), 217–240. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(98\)00032-2](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(98)00032-2)
- Redmore, T. L. (1982). A method to predict the transmission of sound through corridors. *Applied Acoustics*, 15(2), 133–146. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(82\)90031-7](https://doi.org/10.1016/0003-682X(82)90031-7)
- DIN EN ISO 11688-1. *Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte - Teil 2: Einführung in die Physik der Lärminderung durch konstruktive Maßnahmen*.
- Rössel, C. (2022). *Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Innengeräuschprognose von Straßenbahnen* [Praktikumsbericht]. Hochschule Mittweida, Mittweida.

- Sarradj, E. (2004, 25. März). *Energy-based vibroacoustics: SEA and beyond*. Proceedings of the Joint Congress CFA/DAGA '04, Strasbourg, March 22-25,2004,
- Schirmer, W. & Hübelt, J. (Hrsg.). (2022). *Technischer Lärmschutz: Praktische Methoden zur Minderung von Lärm und Schwingungen* (3. Auflage 2022). Springer Berlin; Springer Vieweg.
- Shift2Rail – FINE1 – Deliverable 7.1. (2017). *Review of state of the art for industrial interior noise*. Grant Agreement Number: 730818.
- Staubach, L. (2023). *Einordnung von Methoden zur Bewertung der Qualität diffu-ser Schallfelder basierend auf Messungen im Modellmaßstab* [Bachelorarbeit]. Hochschule Mittweida.
- Sun, W., Thompson, D. J., Zhang, Z. & Squicciarini, G. (2022). A practical approach to modelling railway vehicle interior acoustics. *Applied Acoustics*, 200, 109055. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109055>
- Zhao, Y. J., Deng, X., Liu, S. Q., Shuai, R., Sun, Z. J., Guo, J. Q. & Xu, Y. (2015). Interior Noise Prediction of High-Speed Train Based on Hybrid FE-SEA Method. In J. C. Nielsen, D. Anderson, P.-E. Gautier, M. Iida, J. T. Nelson, D. Thompson, T. Tielkes, D. A. Towers & P. de Vos (Hrsg.), *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems* (Bd. 126, S. 699–705). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44832-8_83
- Zheng, X., Dai, W., Qiu, Y. & Hao, Z. (2019). Prediction and energy contribution analysis of interior noise in a high-speed train based on modified energy finite element analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 126, 439–457. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.02.042>

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname

Unterschrift