

Diploma Thesis

# Influence of roomacoustics in the sending room on the measured airborne sound insulation of two testrooms

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

Diplomarbeit

## Einfluss der Raumakustik im Senderaum auf die gemessene Schallpegeldifferenz zweier Prüfräume

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Florian Dirnberger, BSc**

Matr.Nr.: 01328791

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Thomas Bednar**

**Polina Pirch, MSc**

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie  
Technische Universität Wien  
Campus Science Center, Lilienthalgasse 14  
1030 Wien, Österreich

Wien, im Dezember 2021

---



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich im Zuge meines Studiums begleitet und unterstützt haben. Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir ein Studium erst ermöglicht haben und auf deren Unterstützung ich mich immer verlassen kann. Danken möchte ich meiner Freundin für den starken emotionalen Rückhalt und die aufmunternden Worte im Zuge meines Studiums.

Ebenso darf ich mich für die wissenschaftliche Betreuung und wertvollen fachlichen Inputs bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar bedanken. Dank gilt ebenso meiner Zweitbetreuerin Frau Polina Pirch, MSc die mir mit ihre Erfahrung bei den praktischen Messungen und ihrer theoretischen Kompetenz geholfen hat, diese Arbeit bestmöglich fertigzustellen.

Für die Gründlichkeit und Geduld im Zuge des Korrekturlesens dieser Arbeit möchte ich mich bei meiner Mutter und meinen Schwiegereltern bedanken.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kurzfassung

Auf Basis von Ergebnissen diverser Ringversuche ist die Ermittlung der Luftschalldämmung im Prüfstand, speziell im tieffrequenten Bereich, mit großen Messunsicherheiten behaftet. Die genauen Eigenschaften des Senderraums, wie Nachhallzeit, Volumen und Diffusität des Schallfelds, gehen nicht in die Beurteilung des Schalldämm-Maßes ein. Diese Arbeit bezieht sich auf den Einfluss der Raumakustik im Senderraum auf die Schallpegeldifferenz und somit auch auf das Schalldämm-Maß einer Leichtbau Trennwand im tieffrequenten Bereich. Es werden verschiedene Varianten des Senderraums mit normativer, sehr kurzer und sehr langer Nachhallzeit untersucht und deren Einfluss auf die Schallpegeldifferenz sowohl qualitativ als auch quantitativ analysiert. Neben unterschiedlichen Diffusoren kommen auch verschiedene Bedämpfungsgrade in Form von Absorbern zum Einsatz. Zur Beurteilung dienen drei verschiedene Messmethoden, zwei normative Methoden und Rastermessungen beider Prüfräume. Durch Visualisierung der Rastermessungen können die Auswirkungen der eingebrachten raumakustischen Elemente auf die Ausprägung der Raummoden gezeigt und analysiert werden. Es zeigt sich, dass die Positionierung der Mikrofone besonders in üblichen Prüfräumen große Auswirkungen auf die Schallpegeldifferenz im tieffrequenten Bereich hat.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Abstract

Based on the results of various round robin tests, the determination of airborne sound insulation in the test rig, especially in the low-frequency range, is subject to large measurement uncertainties. The exact properties of the sending room, such as reverberation time, volume and diffusivity of the sound field, are not included in the evaluation of the sound reduction index. This work refers to the influence of the room acoustics in the sending room on the sound level difference and thus also on the sound reduction index of a lightweight partition wall in the low-frequency range. Different variants of the sending room with normative, very short and very long reverberation time are examined and their influence on the sound level difference is analyzed both qualitatively and quantitatively. In addition to different diffusers, various degrees of damping in the form of absorbers are also utilized. Three different measurement methods are used for the evaluation, two normative methods as well as grid measurements of both test rooms. By visualizing the grid measurements the effects of the introduced room acoustic elements on the characteristics of the room modes can be shown and analyzed. It is shown that the positioning of the microphones has a major effect on the sound level difference in the low-frequency range, especially in conventional test rooms.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>11</b>
1.1	Motivation und Ziele der Arbeit . . . . .	11
1.2	Begrifflichkeiten und Symboltabelle . . . . .	12
1.3	Stand des Wissens . . . . .	16
1.3.1	Messunsicherheiten bei Bestimmung des Schalldämm-Maßes – Ringversuche	16
1.3.2	Einfluss der Raumakustik auf das Schalldämm-Maß . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Theorie zur Messung des Schalldämm-Maßes</b>	<b>19</b>
2.1	Grundlagen zur Bestimmung des Schalldämm-Maßes im Prüfstand . . . . .	19
2.1.1	Definition des Schalldämm-Maßes . . . . .	19
2.1.2	Anforderungen an die Prüfeinrichtungen . . . . .	20
2.1.3	Anforderungen an den Prüfstand . . . . .	21
2.1.4	Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition . . . . .	21
2.1.5	Anforderungen an die Mikrofonpositionen . . . . .	24
2.2	Bestimmung der Nachhallzeit in den Prüfräumen . . . . .	26
2.2.1	Nachhallzeit-Messung mit abgeschaltetem Rauschen . . . . .	28
2.2.2	Nachhallzeit-Messung mit integrierter Impulsantwort . . . . .	28
2.3	Definition und Wirkungsweise von raumakustischen Elementen . . . . .	30
2.3.1	Passive Absorber . . . . .	30
2.3.2	Diffusoren . . . . .	32
2.4	Definition der Schröderfrequenz . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Angewandte Methodik</b>	<b>37</b>
3.1	Prüfeinrichtungen im Akustik Center Austria . . . . .	37
3.1.1	Prüfstand der Untersuchungen . . . . .	37
3.1.2	Eingesetzte Messapparaturen . . . . .	39
3.2	Optimale Lautsprecherpositionen . . . . .	40
3.3	Angewandte Messmethoden zur Ermittlung der Schallpegeldifferenz . . . . .	42
3.3.1	Standardmessmethode nach ISO 10140-2 . . . . .	42
3.3.2	Regelmäßiger Raster über die jeweiligen Messräume . . . . .	42
3.3.3	Messmethode für tiefe Frequenzbereiche nach Anhang A der ISO 10140-4	44
3.4	Angewandte Messmethode zur Bestimmung der Nachhallzeit . . . . .	46
3.5	Untersuchte Senderaum-Konfigurationen . . . . .	46
3.5.1	Aufbau und Anordnung der raumakustischen Elemente . . . . .	46
3.5.2	Nachhallzeiten der Senderaum-Konfigurationen . . . . .	51
3.6	Empfangsraum-Setup aller Messungen . . . . .	55
3.7	Aufbau und Schalldämm-Maß der geprüften Leichtbauwand . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Messungen</b>	<b>59</b>
4.1	Allgemeines zu den Messergebnissen . . . . .	59
4.2	Schallpegeldifferenz in der Messmethode 'Norm' . . . . .	60
4.2.1	Einfluss der Raumakustik auf die Schallpegeldifferenz . . . . .	60

4.2.2	Einfluss der Absorber auf das Schallfeld im Senderaum . . . . .	64
4.2.3	Einfluss der Diffusoren auf das Schallfeld im Senderaum . . . . .	71
4.2.4	Interpretation der Messergebnisse der Messmethode 'Norm' anhand der Mikrofonpositionen und der Schallfelder des Sende- und Empfangsraums .	75
4.3	Vergleich der Ergebnisse der angewandten Messmethoden je Raumsetup . . . . .	81
<b>5</b>	<b>Conclusio</b>	<b>87</b>
	<b>Appendix</b>	<b>93</b>
<b>A</b>	<b>Koordinaten der Mikrofonpositionen zu den Messmethoden</b>	<b>94</b>
<b>B</b>	<b>Lautsprecherpositionen zur Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition</b>	<b>96</b>
<b>C</b>	<b>Einfluss der Lautsprecherposition auf die Schallpegeldifferenz in der Messmethode 'Norm'</b>	<b>102</b>
<b>D</b>	<b>Schallpegeldifferenz der Messmethode 'Anhang A' vs. 'Anhang A inkl. Mitte'</b>	<b>108</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation und Ziele der Arbeit

Motivation dieser Arbeit war und ist mein Interesse am Forschungsbereich Schallschutz und Akustik. Im Zuge meines Studiums an der TU Wien haben zwei Themengebiete besonderes Interesse in mir geweckt; das ist zum einen die Bauphysik und zum anderen der Holzbau gemeinsam mit dem Fachgebiet der Statik. Mein erklärtes Ziel bei der Themenfindung für diese Arbeit war es, zumindest zwei dieser Fachbereiche zu vereinen. In diversen Lehrveranstaltungen an der Universität sowie aus der praktischen Erfahrung im Büroalltag bei einem Ziviltechniker für Bauphysik stellte ich fest, dass der Schallschutz bei Holzbauten immer wieder Probleme mit sich bringt. Zum einen gibt es hier das Thema der Prognostizierbarkeit der schalldämmenden Eigenschaften von Bauteilen auf Basis von Holz, zum anderen ist der größte Schwachpunkt bisheriger Holz-Konstruktionen die Schalldämmung in tiefen Frequenzen. Auch aus der Baupraxis steigt die Nachfrage an Holzbauten in den letzten Jahren immer weiter an, und somit erreicht das Thema 'Schallschutz im Holzbau' mehr Menschen und damit einhergehend auch mehr Interesse. Ein Themengebiet der Diplomarbeit war somit gefunden - Schallschutz im Holzbau.

Bei ersten Sondierungsgesprächen mit Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar brachte er Frau Polina Pirch, MSc und das Akustik Center Austria ins Gespräch. Bei letzterem handelt es sich um eine Forschungseinrichtung, die zum Zeitpunkt des Beginns dieser Arbeit von einer Kooperation aus TU Wien, dem technischen Gewerbemuseum (TGM) Wien und Holzforschung Austria betrieben wurde. Im Akustik Center Austria werden hauptsächlich Schallmessungen von Bauteilen aus Holz geprüft; diese Prüfstände wurden im Zuge mehrerer Forschungsprojekte auch auf diese Art von Prüfungen abgestimmt [34]. Kollegin Pirch, welche in weiterer Folge meine Diplomarbeit als Zweitbetreuerin betreut, arbeitet an Ihrer Dissertation zum Thema 'Reduzierung von Unsicherheiten beim Bau von akustischen Prüfständen' sowie zum Zeitpunkt der Untersuchungen im Akustik Center Austria. Nach weiteren Gesprächen mit Frau Polina Pirch, MSc und Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar grenzte sich das Themengebiet immer weiter ein, und auf Basis der Erfahrung meiner Betreuer wurde das Thema auf den Schallschutz von Holzbauteilen im tieffrequenten Bereich fixiert. Hierbei war es mein persönliches Ziel, diese Arbeit mit ausreichend Bezug zur Praxis zu gestalten. Daher erfolgte nach grober Themeneingrenzung eine ausgiebige Literaturrecherche. Einschlägige Literatur liefert bereits einige Erkenntnisse über das Verhalten von Schallfeldern und in weiterer Folge der Schalldämmung in tiefen Frequenzen. Im Verlauf der Literaturrecherche zeigte sich, dass die Raumakustik im Senderraum quantitativ nicht in die normative Bestimmung des Schalldämm-Maßes eingeht. Daher lag die Idee nahe, tiefer in die Thematik der Raumakustik im Senderraum von Prüfständen einzutauchen. Hierbei ist der Praxisbezug dahingehend gegeben, dass durch die Adaptierung der Raumakustik im Senderraum die Messergebnisse bewusst beeinflusst werden könnten. Untersuchungen zum Thema Raumakustik im Senderraum bei Messung des Schalldämm-Maßes haben bereits unter anderem Kolleg\*innen der EMPA, Schweiz [41, 43] sowie Kolleg\*innen der Casa Acustica, Berlin [20] angestellt. Mit Hilfe dieser Arbeit sollen also zum

einen die normativen Vorgaben die Raumakustik im Senderaum betreffend bei der Prüfung des Schalldämm-Maßes überprüft und hinterfragt werden; zum anderen soll eruiert werden, ob die Ergebnisse aus den oben genannten Untersuchungen auch für das Prüfstandssetup im Akustik Center Austria zutreffen. Es ergibt sich daher folgende Forschungsfrage:

*Welchen qualitativen bzw. quantitativen Einfluss haben Elemente der Raumakustik im Senderaum auf das Schallfeld bzw. die Schallpegeldifferenz einer Leichtbau-Trennwand im tieffrequenten Bereich und kann auf Basis der aktuellen normativen Vorgaben eine aussagekräftige Messung gewährleistet werden?*

Um etwaiger Verwirrung vorzubeugen sei erwähnt, dass das Schalldämm-Maß auf Basis der Schallpegeldifferenz ermittelt wird. Im Zuge der Untersuchungen kam das Forschungsteam zum Entschluss, die Schallpegeldifferenz als tatsächlich gemessene Größe bei den detaillierten Betrachtungen zu verwenden. Das Schalldämm-Maß verhält sich allerdings in diesem konkreten Fall qualitativ gleich wie die Schallpegeldifferenz, da die Raumakustik im Empfangsraum bei allen Messungen gleich blieb.

## 1.2 Begrifflichkeiten und Symboltabelle

In diesem Kapitel werden einige im Zuge dieser Arbeit verwendeten Begriffe erklärt bzw. nochmals aufgefrischt. Als allgemeine Einführung in das Thema Schallschutz und Raumakustik empfiehlt es sich, [40] zu studieren. In weiterer Folge werden die verwendeten Symbole, deren Bedeutung und Einheit in Form einer Symboltabelle in Tabelle 1.1 dargestellt.

*Druckmethode:* Die von Buckingham [2] und Davis [5] im Jahre 1925 entwickelte 'Druckmethode' beschreibt die Bestimmung des Schalldämm-Maßes eines Prüfbauteils auf Basis der in den beiden Prüfräumen gemessenen Schalldrucke. Dabei werden diese mittels Mikrofonen gemessen und in weiterer Folge als Referenzgröße Schalldruckpegel in Dezibel (dB) angegeben. Daraus errechnet sich dann unter Einbeziehung der Raumakustik im Empfangsraum das Schalldämm-Maß.

*Intensitätsmessmethode:* Bei der Intensitätsmessmethode wird, anders als bei der Druckmethode, die Schalldämmung ohne den Einfluss der Raumakustik im Empfangsraum bestimmt. Hierzu wird der äquivalente Schalldruckpegel im Senderaum analog zur Druckmethode ermittelt. Im Empfangsraum kommt allerdings der äquivalente Schallintensitätspegel auf der Bauteilfläche zur Messung; hierzu ist die Rückwand des Empfangsraums mit ausreichend absorbierendem Material auszukleiden, sodass keine Reflexionen an der Messfläche gemessen werden. Nähere Informationen zu dieser Messmethode findet man in der einschlägigen Norm ISO 15186-1 [10].

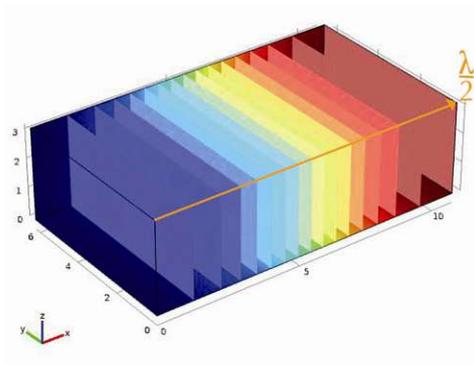
*Oktavband / Terzband:* Allgemein wird als 'Band' die Zusammenfassung einzelner Frequenzen bezeichnet. Die sogenannten Mittenfrequenzen der Oktavbänder werden im Verhältnis 1:2 fortgeführt, man spricht beispielsweise vom 125 Hz Oktavband oder vom 250 Hz Oktavband. Verfeinert man die Auflösung der Bänder, so werden Terzbänder verwendet. Hierbei liegt das Verhältnis der Mittenfrequenzen bei  $1:\sqrt[3]{2}$ ; ein Oktavband besteht somit aus drei Terzbändern. Die Terzbänder werden daher oftmals auch als  $1/3$  Oktavbänder bezeichnet. Die oberen und unteren Grenzfrequenzen der jeweiligen Bänder sind in ISO 266 [13] definiert. Beispielsweise besteht das 63 Hz Oktavband aus den Terzbändern mit der Mittenfrequenz 50, 63 und 80 Hz; das 63 Hz Oktavband beinhaltet somit den Frequenzbereich von 44,2 bis 88,4 Hz wohingegen das 63 Hz Terzband lediglich aus den Frequenzen zwischen 55,7 bis 70,2 Hz besteht [26].

In der Bachelorarbeit von Plagg und Pobiter [39] wurden die Begriffe 'Eigenfrequenzen – Eigenmoden sowie Resonanzfrequenz – Raummode' sehr gut erklärt, gegenüber- und dargestellt. Die Erklärungen zu diesen Begriffen werden nun nachfolgend kurz angeführt.

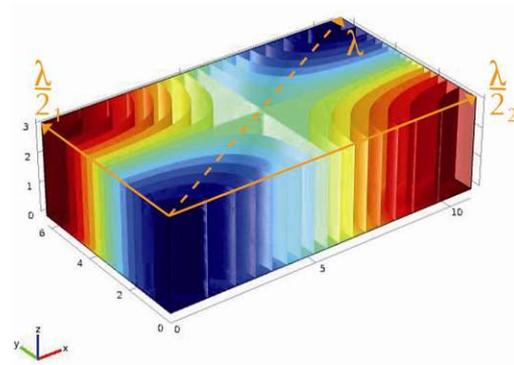
Als *Eigenmode* bezeichnet man folglich das sich einstellende Schalldruckmuster bei einer *Eigenfrequenz*. Letztere könnte man als besonders gut zu einem Raum passende Frequenz bezeichnen; sie stellt jene Frequenz dar, bei der sich die Vielzahl der Reflexionen einer ebenen Schallwelle gleichphasig überlagern. Dadurch bilden sich Bereiche mit besonders hohem und solche mit besonders niedrigem Schalldruck. Es handelt sich also um eine akustische Eigenschaft des Raumes auf Basis seiner Abmessungen.

Spricht man von einer *Raummode*, so meint man das sich tatsächlich einstellende Schallfeldmuster aufgrund einer Schallquelle im Raum bei einer *Resonanzfrequenz*. Letztere stellt somit jene Frequenz dar, bei der sich die Schallwellen tatsächlich gleichphasig überlagern und die sich einstellenden Extrema des Schalldrucks auch tatsächlich gemessen werden können. Sie ist somit nicht nur noch abhängig von den Raumabmessungen sondern auch von den Eigenschaften der reflektierenden Elemente im Raum sowie der Position der Schallquelle. Liegt beispielsweise die Schallquelle in einem Nullpunkt (Knotenpunkt) der Raummode, so lässt sich der Raum bei der Resonanzfrequenz nur sehr schwer anregen.

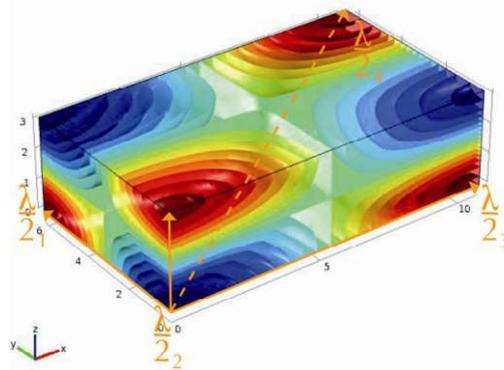
Die Bezeichnung der Eigen- wie auch Raummoden erfolgt mit Hilfe von drei Ordnungszahlen, wobei jede Ordnungszahl für eine Koordinatenachse steht. Die Zahl selbst ergibt sich aufgrund der Anzahl der Nulldurchgänge des Schalldrucks entlang der besagten Achse. Beispielsweise spricht man von der Raummode (1-0-0), wenn die Momentaufnahme eines Schallfeldmusters eines Raums ein Druckmaximum und ein Druckminimum entlang der X-Achse und folglich einen Nulldurchgang hat, wie in Abbildung 1.1a dargestellt. Diese Moden, bei denen zwei der drei Ordnungszahlen null sind, werden auch als *axiale Moden* bezeichnet. Von einer *tangentialen Mode* spricht man beispielsweise bei der Mode (1-1-0) – hierbei finden sich Druckmaxima bzw. -minima in den jeweils gegenüberliegenden Raumecken; über die Höhe des Raumes ist der Druck jedoch jeweils gleichbleibend (siehe Abbildung 1.1b). Somit liegt in der Raummitte in X- sowie in Y-Richtung also ein Nulldurchgang vor. Der dritte mögliche Typ von Raummoden sind die *schrägen Moden*; hierbei sind alle drei Ordnungszahlen von null verschieden. Stellt sich beispielsweise eine Raummode so ein, dass die jeweils nächste Raumecke ein diametrales Schalldruckextrem vorweist, spricht man von der Mode (1-1-1). Diese ist in Abbildung 1.1c ersichtlich.



(a) Momentaufnahme einer Axialen Mode (1-0-0) mit einem Nulldurchgang des Schalldrucks in X-Richtung; einem Minimum bei  $X=0$  und einem Maximum bei  $X=\text{Maximal}$



(b) Momentaufnahme einer Tangentialen Mode (1-1-0) mit einem Nulldurchgang des Schalldrucks in X- sowie in Y-Richtung; Minima im Koordinatenursprung über die Raumhöhe konstant sowie schräg gegenüberliegend, Maxima in den anderen Raumecken



(c) Momentaufnahme einer Schrägen Mode (1-1-1) mit je einem Nulldurchgang des Schalldrucks in X-, Y- und Z-Richtung; die jeweils nächstgelegenen Ecken weisen ein diametrales Schalldruckextrem auf

**Abb. 1.1:** Darstellung von theoretischen Modentypen, wobei Schalldruckminima blau und Schalldruckmaxima rot dargestellt sind (Momentaufnahmen); Zonen in denen der Schalldruck gleich null ist, sind weiß [39]

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$A$	äquivalente Absorberfläche	$m^2$
$c$	Schallgeschwindigkeit	$m/s$
$c_0$	Schallgeschwindigkeit bei 20°C (340 m/s)	$m/s$
$d$	Abstand / Dicke	$m$
$D_{(w)}$	(bewertete) Schallpegeldifferenz	$dB$
$D_{nT}$	Standard-Schallpegeldifferenz	$dB$
$f$	Frequenz	$Hz$
$f_S$	Schröderfrequenz / Grenzfrequenz	$Hz$
$\Delta f$	3 dB- Halbwertsbreite	$Hz$
$h(t)$	Impulsantwort	
$L$	Schalldruckpegel	$dB$
$L_{eq}$	äquivalenter Schalldruckpegel	$dB$
$L_b$	Hintergrundgeräuschpegel	$dB$
$m$	Masse	$kg$
$m''$	flächenbezogene Masse	$kg/m^2$
$M$	Modenüberlappung	
$p$	Schalldruck	$Pa$
$r$	längenbezogener Strömungswiderstand	$Pa\ s/m^2$
$R_{(w)}$	(bewertetes) Schalldämm-Maß	$dB$
$R'$	Bauschalldämm-Maß	$dB$
$R_{max}$	Grenzschalldämm-Maß eines Prüfstands	$dB$
$R_s$	spezifischer Strömungswiderstand	$Pa\ s/m$
$s$	Standardabweichung	
$S$	Fläche des Trennbauteils	$m^2$
$SQR$	Summe der Fehlerquadrate (Residuenquadratsumme)	
$T$	Nachhallzeit	$s$
$u$	Geschwindigkeit der Luft	$m/s$
$v$	Schallschnelle	$m/s$
$V$	Volumen	$m^3$
$W$	Schalleistung	$W$
$\alpha_{(m)}$	(mittlerer) Absorptionsgrad	
$\epsilon$	Porosität	
$\lambda$	Wellenlänge	$m$
$\mu$	arithmetischer Mittelwert	
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$

Tab. 1.1: Abkürzungen und Symbole

## 1.3 Stand des Wissens

Die einschlägige Normenreihe zur Messung des Schalldämm-Maßes im Prüfstand, die ISO 10140, besteht aus insgesamt fünf Teilen, in welchen die Auslegung des Prüfstands sowie das Vorgehen bei der Messung geregelt sind. Bereits seit Jahrzehnten ist bekannt, dass die angewandte und 1925 von Davis [5] und Buckingham [2] entwickelte Druckmethode vor allem in tieffrequenten Bereichen zu erheblichen Abweichungen bei den Messungen führt. Nachstehend werden zum einen diverse Ringversuche zwischen Labors sowie Messteams analysiert, um die zu erwartenden Schwankungen des Schalldämm-Maßes und damit einhergehender Größen darzulegen. Zum anderen wird die bestehende Literatur zum Einfluss der Raumakustik der Prüfräume auf das Schalldämm-Maß zusammengefasst.

### 1.3.1 Messunsicherheiten bei Bestimmung des Schalldämm-Maßes – Ringversuche

Bereits auf der Internoise 1996 in Liverpool wurden von Farina et.al. [15] festgestellt, dass die Labormessungen des Schalldämm-Maßes von zahlreichen Faktoren beeinflusst werden. Neben den Abmessungen der Testräume und des Prüfbauteils spielen auch die Flankenübertragung, die Diffusität in den Räumen sowie deren Nachhallzeit eine wesentliche Rolle. Die Erkenntnisse dieser und weiterführender Untersuchungen [17] fanden 2010 Einzug in die Normung [6], und die Anforderungen an die Prüfstände und Messmethoden wurden umgesetzt.

Auf der Internoise 2011 in Osaka präsentierten Demanet et al. [6] Ergebnisse aus dem europäischen CEN-Ringversuch. Hier nahmen 19 europäische Labore in neun Ländern teil, und in allen Prüfstätten kamen zwei unterschiedliche Leichtbauwände mit Stahlständerwerk zum Einsatz. Die Reproduzierbarkeit der Messungen in verschiedenen Laboren konnte trotz Implementierung der Ergebnisse der oben genannten Untersuchungen nicht verbessert werden; allerdings wurden die Abweichungen bei Wiederholung der Messung innerhalb der Prüfeinrichtung verbessert. Die Reproduzierbarkeit lag bei den untersuchten Wänden im Bereich von 5 bis 7 dB im Einzahlwert des Schalldämm-Maßes  $R_w$ ; die Wiederholbarkeit bei 0,5 bis 0,6 dB in  $R_w$ , wobei beide Werte mit steigender Schalldämmung der Bauteile ebenfalls stiegen. Die Einzahlwerte  $R_w$  der untersuchten Leichtbauwände lag im Bereich von 27 bis 64 dB. Als Konsequenz dieses Ringversuchs hat die zugehörige Arbeitsgruppe zwei Referenzsysteme zur Kalibrierung der unterschiedlichen Prüfstätten vorgeschlagen. Als Parameter mit großem Einfluss haben sich demnach die Luftdichtheit, Trockenzeit, Diffusität des Schallfeldes in den Prüfräumen sowie die Flankenübertragung herausgestellt. Eine eindeutige systematische Abweichung, aus der sich eine einheitliche Korrektur ableiten lässt, konnte nicht erkannt werden. In nachfolgenden Untersuchungen durch Bethke [1] wurden auf Basis der Untersuchungen von Demanet et al. [6] weitere Messungen durchgeführt, welche unter anderem die Abweichungen des Schalldämm-Maßes aufgrund von Produktstreuungen quantifizieren.

In weiteren Untersuchungen rückten vor allem auch die Abweichungen bei tiefen Frequenzen in den Fokus. Hongisto et al. [21] haben im Jahr 2012 Untersuchungen zu Einzelkenngrößen des Schalldämm-Maßes an Fenstern durchgeführt. Hierbei wurden neben der Druckmessmethode auch die Intensitätsmessmethode in fünf Laboren untersucht. Es konnte vor allem bei Frequenzen unterhalb von 200 Hz in üblichen Prüfständen bei Anwendung der Druckmethode eine sehr große Streuung des Schalldämm-Maßes in Terzband-Auflösung festgestellt werden. Wurde in den Terzbändern unter 200 Hz die Intensitätsmessmethode verwendet, konnte die Streuung der Ergebnisse wesentlich verringert werden. Mit Blick auf die Bewertung hin zum Einzahlwert des frequenzabhängigen Schalldämm-Maßes sei auf die Forschung von Wittstock [45] sowie Scholl [42] verwiesen. Weiters haben Scrosati und Scamoni [44] die Abweichungen des Schalldämm-Maßes mit Fokus auf tiefe Frequenzen einer Leichtbauwand, einer schweren Decke sowie einer Fassade

untersucht. Dabei wurden die Testumgebung sowie die Prüfbauteile gleich behalten; die Messungen wurden von neun unterschiedlichen Teams durchgeführt. Die sich ergebenden Abweichungen in den Einzählwerten waren gravierend; hierbei wurden vor allem große Messunsicherheiten in den tiefen Frequenzen unter 200 Hz festgestellt. Konkret lag die Standardabweichung der Einzähl-Ergebnisse bei etwa 3 bis 4 dB.

In einem aktuellen Ringversuch hat der Österreichische Arbeitsring für Lärmbekämpfung (ÖAL) die Messunsicherheiten von In-Situ Tritt- wie auch Luftschallmessungen untersucht [23]. An den Messungen wurden insgesamt 20 Labore mit der selben Messaufgabe betraut. In einer Musikschule in Oberösterreich sollten Luft- wie auch Trittschallmessungen in horizontaler und vertikaler Richtung durchgeführt werden. Bei den betrachteten Räumen handelt es sich um Unterrichtsräume mit einem Volumen von 60 bis 80 m<sup>3</sup>, wobei die Raumhöhe bei 2,80 m liegt. Die gemessenen Bauteile sind eine Leichtbautrennwand mit 5-facher Beplankung sowie eine Standard Stahlbetondecke mit 20 cm abgehängter Decke. Die Vorgabe war, Messungen nach den einschlägigen Normen für die In-Situ-Messung der Normenreihe ISO 16283 durchzuführen. Je Laborteam wurden fünf Messungen durchgeführt und diese je Labor gemittelt. Aus diesen gemittelten Werten der Standard-Schallpegeldifferenz ( $D_{nT}$ ) ergaben sich im Frequenzbereich < 125 Hz Schwankungen in den Terzbändern von bis zu 10 dB. Auf Basis der publizierten Daten kann allerdings davon ausgegangen werden, dass diese Schwankungen auch mit der Ermittlung der Nachhallzeit zusammenhängen – hierbei kam es im erwähnten Frequenzbereich zu Abweichungen von bis zu 0,5 s, was zu Schwankungen im  $D_{nT}$  von bis zu 3 dB in den Terzbändern führen kann. Geht man vom größtmöglichen Einfluss aus der Nachhallzeit aus, so liegen die Schwankungen der Schallpegeldifferenz trotzdem noch bei bis zu 7 dB.

### 1.3.2 Einfluss der Raumakustik auf das Schalldämm-Maß

Der Einfluss der Raumakustik im Sende- wie auch Empfangsraum wurde, wie bereits erwähnt von Schönwald et al. [41, 43] beleuchtet. Hierbei wurde der Fokus allerdings auf den Vergleich der Messmethoden nach ISO 16283-1 [11] und Moorhouse [27] gelegt. Forschung zu den verschiedenen Messmethoden wurde auch bereits im Prüfstand, in welchem die Messungen im Zuge dieser Arbeit stattfanden, von Pirch [35–37] durchgeführt. Bei den Untersuchungen von Schönwald kam ein innerhalb eines existierenden Prüfraums eingebauter Versuchsraum mit einem Raumvolumen von < 25 m<sup>3</sup> zum Einsatz. Hierdurch konnte man die Wirkungsweise des Versuchsraums, welcher mit typischer Möblierung dieser Raumgröße ausgestattet wurde, als Sende- wie auch Empfangsraum untersuchen. Zur Messung kamen vier Varianten, wobei der Versuchsraum als Sende- oder Empfangsraum sowohl möbliert als auch unmöbliert war. Der Schalldruckpegel der Räume wurde mit einem regelmäßigen Raster von 50 cm Schrittweite abgetastet, und daraus wurden je 10 Sets mit je 5 Messpunkten für die Auswertung herausgegriffen. Betrachtet man die für diese Arbeit ausschlaggebenden Ergebnisse der Untersuchungen, so wurde der Einfluss der Möblierung auf die Schalldruckpegel als vernachlässigbar eingestuft. Die Schwankungen aller Varianten bewegen sich unterhalb von 1 dB in den Terzbändern, wobei die Schwankung innerhalb der einzelnen Datasets in den möblierten Räumen zunimmt. Auch nach dem Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen nach ISO 16283-1 [11] kam nur ein geringer Einfluss (etwas mehr als 1 dB in den Terzbändern) der Möblierung zu Tage. Zu erwähnen ist, dass die Anregungsamplitude der einzelnen Messungen bei diesen Untersuchungen angepasst wurde, der Einfluss der Möblierung auf Basis deren Absorption und somit der Energiedissipation ist daher nicht gegeben. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse dieser Untersuchungen mit jenen im Zuge dieser Arbeit ist daher leider nicht möglich.

Fuchs hat in [20] unter anderem Untersuchungen zur idealen Bedämpfung von Prüfraumen für die Bestimmung des Schalldämm-Maßes im tiefen Frequenzbereich durchgeführt. Hierbei

konnte beobachtet werden, dass der Einsatz von breitbandig wirksamen Tiefen-Absorbern<sup>1</sup> zu einer Pegelreduzierung der Eigenresonanz-Spitzen von 10-20 dB führen. Diese Messungen wurden in einem Prüfstand mit zwei identischen Prüfräumen mit den Abmessungen von jeweils  $L / B / H = 5 / 4 / 3$  m durchgeführt; das Volumen des Prüfstands entspricht mit  $60 \text{ m}^3$  also einem üblichen Prüfstand nach ISO 10140. Es kam zu Tage, dass durch eine sehr hohe Absorption in den Prüfräumen von  $\alpha_m = 0,4$  (dies entspricht einer Nachhallzeit in den Prüfräumen von etwa 0,25 s) nahezu Freifeldbedingungen in den Räumen herrschen. Eine nach Fuchs 'optimale Bedämpfung' wird durch eine mittlere Absorption von  $\alpha_m = 0,2$  erreicht (die Nachhallzeit liegt hier somit bei etwa 0,5 s). Im Vergleich hierzu wurden bei geringerer Bedämpfung auch niedrigere Schalldämm-Maße gemessen; bei stark bedämpften Räumen konnten höhere Werte beobachtet werden. Bestimmt wurde diese 'optimale Bedämpfung' anhand von insgesamt zehn Bauteilen, deren Schalldämm-Maß jeweils fünfmal bestimmt wurde. Daraus konnten Fuchs und Zha ableiten, dass bei besagter Bedämpfung die erforderliche Genauigkeit für eine Messung des Schalldämm-Maßes nach ISO 10140 bis zum 50 Hz Terzband gewährleistet ist. Daraus ergibt sich, dass durch die ausreichende Bedämpfung der Prüfräume die Bestimmung des Schalldämm-Maßes auch in den Frequenzen unterhalb von 100 Hz ohne wesentlichen Mehraufwand mit zufriedenstellender Wiederholbarkeit durchgeführt werden kann.

---

<sup>1</sup>bspw. Verbundplatten-Resonatoren, Membran-Absorber oder Kanten-Absorber nach Beitrag B1 in [18]

# Kapitel 2

## Theorie zur Messung des Schalldämm-Maßes

### 2.1 Grundlagen zur Bestimmung des Schalldämm-Maßes im Prüfstand

Die Bestimmung des Schalldämm-Maßes im Prüfstand ist in der Normenserie ISO 10140 geregelt, konkret wird im Teil 2 der Serie das Vorgehen zur Messung des Luftschalldämm-Maßes definiert. Das nachstehende Kapitel wurde auf Basis der ISO 10140-2 [7] sowie ISO 10140-5 [9] erstellt. Es handelt sich somit um rein normative Vorgaben, welche nicht zwingend dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechen. Allerdings wurde versucht, den wissenschaftlichen Hintergrund der normativen Vorgaben zu eruieren und zu beleuchten.

#### 2.1.1 Definition des Schalldämm-Maßes

Für die Messung des Schalldämm-Maßes sind zwei angrenzende Räume mit einem trennenden Prüfbauteil zu verwenden. Im Senderraum ist ein bewegter Lautsprecher oder alternativ sind Lautsprecher an zwei oder mehr Positionen zu verwenden, um ein diffuses Schallfeld zu erzeugen. Grundlegend wird in weiterer Folge der Schalldruckpegel im Sende- wie auch Empfangsraum gemessen und mit Hilfe der nachstehenden Methodik das Schalldämm-Maß ermittelt. Der übliche Frequenzbereich für Messungen beträgt 100 Hz bis 5000 Hz; spricht man vom erweiterten tiefen Frequenzbereich, so werden auch Frequenzen von 50 Hz bis 100 Hz miteinbezogen. Da der Schalldruckpegel von den vorherrschenden atmosphärischen Gegebenheiten abhängt, sind die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte sowie der statische Druck in den Prüfräumen zum Zeitpunkt der Messungen aufzuzeichnen und anzugeben. Allgemein muss das Messverfahren eine zufriedenstellende Wiederholpräzision aufweisen; diese ist von Zeit zu Zeit zu prüfen, vor allem wenn Änderungen am Prüfstand bzw. den Messeinrichtungen vorgenommen wurden.

Grundlegend ist das Schalldämm-Maß als zehnfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses der eintreffenden  $W_{in}$  zur abgestrahlten Schalleistung  $W_{out}$  definiert, wie in Gleichung 2.1 dargestellt.

$$R = 10 \lg\left(\frac{W_{in}}{W_{out}}\right) \quad (2.1)$$

Da in den Prüfständen üblicherweise der Schalldruck gemessen wird, ergibt sich das Schalldämm-Maß  $R$  nach Gleichung 2.2 aus der Differenz des energetisch gemittelten Schalldruckpegels im Sende-  $L_{SR}$  und Empfangsraum  $L_{ER}$  in dB sowie dem zehnfachen dekadischen Logarithmus des Verhältnisses der Fläche des Trennbauteils  $S$  zur äquivalenten Schallabsorptionsfläche  $A_{ER}$  im Empfangsraum, jeweils in  $m^2$ .

Diese theoretische Formulierung beruht auf den Untersuchungen von Buckingham [2] und Davis [5]. Es liegt die Annahme eines stationären diffusen Schallfelds zugrunde und ergibt sich

auf Basis eines von allen Richtungen gleichmäßigen Schalleinfalls; die Herleitung der Gleichung 2.2 ist in [30] sehr gut dargelegt.

$$R = L_{SR} - L_{ER} + 10 \lg \left( \frac{S}{A_{ER}} \right) \quad (2.2)$$

Die äquivalente Absorptionsfläche  $A$  ergibt sich aus der Messung der Nachhallzeit in Kombination mit der Sabine'schen Formel gemäß Gleichung 2.3. Wobei  $V$  das Volumen in  $\text{m}^3$  und  $T$  die gemessene Nachhallzeit in s des Empfangsraums darstellt.  $A$  stellt jene fiktive Fläche im Raum dar, welche sich aus dem Produkt des jeweiligen Absorptionsgrades  $\alpha$  mit der zugehörigen Fläche ergibt; es wird praktisch eine äquivalente Absorberfläche  $A$  mit  $\alpha = 1$  verwendet.

Diese Gleichung beruht ebenso auf der Annahme eines stationären diffusen Schallfelds und gilt für die Nachhallzeit bei 20°C Lufttemperatur. Es wird vorausgesetzt, dass die durch eine Quelle zugeführte Leistung gleich der absorbierten Leistung in einem Raum ist. Eine anschauliche Herleitung der Sabine'schen Formel findet man in Kapitel 7.1.2 in [30]; eine sehr detaillierte Aufarbeitung kann in Kapitel 1.2.6.3 in [22] nachgeschlagen werden.

$$A = \frac{0,16 V}{T} \quad (2.3)$$

Werden feste Mikrofonpositionen und ein einzelner Lautsprecher an mehreren Positionen verwendet, so ergibt sich nach ISO 10140-4 [8] das Schalldämm-Maß aus dem Mittelwert der Schalldämm-Maße der einzelnen Lautsprecherposition. Das Schalldämm-Maß  $R$  ist also nach Gleichung 2.2 für jede Lautsprecherposition  $i$  zu bestimmen und in weiterer Folge nach Gleichung 2.4 als Mittelung aus  $n$  Lautsprecherpositionen zu errechnen.

$$R = -10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{-R_i/10} \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Anforderungen an die Prüfeinrichtungen

Allgemein ist ein diffuses Schallfeld im Senderraum anzustreben. Da dies vor allem in tiefen Frequenzen nicht trivial zu bewerkstelligen ist, ist die Position der Schallquelle entscheidend [22]. Weiters ist eine Schallquelle einzusetzen, die ein gleichmäßiges Spektrum über den betrachteten Frequenzbereich aufweist. Empfohlen wird ein Breitbandrauschen, welches zumindest oberhalb von 100 Hz eine Schwankung zwischen den benachbarten Terzbändern von weniger als 6 dB im Empfangsraum sicherstellt.

Das Messsystem muss die Anforderungen an ein Instrument der Klasse 1 nach IEC 61672-1 erfüllen. Weiters müssen die Filter die Anforderungen an ein Instrument der Klasse 0 oder 1 nach IEC 61620 einhalten. Der Schallkalibrator muss Klasse 1 nach IEC 60942 entsprechen. Alle Kriterien der Messtechnik sind durch ein Labor mit einem gültigen Baumusterprüfungszertifikat zu verifizieren. Weiters ist es in Österreich üblich, dass ein Team eines anderen Prüflabors einige Probemessungen im neuen Prüfstand durchführt und diesen somit 'validiert' – verpflichtend ist dies allerdings nicht. Vorgeschrieben werden hingegen Akreditierungsverfahren um solche Messungen durchführen zu dürfen. In Deutschland hingegen werden neue Prüfeinrichtungen durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) geprüft und abgenommen.

### 2.1.3 Anforderungen an den Prüfstand

Allgemein muss der Prüfstand aus zwei Räumen bestehen, die durch ein zu prüfendes Bauteil getrennt sind. Die Prüföffnung sollte sich von Wand zu Wand sowie von Boden zu Decke erstrecken und deren Fläche muss für die Wandprüfung größer als  $10\text{ m}^2$  sein. Die kürzeste Kante der Prüfwand hat zumindest  $2,3\text{ m}$  lang zu sein. Das Volumen der Prüfräume muss mindestens  $50\text{ m}^3$  betragen, wobei die beiden Prüfräume nicht gleich groß sein sollten. Der Senderraum sollte um zumindest  $10\%$  größer sein als der Empfangsraum. Sollten größere Schwankungen des Schalldruckpegels auftreten, ist das ein Hinweis auf Eigenmoden im Prüfraum. Treten diese auf, so sind nach ISO 10140-5 Diffusoren in die Räume einzubringen und so anzuordnen, dass das Schalldämm-Maß durch zusätzlich installierte Diffusoren nicht mehr beeinflusst wird. Wie diese Schwankungen zu überprüfen sind, oder welche Art von Diffusoren in den Prüfraum eingebracht werden sollen, wird nicht genauer definiert. Die Nachhallzeit in den Prüfräumen soll nicht übermäßig kurz oder lang sein. Für die Frequenzen über  $100\text{ Hz}$  ist eine Nachhallzeit im Bereich von  $1\text{--}2\text{ s}$  anzustreben. Sollte die Nachhallzeit der Prüfräume nicht in diesen Bereich fallen, so ist zu überprüfen, ob das Schalldämm-Maß von der Nachhallzeit abhängt. Sollte eine solche Abhängigkeit bestehen, sind die Räume zu verändern und die Spanne Nachhallzeit ist gemäß Gleichung 2.5 zu erweitern.

Auf diese normative Vorgabe der Erweiterung der Nachhallzeit für große Prüfräume hin zu einer längeren Nachhallzeit wird in weiterer Folge vertiefend eingegangen.

$$1 \leq T \leq 2 \left( \frac{V}{50} \right)^{2/3} \quad (2.5)$$

Die Flankenübertragung im Prüfstand sollte im Vergleich zur Übertragung durch das Prüfbau- teil vernachlässigbar sein. Dies kann mit Hilfe von geeigneter Körperschalldämmung zwischen Sende- und Empfangsraum und/oder mittels Vorsatzschalen in den Prüfräumen realisiert werden. Das Grenzschalldämm-Maß des Prüfstands wird auf Basis dieses Kriteriums bestimmt. Spezielle Anforderungen an den Prüfraum von zweischaligen Leichtbau-Trennwänden ergeben sich aufgrund der möglichen Übertragung von Schwingungen zwischen den Wandscheiben über den Rahmen der Prüföffnung. Zutreffend ist dies, wenn eine Prüfstandsausführung verwendet wird, bei der Sende- und Empfangsraum durch einen separaten Prüfraum getrennt sind. In diesen Prüfraum setzt man in weiterer Folge das zu prüfende Bauteil ein – detaillierte Erläuterungen zu diesem System sind Kapitel 3.1.1 zu entnehmen. Um diese ungewollte Beeinflussung der Schallübertragung zu minimieren, ist die flächenbezogene Masse des Rahmens im Verhältnis  $1:6$  größer als jene der schwersten Wandscheibe der Prüfwand zu wählen. Der Rahmen sollte weiters mindestens  $100\text{ mm}$  dick und  $200\text{ mm}$  tief sein. Die Dichte des Rahmens muss zumindest  $2000\text{ kg/m}^3$  sein und die flächenbezogene Masse mehr als  $450\text{ kg/m}^2$  betragen und aus einem homogenen massiven Material ausgeführt sein.

### 2.1.4 Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition

Die Ermittlung der optimalen Lautsprecherposition erfolgt nach ISO 10140-5 [9] Anhang D. Grundlegend sollte für das beschriebene Verfahren eine Prüfwand mit sehr geringem Schalldämm- Maß verwendet werden. Da allerdings im Zuge der Untersuchungen eine zweischalige Prüfwand verwendet wurde, fand auch die Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition in diesem Setup statt. Sofern die in diesem Prüfstand üblicherweise gemessenen Prüfwände nicht den normativen Vorgaben des Schalldämm-Maßes entsprechen, kann, nach Anmerkung 3 des Kapitels D.1.4 der einschlägigen Norm, auch eine üblicherweise gemessene Wand für die Bestimmung

der optimalen Lautsprecherposition verwendet werden. Die nachstehende Verfahrenserläuterung wurde in Anlehnung an [9] verfasst und ist für den Frequenzbereich  $> 100$  Hz vorgesehen.

Grundlegend soll das Verfahren zur Bestimmung der optimalen Lautsprecherpositionen zu jenen Positionen führen, welche Ergebnisse nahe dem Mittelwert aus einer großen Anzahl von gleichmäßig im Raum verteilten Quellpositionen liefern. Die für die Bestimmung verwendete Raumkonfiguration soll jener entsprechen, die auch bei den weiteren Messungen verwendet wird. Bei den Untersuchungen wurde die Raumkonfiguration 'SR00' (respektive der leere Senderraum) verwendet, da diese aus Sicht der möglichen Raummoden ein Worst-Case-Szenario darstellt. Die daraus generierten Positionen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auch für bedämpfte Messräume gut geeignet, da die Raummoden des leeren Senderraums abgeschwächt werden. Der Empfangsraum verblieb, wie für alle weiteren Untersuchungen auch, in der Konfiguration 'ERNorm'.

Ähnlich zu den Kriterien bei der Messung des Schalldämm-Maßes sind auch für die Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition Kriterien für Abstände der Schallquelle zueinander wie auch zu den Raumbegrenzungen einzuhalten. Diese werden nachstehend für feste Lautsprecher- sowie Mikrofonpositionen angeführt:

- zwischen Lautsprecherpositionen  $\geq 0,7$  m
- Abstand zumindest zweier Lautsprecherpositionen  $\geq 1,4$  m
- Lautsprecher zu Raumbegrenzung  $\geq$  mind.  $0,7$  m
- keine Symmetrie der Lautsprecherpositionen im Raum
- Achse unterschiedlicher Lautsprecherpositionen nicht in einer parallelen Ebene zu Raumbegrenzungen
- Abstand zwischen den Ebenen der unterschiedlichen Lautsprecherpositionen  $\geq 0,1$  m

Die Anforderungen an die Mikrofonpositionen sind jenen der Bestimmung des Schalldämm-Maßes gleichzusetzen. Es ist auch sicherzustellen, dass die Mikrofone außerhalb des Direktschallfeldes der Schallquelle liegen; diese Bedingung wird durch den Mindestabstand von der Schallquelle bei der Messung gewährleistet. Die konkreten Anforderungen sind im nachstehenden Kapitel 2.1.5 angeführt.

Aus wissenschaftlicher Sicht beruhen diese Vorgaben auf dem wesentlich höheren Schalldruckpegel im Bereich von  $\lambda/4$  von den Raumbegrenzungen. Hierbei werden Unterschiede des Schalldruckpegels von etwa 3 dB zwischen der Oberfläche der Raumbegrenzung sowie dem Punkt  $\lambda/4$  entfernt davon festgestellt [22]. Setzt man  $\lambda/4$  in die allgemeine Formel für den Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Frequenz ein, so ergibt sich eine Frequenz von etwa 120 Hz, für welche der Abstand von 0,7 m auf  $\lambda/4$  zutrifft. Kommen symmetrische Messpunkte oder Mikrofonanordnung in einer Ebene zur Anwendung, so kann es dazu kommen, dass beispielsweise mehrere Mikrofone in einem Druckextrem einer Mode liegen und somit das Ergebnis verfälschen. Der notwendige Abstand zwischen den Lautsprecherpositionen lässt sich durch den Einfluss des Direktschallfeldes begründen; hierbei wird in [22] ein praxistauglicher Abstand von 1,0 m vorgeschlagen und basiert auf geometrischen Überlegungen bei der Schallausbreitung einer Punktquelle – Details hierzu können Kapitel 2.2 sowie vertiefend Kapitel 1.2.7.6 in [22] entnommen werden. In [22] wird bezugnehmend zur Anzahl der Lautsprecherpositionen lediglich erwähnt, dass mehr als eine Lautsprecherposition zu verwenden ist. Dies wird vor allem im Kontext der Anregung möglichst vieler Moden im Raum erläutert; wobei weiters festgehalten ist, dass sich eine Lautsprecherposition möglichst in einer Ecke des Senderraums befinden soll, da hier die Wahrscheinlichkeit am größten ist, möglichst viele Raummoden gleichzeitig anzuregen.

In nächsten Schritt sind die Pegeldifferenzen  $D$  nach [8] zu bestimmen; welche sich aus der Differenz des Schallpegels im Senderraum  $L_{SR}$  und im Empfangsraum  $L_{ER}$  ergibt (Gleichung 2.6). Mit Hilfe der Gleichung 2.7 wird die zu untersuchende Anzahl an Lautsprecherpositionen  $n$  abhängig vom Senderraumvolumen  $V$  in  $\text{m}^3$  bestimmt.

$$D = L_{SR} - L_{ER} \quad (2.6)$$

$$n = \frac{152}{V_{SR}^{2/3}} \quad (2.7)$$

Mit Hilfe der ermittelten Pegeldifferenzen  $D$  der untersuchten Lautsprecherpositionen  $j$  werden nun die statistischen Kennwerte der Messungen ermittelt. Hierbei wird der arithmetische Mittelwert und in weiterer Folge die Standardabweichung jeweils in den Terzbändern  $i$  von 100 bis 315 Hz bestimmt, wie in Gleichung 2.8 und 2.9 dargestellt.

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_i D_i \quad (2.8)$$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (D_{ji} - \mu_i)^2} \quad (2.9)$$

In weiterer Folge werden jene Lautsprecherpositionen ausgewählt, welche die kleinste Abweichung aus der Summe der Fehlerquadrate vom Mittelwert der Terzbänder  $SQR_j$  ergeben, siehe Gleichung 2.10.

$$SQR_j = \sum_i (D_{ji} - \mu_i)^2 \quad (2.10)$$

Für die Anzahl  $N$  der mindestens zu wählenden Lautsprecherpositionen werden weitere Kriterien festgelegt:

- $N \geq 2$
- $N \geq \frac{s_i}{s_{max,i}}$
- $N \geq \left( \sum_i \frac{s_i}{4,8} \right)^2$

Die Werte für die maximale Standardabweichung  $s_{max,i}$  sind der nachstehende Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Nun werden zumindest zwei Lautsprecherpositionen ausgewählt, welche in ihrer Kombination die kleinste Summe der Fehlerquadrate  $SQR_j$  ergeben. Von diesen gewählten Lautsprecher-Positionen müssen mindestens zwei einen Abstand von mehr als 1,4 m einhalten. Sollten Positionen nahe den Raumbegrenzungen gewählt worden sein, so ist darauf zu achten, dass diese Positionen genau reproduziert werden können, da bereits kleine örtliche Abweichungen zu großen Messunsicherheiten führen können.

**Tab. 2.1:** Maximale Standardabweichung je Terzband für den Mittelwert der Pegeldifferenzen  $D$  zur Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition

f	$s_{max,i}$
in Hz	in dB
100	1,4
125	1,2
160	1,0
200	0,8
250	0,8
315	0,8

## 2.1.5 Anforderungen an die Mikrofonpositionen

### 2.1.5.1 Standardmessmethode nach ISO 10140

Das nachstehende Kapitel wurde in Anlehnung an ISO 10140-4 [8] verfasst. Die Messung der Schalldruckpegel ist mit Terzbandfiltern durchzuführen, wobei die Bandmittenfrequenzen von 100 bis 5000 Hz gemessen werden müssen, jene von 50 bis 80 Hz sind optional. Der Schalldruckpegel in den Prüfräumen kann mit einem einzelnen Mikrofon, welches von einer zur nächsten Position bewegt wird, bestimmt werden; alternativ können auch mehrere Mikrofone an festen Positionen gleichzeitig oder ein kontinuierlich bewegtes Mikrofon verwendet werden. Die Mittelungszeit einer einzelnen Messung mit festen Mikrofonpositionen muss zumindest bei 6 s liegen, oberhalb des 400 Hz Terzbandes darf auf 4 s reduziert werden. Folgende Mindestabstände der Mikrofone sind jedenfalls einzuhalten:

- 0,7 m zwischen Mikrofonen
- 0,7 m zu den Raumbegrenzungen sowie zu Diffusoren
- 1,0 m zum Prüfbauteil sowie zur Schallquelle

Wie in Kapitel 2.1.4 erläutert, hängen die Abstände mit dem erhöhten Schalldruckpegel in der Nähe der Raumbegrenzungen sowie der Schallquelle zusammen.

Für die Ermittlung des Schalldämm-Maßes werden die energetisch gemittelten Schalldruckpegel des Sende- wie auch Empfangsraums verwendet. Diese ergeben sich aus der logarithmischen Mittelung der gemessenen Schalldruckpegel je Mikrofonposition und berechnen sich wie in Gleichung 2.11 dargestellt, wobei  $i$  für die einzelnen Mikrofonpositionen und  $n$  für die Anzahl steht.

$$L = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \quad (2.11)$$

Im Zuge der Messung des Schalldruckpegels ist auch der Hintergrundgeräuschpegel festzuhalten. Dies geschieht durch Messen des Schalldruckpegels im Empfangsraum im Prüfsetup, jedoch ohne dass der Lautsprecher im Senderraum aktiv ist. Es werden somit elektrische Störsignale sowie Geräusche außerhalb des Prüfraums dokumentiert. Dieser Hintergrundgeräuschpegel muss mindestens 6 dB unter jenem des bei der R-Messung ermittelten Schalldruckpegels liegen. Beträgt dieser Störabstand 15 dB oder mehr, so sind keine weiteren Adaptierungen durchzuführen. Beträgt der Abstand 6 dB oder weniger, so ist ein Korrekturwert von -1,3 dB beim Empfangsraumpegel

anzusetzen und eindeutig im Prüfbericht zu kennzeichnen. Bewegt sich der Störabstand zwischen 6 und 15 dB, so ist eine Korrektur des gemessenen Schalldruckpegels im Empfangsraum  $L_{ER}$  nach Gleichung 2.12 anzuwenden; wobei  $L'_{ER}$  der korrigierte Schalldruck und  $L_b$  der Hintergrundgeräuschdruckpegel ist. Der Schalldruckpegel im Empfangsraum wird somit durch die Korrektur verringert, wodurch die Schallpegeldifferenz und somit auch das Schalldämm-Maß steigt.

$$L'_{ER} = 10 \lg \left( 10^{L_{ER}/10} - 10^{L_b/10} \right) \quad (2.12)$$

Die Messung der Luftschalldämmung ist mit zumindest zwei Lautsprecherpositionen im Senderaum durchzuführen. Diese können simultan durch zwei Lautsprecher oder auch nacheinander durch einen Lautsprecher bedient werden. Weiters ist auch die Verwendung eines kontinuierlich bewegten Lautsprechers möglich. Für das vorliegende Prüfstands-Setup sind die Bestimmungen für feste Mikrofonpositionen und Verwendung eines einzelnen Lautsprechers relevant. Es sind je Lautsprecherposition zumindest fünf Mikrofonpositionen zu verwenden. Diese dürfen kein regelmäßiges Raster ergeben, und es dürfen nicht zwei Positionen in einer parallelen Ebene zu den Raumbegrenzungen liegen.

Aus wissenschaftlicher Sicht findet sich in Kapitel 3.4.1 in [22] ein Hinweis auf das Zustandekommen der Kriterien der Mikrofonpositionen. Hier wird als Ziel gesetzt Stichproben zu finden, die für ein diffuses Schallfeld repräsentativ sind. Als Parameter zur Beurteilung der Qualität der Stichproben wird die Korrelation zwischen den Schalldruckpegeln zweier Mikrofone im Abstand  $d$  definiert. Es wird gezeigt, dass diese Korrelation im Bereich  $d > \lambda/2$  nur eine schwache ist; somit können nahezu unkorrelierte Mikrofonpositionen gefunden werden, wenn dieser Abstand eingehalten wird. Die normative Anforderung von 0,7 m zwischen Mikrofonen stimmt somit mit dieser Bedingung bei etwa 250 Hz überein. Wird diese Bedingung eingehalten, so erhält man nach [24, 25] bei fünf Mikrofonpositionen immer zumindest vier unkorrelierte. Ein Kriterium, wonach vier unkorrelierte Mikrofonpositionen repräsentativ für ein diffuses Schallfeld sind, wird allerdings nicht angeführt.

### 2.1.5.2 Messmethode für tiefe Frequenzbereiche nach Anhang A der ISO 10140-4

Die Messmethode 'Anhang A' basiert auf dem Anhang A der ISO 10140-4 [8], welcher informativ *zusätzliche Verfahren zur Messung bei tiefen Frequenzen* darlegt. Die nachstehenden Erläuterungen in diesem Kapitel wurden auf Basis der einschlägigen Norm [8] verfasst. Hier heißt es einleitend:

„In tiefen Frequenzbändern (unter 400 Hz im Allgemeinen und vor allem unterhalb von 100 Hz) ist das Schallfeld in den Prüfräumen nicht diffus, besonders dann, wenn Raumvolumina von nur 50 m<sup>3</sup> bis 100 m<sup>3</sup> betrachtet werden. Die allgemeine Anforderung, dass die Raummaße mindestens eine Wellenlänge betragen sollten, kann für die tiefsten Frequenzbänder nicht erfüllt werden.“ [8, S. 18]

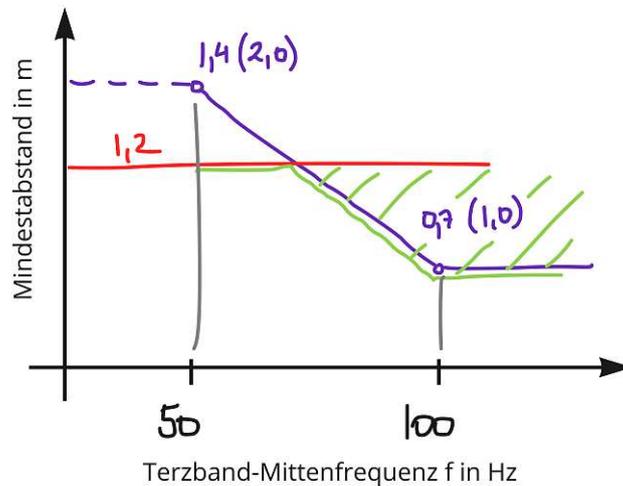
Hierbei wird die Schröderfrequenz als Grenze für ein diffuses verwendet – detaillierte Erläuterung zur Schröderfrequenz sind in Kapitel 2.4 erläutert.

Durch das zu erwartende nicht diffuse Schallfeld ist die Lautsprecherposition von großer Bedeutung, da je nach Position des Lautsprechers unterschiedliche Raummoden angeregt werden können und somit das Schalldämm-Maß erheblich beeinflusst wird. Grundlegend sollten folgende Anforderung an den Prüfraum für das tiefste betrachtete Frequenzband eingehalten werden:

- ein Raummaß  $\geq \lambda$
- ein weiteres Raummaß  $\geq \lambda/2$

wobei dies, wie oben beschrieben, oft nicht eingehalten werden kann. Beispielsweise ergibt sich für 50 Hz für den XL-Prüfstand im ACA bei einer Schallgeschwindigkeit ( $c_0$ ) von 340 m/s ein Raummaß von zumindest 6,8 m und ein weiteres von zumindest 3,4 m. Der Senderraum im ACA erfüllt diese Bedingung also knapp nicht bei seinen Abmessungen L / B / H von 6,7 / 5,3 / 3,9 m<sup>3</sup>. Der Empfangsraum im ACA mit den Raummaßen L / B / H von 7,4 / 5,3 / 3,9 m<sup>3</sup> erfüllt die oben genannten Bedingungen sehr wohl.

In weiterer Folge sollen auch die Mindestabstände der Norm-Messung nach Kapitel 2.1.5.1 erhöht werden, da im Bereich  $\lambda/4$  von den Raumbegrenzungen ein deutlich höherer Schalldruckpegel zu erwarten ist. Die vorgeschlagenen Mindestabstände sollen daher bis zum 50 Hz Terzband linear verdoppelt werden; wobei das Höchstmaß des Mindestabstands der Mikrofone etwa 1,2 m betragen soll. Eine schematische Darstellung dieser Vorgabe ist in Abbildung 2.1 dargestellt.



**Abb. 2.1:** Veranschaulichung der Erhöhung der Mindestabstände von den Raumbegrenzungen (blau) bei Anwendung des Messverfahrens für tiefe Frequenzbereiche nach Anhang A der ISO 10140-4; wobei die Abstände vom 100 zum 50 Hz Terzband linear zu verdoppeln sind (blau) und 1,2 m den Höchstwert der Mindestabstände (rot) darstellt. Mindestabstände im grünen Bereich sind daher zulässig. Die Werte in den Klammern stellen die Mindestabstände zur Schallquelle und zum Prüfbauteil dar

Nach Anhang A der ISO 10140-4 wird auch eine Abtastung des Schallfelds empfohlen, wobei die Anzahl Mikrofonpositionen erhöht und gleichmäßig über das zulässige Volumen verteilt werden soll. Die Mittelungszeit soll zumindest 15 s betragen, da die Modenüberlappung eine geringer ist. Normativ angemerkt wird, dass bei sehr tiefen Frequenzen, bei denen die Raummaße im Bereich  $\lambda/2$  liegen, extrem niedrige Schalldruckpegel in der Mitte des Raumes zu erwarten sind und dieser Bereich daher ausgespart werden sollte. Weiters wird empfohlen, die Anzahl der Lautsprecherpositionen zu erhöhen, hierdurch sollen die fehlende Diffusivität in kleinen Räumen ausgeglichen, und die unterschiedlichen Schallfelder nacheinander angeregt werden. Es sind zumindest drei Lautsprecherpositionen vorzusehen bzw. wird ein kontinuierlich bewegter Lautsprecher empfohlen.

## 2.2 Bestimmung der Nachhallzeit in den Prüfräumen

Grundlegend ist die Nachhallzeit eines Raumes als jene Zeit definiert, die erforderlich wäre, damit der Schalldruckpegel in einem Raum um 60 dB abnimmt, nachdem die Schallquelle abgeschaltet wurde [8]. Die Nachhallzeit wird in der Einheit Sekunden angegeben.

Nach der aktuellen Norm zur Messung der Schalldämmung im Prüfstand, der ISO 10140-4 [8], ist die Nachhallzeit bevorzugt nach dem *Standardverfahren*<sup>1</sup> der ISO 3382-2 [14] zu bestimmen; alternativ kann auch das *Präzisionsverfahren*<sup>2</sup> verwendet werden. Diese beiden Verfahren stellen lediglich die Qualität der Messung dar und werden untenstehend kurz beleuchtet. Allgemein kann die Messung der Nachhallzeit mit *abgeschaltetem Rauschen* oder mit *integrierter Impulsantwort* erfolgen; für letzteres sind auch Vorgehensweisen nach ISO 18233 [12] zulässig (z.B. Sinus-Sweep). Der meist in der Bauakustik bevorzugte Schalldruckpegelabfall für die Berechnung der Nachhallzeit beträgt 20 dB, kurz RT20. Für die Approximation auf den Pegelabfall von 60 dB muss die obere Grenze mindestens 20 dB unter dem Anfangsschallpegel und die untere Grenze mindestens 10 dB über dem Hintergrundgeräuschpegel liegen. Gemäß ISO 3382-2 [14] erfolgt die Auswertung der Abklingkurven nach dem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate, siehe Anhang C der besagten Norm. Allerdings können auch andere Methoden angewandt werden, solange diese zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Eine visuelle Kontrolle der Abklingkurve ist anzuraten, da die Auswertemethode nur für annähernd geradlinigen Abfall der Nachhallzeit zu brauchbaren Ergebnissen führt.

In der ISO 3382-2 [14] wird für das Messen mit *abgeschaltetem Rauschen* festgelegt, dass als Eingangssignal für den verwendeten Lautsprecher ein breitbandiges statisches oder pseudo-statisches elektrisches Rauschen anzuwenden ist. Der erzeugte Schalldruckpegel muss mindestens 35 dB über dem Störpegel (=Hintergrundgeräuschpegel) liegen. Sofern die Nachhallzeit mit 30 dB als Approximation für die Abklingkurve (RT30) bestimmt werden soll, ist ein Störabstand von zumindest 45 dB sicherzustellen. Weiters muss für das *Standardverfahren* und das *Präzisionsverfahren* die Anregung des Raumes solange fortgeführt werden, bis sich ein stationäres Schallfeld einstellt; davon kann ausgegangen werden, wenn die Anregung mindestens  $T/2$  erfolgt. Für große Prüfvolumina ist eine Anregedauer von zumindest 1 s vorgesehen.

Allgemein sollte die Schallquelle so ungerichtet wie möglich sein. Die Mikrofone sollten so klein wie möglich sein, ein maximaler Membrandurchmesser von 14 mm ist erstrebenswert. Die Senderposition soll sich in einer der üblichen Nutzung entsprechenden Position befinden; falls keine Position der üblichen Nutzung besteht, sollte der Sender in einer Raumecke aufgestellt werden. Folgende Abstände und Kriterien der Mikrofone sind einzuhalten:

- zwischen den Mikrofonpositionen mind.  $\lambda/2$
- zur nächsten reflektierenden Oberflächen mind.  $\lambda/4$
- keine symmetrischen Anordnungen

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge der niedrigsten betrachteten Frequenz darstellt. Vor allem bei tiefen Frequenzen ist die Einhaltung dieser Abstände nur sehr schwer bewerkstelligbar. In der Praxis werden oftmals die Abstandskriterien aus der Messung des Schalldämm-Maßes auch für die Nachhallzeit-Messung übernommen. Die Kriterien der Messung des Schalldämm-Maßes stimmen mit den hier angeführten überein, sofern man eine Frequenz von etwa 120 Hz und höher ansetzt.

Der Frequenzbereich für Oktavbänder sollte mindestens von 125 Hz bis 4000 Hz, sowie für Terzbänder von 100 Hz bis 5000 Hz reichen. Um einen Direktschall-Einfluss zu vermeiden, ist

<sup>1</sup>Das Standardverfahren für gewöhnliche Räume nach ISO 3382-2 [14] ist für die Spezifikation der Nachhallzeit in Gebäude konzipiert. Die Nenngenauigkeit bei Anwendung von Terzbandfiltern liegt bei 10 % oder besser; bei Oktavbändern bei 5 % oder besser. Für das Standardverfahren sind sechs Sender-Mikrofon-Kombinationen, zumindest zwei Senderpositionen sowie zumindest zwei Mikrofonpositionen zu verwenden. In Summe sind mindestens sechs unabhängige Sender-Mikrofon-Kombinationen zu verwenden.

<sup>2</sup>Das Präzisionsverfahren für gewöhnliche Räume nach ISO 3382-2 [14] ist vorgesehen, wenn eine hohe Messgenauigkeit gefordert ist; diese beläuft sich in den Terzbändern auf besser als 5 % und in den Oktavbändern auf besser als 2,5 %. Hier sind mindestens zwei Senderpositionen sowie zumindest 12 unabhängige Sender-Mikrofon-Kombinationen erforderlich.

ein Mindestabstand  $d_{min}$  in Meter der Mikrofone von der Schallquelle nach Gleichung 2.13 einzuhalten; wobei  $V$  das Volumen des Prüfraums in  $m^3$ ,  $c_0$  die Schallgeschwindigkeit in  $m/s$  und  $\hat{T}$  die zu erwartende Nachhallzeit in  $s$  darstellt.

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{V}{c_0 \cdot \hat{T}}} \quad (2.13)$$

In [22] wird die empfohlene Distanz der Mikrofone von den Lautsprechern mit 1,0 m für Räume unter  $150 m^3$  und mehr als 0,5 s Nachhallzeit angegeben. Vertieft man sich in die Herleitung dieser Aussage, so zeigt sich, dass die Energiedichte des diffusen Feldes jener des Direktschallfeldes gleichgesetzt wird. Auf Basis der geometrischen Überlegung, dass der Schalldruckpegel einer Punktschallquelle mit Verdopplung des Abstands um 6 dB sinkt, ergibt sich eine Bedingung für diesen Übergang von Direkt- zu Diffusschallfeld. Dieser Abstand wird mit Nachhallabstand  $d_{rd}$  bezeichnet und beträgt etwa die Hälfte des in Gleichung 2.13 angeführten Abstands. Hierzu heißt es in [22], dass die Mikrofone etwas weiter als  $d_{rd}$  von der Schallquelle entfernt aufgestellt werden sollten.

Neben der Nachhallzeit werden in der Literatur oftmals weitere Größen zur Beschreibung der Raumakustik verwendet. Zum einen die in Kapitel 2.1.1 erwähnte äquivalente Absorptionsfläche  $A$ , zum anderen die daraus abgeleitete Größe des Absorptionsgrades  $\alpha$ . In weiterer Folge findet sich auch der Begriff des mittleren Absorptionsgrades in diversen Werken, hierbei handelt es sich um einen arithmetischen Mittelwert des Absorptionsgrades  $\alpha_m$  über einen definierten Frequenzbereich. In dieser Arbeit wird der betrachtete Frequenzbereich als Index des Absorptionsgrades geführt, beispielsweise spiegelt  $\alpha_{m,50-250}$  den mittleren Absorptionsgrad für die Terzbänder von 50 bis 250 Hz wider.

### 2.2.1 Nachhallzeit-Messung mit abgeschaltetem Rauschen

Bei Bestimmung der Nachhallzeit sind nach ISO 10140-4 [8] feste Mikrofonpositionen und mindestens sechs Messungen je Frequenzband vorgesehen. Weiters sind diese sechs Messungen an zumindest drei unterschiedlichen gleichbleibenden Mikrofonpositionen und einer Lautsprecherposition zu ermitteln, hierbei erfolgen zwei Messungen an der jeweils gleichen Mikrofonposition. Alternativ kann mit sechs festen Mikrofonpositionen und je einer Messung gearbeitet werden. Diese Angaben der ISO 10140-4 [8] stimmen somit nicht mit dem nach der selben Norm anzuwendenden Standardverfahren der ISO 3382-2 überein, welche wie oben beschrieben zumindest zwei Senderpositionen vorschreibt.

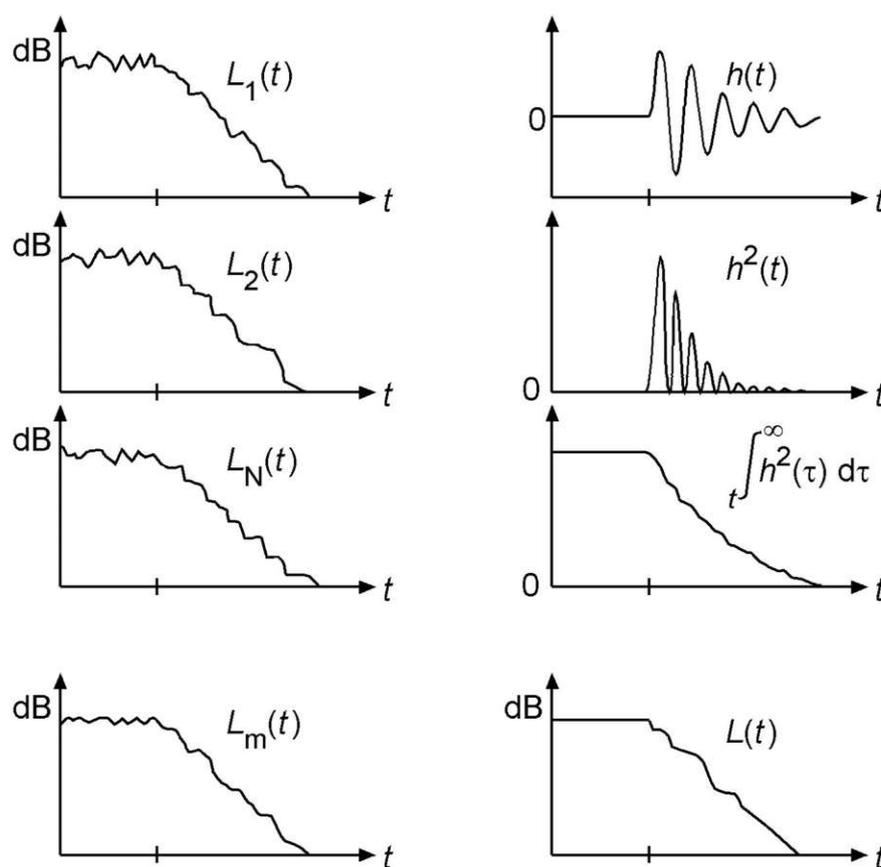
### 2.2.2 Nachhallzeit-Messung mit integrierter Impulsantwort

Analog werden auch für das Verfahren mit integrierter Impulsantwort nach [8] zumindest sechs Messungen je Frequenzband gefordert, diese sind allerdings mit mindestens einer Lautsprecherposition sowie sechs festen Mikrofonpositionen zu ermitteln. Es dürfen keine bewegten Lautsprecher oder Mikrofone verwendet werden. Die Berechnung der Nachhallzeit erfolgt durch Auswerten der jeweiligen Abklingkurve; diese wird durch Rückwärtsintegration der quadrierten, gefilterten Impulsantwort erzeugt. In [14] ist festgelegt, dass die Anregung beim *Verfahren mit Integrierter Impulsantwort* mit einer Impulsquelle oder einem beliebigen anderen Sender, der selbst nicht nachhallend ist und über ein ausreichend breites Spektrum verfügt, zu erfolgen hat. Speziell dürfen auch besondere Schallsignale wie beispielsweise ein Sinus-Sweep verwendet werden, hierzu wird auf die ISO 18233 [12] verwiesen. Die Verwendung eines Sinus-Sweep-Signals verbessert den Störabstand und führt somit zu einer resilienteren Messung gegenüber Verzerrungen [32].

Die Anregung durch einen *Sinus-Sweep* wird in Anhang B der ISO 18233 [12] beschrieben und nachstehend erläutert.

Ganz allgemein ist die Impulsantwort eines Raums ein Oszillatorsignal mit einer großen Anzahl an Perioden. Die Umhüllende kann als unregelmäßig beschrieben werden; meist zeigt sich allerdings ein schneller Anstieg und ein exponentielles Abklingverhalten. Diese Antwort ermöglicht die Evaluierung des Ansprechverhaltens eines Raums auf einen sehr kurzen akustischen Impuls. Vorzugsweise ist für die Schallerzeugung ein Lautsprecher mit digitaler Signalverarbeitung zu verwenden. Durch die Anregung des Raums über eine bestimmte Dauer hinweg wird die abgestrahlte Gesamtenergie erhöht, was wiederum den Einfluss des Hintergrundgeräuschs reduziert. Weiters ist eine Anregung durch sinusförmige Sweeps weniger empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen (Temperatur, Luftfeuchte, Luftbewegung), was vor allem bei Messungen im Freien von Vorteil ist. Es sollte trotzdem auf möglichst stabile Umweltbedingungen geachtet werden. Vertiefende Untersuchungen hierzu sind [32] zu entnehmen.

Ein Vergleich der Ermittlung der Nachhallzeit mittels der Messmethode des *abgeschalteten Rauschens* und jener des *Sinus-Sweep-Verfahrens* und somit der integrierten Impulsantwort ist in Abbildung 2.2 dargestellt; wobei  $L_i$  die einzelnen Abklingkurven sind und  $L_m$  die Mittelung dieser ist. Die Abklingkurve  $L(t)$  entsteht durch Verarbeitung der Impulsantwort  $h(t)$ .



**Abb. 2.2:** Vergleich beispielhafter Abklingkurven bei einer definierten Frequenz zur Ermittlung der Nachhallzeit mittels Anregung durch abgeschaltetes Rauschen (links) und jene des Sinus-Sweep-Verfahrens (rechts); wobei  $L_{i=1\dots N}$  die einzelnen Abklingkurven sind und  $L_m$  die Mittelung dieser ist, die Abklingkurve  $L(t)$  entsteht durch Verarbeitung der Impulsantwort  $h(t)$  [12]

Die Anregung durch den Sinus-Sweep kann einmalig von niedriger zu hoher Frequenz oder periodisch wiederholt erfolgen. Bei einmaligem Sweep wird die Messdauer verkürzt, allerdings muss nach der Signalabgabe eine ruhige Phase folgen, um die verzögerten Komponenten erfassen zu können. Diese Ruhephase muss lediglich größer als die Nachhallzeit des Raums bei hohen Frequenzen sein, da die Impulsantwort der tiefen Frequenzen bereits ermittelt werden kann solange der Sweep 'hochläuft'. Daher kann ein möglichst langer Sweep im Bereich von einigen Sekunden verwendet werden. Das Spektrum des Sweeps kann analog als weißes oder auch rosa Rauschen (üblich) erfolgen. Für das Sweep-Signal kommt hier die zeitliche Komponente hinzu; beim linearen Sweep bleibt die Zeit je Frequenzband konstant; beim exponentiellen Sweep steigt hingegen die Frequenz exponentiell mit der Zeit an – in tiefen Frequenzen wird das Signal somit länger abgegeben, um eine adäquate Anregungsdauer zu erreichen.

## 2.3 Definition und Wirkungsweise von raumakustischen Elementen

Im Zuge der Variation der Raumakustik im Senderraum werden verschiedene Elemente eingesetzt. Zum einen handelt es sich um Absorber, welche durch Energiedissipation das Schallfeld bedämpfen; zum anderen kamen Diffusoren zum Einsatz, welche durch Ablenken und Streuen der Schallwellen ein diffuseres Schallfeld erzeugen. Nachstehend werden diese beiden Elemente der Raumakustik sowie deren Wirkungsweise genauer beschrieben. Dieses Kapitel wurde in Anlehnung an [30] sowie [19] verfasst.

### 2.3.1 Passive Absorber

Wie bereits einleitend erwähnt, hat ein Absorber die Aufgabe, die Energie des Schallfelds zu dissipieren. Die im Zuge dieser Untersuchungen verwendeten sogenannten passiven Absorber werden aus porösen, fasrigen Materialien gefertigt – wie beispielsweise Mineralwolle, Kokosfasern, Filze oder offenzelligen Schäumen. Diese passiven Absorber dissipieren die Energie durch Reibung der Luftmoleküle und somit in Form von Wärme.

Essenziell für eine hohe Energiedissipation ist der Widerstand  $R_s$ , welcher der hindurchströmenden Luft entgegengesetzt wird und eine Druckdifferenz hervorruft (Gleichung 2.14). Der spezifische Strömungswiderstand  $R_s$  ist wiederum proportional zur Geschwindigkeit  $u$  dieser durchströmenden Luftmoleküle. Der Widerstand wird bei gleichem Material mit zunehmender Dicke  $d$  größer, daher wird in Gleichung 2.15 der längenbezogene Strömungswiderstand  $r$  eingeführt; wobei sich die Einheit von  $r$  zu  $\text{Pa s/m}^2$  ergibt.

$$\Delta p = R_s \cdot u = r \cdot d \cdot u \quad (2.14)$$

$$r = \frac{R_s}{d} \quad (2.15)$$

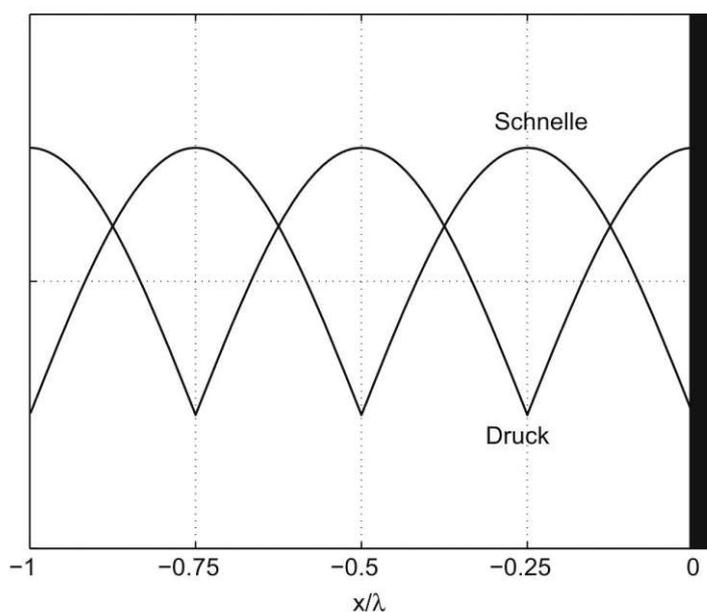
Weitere Parameter für die Wirksamkeit von Absorbern sind die Porosität  $\Phi$  sowie der Strukturfaktor  $\kappa$ . Ersterer beschreibt den Anteil der Luft im Absorber am Gesamtvolumen (Gleichung 2.16); zweiterer berücksichtigt, dass einige Kanäle des Materials als Sackgasse enden oder Umwege bilden. Der Parameter  $\kappa$  ergibt sich nach Gleichung 2.17 aus dem Verhältnis der inneren ( $v_i$ ) und der äußeren Schallschnelle ( $v_e$ ) sowie der Porosität.

$$\Phi = \frac{V_{air}}{V_{total}} \quad (2.16)$$

$$\kappa = \Phi \cdot \frac{v_i}{v_e} \quad (2.17)$$

Um einen möglichst hohen Grad der Absorption zu erreichen, sollte  $r$  weder zu klein noch zu groß gewählt werden. Ist der längenbezogene Strömungswiderstand  $r$  zu groß, so kann der Schall nicht ungehindert in das Material eindringen; ist  $r$  jedoch zu klein, wird die durchströmende Luft nicht hinreichend starker Reibung ausgesetzt und keine Energie dissipiert. In der Praxis haben sich Strömungswiderstände im Bereich von  $800 \leq R_s \leq 2400 \text{ Pa s/m}$  als optimal erwiesen [30]. In [16] wird ein optimaler Bereich von  $1000 \leq R_s \leq 3000 \text{ Pa s/m}$  angeführt.

Die Wirkungsweise eines passiven Absorbers kann daher am besten gewährleistet werden, wenn die Schallschnelle  $v$  der einfallenden bzw. reflektierten Welle maximal ist. Dies ist laut den Grundlagen der Akustik im Bereich  $\lambda/4$  der Fall, wie in Abbildung 2.3 dargestellt. Wird der passive Absorber mit einer Dicke  $d \geq \lambda/4$  ausgeführt, kann man einen Absorptionsgrad  $\alpha \geq 0,9$  erwarten; bei  $d \geq \lambda/8$  ist mit  $\alpha \geq 0,8$  zu rechnen.



**Abb. 2.3:** Darstellung des Schalldrucks sowie der -schnelle in Abhängigkeit der Wellenlänge an einem schallharten Reflektor (rechts) [30]

Eine Folie, die häufig als Schutz des porösen Absorbers zum Einsatz kommt, darf den Eintritt des Schalls nicht wesentlich behindern. Dies wird durch eine nicht zu große Masse  $m''_{foil}$  in  $\text{kg/m}^2$ , im Verhältnis zur von der Welle mitbewegten Luftmasse  $m''_{air}$ , garantiert. Diese Bedingung wird in Gleichung 2.18 dargestellt, wobei 2.19 als Empfehlung nach [31] in  $\text{kg/m}^2$  zu sehen ist. Im Zuge der Untersuchungen wurden verpackte Mineralwolle-Pakete verwendet. Aufgrund des Fokus auf die tiefen Frequenzen ( $f \leq 250 \text{ Hz}$ ) ist die angeführte Bedingung an die flächenbezogenen Masse der Folie mit ausreichender Sicherheit erfüllt.

$$m''_{foil} \ll m''_{air} = \frac{\rho_0 c_0}{2\pi} \cdot \frac{1}{f} \quad (2.18)$$

$$m''_{foil} \leq \frac{90}{f} \quad (2.19)$$

### 2.3.2 Diffusoren

Diffusoren haben, wie der Name schon verrät, die Aufgabe das Schallfeld diffuser zu machen. Dies geschieht, wie eingangs angeführt, durch mehrfache Reflexion von Schallwellen an geometrischen Flächen. So werden beispielsweise in Hallräumen zum einen hoch-reflektierende Wände zur Raumbegrenzung genutzt, zum anderen kommen zusätzlich Diffusoren aus Stahlblech, Acrylglas oder Auswölbungen an Decken und Wänden zum Einsatz; beispielhaft sind in Abbildung 2.4b die Diffusoren im Hallraum des TGM Wien dargestellt. Um die Wirkung dieser Diffusoren zu entfalten, müssen die Abmessungen dieser auf den notwendigen Frequenzbereich abgestimmt werden.

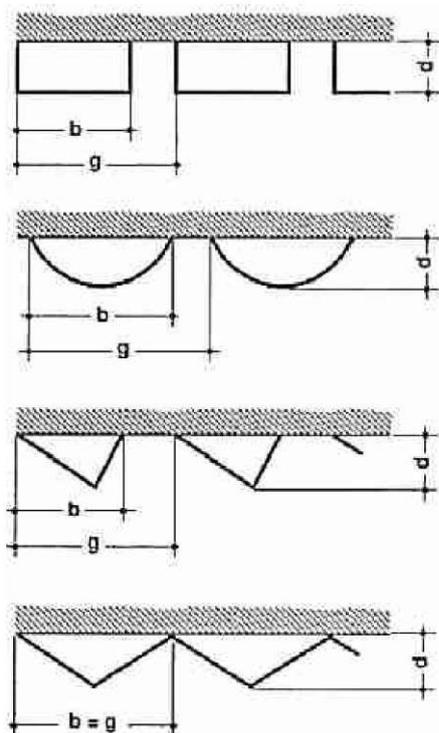
Allgemein kann die Wirksamkeit der Diffusoren in Form einer ungerichteten Reflexion nur dann gewährleistet werden, wenn deren Abmessungen Groß gegenüber der Schallwellenlänge sind. Gemäß [16] werden die geometrischen Parameter laut Gleichung 2.20 und zugehöriger Abbildung 2.4a abgeschätzt (Maße in Meter).

$$\begin{aligned} g &\cong \frac{500}{f}; \\ b &> \frac{g}{2}; \\ d &\cong (0,3 \text{ bis } 0,5) \cdot b \end{aligned} \quad (2.20)$$

Betrachtet man die im Zuge der Untersuchungen verwendeten Diffusoren bezüglich dieser geometrischen Parameter, so zeigt sich, dass diese im tieffrequenten Bereich nicht wirksam sind. Die Abmessungen der eingesetzten Diffusoren liegen im Bereich von 1,0 bis 2,4 m; deren Wirkung sollte sich nach Gleichung 2.20 ab einer Frequenz von etwa 200 Hz bemerkbar machen. Setzt man die Mittenfrequenz des untersten Terzbandes der Untersuchungen (50 Hz) in Gleichung 2.20 ein, so müssten wirksame Diffusoren Strukturabmessungen in der Größenordnung von 10 m besitzen, was in keinem üblichen Prüfstand sinnvoll umgesetzt werden kann. Wie in Kapitel 1.3 angeführt, ist nach [20] daher der Einsatz von breitbandig wirksamen Tiefen-Absorbern empfehlenswert. Hierbei wird durch gezielte Dämpfung der Resonanzspitzen das Schallfeld geglättet und die Absorption wirkt im tieffrequenten Bereich ähnlich positiv wie Diffusoren im Hallraum bei hohen Frequenzen. Das Schallfeld wird somit durch Absorber diffuser.

## 2.4 Definition der Schröderfrequenz

Für die Bestimmung des Schalldämm-Maßes ist es entscheidend, ein diffuses Schallfeld sowohl im Sende- als auch im Empfangsraum gewährleisten zu können. Grund hierfür ist die in Kapitel 2.1 dargelegte Definition des Schalldämm-Maßes, welches sich aus dem Quotienten der einfallenden und abgestrahlten Schalleistung des Prüfbauteils ergibt. Stellt sich in einem der Prüfräume ein nicht diffuses Schallfeld und somit Raummoden ein, kann bei Abgreifen des Schalldruckpegels nicht gewährleistet werden, einen für den Raum repräsentativen Schalldruck zu messen. Die verwendeten Mikrofonpositionen könnten an Schalldruckextrema oder Knotenpunkten liegen.



(a) Geometrische Parameter zur Auslegung von Diffusoren [16]



(b) Diffusoren aus Stahlblech sowie Holzfaserplatten im Hallraum des TGM Wien

**Abb. 2.4:** Theoretische Auslegung sowie praktische Ausführung von Diffusoren

Weiters können dezidierte Frequenzen ohne oder mit nur geringer Dämmung durch das Prüfbauteil vom Sende- in den Empfangsraum übertragen werden; dies ist auch als Modenkopplung bekannt.

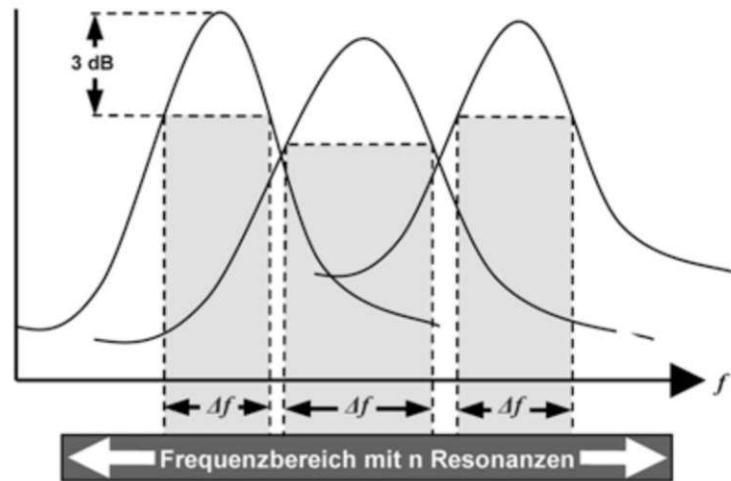
Entscheidend für die Diffusität eines Raumes ist nach [29] die Eigenfrequenzdichte. Diese beschreibt die Anzahl an Eigenfrequenzen pro Herz und ist in Gleichung 2.21 ersichtlich; wobei  $V$  das Raumvolumen in  $\text{m}^3$  und  $c_0$  die Schallgeschwindigkeit in Luft in  $\text{m/s}$  sind. Setzt man die Eigenfrequenzdichte von  $1/\text{Hz}$  voraus [30], so ergibt sich eine Messfrequenz, ab welcher eine ausreichende Eigenfrequenzdichte vorhanden ist, nach Gleichung 2.22. Für einen normativen Prüfstand mit zumindest  $50 \text{ m}^3$  Raumvolumen ergibt sich somit ein Messbereich von etwa  $f \geq 250 \text{ Hz}$ ; für dem im ACA im Zuge dieser Untersuchungen verwendeten Prüfstand mit einem Raumvolumen von etwa  $150 \text{ m}^3$  ergibt sich eine Messfrequenz von  $f \geq 150 \text{ Hz}$ .

$$\frac{dN_f}{df} \approx 4\pi \cdot V \cdot \frac{f^2}{c_0^3} \quad (2.21)$$

$$f \geq \sqrt{\frac{c_0^3}{4\pi \cdot V} \frac{1}{\text{Hz}}} \approx \frac{1800 \text{ Hz}}{\sqrt{V}} \quad (2.22)$$

Betrachtet man speziell den tieffrequenten Bereich, so ist nach [29] die Überlappung der einzelnen Moden im betrachteten Frequenzbereich relevant. Diese Fähigkeit zur Überlappung ist nicht nur von der Modendichte, sondern auch von der Dämpfung der Resonanzen abhängig. Letztere kann durch die Halbwertsbreite  $\Delta f$  ausgedrückt werden; diese *ist derjenige Frequenzbereich, bei*

dem für eine Resonanzkurve die Werte 3 dB unter dem Resonanzmaximum liegen [29, S. 25], und in Abbildung 2.5 dargestellt.



**Abb. 2.5:** Schematische Darstellung der Modenüberlappung bei bestimmten Frequenzbereichen sowie der 3 dB Halbwertsbreite  $\Delta f$  [29]

In weiterer Folge kann die Modenüberlappung aus der Halbwertsbreite und der oben beschriebenen Eigenfrequenzdichte nach Gleichung 2.23 bestimmt werden. Die Halbwertsbreite kann nach [29] auch mit Hilfe üblicher Dämpfungswerte, der Nachhallzeit  $T$  beschrieben werden. Es ergibt sich daher die Modenüberlappung  $M$  nach Gleichung 2.24.

$$M = \Delta f \cdot \frac{dN_f}{df} \quad (2.23)$$

$$M = \frac{2,2}{T} \cdot \frac{dN_f}{df} \quad (2.24)$$

Setzt man nun hier die Modenüberlappung  $M \geq 3$  nach [29] voraus und führt man Gleichung 2.21 sowie Gleichung 2.24 zusammen, so erhält man die Schröderfrequenz  $f_S$  oder auch Großraumbedingung genannt. Diese ist in der nachstehenden Gleichung 2.25 angeführt.

$$f_S = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.25)$$

Diese Schröderfrequenz ist im Allgemeinen als jene Grenzfrequenz bekannt, ab der sich eine ausreichende Modenüberlappung und somit ein diffuses Schallfeld einstellt. Im Frequenzbereich unter  $f_S$  ist mit ausgeprägten Raummoden zu rechnen. Betrachtet man hier einen normativen Prüfstand mit einem Raumvolumen von  $50 \text{ m}^3$  so ergibt sich, analog zur oben erwähnten Bedingung der Eigenfrequenzdichte, bei Einhaltung der normativen Nachhallzeit-Empfehlung von 1 bis 2 s ein  $f_S \approx 280$  bis 400 Hz. Für alle Frequenzen unterhalb von  $f_S$  kann also davon ausgegangen werden, dass die normative Anforderung an ein diffuses Schallfeld bei Bestimmung des Schalldämm-Maßes nicht eingehalten wird.

Ergänzend zu erwähnen ist, dass die Schröderfrequenz keine scharfe Grenze ist. So stellt beispielsweise die Schröderfrequenz nach Gleichung 2.25 einen mittleren Wert des Schwankungs-

bereiches dar – nach [19] bewegt sich die Schröderfrequenz in einem weitaus größeren Bereich. Hier wird dem Faktor '2000' der Gleichung 2.25 eine Schwankung von 1200 bis 4000 zugeschrieben. Der Bereich, ab dem ein diffuses Schallfeld zu erwarten ist, erweitert sich somit auf  $f'_S \approx 170$  bis 800 Hz. In der weiterführenden Literatur sind noch weitere Grenzfrequenzen, oberhalb welcher ein diffuses Schallfeld angenommen werden darf, angegeben – neben [19] auch [3], [4] sowie [28].

Betrachtet man nun den für die Untersuchungen verwendeten XL-Prüfstand im ACA, so ergibt sich selbst bei einer wesentlichen Vergrößerung des Raumvolumens auf etwa  $150 \text{ m}^3$  bei 1 bis 2s Nachhallzeit eine Grenzfrequenz nach Gleichung 2.25 von  $f_S \approx 160$  bis 230 Hz. Also kann, selbst in einem Prüfstand mit 3-fach größerem Raumvolumen als normativ vorgegeben, das Schalldämm-Maß im normativen Frequenzbereich bis 100 Hz mit der Druckmethode nicht sauber bestimmt werden.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kapitel 3

## Angewandte Methodik

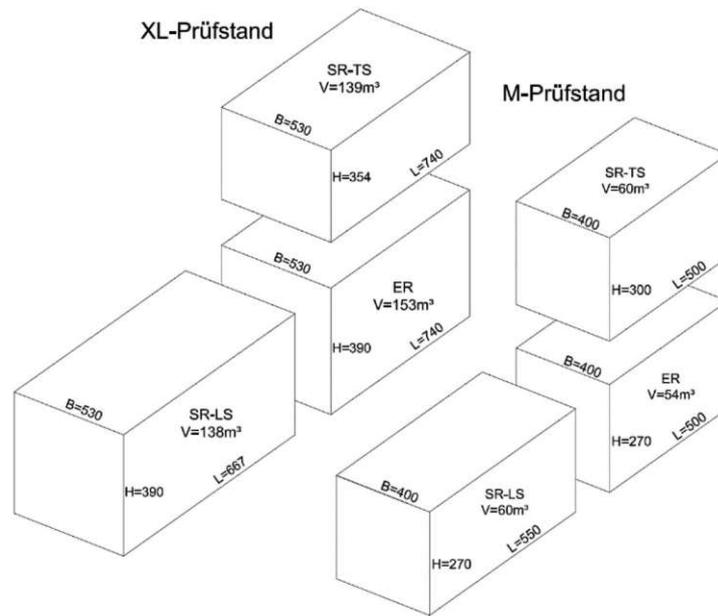
### 3.1 Prüfeinrichtungen im Akustik Center Austria

Die gesamten im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messungen fanden im Akustik Center Austria (ACA) nördlich von Wien statt. Im ACA findet sich neben einem Normprüfstand ('M-Prüfstand') auch ein 'XL-Prüfstand' mit überdurchschnittlich großen Prüfräumen, durch welchen speziell die Schalldämmung von Leichtbaukonstruktionen im tieffrequenten Bereich untersucht werden kann. Die Motivation, einen solchen Prüfstand zu bauen, lässt sich durch die nicht zufriedenstellende Reproduzierbarkeit von Messergebnissen im Bereich unter 100 Hz erklären, wie eingangs in Kapitel 1.3 erläutert. Weiters strebt auch die europäische Normung an, eine Bewertung der Bauteile ab 50 Hz verpflichtend in die einschlägigen Normen aufzunehmen, wie es in Skandinavien bereits üblich ist [34]; derzeit erfolgt die Bewertung in Mitteleuropa ab 100 Hz. Auch gewinnt die Schalldämmung in tiefen Frequenzen durch den vermehrten Einsatz von tieffrequenten Emittenten wie zum Beispiel Wärmepumpen sowie andererseits Leichtbaukonstruktionen im Wohnbau immer mehr an Bedeutung. Leichtbaukonstruktionen, beispielsweise aus Holz, haben meist schlechtere Schalldämmeigenschaften im tieffrequenten Bereich als massive Konstruktionen aus Beton oder Ziegel.

#### 3.1.1 Prüfstand der Untersuchungen

Die im Zuge dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurden im XL-Prüfstand des ACA durchgeführt. Die optimalen Abmessungen dieses Prüfstands wurden auf Basis eines validierten FE-Modells zur Schallfeldprognostizierung der TU Wien ermittelt [33]. Hierbei wurden insgesamt 190 verschiedene Abmessungsvarianten simuliert. Als Maß für die Diffusität des Schallfeldes wurde die Anzahl der sich einstellenden Moden je Terzband definiert. Auf Basis der Simulationen konnte festgestellt werden, dass sich in einem üblichem normativen Prüfstand nach der Normenreihe ISO 10140 im 100 Hz Terzband sieben Moden einstellen. Daher wurde dieses Kriterium für den XL-Prüfstand im 63 Hz Terzband festgelegt. Auf Basis der daraus resultierenden Ergebnisse wurden die Abmessungen gemäß Abbildung 3.1 des XL-Prüfstands (links) im ACA gewählt; als Vergleich ist in Abbildung 3.1 rechts ein der besagten Normenreihe entsprechender 'M-Prüfstand' dargestellt. Diese Prüfstände dienen auch der Messung der Trittschall- bzw. Luftschalldämmung von Decken, daher sind in Abbildung 3.1 auch die Abmessungen des Senderraums für diese Messungen (SR-TS) dargestellt. Im Zuge dieser Messungen wurde die Schalldämmung einer Wand untersucht, daher kam der Senderraum für die Wandprüfung (SR-LS) zum Einsatz.

Die Bauweise der Prüfstände im ACA ist auf eine zeit- und kosteneffiziente Prüfung von Bauteilen ausgelegt. So wurde der Senderraum aus Brettspertholz gefertigt und der Empfangsraum aus Stahlbeton; ersterer ist auf Schienen gelagert, kann daher schnell und einfach versetzt werden und trägt somit zum raschen Tausch der Prüfbauteile bei. Dies bietet einen entscheidenden Vorteil im Zuge von Ringversuchen, da die Prüfbauteile auch vorgefertigt werden können und somit ein Einflussfaktor bei einem Ringversuch einfach eliminiert wird. Das zu prüfende Bauteil



**Abb. 3.1:** Abmessungen und Gegenüberstellung der Prüfstände im Akustik Center Austria. XL-Prüfstands (links) überdurchschnittlich große Prüfräume, M-Prüfstand (rechts) üblicher Prüfstand nach Normenreihe ISO 10140. Maße in cm. Der Senderraum für die Wandprüfung (nur Luftschall) wird mit 'SR-LS' bezeichnet, jener für die Prüfung von Deckenbauteilen (Luftschall und Trittschall) mit 'SR-TS' [34]

wird vorab in einen Prüfraumen aus Stahlbeton eingebaut und anschließend per Schwerlastkran zwischen die Prüfräume eingehoben. Sende- wie auch Empfangsraum sind mit mehrfach beplankten freistehenden Vorsatzschalen ausgestattet, um die Luftschall- und Flankenübertragung zu minimieren; zu diesem Zweck wird auch der eingesetzte Prüfraumen mittels Elastomerlagern von den Prüfräumen akustisch entkoppelt. Der geöffnete Prüfstand sowie ein ausgebauter Prüfraumen sind in Abbildung 3.2a und 3.2b dargestellt.

Um die indirekten Wege der Schallübertragung einzuschätzen und diese in weiterer Folge als vernachlässigbar gegenüber der Schallübertragung durch das Prüfbauteil ansehen zu können, ist das Grenzschalldämm-Maß ( $R_{max}$ ) für den Prüfstand zu ermitteln. Das Verfahren zur Bestimmung des Grenzschalldämm-Maßes ist in der ISO 10140-5 [9] geregelt. Grundlegend kann das gemessene Bauschalldämm-Maß ( $R'$ ) dann als Schalldämm-Maß ( $R$ ) bezeichnet werden, wenn die Schallübertragung über die Flanken vernachlässigbar ist. Diese Bedingung wird nach ISO 10140-2 [7] erfüllt, wenn  $R' \leq (R_{max} - 15 \text{ dB})$  ist. Sollte diese Bedingung nicht erfüllt werden können, so ist der Betrag der Flankenübertragung gesondert zu untersuchen. Hierbei darf man Verfahren nach Anhang A der ISO 10140-5 [9] anwenden.

Im konkreten Fall des XL-Prüfstands im ACA wurde die Prüfung des Grenzschalldämm-Maßes mit einer hochschalldämmenden zweischaligen Leichtbauwand von Kollegen der Holzforschung Austria durchgeführt. Der Aufbau dieser Wand ist sehr ähnlich zu jener in den Untersuchungen verwendeten Konstruktion; es handelte sich um eine zweischalige Leichtbaukonstruktion mit 20 cm Abstand zwischen den beiden Schalen, welche mit Mineralwolle verfüllt wurde. Das bewertete Grenzschalldämm-Maß für den XL-Prüfstand beläuft sich auf  $R_{w,max} = 84 \text{ dB}$ , wobei bei diesen Messungen der Störabstand ab dem 630 Hz Terzband aufwärts nicht eingehalten ist und daher das bewertete Schalldämm-Maß mit den korrigierten Empfangsraumpegeln bestimmt wurde.



**Abb. 3.2:** Fotos des Prüfstands im ACA (a) Empfangsraum des geöffneten Prüfstands mit Elastomerlagern (orange und grün) zur akustischen Trennung des Prüfrahmens zu den Prüfräumen sowie (b) Foto des verwendeten Stahlbeton-Prüfrahmens mit eingebautem Prüfbauteil

### 3.1.2 Eingesetzte Messapparaturen

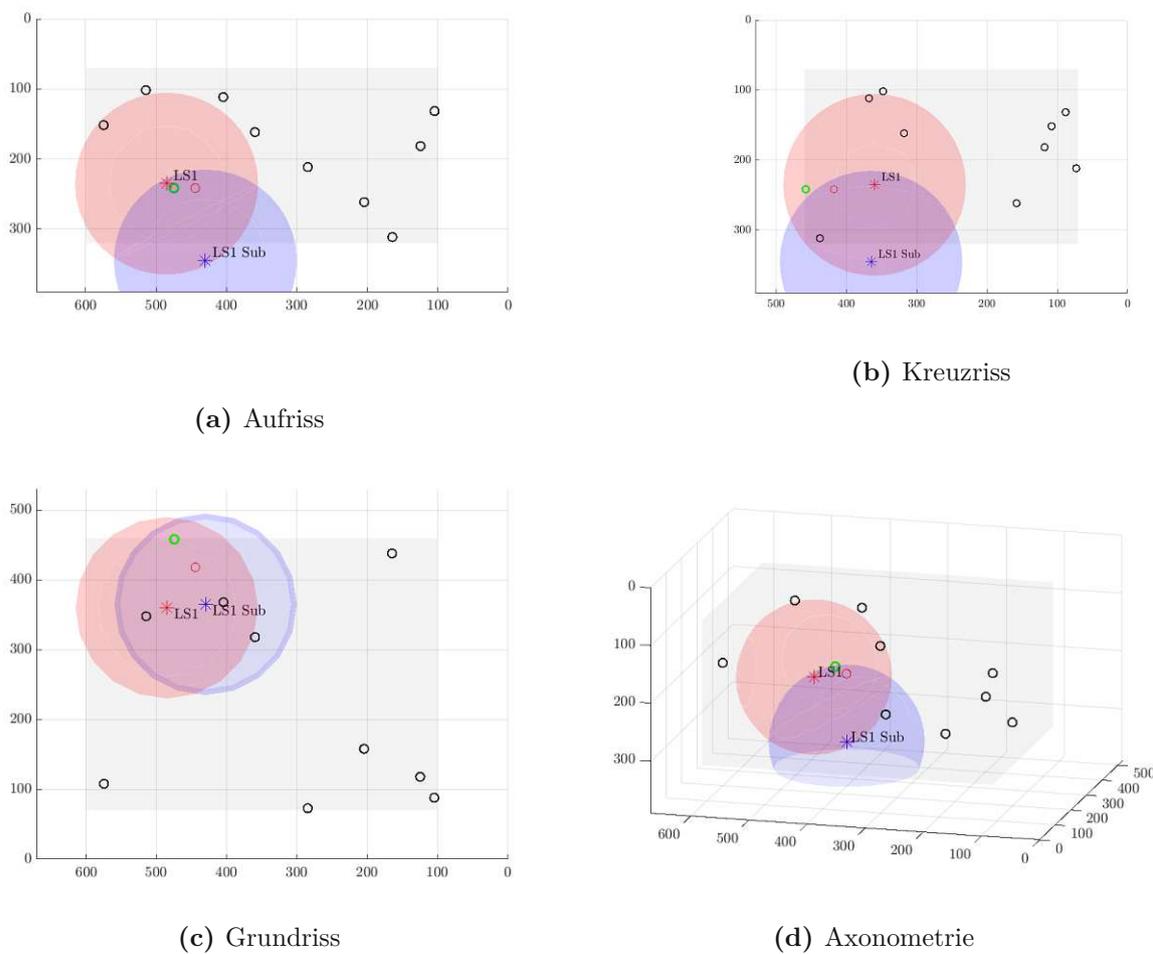
Die im Zuge dieser Untersuchungen verwendeten Apparaturen werden nachstehend angeführt:

- Lautsprecher:
  - Dodekaeder 'Infra Qsources Qom' sowie der zugehöriger Verstärker 'Infra Qsources Qam'
  - Subwoofer 'L.acoustics SB18m' sowie der zugehörige Verstärker 'L.acoustics LA4X'
- Mikrofone: Kondensatormikrofone 1/2" 'G.R.A.S. 40AE' inkl. Vorverstärker 'G.R.A.S. Typ 26AK'
- geeichtes mehrkanaliges Messsystem 'SINUS Soundbook' mit Samba 1.7.1 und Samurai 2.6.1 zur Messauswertung

Die notwendige Kalibrierung der Mikrofone fand am morgen jeden Messtages statt. Alle Geräte wurden sach- und fachgerecht gewartet und durch eine akkreditierte Eichstelle geeicht.

## 3.2 Optimale Lautsprecherpositionen

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, wird für die Bestimmung des Schalldämm-Maßes ein diffuses Schallfeld vorausgesetzt. Gemäß normativem Anhang D der ISO 10140-5 [9] sind hierzu die optimalen Lautsprecherpositionen zu ermitteln. Das Verfahren zur Ermittlung der optimalen Lautsprecherposition ist in Kapitel 2.1.4 dargelegt. In der nachstehenden Grafik 3.3 ist beispielhaft die optimale Lautsprecherposition LS1 sowie die zugehörigen zehn Mikrofonpositionen zur Bestimmung dieser gezeigt. Letztere wurden nach dem Zufallsprinzip unter Einhaltung der in Kapitel 2.1.4 genannten Kriterien ausgewählt. Weiters können laut ISO 10140-5 [9] auch Eckpositionen in die Untersuchungen einbezogen werden, da diese in der Praxis oft zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen. Bei der Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition wurden weitestgehend die gleichen zehn Mikrofonpositionen eingesetzt. Nachstehend wird lediglich die 'beste' Lautsprecherposition dargestellt, alle untersuchten Lautsprecher- sowie deren zugehörige Mikrofonpositionen sind dem Appendix B zu entnehmen. Um alle Kriterien des Anhang D der ISO 10140-5 [9] einzuhalten, verschoben sich ab und an einige der Mikrofonpositionen. Diese verschobenen Messpositionen sind in den Grafiken rot markiert, die neue Position in grün dargestellt.



**Abb. 3.3:** Lautsprecherposition 'LS1' im Senderaum für die Bestimmung der optimalen Lautsprecherpositionen – in dunkelblau der Subwoofer, in rot der Dodekader inkl. Einflussbereich des Direktschallfelds von 1,3 m nach [14] sowie die verwendeten Mikrofonpositionen (schwarz) und deren normativ zulässiger Bereich in grau; rote Messpositionen werden durch grüne ersetzt um die geforderten Abstandskriterien einzuhalten

## 3.3 Angewandte Messmethoden zur Ermittlung der Schallpegeldifferenz

### 3.3.1 Standardmessmethode nach ISO 10140-2

Die Standardmessmethode des Luftschalldämm-Maßes nach ISO 10140-4 [8] wird in weiterer Folge als die Messmethode 'Norm' bezeichnet. Grundlegend sind die in Kapitel 2.1 angeführten normativen Anforderungen an den Prüfstand sowie die Prüfeinrichtungen einzuhalten.

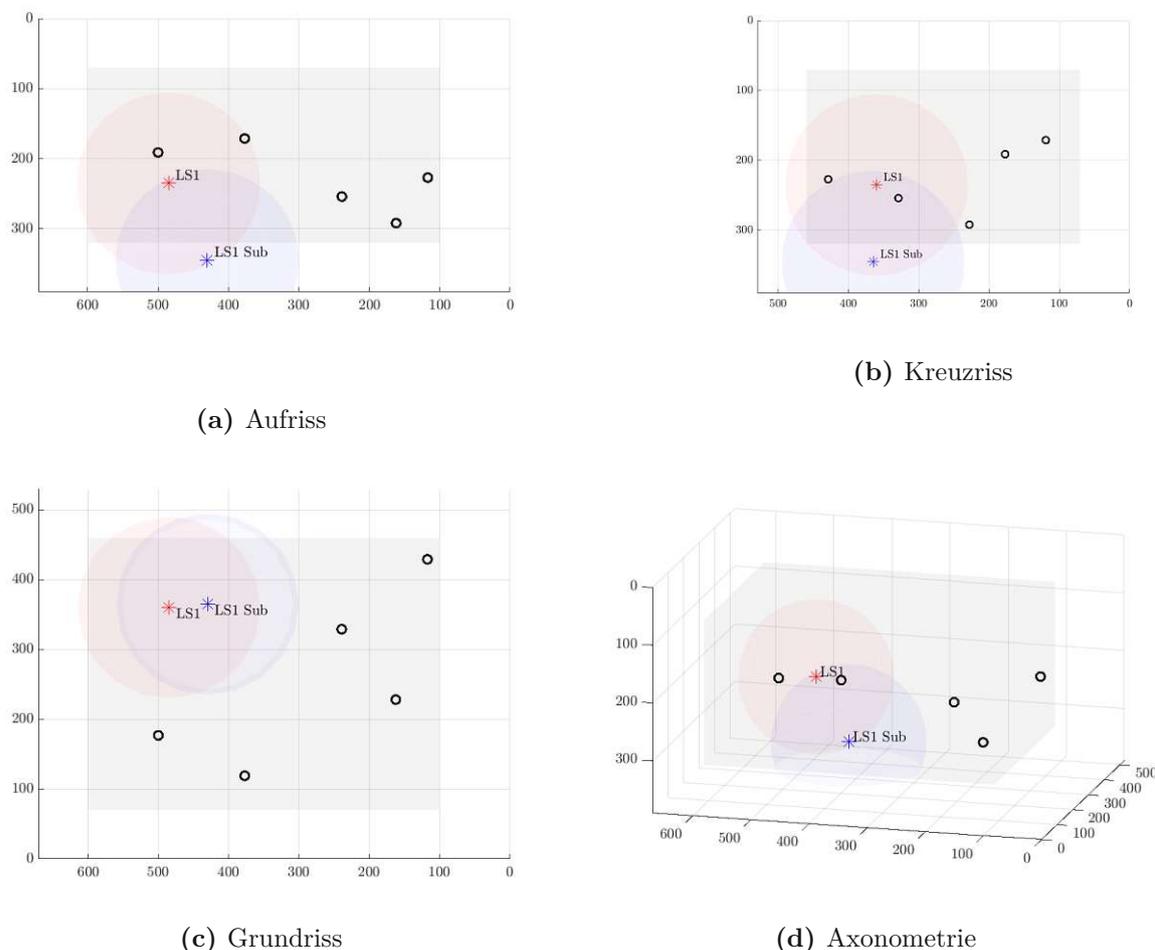
Im Zuge der Untersuchungen sich das Forschungsteam für eine 'Mindest-Variante' zur Messung des Schalldämm-Maßes entschieden, respektive werden die normativen Mindestanforderung eingehalten aber keinerlei sonst üblichen Maßnahmen zur Qualitätssteigerung getroffen. Grund hierfür ist zum einen die Darstellung eines normativen 'Worst Case', zum anderen ist dies durch die große Anzahl an untersuchten Raumkonfigurationen bedingt. Es kamen also fünf Mikrofonpositionen zum Einsatz; die in Kapitel 2.1 angeführten Kriterien wurden eingehalten. Die Lautsprecher- und die zugehörigen Mikrofonpositionen wurden bei allen untersuchten Senderaumkonstellationen gleich gehalten. Auf Basis des Einrichtens der Positionen per Maßband bzw. Markierungen am Boden des Prüfstands kann von einer Wiederholpräzision der besagten Positionen von in etwa 10 cm ausgegangen werden. Da der Fokus auf der Beurteilung des tiefen Frequenzbereichs lag, wurde die Mittelungsdauer je Messung auf 20 s erhöht. Die Auswertung erfolgte in Terzband-Auflösung von 50 bis 5000 Hz. Die verwendeten Mikrofonpositionen und die Lautsprecherposition LS1 sind in der nachstehenden Abbildung 3.4 in Grund-, Auf- und Kreuzriss sowie einer axonometrischen Ansicht dargelegt. Die Koordinaten der Messpositionen können dem Anhang A entnommen werden, jene der Senderposition LS1 dem Anhang B.

### 3.3.2 Regelmäßiger Raster über die jeweiligen Messräume

Als weitere Messmethode wurde ein regelmäßiger Raster von Messpunkten im Sende- wie auch Empfangsraum verwendet, diese Messmethode wird weiter als 'Raster' bezeichnet. Hierbei handelt es sich um eine Raumabtastung mittels Roboter, wie sie auch schon in [35] und [37] Anwendung fand. Dieser Roboter ist ein modifizierter 3D-Drucker, welcher mit Hilfe eines G-Codes angesteuert wird. So ist es möglich, jeden beliebigen Punkte im Raum zu erreichen und mit Hilfe des angebrachten Mikrofons den Schalldruckpegel abzugreifen. Während der Schallmessung wird die Stromzufuhr zu den Motoren des Roboters getrennt, um etwaige Störsignale zu unterbinden.

Der standardmäßig verwendete Raster im Senderaum besteht aus sieben Ebenen in Richtung der X-Achse, sechs in Y-Richtung sowie vier in Z-Richtung. Es ergibt sich dadurch ein Raster mit einer Schrittweite von etwa 80 cm in allen drei Achsen. Für den längeren Empfangsraum wurde eine zusätzliche achte Ebene entlang der X-Achse verwendet, die Schrittweite blieb somit bestehen. Der Abstand von den Raumbegrenzungen wurde in Anlehnung an die Messmethode 'Norm' und somit die ISO 10140-4 [8] mit 0,7 m festgelegt. Dieser Abstand wurde auch zum Prüfbauteil eingehalten, wobei für jede Messung auch eine zusätzliche Ebene mit einem Abstand vom 1,0 m vom Bauteil gemessen wurde – in Anlehnung an die normative Vorgabe nach Kapitel 3.3.1. Die optionale Variante, in welcher die Ebene 0,7 m vom Prüfbauteil durch jene 1,0 m vom Bauteil ersetzt ist, trägt die Bezeichnung 'Raster 1m BT'. Die Abstände zur Schallquelle<sup>1</sup> von zumindest 1,0 m sowie die 0,7 m zu Diffusoren und auch Absorbern wurden ebenfalls eingehalten. Es ergeben sich daher im Senderaum 168 Messpunkte wobei aufgrund des Lautsprechers, der

<sup>1</sup>Anzumerken ist hierbei, dass die Normenreihe ISO 10140 einen Abstand der Mikrofone von 1,0 m vorschreibt, in der einschlägigen Norm zur Bestimmung der Nachhallzeit ISO 3382-2 [14] ist allerdings ein Einflussbereich des Direktschallfeldes auf Basis der Nachhallzeit im Raum angeführt; wendet man dies auf den Prüfraum an, so liegt der einzuhaltende Abstand bei etwa 1,3 m. Genauere Untersuchungen hierzu wurden nicht angestellt.

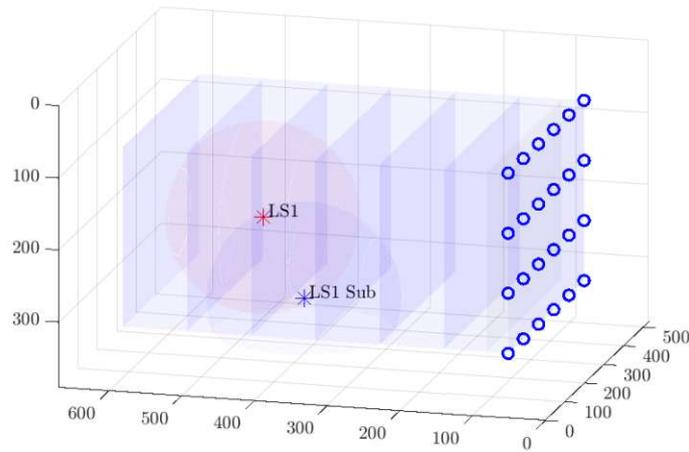


**Abb. 3.4:** Messmethode 'Norm' im Senderraum, mit Darstellung der verwendeten Mikrofonpositionen (schwarz) inkl. des normativ zulässigen Bereichs (grau) sowie der verwendeten Lautsprecherposition 'LS1' inkl. Einflussbereich des Direktschallfelds im Hintergrund

Diffusoren sowie der Absorber Bereiche ausgespart wurden; daher tragen etwa 150 Messpunkte (je nach Senderraumkonstellation) zur Messung bei. Der Empfangsraum wurde für die gesamten Messungen im Setting 'ERnorm' gelassen, daher werden hier jeweils 192 Messpunkte für die Ermittlung des äquivalenten Schalldruckpegels herangezogen.

Aufgrund der erwähnten, regelmäßigen Rasterschrittweite ist besonders bei tieferen Frequenzen die Gefahr gegeben, dass sich die Messposition an einem Druckextrem befindet. Bei einem Rasterabstand von 80 cm liegt die Kritische Frequenz bei rund 100 Hz, hier liegt  $\lambda/4$  bei etwa  $85 \text{ cm}^2$ . Es wird daher im Zuge der Auswertung in Kapitel 4 besonderer Augenmerk auf die Frequenzen 100 Hz, sowie ganzzahlige Vielfache oder Teiler davon, gelegt. Eine Darstellung der Messebenen der Messmethode 'Raster' im Senderraum inkl. der verwendeten Lautsprecherposition LS1 ist in Abbildung 3.5 gezeigt.

<sup>2</sup> $\lambda = c_0/f = 340/100 = 3,4 \text{ m}$ ; daher liegt  $\lambda/4$  bei etwa 85 cm

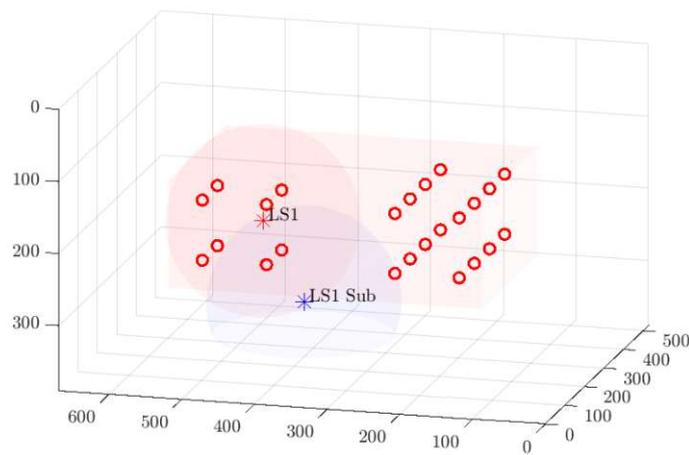


**Abb. 3.5:** Messmethode 'Raster' im Senderraum, mit Darstellung der verwendeten Messebenen und beispielhaft der Mikrofonpositionen der ersten Messebene (blau) sowie der zusätzlichen Messebene 1 m vom Bauteil (grau) und der verwendeten Lautsprecherposition 'LS1' inkl. Einflussbereich des Direktschallfelds im Hintergrund

### 3.3.3 Messmethode für tiefe Frequenzbereiche nach Anhang A der ISO 10140-4

Aufgrund der Auswertung der Daten für die Messmethode 'Anhang A' aus den Daten der 'Raster'-Messung wird lediglich die Lautsprecherposition LS1 bei der Auswertung verwendet. Die normative Anforderung, zumindest drei Lautsprecherpositionen zu verwenden, wird daher nicht eingehalten. Die Mittelungszeit wurde wie bereits bei der Standardmessmethode mit 20 s festgelegt, die geforderte Mittelungsdauer von zumindest 15 s ist also eingehalten. Von den im Senderraum abgegriffenen rund 150 Messpunkten bei der Messmethode 'Raster' werden, unter Einhaltung der in Kapitel 2.1.5.2 angeführten Kriterien, 24 Punkte zur Auswertung 'Anhang A' herangezogen. Alle Rand- sowie die Mittelebenen des Rasters wurden ausgeblendet.

Da es sich lediglich um eine Empfehlung handelt, den Mittenbereich bei der Ermittlung des äquivalenten Schalldruckpegels auszusparen, erfolgte die Auswertung auch inklusive des Mittenbereichs, um eventuelle Unterschiede beleuchten und interpretieren zu können. Hierbei werden von den im Senderraum abgegriffenen rund 150 Messpunkten 32 Punkte zur Auswertung 'Anhang A inkl. Mitte' verwendet. Die Messpunkte der Messmethode 'Anhang A' sind in der nachstehenden Abbildung 3.6 in einer axonometrischen Ansicht dargestellt.



**Abb. 3.6:** Messmethode 'Anhang A' im Senderraum, mit Darstellung der verwendeten Mikrofonpositionen (rot) inkl. des normativ zulässigen Bereichs (grau) sowie der verwendeten Lautsprecherposition 'LS1' inkl. Einflussbereich des Direktschallfelds im Hintergrund

### 3.4 Angewandte Messmethode zur Bestimmung der Nachhallzeit

Zur Messung der Nachhallzeit wurde im Zuge dieser Untersuchungen das Verfahren der Integrierten Pulsantwort nach dem Präzisionsverfahren der ISO 3382-2 [14] verwendet. Konkret kam das Sinus-Sweep-Verfahren nach ISO 18233 [12] zur Anwendung. Die Anregung des Schallfeldes im Raum erfolgte mit Hilfe des in Kapitel 3.1 beschriebenen Dodekaeders, Subwoofers sowie dem zugehörigen Equipment; als Signal wurde ein Sinus-Sweep verwendet. Die Messung der Nachhallzeit erfolgte durch die Mittelung von drei Lautsprecherpositionen und je zehn Mikrofonpositionen; wobei zwei der drei Lautsprecherpositionen jenen der Messungen der Schallpegeldifferenz zur Bestimmung des Schalldämm-Maßes entsprachen (LS1 gemäß Kapitel 3.2 bzw. LS2 gemäß Kapitel B im Anhang). Die dritte Lautsprecherposition wurde bei jeder Messung beliebig gewählt. Die Messungen fanden nacheinander mit Hilfe eines Lautsprechers statt.

Bei den jeweils zur Lautsprecherposition zugehörigen zehn Mikrofonpositionen wurden ebenfalls die ersten fünf Positionen analog den Messpositionen der Schallpegeldifferenz verwendet, die weiteren fünf Mikrofonpositionen je Lautsprecherposition wurden beliebig gewählt. Für die dritte Lautsprecherposition kamen immer zehn beliebige Mikrofonpositionen zum Einsatz. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe von Samurai 2.6.1 durch Rückintegration der Impulsantwort im Frequenzbereich von 25 bis 5000 Hz in Terzbandauflösung. Weiters erfolgte die Auswertung der Abklingkurven mit Approximation bei 30, 20 sowie 15 dB Pegelabfall; sofern nicht anders beschrieben, sind alle angeführten Nachhallzeiten mit dem normativ empfohlenen Pegelabfall von 20 dB (RT20) ermittelt. Die atmosphärischen Parameter während der Messungen wurden protokolliert und können gemeinsam mit detaillierten Messdaten bei Interesse zur Verfügung gestellt werden. Alle Lautsprecher- wie auch Mikrofonpositionen entsprechen den normativen Anforderungen. Abweichend davon konnte aus Gründen der praktischen Umsetzbarkeit der normative Abstand von den Raumboflächen bei 50 Hz von  $\lambda/4 = 1,7$  m und der Abstand zwischen den Mikrofonpositionen von  $\lambda/2 = 3,4$  m nicht eingehalten werden. Der Abstand zu den reflektierenden Oberflächen betrug zumindest 0,7 m und zwischen den Mikrofonpositionen zumindest 1,4 m, was in etwa den normativen Anforderungen für das 125 Hz Terzband entspricht. Der Abstand der Mikrofone zu den Lautsprechern wurde auf zumindest 1,3 m festgelegt. Dieser Abstand zur Quelle ergibt sich auf Basis der Gleichung 2.13 in Kapitel 2.2. Bei einer zu erwartenden Nachhallzeit von etwa 1 s und dem Raumvolumen des Senderraums von  $153 \text{ m}^3$  liegt er bei  $d_{min} \approx 1,3$  m; setzt man die in der Senderraumvariante SR22 gemessene Nachhallzeit von 0,5 s ein, so ergibt sich ein  $d_{min} \approx 1,9$  m.

### 3.5 Untersuchte Senderraum-Konfigurationen

#### 3.5.1 Aufbau und Anordnung der raumakustischen Elemente

Wie bereits eingangs erwähnt, ist das Ziel dieser Arbeit, den Einfluss der Raumakustik im Senderraum auf die Schallpegeldifferenz im Prüfstand zu quantifizieren. Wie in Kapitel 2.1 dargelegt, geht die Raumakustik des Senderraums nicht quantitativ in die Berechnung des Schalldämm-Maßes mit ein; es werden lediglich Empfehlungen zur Nachhallzeit genannt. Liegt die Nachhallzeit im Frequenzbereich über 100 Hz außerhalb dieser Empfehlung, so ist laut ISO 10140-5 [9] bei der Bestimmung des Schalldämm-Maßes zu überprüfen, ob dieses von der Nachhallzeit im Senderraum abhängt. Die normative Empfehlung der Nachhallzeit im Senderraum liegt bei 1 bis 2 s. Wird eine Abhängigkeit des Schalldämm-Maßes von der Nachhallzeit trotz eingebrachter Diffusoren festgestellt, so kann dieser Bereich im Verhältnis des Raumvolumens zum Mindestraumvolumen des Prüfstands erweitert werden. Gemäß Gleichung 2.5 in Kapitel

2.1.3 ergibt sich für den Senderaum des XL-Prüfstands eine nach oben erweiterte Nachhallzeit im Bereich von 1,0 bis 3,9 s.

Im Zuge der Untersuchungen werden verschiedene Absorber- und Diffusor-Varianten sowie Kombinationen beider im Senderaum betrachtet. Der Empfangsraum verblieb, wie bereits erwähnt, im Norm-Setup 'ERNorm'. Die verwendeten Raumkonfigurationen werden fortan durch zwei Indizes bei Bezeichnung des Senderaums (SR) gekennzeichnet. Der erste Index zeigt die Absorberstufe, der Zweite jene der Diffusoren, wobei es drei Absorber-Varianten (0, 1, 2) sowie drei Diffusor-Varianten (0, 1, 2) gibt. Zusätzlich wurde eine normative Raumkonfiguration ('SRnorm') gemessen, welche auch für die Messungen im Normalbetrieb des ACA verwendet wird. Der leere Raum wird folglich mit 'SR00' bezeichnet; der Raum mit den meisten Einbauten – sozusagen der volle Raum – wird durch 'SR22' deklariert. Nachstehend werden nun die untersuchten Konstellationen in den Abbildungen 3.7 bis 3.14 dargelegt und ihre Spezifikationen angeführt. Die zu den einzelnen Räumen zugehörigen Nachhallzeiten sind dem nachstehenden Kapitel 3.5.2 zu entnehmen.

Der normative Senderaum 'SRnorm' (Abbildung 3.7) ist mit einigen Elementen zur Absorption sowie Diffusion des Schallfeldes ausgestattet. Ersichtlich sind beispielsweise drei Plattenresonatoren an den Längswänden. Weiters finden sich Diffusoren an den Bodenkanten der Rückwand sowie ein großer Diffusor an der linken Längswand. In den Ecken auf etwa halber Prüfstandshöhe sowie an der rechten Längswand sind passive Schaumstoffabsorber ersichtlich. Zusätzlich sind in den rückwärtigen Ecken zwei Vicoustic Bassfallen aus Holz und Akustikschaum installiert sowie an der Rückwand vier Schröderdiffusoren<sup>3</sup> in Form von EPS Vicoustic Multifuser DC2 an der Wand angebracht. In der Mitte der Längswände befinden sich auch zwei Elektro Heizkörper, welche allerdings für diese Messungen nicht in Gebrauch waren. Die Verbindung zum Messequipment außerhalb der Messräume erfolgt durch ein Loch mit etwa 10 cm Durchmesser welches durch die Vorsatzschale sowie die Wand der Prüfräume führt. In diesem Kanal werden alle notwendigen Kabel lose verlegt, und er wurde während der Messungen mit Stoffstücken von innen wie auch außen möglichst dicht verschlossen.



**Abb. 3.7:** Raumkonfiguration 'SRnorm' aus Blickrichtung des Prüfbauteils im XL-Prüfstands des ACA. Mit Plattenresonatoren und passiven Absorbern aus Schaumstoff an den Längswänden, Diffusoren an der linken Längswand sowie an der Rückwand, Bassfallen aus Holz und Akustikschaum in den Ecken sowie Schröderdiffusoren über der Türe

Für die Raumkonfiguration 'SR00' (Abbildung 3.8) wurde, wie bereits erwähnt, der Senderaum leer geräumt. Lediglich der Arbeitstisch, auf welchem der Verstärker des Dodekaeders platziert ist, verblieb im Raum.

<sup>3</sup>Schröderdiffusoren sind Diffusoren, welche durch ihre geometrischen Abmessungen und den Prinzip der  $\lambda/2$ -Transformation eine breitbandigere Wirkung erzielen als übliche Diffusoren. Nähere Erläuterung hierzu findet man in [16].



**Abb. 3.8:** Raumkonfiguration 'SR00' aus Blickrichtung des Prüfbauteils im XL-Prüfstands des ACA. Alle akustischen Element wurde entfernt, lediglich der Arbeitstisch (links) verblieb im Senderaum

Für den Senderaum 'SR10' (Abbildung 3.9) kamen Absorber in Form von Paketen mit Mineralwolle zur Anwendung. Konkret wurden je drei Pakete von Holzbaudämmplatten<sup>4</sup> mit einer Größe von je  $1,2 / 0,6 / 0,3 \text{ m}^3$  zusammen zu je einem passiven Absorber in den Ecken der Rückwand mit den Abmessungen  $1,2 / 0,9 / 0,6 \text{ m}^3$  verwendet.



**Abb. 3.9:** Raumkonfiguration 'SR10' aus Blickrichtung des Prüfbauteils im XL-Prüfstands des ACA. Es werden in den leeren Senderaum Absorberpakete mit je  $1,2 / 0,9 / 0,6 \text{ m}^3$  in den Ecken der Rückwand platziert

Bei der Senderaumkonstellation 'SR20' (Abbildung 3.10) sind zusätzlich zu den Absorbern von 'SR10' weitere Mineralwolle-Pakete im Einsatz. So werden die Eckabsorber auf Würfel mit  $1,2 \text{ m}$  Seitenlänge ergänzt, und es kommen weitere Mineralwolle Pakete an den Längswänden hinzu. Die ersten zusätzlichen Pakete befinden sich vom Mittelpunkt der Längswände nach hinten angeordnet, der Abstand der vorderen Pakete zum Prüfbauteil beträgt etwa  $1,7 \text{ m}$ . Diese werden symmetrisch um die Raummitte angeordnet und bestehen aus je zwei leicht komprimierten Paketen Mineralwolle<sup>5</sup> mit einer Größe von je  $0,6 / 0,5 / 1,2 \text{ m}^3$  zusammen also  $0,6 / 1,0 / 1,2 \text{ m}^3$ .

In der Raumkonfiguration 'SR01' (Abbildung 3.11) finden sich in Anlehnung an ISO 16283-1 [11] drei Diffusoren mit einer Fläche von je  $1,0 \text{ m}^2$ , allerdings keine Absorber. Der Raum ist also bis auf drei kleine Diffusoren leer. Die Maße der Diffusoren betragen  $1,25 \text{ m}$  auf  $0,80 \text{ m}$ , und bestehen aus zwei Lagen  $18 \text{ mm}$  Gipsfaserplatten, welche auf der Rückseite quer mit zwei Holzstaffeln verschraubt sind. Angemerkt sei, dass die Diffusoren nicht gekrümmt sind. Platziert wurden zwei der drei Diffusoren an den Längswänden, einer links etwa im Drittelpunkt von der Rückwand entfernt und einer rechts ebenfalls etwa im Drittelpunkt allerdings von der Prüfwand

<sup>4</sup>ISOVER FDP10 Mineralwolle drei Stück mit je  $1,2 / 0,6 / 0,1 \text{ m}^3$

<sup>5</sup>ISOVER HB-DP5 Holzbaudämmplatte mit 16 Stück je  $1,2 / 0,625 / 0,05 \text{ m}^3$



**Abb. 3.10:** Raumkonfiguration 'SR20' aus Blickrichtung des Prüfbauteils im XL-Prüfstands des ACA. Es finden sich Absorberpakete mit je  $1,2 / 1,2 / 1,2 \text{ m}^3$  in den Ecken der Rückwand sowie an den Längswänden vier Absorberpaket mit je  $0,6 / 1,0 / 1,2 \text{ m}^3$

entfernt; der dritte Diffusor wurde an der Tür in der Rückwand platziert. Alle drei wurde mit  $0,7 \text{ m}$  Abstand des Fußpunktes an die Wände gelehnt.



**Abb. 3.11:** Raumkonfiguration 'SR01' aus Blickrichtung des Prüfbauteils im XL-Prüfstands des ACA. Der leere Prüfraum wird mit drei Diffusoren mit je  $1,0 \text{ m}^2$  Fläche ergänzt

Dem Senderraum 'SR02' (Abbildung 3.12) wurden zusätzlich zu den Diffusoren aus 'SR01' zwei weitere Diffusoren hinzugefügt. Dabei handelt es sich um größere ebenfalls zweilagige Gipsplatten wobei eine  $18 \text{ mm}$  Gipsfaser- und eine  $12,5 \text{ mm}$  Gipskartonplatte als Decklage verbaut sind; die Platten sind längs mit zwei Holzstaffeln an der Rückseite verschraubt. Diese beiden großen Diffusoren mit den Abmessungen von  $1,25$  auf  $2,40 \text{ m}$  waren auch bereits im CEN-Ringversuch [6] im Einsatz; die oberen Ecken der Diffusoren wurden abgeschrägt –  $0,2 \text{ m}$  an der kurzen und  $0,55 \text{ m}$  an der langen Seite der beiden oberen Ecken. Auch hierbei handelt es sich um flache, nicht gekrümmte Diffusoren. Platziert wurde einer der beiden vor dem festen Teil der Türe, jener Diffusor aus der Variante 'SR01' fand seinen Platz an der linken Längswand des Prüfstands etwa im Drittelpunkt der Wand vom Prüfbauteil gesehen. Der zweite große Diffusor wurde etwa im hinteren Drittelpunkt der rechten Längswand platziert. Analog zur Variante 'SR01' lehnten auch die großen Diffusoren mit einem Abstand des Fußpunkts von  $0,7 \text{ m}$  an den Wänden.

Die Konfiguration 'SR11' (Abbildung 3.13) vereint nun die Absorbervariante 'SR10' mit der ersten Stufe der Diffusoren 'SR01'.

Mit der Kombination der Konfigurationen 'SR02' und 'SR20' entsteht der Raum 'SR22' (Abbildung 3.14). Hierbei werden die Längswände wie auch die Rückwand des Senderraums nahezu vollständig durch Absorber oder Diffusoren verstellt; lediglich der Bereich etwa  $1,7 \text{ m}$  vom Prüfbauteil bleibt unberührt. Die Bezeichnung *voller Raum* ist mit dieser Abbildung gut dargestellt, da der Boden des Prüfraums bis auf den Mitten-, Eingangs- und den Bereich vor dem Prüfbauteil mit Diffusoren und Absorbern belegt ist.



**Abb. 3.12:** Raumkonfiguration 'SR02' aus Blickrichtung des Prüfbauteils im XL-Prüfstands des ACA. Es kommen drei kleine Diffusoren mit je einer Fläche von  $1,0\text{ m}^2$  ( $0,8\text{ m}$  auf  $1,25\text{ m}$ ) sowie zwei große Diffusoren mit Abmessungen von  $1,25\text{ m}$  auf  $2,40\text{ m}$  zum Einsatz



**Abb. 3.13:** Raumkonfiguration 'SR11' aus Blickrichtung des Prüfbauteils im XL-Prüfstands des ACA. Eine Kombination aus Absorberpaketen in den Ecken der Rückwand mit je  $1,2 / 0,9 / 0,6\text{ m}^3$  sowie der kleinen Diffusoren mit Abmessungen von  $0,8\text{ m}$  auf  $1,25\text{ m}$



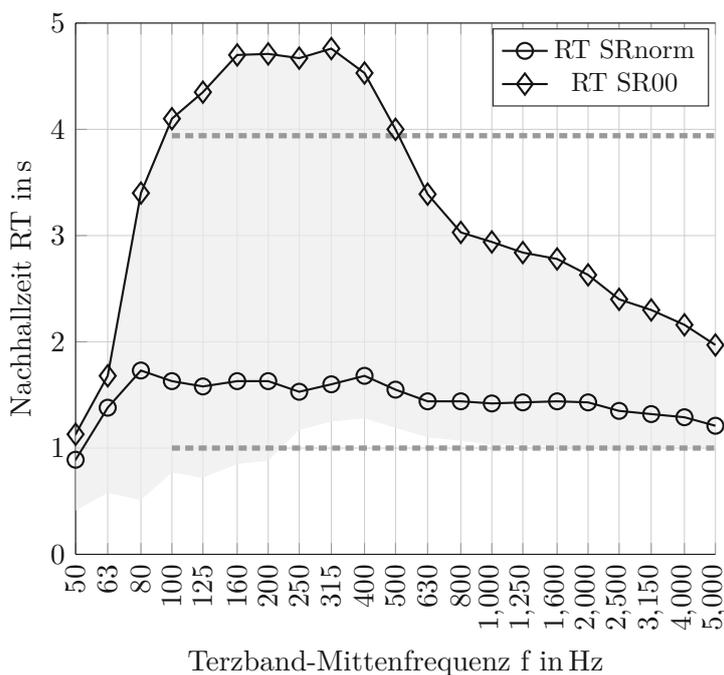
**Abb. 3.14:** Raumkonfiguration 'SR22' aus Blickrichtung des Prüfbauteils im XL-Prüfstands des ACA. Als Kombination der Absorberpakete in würfelform mit  $1,2\text{ m}$  Kantenlänge in den Ecken der Rückwand, vier Absorberpaketen entlang der Seitenwände mit je  $0,6 / 1,0 / 1,2\text{ m}^3$ , drei kleinen Diffusoren mit je  $1,0\text{ m}^2$  Fläche sowie zwei großen Diffusoren mit Abmessungen von  $1,25\text{ m}$  auf  $2,40\text{ m}$

### 3.5.2 Nachhallzeiten der Senderaum-Konfigurationen

Im nachstehenden Kapitel werden die Ergebnisse der Nachhallzeitmessungen für die untersuchten Senderaum-Konfigurationen dargestellt. Aufgrund der normativen Empfehlung gemäß Kapitel 4.6 der ISO 10140-4 [8] wird die Nachhallzeit mit einem Berechnungsbereich von 20 dB verwendet; kurz RT20. Es wird allerdings für die Nachhallzeit RT20 die Schreibweise RT bevorzugt; sollten andere Berechnungsbereiche zur Bestimmung der Nachhallzeit verwendet worden sein, so wird diese beispielsweise mit RT30, für den Approximationsbereich von 30 dB, gekennzeichnet.

In Abbildung 3.15 wird die Nachhallzeit des Senderaums in Norm-Konfiguration ('SRnorm') sowie jene des leeren Senderaums ('SR00') gezeigt. Die Grenzen des normativ empfohlenen Bereichs der Nachhallzeit im Senderaum von 1,0 bis 3,9 s, nach Kapitel 2.1.3, sind in gestrichelten grauen Linien eingezeichnet. Im Hintergrund grau dargestellt ist die Schwankungsbreite der Nachhallzeit aller gemessenen Senderaumkonfigurationen.

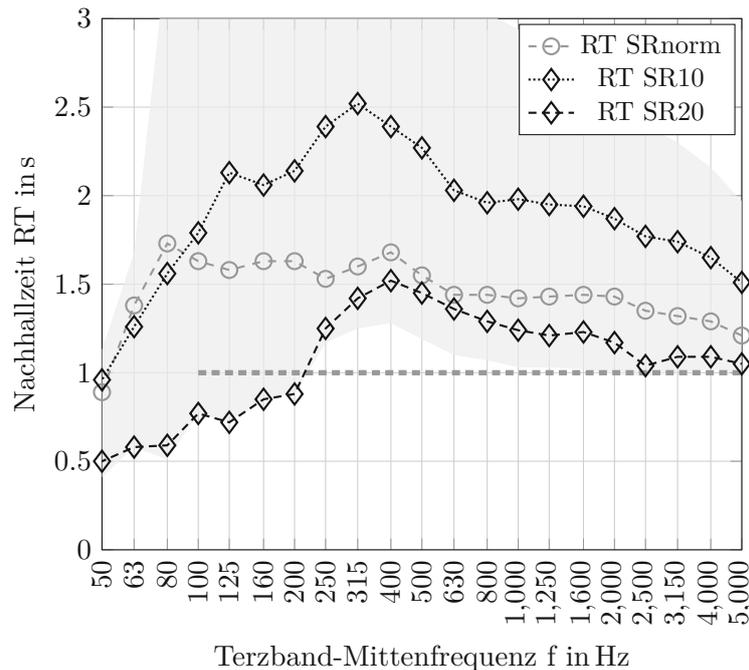
Die Nachhallzeit von 'SRnorm' kann für den Bereich der Bauakustik zwischen dem 100 und 3150 Hz Terzband als gleichmäßig beschrieben werden, sie schwankt in diesem Bereich lediglich um 0,3 s. Der mittlere Absorptionsgrad dieser Konstellation kann im tieffrequenten Bereich mit  $\alpha_{m,50-250} \approx 0,09$  angegeben werden. Für die Raumkonfiguration 'SR00' – den leeren Senderaum – steigt die Nachhallzeit im Frequenzbereich von 100 - 500 Hz auf über 4 s an und fällt dann bis zum 5000 Hz Terzband hin bis auf 2,0 s. Es zeigt sich, dass die Nachhallzeit bei beiden Varianten im sehr tiefen Frequenzbereich ( $\leq 63$  Hz Terzband) einen sehr ähnlichen Verlauf aufweist. Hierfür könnte die Konstruktion des Prüfstands aus Brettsperholz mit Vorsatzschale verantwortlich sein.



**Abb. 3.15:** Nachhallzeit RT in Abhängigkeit der Frequenz im Senderaum in der Konfiguration 'SRnorm' | 'SR00' inkl. Darstellung des normativ empfohlenen Bereichs grau strichliert, sowie des Schwankungsbereichs aller gemessenen Raumkonfigurationen grau im Hintergrund

In Abbildung 3.16 sind die Nachhallzeiten der untersuchten Absorber-Varianten ('SR10' | 'SR20') dargestellt. Die Konstellation 'SR10' führt im tieffrequenten Bereich bis etwa 100 Hz zu nahezu identischen Nachhallzeiten wie das 'SRnorm'-Setup. Danach steigt die Nachhallzeit auf

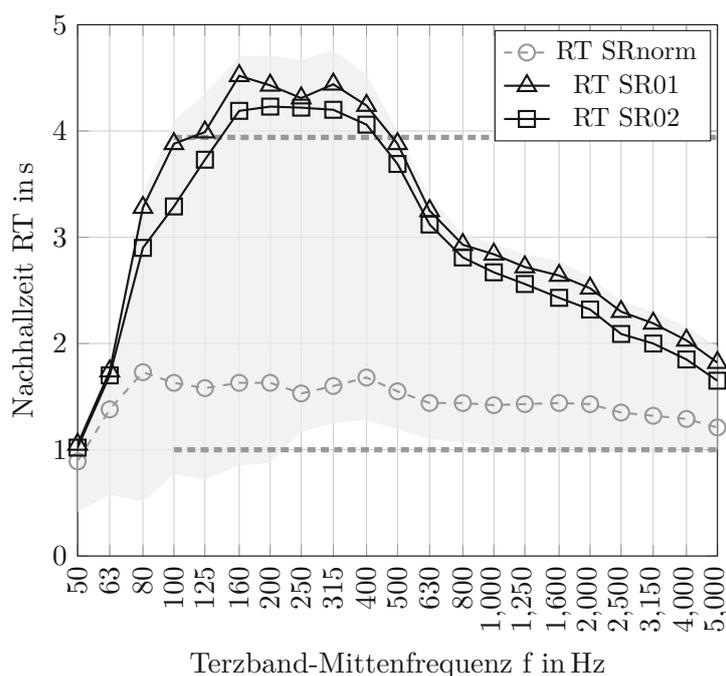
über 2 s und verbleibt bis etwa zum 1000 Hz Terzband im Bereich von 2 s ehe sie zu 1,5 s bei 5000 Hz verläuft. Mit der Absorber-Variante 'SR20' erreicht man vor allem im Bereich unterhalb der Schröderfrequenz von etwa 250 Hz eine wesentliche Verringerung der Nachhallzeit. Bis zum 200 Hz Terzband liegt die Nachhallzeit unter 1 s und in den Terzbändern unter 100 Hz sogar rund um 0,5 s. Oberhalb der des 250 Hz Terzbandes nähert sich die Variante 'SR20' der 'SRnorm' Konfiguration an; die Differenz liegt bei maximal 0,3 s. Diese effektive Absorption der sehr tiefen Frequenzen kann auf die Positionierung der Absorber in den Ecken sowie entlang der Längskanten des Senderraums zurückgeführt werden. Hier befinden sich, wie in Kapitel 2.3 beschrieben die Schnelle-Maxima der tieffrequenten Moden – diese werden somit besonders effektiv bedämpft.



**Abb. 3.16:** Nachhallzeit RT in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der unterschiedlichen Absorber-Varianten im Senderraum mit der normativen Nachhallzeit 'SRnorm' in grau als Referenz inkl. Darstellung des normativ empfohlenen Bereichs grau strichliert, sowie des Schwankungsbereichs aller gemessenen Raumkonfigurationen grau im Hintergrund

Betrachtet man Abbildung 3.17 so zeigen sich eher geringe Abweichungen der Nachhallzeit aufgrund der eingebrachten Diffusoren in den leeren Senderraum. Die beiden Diffusor-Varianten ('SR01' | 'SR02') verringern die Nachhallzeit im Senderraum im Vergleich zu jenen der gezeigten Absorber-Varianten nur gering. Dies war so zu erwarten, da diese Diffusoren den Zweck haben, das Schallfeld diffuser zu machen und die Schallwellen zu streuen und nicht Energie zu dissipieren. Die Nachhallzeit wird durch die eingebrachten Diffusoren bei der Variante 'SR02' im Vergleich zum leeren Senderraum trotzdem sehr breitbandig um etwa 0,5 s verringert. Ein Grund hierfür könnten die Schwingungen der Platten in die damit einhergehende Energiedissipation sein. Lediglich im tieffrequenten Bereich, den Terzbändern 50 und 63 Hz liegt die Nachhallzeit abermals nahe der Varianten 'SR00' und 'SRnorm'.

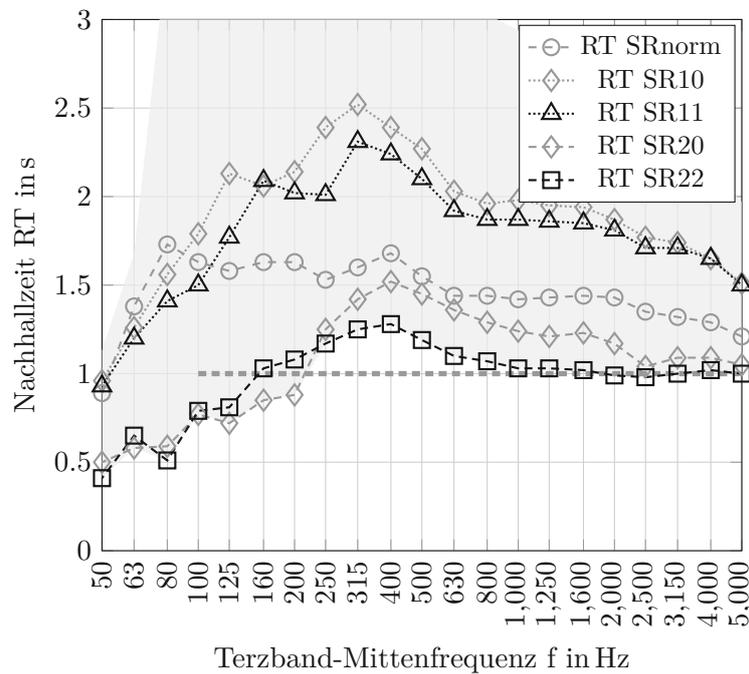
Wie in Abbildung 3.18 ersichtlich, verringert sich die Nachhallzeit der Varianten 'SR10' sowie 'SR20' nur geringfügig, wenn Diffusoren hinzugefügt werden (folglich die Varianten 'SR11' | 'SR22'). Dies konnte auch bereits in Abbildung 3.17 beim leeren Senderraum beobachtet werden. Allerdings erhöht sich die Nachhallzeit im Senderraum bei der Platzierung der Diffusoren in der



**Abb. 3.17:** Nachhallzeit RT in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der unterschiedlichen Diffusor-Varianten im Senderaum mit den Varianten 'SRnorm' in grau als Referenz inkl. Darstellung des normativ empfohlenen Bereichs grau strichliert, sowie des Schwankungsbereichs aller gemessenen Raumkonfigurationen grau im Hintergrund

Konfiguration 'SR20', welche somit zu 'SR22' wird, in den Terzbändern von 125 bis 200 Hz. Dies könnte an der partiellen Abschirmung der Absorber-Pakete durch die eingebrachten Diffusoren liegen.

Der eingangs erwähnte Einbruch der Nachhallzeit im Bereich des 50 Hz Terzbandes spiegelt sich in praktisch allen Senderaum-Konfigurationen wider. Lediglich bei den Raumkonfigurationen mit maximaler Absorberbestückung 'SR20' und 'SR22' ist die Nachhallzeit auch für die Terzbänder unter 100 Hz noch kürzer. Die Vermutung, dass dieses Verhalten aufgrund der Konstruktion des Senderaums besteht, kann daher auf Basis dieser Nachhallzeit-Messungen bestätigt werden.



**Abb. 3.18:** Nachhallzeit RT in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der unterschiedlichen Kombinationen von Absorber und Diffusoren im Senderraum ('SR11' | 'SR22') mit den Absorber-Varianten 'SR10' und 'SR20' und 'SRnorm' in grau als Referenz inkl. Darstellung des normativ empfohlenen Bereichs grau strichliert, sowie des Schwankungsbereichs aller gemessenen Raumkonfigurationen grau im Hintergrund

### 3.6 Empfangsraum-Setup aller Messungen

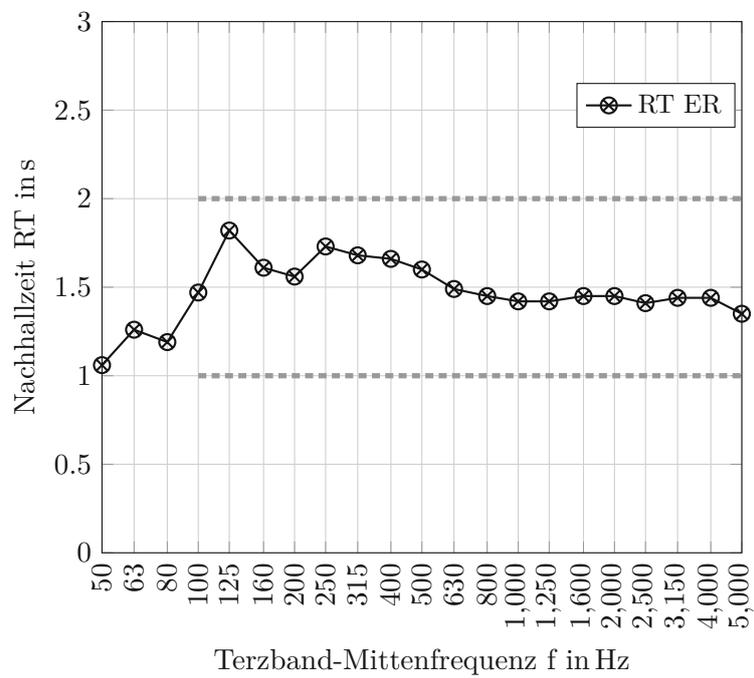
Der Empfangsraum verblieb für alle Messungen im gleichen, normativen Setup. Analog zur SR-Konfiguration 'SRnorm' befinden sich im normativen Empfangsraum 'ERnorm' diverse Diffusoren, Plattenresonatoren sowie Absorber. Ein Foto des im Zuge der Messungen unveränderten Empfangsraums ist in Abbildung 3.19 dargestellt.

Die zugehörige Nachhallzeit ist in Abbildung 3.20 gezeigt. Diese wurde in zwei verschiedenen Varianten gemessen: zum einen nur durch den Dodekaeder und zum anderen mit einer Kombination von Dodekaeder und Subwoofer. Dargestellt ist hier nur die verwendete Nachhallzeit, welche nur mit dem Dodekaeder gemessen wurde. Der gezeigte Verlauf der Nachhallzeit kann, wie auch schon beim 'SRnorm', als gleichmäßig beschrieben werden. Der im Senderraum beobachtete Abfall der Nachhallzeit ab dem 80 Hz Terzband abwärts findet im Empfangsraum allerdings bereits bei höheren Frequenzen, ab dem 125 Hz Terzband abwärts, statt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den unterschiedlichen Messmethoden der Nachhallzeit im Empfangsraum sind nicht Teil dieser Arbeit, die Rohdaten werden allerdings auf Anfrage der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Hier dargestellt wird jene Nachhallzeit, welche auch für die Berechnung des Schalldämmmaßes der Prüfwand herangezogen wurde; es handelt sich um RT20, gemessen nur mit dem Dodekaeder. Grund für die Verwendung dieser Nachhallzeit ist, dass der Einfluss der Lautsprecher bei dieser Variante am geringsten ist; die Messergebnisse zeigten, dass der Subwoofer in einem erheblichen Frequenzbereich absorbierend wirkt. Im Prüfalltag befinden sich neben den diversen raumakustischen Einbauten lediglich die Mikrofone im Empfangsraum, hier würde der zusätzliche Subwoofer das Messergebnis weiter verzerren. Da der Dodekaeder-Lautsprecher üblicherweise für Frequenzen über 100 Hz verwendet wird und zugelassen ist, sei an dieser Stelle erwähnt, dass der erreichte Schalldruckpegel einzelner Messkombinationen selbst im 50 Hz Terzband zwischen knapp 70 und gut 90 dB lag. Der Hintergrundgeräuschpegel war dagegen im Bereich von 20 bis 35 dB angesiedelt. Diese extremen Kombinationen von erreichtem Schalldruckpegel und Hintergrundgeräuschpegel traten allerdings niemals bei einer Messung auf, was auf das modale Schallfeld in den tiefen Frequenzbereichen zurückzuführen ist. Der Abfall der Abklingkurve betrug bei jeder Messung zumindest 40 dB; nach [14] ist ein Störpegelabstand von zumindest 35 dB einzuhalten – bei Messung von RT30 werden 45 dB gefordert. Die verwendeten Ergebnisse der Nachhallzeit als RT20 sind also aussagekräftig.



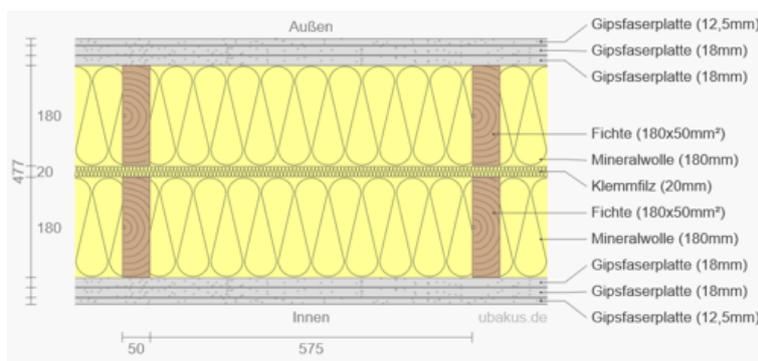
Abb. 3.19: Empfangsraum aus Blickrichtung des Prüfbauzeugs im XL-Prüfstand des ACA



**Abb. 3.20:** Nachhallzeit RT in Abhängigkeit der Frequenz im Empfangsraum inkl. Darstellung des normativ empfohlenen Bereichs grau strichliert

### 3.7 Aufbau und Schalldämm-Maß der geprüften Leichtbauwand

Bei der im Zuge der Untersuchungen verwendeten Prüfwand handelt es sich um eine hochschalldämmende Leichtbauwand, deren Aufbau in der nachstehenden Abbildung 3.21 dargestellt ist. Es handelt sich um eine symmetrische zweischalige Holzriegel Konstruktion, welche durch eine Lage Klemmfilz getrennt ist. Die Holzriegel in der Dimension 50 / 180 mm sind in einem unregelmäßigen Achsabstand angeordnet, und der Hohlraum wurde vollständig mit Glaswolle<sup>6</sup> ausgedämmt. Das unregelmäßige Achsmaß ergibt sich durch die vorhergehende Verwendung als hochschalldämmende Wand für eine Fensterprüfung. Beplankt ist die Konstruktion jeweils außen mit zwei Lagen 18 mm sowie einer Lage 12,5 mm Gipsfaserplatten. Wobei die ersten beiden Lagen mit einem Abstand von 75 cm verschraubt wurden und die Decklage einen Schraubenabstand von 25 cm aufweist. Die Stoßfugen aller Beplankungslagen sind gespachtelt. Die jeweilige Innenseite der Riegelkonstruktion verblieb unbeplankt, und die zwei Schalen werden lediglich durch die Trennlage mittels 20 mm Klemmfilz<sup>7</sup> separiert. Diese Wand wurde in den in Kapitel 3.1.1, Abbildung 3.2b angeführten Prüfraumen des XL-Prüfstands eingebaut und in weiterer Folge zwischen die beiden Prüfräume eingesetzt. Die akustische Trennung von Prüfraum und Prüfraumen erfolgte, wie bereits im Kapitel 3.1.1 beschrieben, durch geeignete Elastomerlager.



**Abb. 3.21:** Aufbau der untersuchten zweischaligen Leichtbauwand. Horizontal-Schnitt im Randbereich. Grafik erstellt mit Ubakus U-Wert-Rechner [38]

Das Schalldämm-Maß der geprüften Leichtbauwand ist in Abbildung 3.22 über das erweiterte Spektrum vom 50 bis zum 5000 Hz Terzband dargestellt. Wobei der normative Abstand vom Hintergrundgeräuschpegel im Empfangsraum von 15 dB bereits ab dem Terzband bei 630 Hz nicht mehr eingehalten werden kann; ab dem 1000 Hz Terzband kann auch der Abstand von 6 dB zum Hintergrundgeräuschpegel nicht mehr eingehalten werden. Die normativ vorgesehenen Korrekturen für die Frequenzen ab dem 630 Hz Terzband aufgrund des zu geringen Abstands vom Hintergrundgeräuschpegel wurden berücksichtigt. Im bewerteten Einzahlwert der Leichtbauwand schlägt sich diese Korrektur allerdings nicht nieder. Das bewertete Schalldämm-Maß für diese Wand liegt bei  $R_w = 79,2$  dB. Der tatsächliche Wert liegt mit großer Wahrscheinlichkeit höher, da vor allem im für die Bewertung relevanten Bereich ab dem 630 Hz Terzband der normative Störabstand nicht eingehalten, und somit die oben erwähnte Korrektur tragend wird.

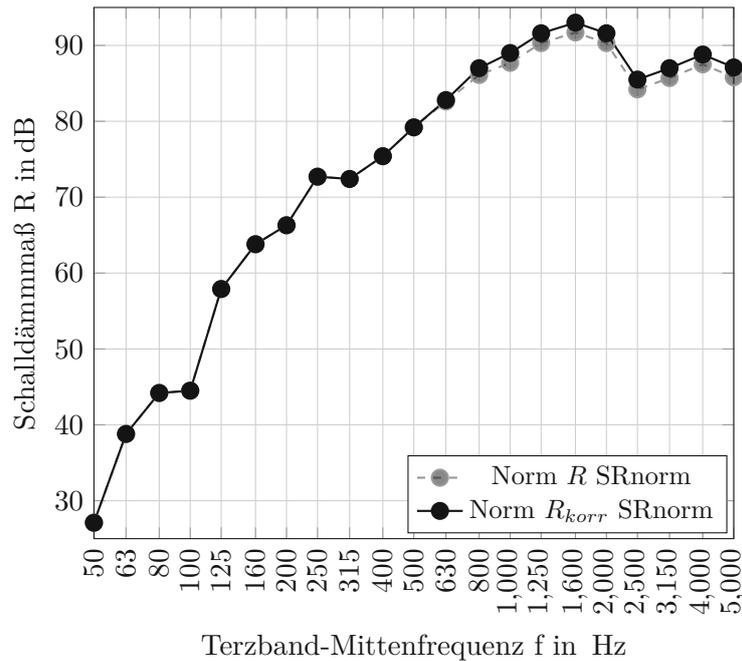
Im Zuge der Untersuchungen lag der Fokus lediglich auf den tiefen Frequenzen von der Schröderfrequenz abwärts, daher beeinflussen die Unsicherheiten aufgrund des zu geringen Störabstandes in den mittleren und hohen Frequenzen die Analyse der Untersuchungen nicht. Das dargestellte Schalldämm-Maß der Leichtbauwand wurde mit den optimalen Lautsprecherpositionen der

<sup>6</sup>ISOVER Uni-Classic, Dichte  $\rho = 14,5 \text{ kg/m}^3$ , längenbezogener Strömungswiderstand  $r \geq 5,0 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}^2$

<sup>7</sup>ISOVER Trennwand Klemmfilz, Dichte  $\rho = 15 \text{ kg/m}^3$

Senderraumkonfiguration 'SR00' ermittelt. Diese entsprechen den im Prüfstand üblicherweise verwendeten Lautsprecherpositionen. Die verwendeten Lautsprecherpositionen LS1 und LS2 sind in Kapitel 3.2 und Kapitel B in Anhang angeführt.

Wie in Abbildung 3.22 ersichtlich, liegt der Einbruch der Schalldämmung der Leichtbauwand im Bereich des 50 Hz Terzbandes. Oberhalb dieses Einbruchs ist auch eine zu erwartende Steigerung des Schalldämm-Maßes von zweischaligen Wänden gegenüber dem Bergen'schen Massegesetz (6 dB je Oktave) [40] von etwa 10 dB Verbesserung je Oktave erkennbar. Der Einknick im Terzband bei 2500 Hz könnte auf eine Koizidenzfrequenz einer Schale hinweisen.



**Abb. 3.22:** Schalldämm-Maß  $R$  im erweiterten Frequenzbereich und der Raumkonfiguration 'SRnorm' in der Messmethode 'Norm'. Ab dem 630 Hz Terzband kann der Störabstand nicht mehr eingehalten werden. Der grau gestrichelte Graph zeigt  $R$  ohne Korrektur aufgrund des Hintergrundgeräuschpegels. Das Schalldämm-Maß wurde mit den optimalen Lautsprecherpositionen der Senderraumkonfiguration 'SR00' ermittelt.

# Kapitel 4

## Ergebnisse der Messungen

### 4.1 Allgemeines zu den Messergebnissen

Einleitend sei darauf hingewiesen, dass alle Ergebnisse nur für den im Zuge dieser Arbeit beleuchteten tiefen Frequenzbereich dargestellt werden. Wie in Kapitel 2.4 anhand der Schröderfrequenz erläutert, kann im XL-Prüfstand des ACA im Frequenzbereich über etwa 230 Hz mit einem diffusen Schallfeld gerechnet werden. Auf Basis dieser Abschätzung wurde ein relevanter Frequenzbereich für die Untersuchung vom 50 bis zum 250 Hz Terzband festgelegt. Die nachstehenden Ergebnisse werden folglich in diesem dargestellt.

Weiters kam es im Zuge der Untersuchungen zu Überlegungen, ob das Schalldämm-Maß oder die Schallpegeldifferenz dargestellt werden soll. Schlussendlich entschied das Forschungsteam, die Unterschiede in der Schallpegeldifferenz  $D$  zu beleuchten; diese ergibt sich aus der Differenz der Schalldruckpegel von Sende- und Empfangsraum. Grund hierfür ist die Definition des Schalldämm-Maßes, welches, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, mit zumindest zwei Lautsprecherpositionen zu bestimmen ist. Aufgrund der generierten Daten ist, wie erwähnt, eine detaillierte Auswertung lediglich mit einer Lautsprecherposition möglich, daher werden nachstehend die Ergebnisse dieser einen Lautsprecherposition LS1 dargelegt. Für die Messmethode 'Norm' existieren allerdings Messdaten mit zwei Lautsprechern, diese wurden lediglich zur Bestimmung des Schalldämm-Maßes der untersuchten Leichtbauwand verwendet. Ein kurzer Abriss des Einflusses der Lautsprecherposition ist im Appendix C angeführt; dies ist allerdings nicht Fokus dieser Arbeit und sollte daher in weiterführenden Untersuchungen vertiefend beleuchtet werden.

Ein weiterer Vorteil der Betrachtung der Schallpegeldifferenz ist, dass auch die Einflüsse der Nachhallzeit im Empfangsraum ausgeblendet werden, welche bei der Berechnung des Schalldämm-Maßes eingehen. Somit ergibt sich auch die Möglichkeit, die unterschiedlichen Wirkungsweisen der raumakustischen Elemente (Absorber | Diffusor) und deren Einfluss auf die Schallfelder im Raum in einer greifbaren Größe – dem Schalldruckpegel – zu vergleichen und zu analysieren.

Im nachfolgenden Kapitel 4.2.1 werden die Ergebnisse der Schallpegeldifferenzen der Messmethode 'Norm' der unterschiedlichen Raumkonstellationen (siehe Kapitel 3.5) gezeigt. In weiterer Folge ist in Subkapitel 4.2.2 der Einfluss der Absorber auf die Schallpegeldifferenz ersichtlich. Die in Kapitel 4.2.1 gezeigten Schwankungen im 63 sowie 100 Hz Terzband bei den Senderaum-Varianten 'SRnorm' | 'SR10' | 'SR20' werden mit Hilfe der zugehörigen 3D-Schallfelder analysiert. Analog folgt in Subkapitel 4.2.3 die genauere Betrachtung des Einflusses der Diffusoren im stark bedämpften Raum 'SR20' | 'SR22' ebenfalls in den Terzbändern bei 63 und 100 Hz. Im letzten Subkapitel 4.2.4 werden die extremen Raumkonstellationen 'SRnorm' | 'SR00' | 'SR02' | 'SR22' herausgegriffen und die Ergebnisse der Schallpegeldifferenzen mit Hilfe der generierten 3D-Schallfelder im Sende- wie auch Empfangsraum detailliert beleuchtet. Abschließend werden in Kapitel 4.3 die Unterschiede der Schallpegeldifferenz auf Basis der in Kapitel 3.3 angeführten Messmethoden 'Norm' | 'Raster' | 'Anhang A' dargelegt und analysiert.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die statistischen Kennwerte der genauer beleuchteten Räume und deren Schallfelder in Tabellen 4.1 für die Messmethode 'Raster' angeführt sind. Für die

Standardabweichung wurden die Messpunkte als Stichprobe einer Grundgesamtheit betrachtet und somit mit der 'n-1'-Methode berechnet.

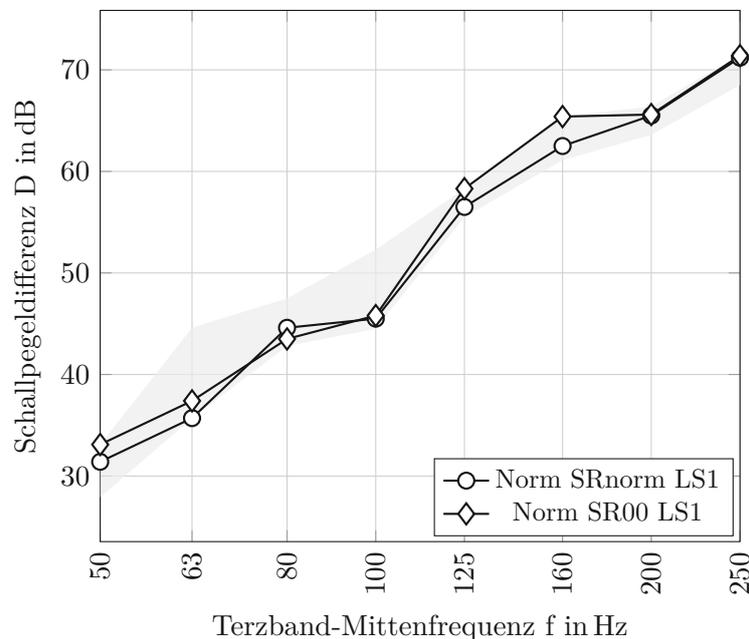
## 4.2 Schallpegeldifferenz in der Messmethode 'Norm'

Die nachstehenden Abbildungen zeigen die Schallpegeldifferenzen der Messmethode 'Norm' im Vergleich der Senderaumkonstellationen aufgetragen über die Terzband-Mittenfrequenzen von 50 bis 250 Hz. Der Schwankungsbereich aller gemessenen Raumkonstellationen ist jeweils grau im Hintergrund angedeutet.

### 4.2.1 Einfluss der Raumakustik auf die Schallpegeldifferenz

#### 4.2.1.1 Schallpegeldifferenz für 'SRnorm' und den leeren Senderaum 'SR00'

In Abbildung 4.1 sind die Schallpegeldifferenzen der Senderaumvarianten 'SRnorm' sowie 'SR00' aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Unterschiede der Schallpegeldifferenz aufgrund der unterschiedlichen Raumakustik im Senderaum im Vergleich zu den Schwankungen aller Senderaumvarianten gering ausfallen. Lediglich im Frequenzbereich unter 100 Hz sowie rund um das 160 Hz Terzband kommt es zu erwähnenswerten Unterschieden der Variante 'SR00' von 'SRnorm'. Konkret liegen die Abweichungen der Variante 'SR00' von 'SRnorm' bei +1,8 dB im 50 Hz Terzband, +1,7 dB im 63 Hz Terzband, -1,1 dB im 80 Hz Terzband. Rund um das 160 Hz Terzband liegen die Werte des leeren Senderaums hingegen konstant über jenen der Variante 'SRnorm' – konkret bei +1,8 dB im 125 Hz Terzband und +2,9 dB im 160 Hz Terzband. Die Unterschiede in der Schallpegeldifferenz der weiteren Terzbänder liegen zwischen +0,3 und +0,1 dB, und werden daher nicht weiter quantifiziert.



**Abb. 4.1:** Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit der Frequenz in der Messmethode 'Norm' im Vergleich der Raumkonstellationen 'SRnorm' und 'SR00' ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs der Schallpegeldifferenz aller gemessenen Raumkonstellationen in grau

Es kann also zusammengefasst werden, dass der leere Senderaum 'SR00' und die damit einhergehende längere Nachhallzeit zu einer Erhöhung der Schallpegeldifferenz in nahezu allen betrachteten Terzbändern führt. Die Schallpegeldifferenz von 'SR00' weicht aber selbst in den Frequenzen unter 100 Hz weniger als 2 dB von jener der Variante 'SRnorm' ab, die Abweichung kann somit als gering eingestuft werden. Im 160 Hz Terzband beläuft sich die Differenz der beiden Varianten bereits auf 2,9 dB und kann mit der erhöhten Diffusitäts-Grenze durch die wesentlich längere Nachhallzeit in diesem Frequenzbereich begründet werden.

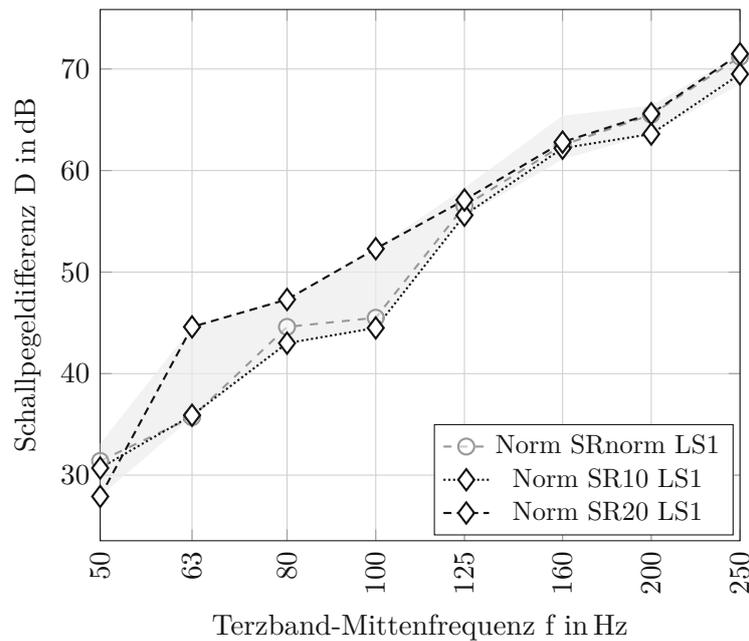
#### 4.2.1.2 Schallpegeldifferenz im Vergleich der Absorber-Varianten 'SR10' und 'SR20'

Betrachtet man im nächsten Schritt den Einfluss der Absorber-Stufen auf die Schallpegeldifferenz, so zeigen sich wesentlich größere Abweichungen als bei den bisher betrachteten Varianten. Der Vergleich der Varianten 'SR10' und 'SR20' mit dem normativen Setup 'SRnorm' als Referenz ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Schallpegeldifferenzen dieser beiden Senderaumkonfigurationen stellen über einen breiten Frequenzbereich die Extrema der Schwankungsbreite (grau) aller untersuchten Senderaumvarianten dar. Der Senderaum 'SR10' liefert größtenteils Werte unterhalb der Referenzgröße: im 80 Hz Terzband -1,6 dB, im 200 Hz Terzband -1,9 dB und im 250 Hz Terzband -1,7 dB. Ansonsten liegen die Werte von 'SR10' nur geringfügig unter der Schallpegeldifferenz von 'SRnorm'; lediglich im 63 Hz Terzband liegt 'SR10' um 0,2 dB über 'SRnorm'. Der stark bedämpfte Senderaum 'SR20' führt in nahezu allen Terzbändern zu deutlich höheren Schallpegeldifferenzen als die normative Variante; lediglich im 50 Hz Terzband liegen die Werte unter jenen von 'SRnorm'. Konkret belaufen sich die Abweichungen auf -3,5 dB im 50 Hz Terzband, die größte Schwankung liegen im 63 Hz Terzband bei +8,9 dB, im 80 Hz Terzband +2,7 dB, im 100 Hz Terzband +6,8 dB. Die Schwankungen der weiteren Terzbänder verbleiben zwischen +0,1 und +0,6 dB.

Der leicht bedämpfte Raum 'SR10' führt also zu betragsmäßig ähnlichen Abweichungen wie der leere Senderaum 'SR00' in Abbildung 4.1, allerdings liegt 'SR10' nahezu konstant unterhalb und 'SR00' oberhalb der Referenzgröße 'SRnorm'. Die Abweichungen finden sich auch in anderen Terzbändern, daher sind die Auswirkungen dieser Varianten grundverschieden. Der stark bedämpfte Raum 'SR20' schlägt mit höheren Schallpegeldifferenzen in allen Terzbändern, ausgenommen jenem bei 50 Hz, zu Buche. Vor allem die Schwankungen im 63 und 100 Hz Terzband sind bemerkenswert, daher werden diese einer genaueren Begutachtung unterzogen – in Kapitel 4.2.2 wird das Schallfeld dieser analysiert.

#### 4.2.1.3 Schallpegeldifferenz im Vergleich der Diffusor-Varianten 'SR01' und 'SR02' im leeren Senderaum

In Abbildung 4.3 ist die Schallpegeldifferenz der Diffusor-Varianten der Raumkonstellationen ersichtlich ('SR01' und 'SR02'). Ganz eindeutig zeigt sich der geringe Einfluss der Diffusoren in den tiefen Frequenzen. Dies war aufgrund der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Wirkungsweise auch zu erwarten. Beide Varianten schwanken nur gering um die Referenzgröße von 'SRnorm', wobei erkennbar ist, dass durch Einbringen weiterer Diffusoren in 'SR02' die Effekte von 'SR01' verstärkt werden. Erwähnenswerte Abweichungen von der Referenzgröße 'SRnorm' gibt es im 80 Hz Terzband sowie im 250 Hz Terzband. Die Variante 'SR01' zeigt Abweichungen von 'SRnorm' im 80 Hz Terzband von -1,8 dB, im 250 Hz Terzband -2,0 dB; in den weiteren Terzbändern liegt die Abweichung zwischen -0,6 und +0,9 dB. Die weiteren Diffusoren in 'SR02' verstärken die Schwankungen in nahezu allen Terzbändern, diese liegen aber mit Ausnahme des 250 Hz Terzbandes zwischen moderaten -1,5 und +1,7 dB. Das Terzband bei 250 Hz Mittenfrequenz liefert, wie auch schon bei der Variante 'SR01', die größte Abweichung von 'SRnorm' von -2,5 dB.



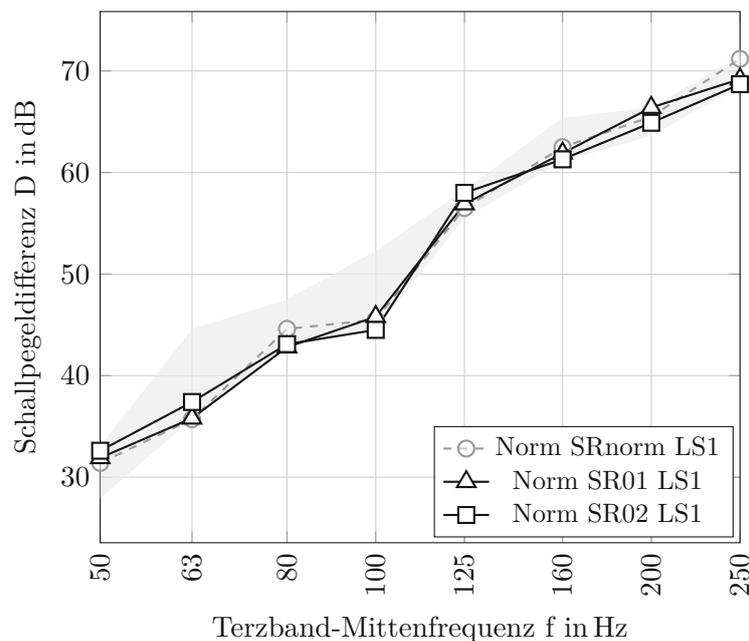
**Abb. 4.2:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz in der Messmethode 'Norm' im Vergleich der Absorber-Varianten 'SR10' und 'SR20', als Referenz das Raumsetup 'SRnorm' (grau), ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs der Schallpegeldifferenz aller gemessenen Raumkonstellationen in grau

Die Schwankungen bewegen sich zusammengefasst abermals betragsmäßig im Bereich von 2 dB wie auch schon bei den Varianten 'SR00' und 'SR10' treten aber wiederum in anderen Terzbändern auf. Es kann die Vermutung angestellt werden, dass die generierten Schwankungen nicht aufgrund der Wirkung der Diffusoren als Diffusoren sondern in Form von lokalen Plattenschwingern tragend werden. Wirklich nennenswerte Abweichungen von der Referenzgröße 'SRnorm' gibt es lediglich im 250 Hz Terzband. Da diese wesentlich geringer als jene der Absorber-Varianten ausfallen, werden die Schallfelder hier nicht genauer untersucht.

#### 4.2.1.4 Schallpegeldifferenz im Vergleich der Diffusor-Varianten 'SR11' und 'SR22' im bedämpften Senderraum

Mit Hilfe der Abbildung 4.3 kamen die Unterschiede aufgrund der in den leeren Senderraum eingebrachten Diffusoren zu Tage. Nun sollen die Auswirkungen der Diffusoren auf einen bereits bedämpften Raum dargelegt werden – die Varianten von 'SR10' zu 'SR11' sowie von 'SR20' zu 'SR22'.

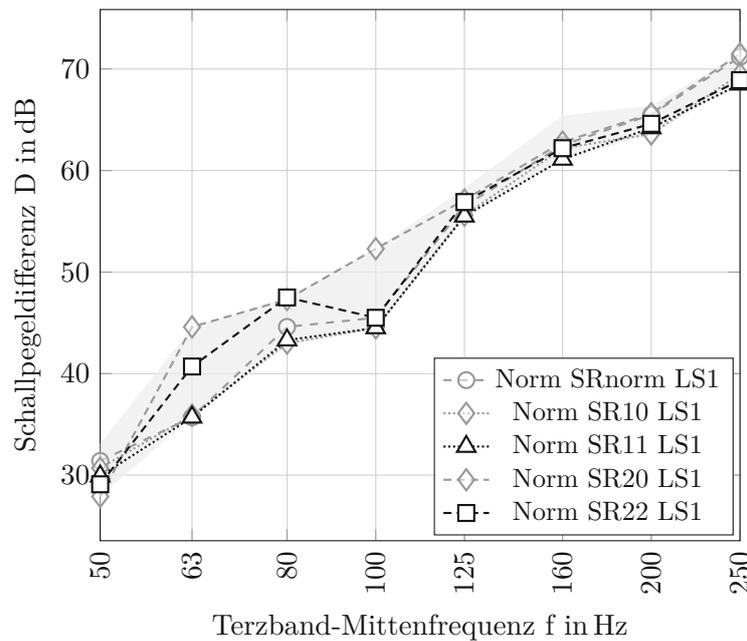
Durch die Abbildung 4.4 zeigt sich, dass vor allem das Einbringen der Diffusoren in den Senderraum 'SR10', welcher somit zu 'SR11' wird, nur marginale Auswirkungen hat. Diese liegen im Bereich zwischen -1,1 und +0,7 dB und sind somit praktisch vernachlässigbar. Werden allerdings in den stark bedämpften Raum 'SR20' die Diffusoren der 'Stufe 2' eingebracht, so zeigen sich markante Auswirkungen. Die Schallpegeldifferenz für das Raumsetup 'SR22' wird im Vergleich zu 'SR20' vor allem in den Terzbändern bei 63 und 100 Hz Mittenfrequenz beeinflusst. Die Schwankung von der Referenzgröße 'SRnorm' wird im 63 Hz Terzband um 3,9 dB reduziert und liegt somit noch bei +5,0 dB, im 100 Hz Terzband wird die Abweichung sogar egalisiert (-6,8 dB) und die Werte von 'SR22' stimmen mit jenen von 'SRnorm' überein. Im Terzband



**Abb. 4.3:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz in der Messmethode 'Norm' im Vergleich der Diffusor-Varianten 'SR01' und 'SR02', als Referenz das Raumsetup 'SRnorm' (grau), ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs der Schallpegeldifferenz aller gemessenen Raumkonstellationen in grau

bei 250 Hz Mittenfrequenz ist analog zu den Beobachtungen im leeren Raum (Abbildung 4.3) eine nennenswerte Abweichung von -2,6 dB im Vergleich zu 'SR20' erkennbar. Alle weiteren Auswirkungen belaufen sich auf -1,0 bis +1,1 dB und werden nicht näher quantifiziert.

Zusammenfassend kann der Einfluss der 'Stufe 1' der Diffusoren ('SRx1') im bereits bedämpften Raum wie auch schon im leeren Raum als gering eingestuft werden. Auch die zweite Diffusor-Stufe ('SRx2') bringt im leeren Senderraum nur wenig Veränderungen mit sich. Im stark bedämpften Raum 'SR20' hat das Hinzufügen der 'Stufe 2' der Diffusoren ('SRx2') allerdings großen Einfluss auf die Schallpegeldifferenz im 63 und 100 Hz Terzband. Hierbei werden wir daher nicht nur die Stufen der Absorption sondern auch die zusätzlichen Diffusor-Stufen genauer beleuchten und die Schallfelder in diesen Terzbändern in Kapitel 4.2.3 analysieren.



**Abb. 4.4:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz in der Messmethode 'Norm' im Vergleich der unterschiedlichen Kombinationen von Absorber und Diffusoren 'SR11' und 'SR22', mit den Varianten 'SR10' und 'SR20' sowie 'SRnorm' als Referenz (grau), ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs der Schallpegeldifferenz aller gemessenen Raumkonstellationen in grau

#### 4.2.2 Einfluss der Absorber auf das Schallfeld im Senderraum

Um den Einfluss der Absorber auf das Schallfeld des Senderraums zu beurteilen, wurden die Daten der Rastermessung ausgewertet und mit Hilfe der Software Matlab eine Visualisierung erstellt. Die folglich dargestellten Schallfelder basieren auf den in Kapitel 3.3.2 vorgestellten Messpunkten. Die Interpolation zwischen diesen Messpunkten erfolgte in der Einheit Pascal und mit linearem Ansatz. Es wurde lediglich zwischen den Messpunkten interpoliert, eine Extrapolation hin zu den Raumbegrenzungen fand nicht statt. Das heißt, die dargestellten Schallfelder werden jeweils 70 cm von den Raumbegrenzungen weg dargestellt; weitere Ausnehmungen im Raster ergaben sich aufgrund der Einbauten sowie Lautsprecher. Diese Bereiche im Raum ohne Messwerte werden weiß dargestellt. Die Werte der dargelegten interpolierten Grafiken stimmen nicht vollständig mit jenen der Messpunkte der Messmethode 'Norm' überein. Dies liegt zum einen an der Schrittweite der Rastermessung von etwa 80 cm, zum anderen an der gewählten linearen Interpolationsmethode. Eine Interpolation höherer Ordnung hätte aufgrund von fehlenden Randbedingungen zu einer Verkleinerung des darstellbaren Bereichs der Schallfelder geführt und ist daher nicht zielführend. Allgemein kann die Reproduzierbarkeit der Lautsprecher- sowie der Messpositionen in der Messmethode 'Norm' nur auf etwa 10 cm genau gewährleistet werden, da diese für jede Senderraum-Variante erneut manuell platziert werden mussten. Aufgrund der generierten Messdaten werden hier lediglich die Schallfelder des Senderraums und die Auswirkungen der Absorber darauf gezeigt.

Mit dem Verweis auf Abbildung 4.4 sei nochmals die Schallpegeldifferenzen der Absorber-Varianten 'SR10' und 'SR20' in Erinnerung gerufen. Die Terzbänder mit den größten Schwankungen bei 63 und 100 Hz werden nun genauer beleuchtet. Die Differenzen im 63 Hz Terzband

belaufen sich im Vergleich zur Referenzgröße 'SRnorm' auf +0,2 dB bei der Variante 'SR10' und +8,9 dB bei 'SR20'; im 100 Hz Terzband liegt die Abweichung bei -1,0 bzw. +6,8 dB.

#### 4.2.2.1 Schallfelder im Senderaum im 63 Hz Terzband

Die Berechnung der theoretischen Moden mit Hilfe des amroc Raummoden-Rechners [26] ergibt für den Senderaum im 63 Hz Terzband (56,2 bis 70,8 Hz) folgende fünf Eigenmoden:

- 1-1-1 bei 60,3 Hz
- 0-2-0 bei 64,7 Hz
- 1-2-0 bei 69,6 Hz
- 2-1-0 bei 60,6 Hz
- 2-0-1 bei 67,5 Hz

Diese stimmen in etwa mit den beobachteten Moden aus den Rastermessungen überein. Natürlich werden bei der Auswertung durch Terzbandfilter die theoretischen Raummoden zusammengefasst und verschmiert, daher ist die Ableitung exakter Raummoden aus den Messdaten lediglich mit Hilfe einer Analyse von FFT-Daten möglich. Die Messungen wurden in dieser Auflösung erfasst, sind allerdings nicht Teil dieser Arbeit. Sollte begründetes Interesse an den Rohdaten in FFT-Auflösung bestehen, stellen wir diese auf Nachfrage gerne zur Verfügung.

Die Schallfelder der unterschiedlichen Senderaumkonfigurationen im 63 Hz Terzband sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurden alle Grafiken auf einer Seite zusammengefasst.

Im Setup 'SRnorm' (erste Zeile der Abbildung 4.5) zeigen sich eindeutig ausgeprägte Raummoden. Vor allem entlang der X-Achse kann ein deutliches Schallfeldmuster erkannt werden. Auch in Richtung der Z-Achse ist in etwa in der Mitte ein verringerter Schalldruckpegel ersichtlich. Betrachtet man die statistischen Kennwerte der Messmethode 'Raster' in der Variante 'SRnorm' in Tabelle 4.1, so liegt der äquivalente Schalldruckpegel  $L_{eq}$  bei 95,5 dB, die Differenz zwischen Maxima und Minima liegt bei 21,8 dB.

Der geringste Schalldruckpegel stellt sich in der zweiten ( $X=158$  cm) sowie der sechsten Messebene ( $X=512$  cm) entlang der X-Achse ein. Im Bereich der Raummitte kann ein überdurchschnittlicher Schalldruckpegel beobachtet werden. Dies spricht für eine Raummode mit zwei Knotenpunkten in X-Richtung (2-y-z). Eine Symmetrie des Schallfeldes um die XY-Ebene in Mitte der Z-Achse ist allerdings nicht erkennbar. Hier scheint es eher eine Überlagerung verschiedener Raummoden zu geben. Im Koordinatenursprung der Y-Achse ist ein Minimum im Bodenbereich erkennbar, und an der hinteren XZ-Ebene sind erhöhte Schalldruckpegel im oberen und unteren Bereich des Raumes ersichtlich; dies spricht für eine schräge Raummode (x-1-1).

Das Schallfeld der Konstellation 'SR10' in der zweiten Zeile der Abbildung 4.5, welche mit Absorberpaketen in den von der Prüfwand abgewandten Ecken ausgestattet ist, zeigt analoge Merkmale wie das Setup 'SRnorm'. Zu erkennen ist allerdings, dass sowohl die Bereiche mit niedrigem wie auch mit hohem Schalldruckpegel sich in abgeschwächter Form ausbilden. Wie aus Tabelle 4.1 ersichtlich, erhöht sich das Minimum aller Messpunkte um 1,0 dB, das Maximum verringert sich um 2,4 dB im Vergleich zum 'SRnorm'. Dies spiegelt sich auch bei dem um 2,8 dB niedrigerem äquivalenten Schalldruckpegel  $L_{eq} = 92,7$  dB wider.

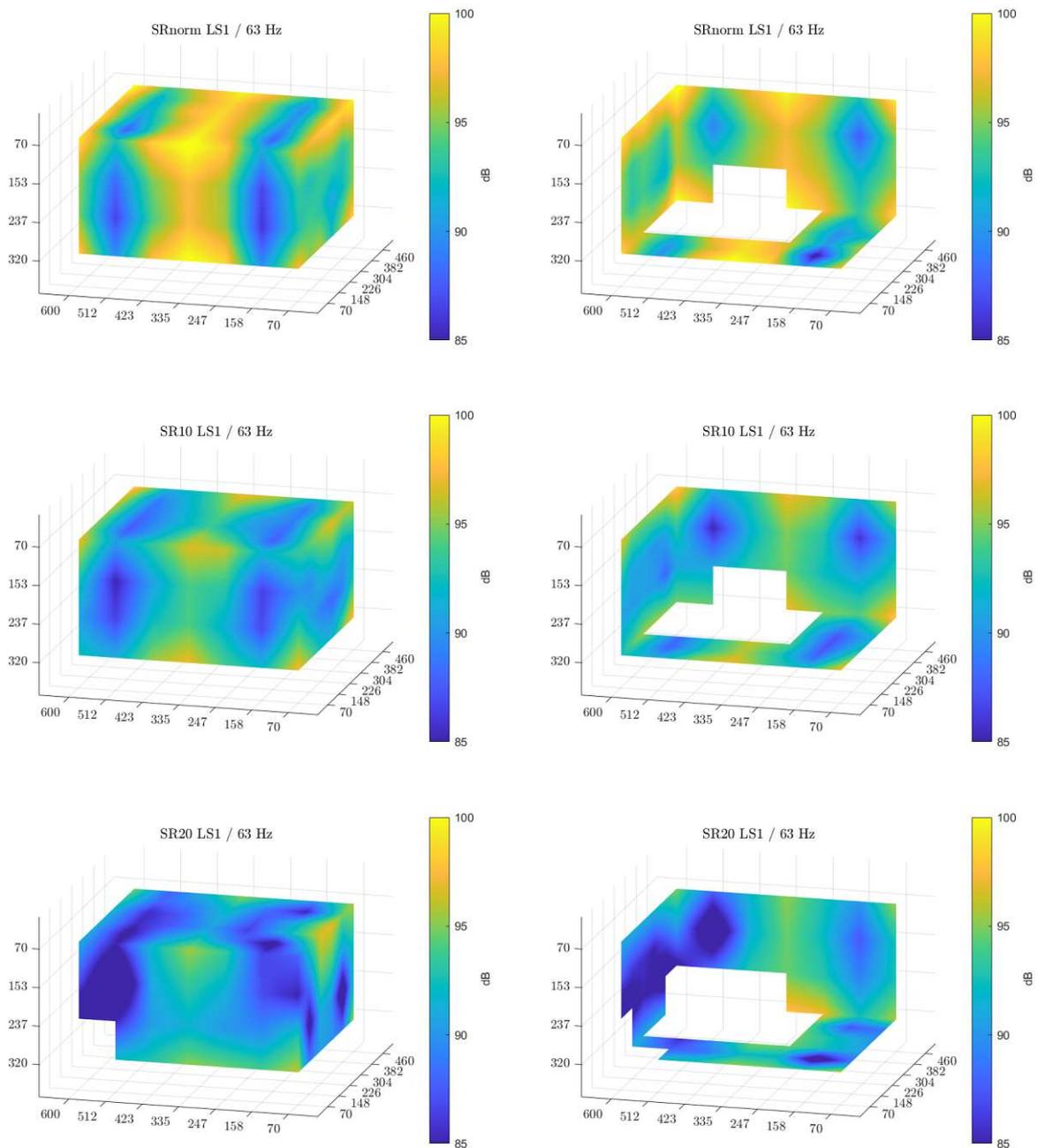
Betrachtet man nun das Schallfeld des stark bedämpften Senderaums 'SR20' in der letzten Zeile der Abbildung 4.5, so zeigt sich allgemein ein niedrigerer Schalldruckpegel im Vergleich zu den bisher betrachteten Raumkonfigurationen; der äquivalente Schalldruckpegel sinkt weiter auf  $L_{eq} = 91,2$  dB. Die extremen Ausprägungen der Schalldruckpegel aus dem Setup 'SRnorm' werden durch die Platzierung der Absorberpakete in den rückwärtigen Ecken sowie entlang der Raumkanten

abgeschwächt. Die Raummoden sind nicht mehr so deutlich erkennbar, trotzdem nimmt die Differenz von Minima und Maxima leicht zu (21,5 dB), wie den statistischen Kennwerten in Tabelle 4.1 zu entnehmen ist. Konträr dazu verbleibt die Standardabweichung der Schalldruckpegel in einem ähnlichen Bereich wie bei der Variante 'SRnorm'. Erwähnenswert ist, dass durch die großräumige Pegelreduktion im Bereich der hinteren Ecken des Raumes das Minimum der Variante 'SR20' um 2,6 dB unter jenem der Variante 'SRnorm' liegt.

Neben den Veränderungen im hinteren Bereich des Senderraums kann auch ein Einfluss der stärkeren Absorption nahe der Prüfwand festgestellt werden. Die im Raum 'SRnorm' beobachteten niedrigen Schalldruckpegel in nahezu der gesamten zweiten Messebene in X-Richtung ( $X=158$  cm) verlagern sich bei 'SR20' hin zu zwei Regionen mit deutlich niedrigerem Schalldruckpegel in Bodennähe wie auch in der obersten Messebene – was auf die Mode (x-2-z) hinweist. Augenscheinlich zieht sich diese Mode allerdings nicht über die gesamte Höhe, und es spielt auch eine Mode in Z-Richtung (x-y-1) mit. Weiters ist erkennbar, dass sich der Mittenbereich des Raumes nicht mehr so deutlich 'abhebt' wie in den beiden Varianten 'SRnorm' und 'SR10', hier finden sich homogenere Schalldruckpegel.

**Tab. 4.1:** Statistische Kennwerte der Messmethode 'Raster' für die Senderraum-Varianten 'SRnorm' | 'SR10' | 'SR20' | 'SR22' in den Terzbändern 63 und 100 Hz

Terzbandmittenfrequenz	63 Hz				100 Hz				
	Raum	SRnorm	SR10	SR20	SR22	SRnorm	SR10	SR20	SR22
$L_{eq}$		95,5	92,7	91,2	91,7	96,1	93,8	93,2	93,0
$s$		4,1	3,7	4,3	4,2	2,2	1,8	2,6	2,4
$Min$		79,0	80,0	76,4	76,7	89,7	88,9	84,3	84,0
$Max$		100,8	98,4	97,9	97,1	99,7	97,6	98,3	98,0



**Abb. 4.5:** Randebenen der Schallfelder im 63 Hz Terzband der Senderraumkonstellationen 'SR-norm' (oben) | 'SR10' (mitte) | 'SR20' (unten), mit Blick aus Richtung der Prüfwand (Koordinatenursprung). Abmessungen in cm

#### 4.2.2.2 Schallfelder im Senderaum im 100 Hz Terzband

Beleuchtet man nun die Schallfelder des Senderaums im 100 Hz Terzband in Abbildung 4.6, so sind in der Variante 'SRnorm' (erste Zeile) keine eindeutigen Raummoden erkennbar. Dies erklärt sich durch die wesentlich höhere Anzahl an Moden, welche in das 100 Hz Terzband fallen. Das spiegeln auch die statistischen Kennwerte der Tabelle 4.1 wider: Die Spreizung zwischen Minima und Maxima von 'SRnorm' nimmt im 100 Hz Terzband im Vergleich zum 63 Hz Terzband deutlich ab und beträgt nur noch 10,0 dB. Auch die Standardabweichung halbiert sich nahezu auf 2,2 dB, der äquivalente Schalldruckpegel beträgt 96,1 dB.

Gemäß dem amroc Raummoden-Rechner [26] liegen theoretisch insgesamt 18 Eigenmoden im besagten 100 Hz Terzband (88,4 bis 111,4 Hz):

- 3-0-1 bei 88,49 Hz
- 1-1-2 bei 97,15 Hz
- 2-1-2 bei 106,78 Hz
- 1-0-2 bei 91,6 Hz
- 1-3-0 bei 100,39 Hz
- 4-1-0 bei 107,38 Hz
- 2-2-1 bei 93,5 Hz
- 3-2-0 bei 100,42 Hz
- 0-2-2 bei 109,19 Hz
- 0-1-2 bei 93,71 Hz
- 2-0-2 bei 101,76 Hz
- 1-3-1 bei 109,6 Hz
- 3-1-1 bei 94,22 Hz
- 4-0-0 bei 102,39 Hz
- 3-2-1 bei 109,63 Hz
- 0-3-0 bei 97,08 Hz
- 0-3-1 bei 106,57 Hz
- 2-3-0 bei 109,75 Hz

Trotz der großen Anzahl an Raummoden kann ein Einfluss der Raumakustik im Senderaum auf dessen Schallfeld und die Schallpegeldifferenz festgestellt werden. So ist aus Abbildung 4.6 in der ersten Zeile, beim Setup 'SRnorm', ein geringerer Schalldruckpegel im Bereich nahe des Prüfbauteils Richtung Boden festzustellen. Weiters kann in der sechsten Messebene in X-Richtung ( $X=512$  cm) im Bereich zur Decke ebenso ein niedrigerer Schalldruckpegel erkannt werden. Ein überdurchschnittlicher Pegel ist in Mitte der X-Achse sowohl in den obersten wie auch der untersten XY-Messebene ersichtlich. Eine Symmetrie des Schallfeldes kann aus den Grafiken nicht festgestellt werden. In der bodennächsten XY-Ebene sind drei Hochs erkennbar, dies deutet auf die Raummode (4-y-z) hin.

Vergleicht man nun die Senderaumkonstellation 'SR10' in der zweiten Zeile der Abbildung 4.6 mit jenen von 'SRnorm', so zeigt sich ein ähnliches Schallfeld. Grundlegend verringert sich der äquivalente Schalldruckpegel um 2,3 dB auf  $L_{eq} = 93,8$  dB – ähnlich wie auch schon im 63 Hz Terzband. Auch die Schwankungsbreite der Schalldruckpegel und die Standardabweichung werden abermals kleiner, wie in Tabelle 4.1 ersichtlich.

Die bei der Variante 'SRnorm' beobachteten geringeren Schalldruckpegel im bodennahen Bereich beim Prüfbauteil werden im Senderaum 'SR10' nicht reproduziert; hier deuten sich eher zwei Hochs im Pegel an – was für die Raummode (x-2-z) spricht. Da diese Mode allerdings nicht über die gesamte Höhe ausgeprägt ist, liegt abermals eine Überlagerung von Moden vor – vor allem scheint eine Mode in Z-Richtung im Spiel zu sein. Es könnte sich also um (x-2-1) im Randbereich und um (x-2-2) in den Drittelpunkten in Y-Richtung an der ersten YZ-Ebene ( $X=70$  cm) handeln.

Die niedrigen Schalldruckpegel in der sechsten Messebene ( $X=512$  cm) aus 'SRnorm' ziehen sich bei 'SR10' von der obersten Messebene weiter nach unten und leicht nach hinten; dies kann durch die verstärkte Absorption in den rückwärtigen Ecken begründet werden. Die Mode (4-y-z) ist auch in der Variante 'SR10' durch drei Hochs in der bodennächsten XY-Ebene erkennbar, wenn auch in abgeschwächter Form.

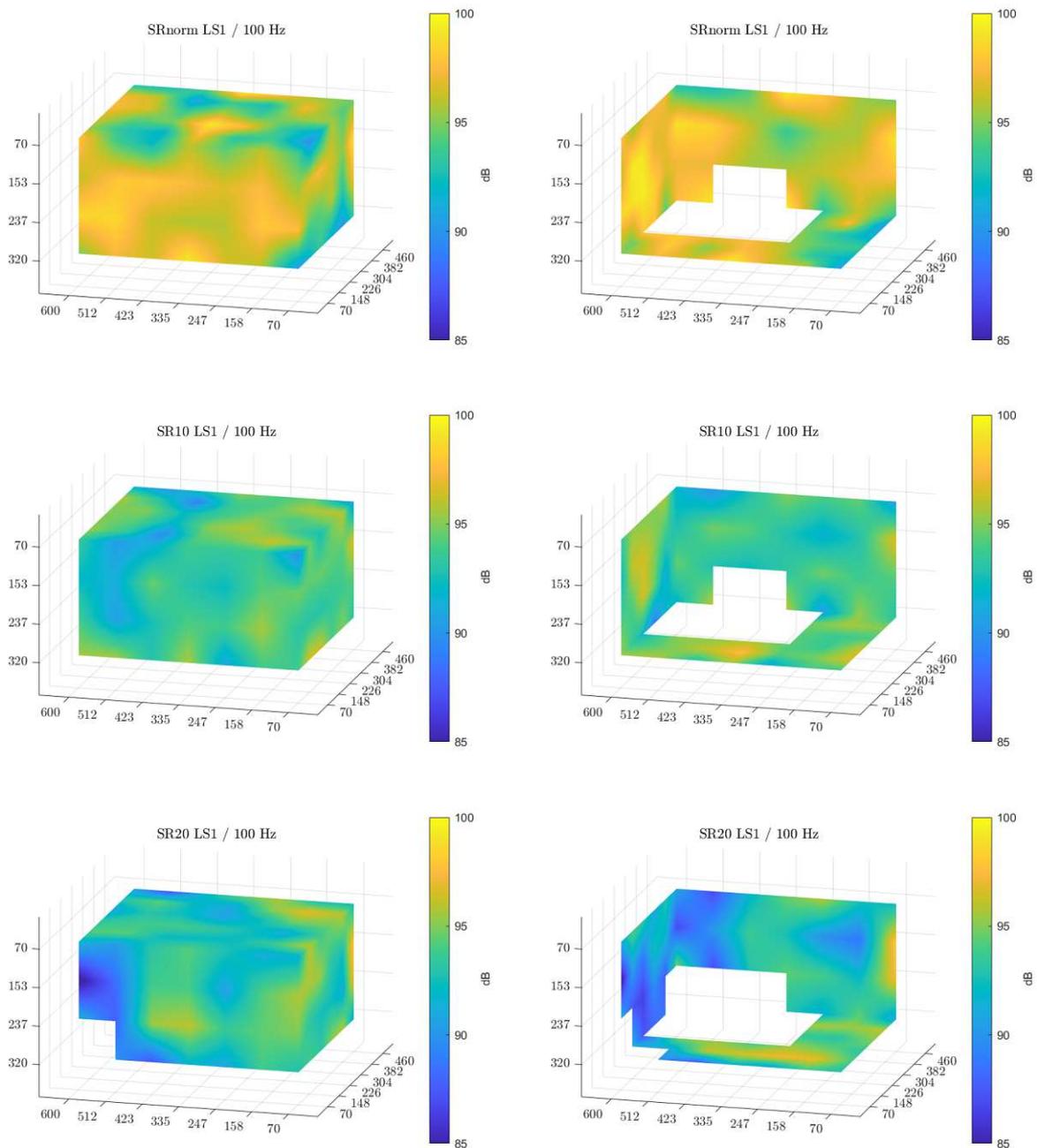
Das Schallfeld des stark bedämpften Raums 'SR20' im 100 Hz Terzband in Abbildung 4.6 (letzte Zeile) zeigt in einigen Bereichen ein differenziertes Bild. Grundlegend verändern sich die statistischen Kennwerte doch deutlich, wie in Tabelle 4.1 ersichtlich.  $L_{eq}$  nimmt abermals analog wie im 63 Hz Terzband geringfügig ab und liegt nun bei 93,2 dB. Die Schwankungsbreite der gemessenen Schalldruckpegel nimmt allderings deutlich zu und beträgt 14,0 dB; wobei im Vergleich zu 'SR10' sowohl das Minimum deutlich sinkt, als auch das Maximum geringfügig steigt.

Die niedrigen Schalldruckpegel im bodennahen Bereich des Prüfbauteils aus 'SRnorm' sind, analog zu 'SR10', auch in 'SR20' nicht erkennbar. Allerdings sind zwei deutlich ausgeprägte Schalldruckhochs entlang der Y-Achse ersichtlich, die Mode (x-2-z) erstreckt sich hier auch über einen wesentlich größeren Bereich in X-Richtung; auch wenn abermals weitere Moden in Z-Richtung mitspielen. In der vordersten YZ-Messebene ( $X=70$  cm) ist abermals ein ähnliches Bild wie auch schon im Raum 'SR10' erkennbar. Im Bereich der Rückwand des Prüfstands zeigen sich durch die dort platzierten großen Absorberpakete deutlich geringere Schalldruckpegel. Die in der Bodenebene der Varianten 'SRnorm' und 'SR10' erkennbaren drei Hochs sind nicht mehr festzustellen; speziell das Hoch in der sechsten YZ-Messebene ( $X=512$  cm) wird praktisch durch die Absorber geschluckt. Die beiden weiteren Hochs entlang der X-Achse können aber weiter beobachtet werden. Die in der obersten XY-Messebene erkannten Tiefs in 'SRnorm' und 'SR10' verändern sich deutlich, und es sind analog zur vorderen Messebene in X-Richtung zwei Hochs erkennbar – was wiederum für die Mode (x-2-z) spricht. Auch im Bereich der Zugangstür zum Prüfraum, in der Mitte der Rückwand, ist ein deutlich niedriger Schalldruckpegel als in den Konstellationen 'SRnorm' und 'SR10' erkennbar. Bei den beiden Varianten 'SRnorm' und 'SR10' ist in diesem Bereich ein Hoch im Schalldruckpegel ersichtlich.

### Zusammenfassung – Einfluss der Absorber

Es kann geschlussfolgert werden, dass die gewünschte Bedämpfung einzelner Raummoden durch die Platzierung der Absorberpakete in den Ecken sowie entlang der Raumkanten gelungen ist. Sowohl im 63 als auch im 100 Hz Terzband werden Unterschiede in der Ausprägung der Raummoden durch den Einfluss der Raumakustik deutlich. Durch eine Bedämpfung von  $\alpha_m = 0,2$  sollen nach Fuchs [20] die Raummoden ausreichend bedämpft und somit die Wiederholbarkeit von Messungen im tieffrequenten Bereich ohne zusätzlichen Aufwand bewerkstelligt werden. Im Zuge dieser Untersuchungen liegt die Variante 'SR22' mit  $\alpha_{m,50-250} = 0,2$  im Bereich dieser optimalen Bedämpfung. Die durch Fuchs [20] ermittelte optimale Bedämpfung von Messräumen kann auf Basis der statistischen Kennwerte der Messmethode 'Raster' in Tabelle 4.1 nur bedingt bestätigt werden. Der Schwankungsbereich der Schalldruckpegel wird zwar teilweise verringert, allerdings wird die Standardabweichung nicht erheblich verbessert. Die Bedämpfung der Moden scheint also gelungen, die Wahrscheinlichkeit, bei Bestimmung der äquivalenten Schalldruckpegel aus fünf Messpunkten repräsentative Größen zu erhalten, erscheint auf Basis der besagten statistischen Kennwerte allerdings fraglich.

In Kapitel 4.3 werden die Beobachtungen von Fuchs [20] nochmals anhand der unterschiedlichen Messmethoden aufgegriffen und beleuchtet. Wie sich die Bedämpfung in der in der Praxis üblichen Messmethode 'Norm' auswirkt, wird in Kapitel 4.2.4 anhand der Schallfelder in Kombination mit den verwendeten Mikrofonpositionen genauer beleuchtet.



**Abb. 4.6:** Randebenen der Schallfelder im 100 Hz Terzband der Senderaumkonstellationen 'SRnorm' (oben) | 'SR10' (mitte) | 'SR20' (unten), mit Blick aus Richtung der Prüfwand (Koordinatenursprung). Abmessungen in cm

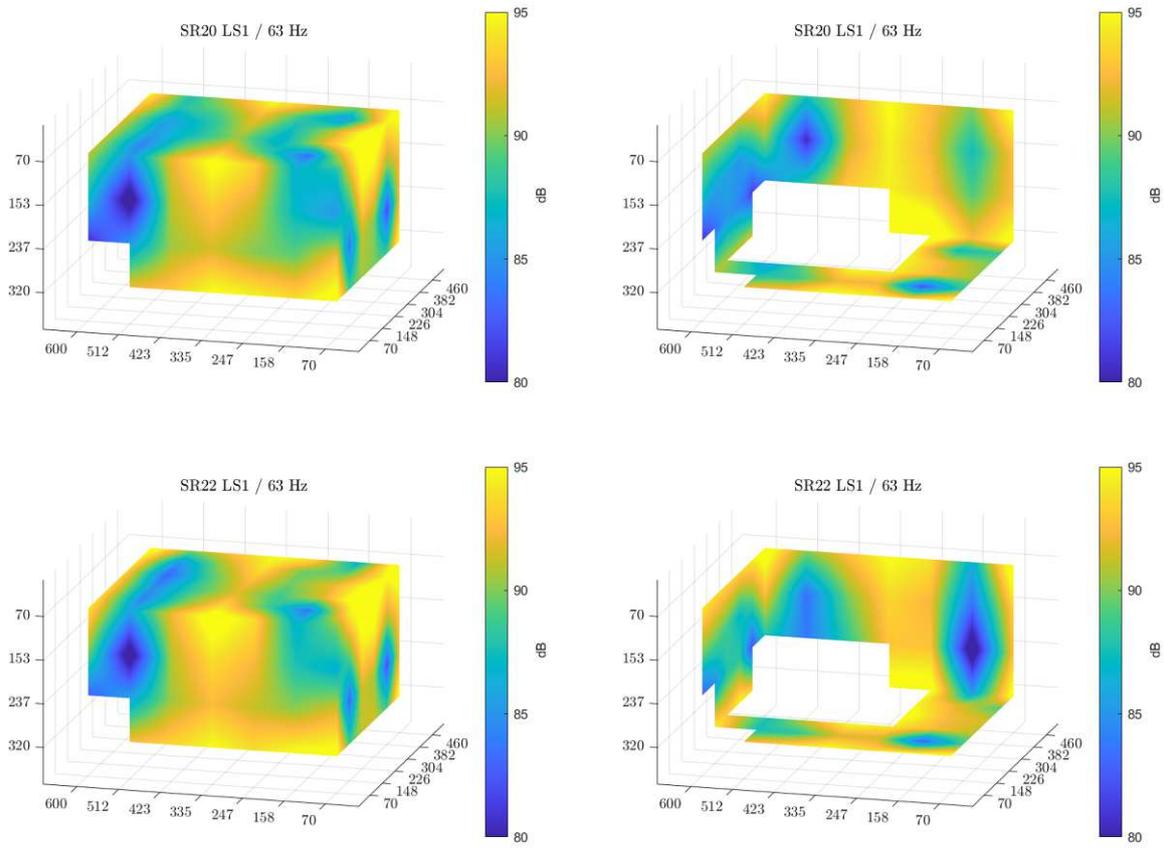
### 4.2.3 Einfluss der Diffusoren auf das Schallfeld im Senderaum

Analog zu den Darstellungen im vorigen Kapitel 4.2.2 soll nun der Einfluss der Diffusoren anstatt jener der Absorber auf das Schallfeld im Senderaum gezeigt werden. Hierzu vergleichen wir die Raumvarianten 'SR20' und 'SR22' im 63 und 100 Hz Terzband. In diesen beiden Terzbändern konnte der größte Einfluss durch das Einbringen der Diffusoren beobachtet werden.

An dieser Stelle sei auf die Abbildung 4.3 in Kapitel 4.2.1 verwiesen, wo der Effekt auf die Schallpegeldifferenz durch die eingebrachten Diffusoren in die Variante 'SR20' deutlich sichtbar ist. Im 63 Hz Terzband beläuft sich der Einfluss der Diffusoren auf die Schallpegeldifferenz auf -3,9 dB, und 'SR22' liegt nur noch 5,0 dB über der Referenzgröße 'SRnorm'. Bei den Werten im 100 Hz Terzband fällt die Änderung durch die eingebrachten Diffusoren noch deutlicher aus und beträgt -6,8 dB, somit liegt der Wert von 'SR22' exakt bei jenem der Referenzgröße 'SRnorm'. Ob dieser starke Einfluss nur zufällig aus den gewählten Messpunkten der Messmethode 'Norm' stammt oder auch bereits in den Schallfeldern des Senderaums ersichtlich ist, sollen die Abbildung 4.7 und 4.8 zu Tage bringen. In diesen nachstehenden Abbildungen wurden die Wertebereiche der Schallfelder im Vergleich zu Kapitel 4.2.2 verändert. Im 63 Hz Terzband in Abbildung 4.7 verschob sich der Wertebereich um 5 dB nach unten, die Grenzen der Skala liegen somit bei 80 bis 95 dB, die Spreizung verblieb bei 15 dB. Für die Schallfelder des 100 Hz Terzbandes verkleinerte sich der Skalenbereich auf 10 dB, die Grenzen liegen bei 85 bzw. 95 dB. Das Verschieben des Wertebereichs trägt zur besseren Erkennbarkeit der Schallmuster bei.

#### 4.2.3.1 Schallfelder im Senderaum im 63 Hz Terzband

Betrachtet man die Schallfelder der Senderaumvarianten 'SR20' (oben) und 'SR22' (unten) in Abbildung 4.7 im 63 Hz Terzband, so sind nur geringe Unterschiede erkennbar. Die statistischen Kennwerte (Tabelle 4.1) werden durch die zusätzlichen Diffusoren im 'SR22' nur geringfügig beeinflusst;  $L_{eq}$  steigt im Vergleich zu 'SR20' um 0,5 dB auf 91,7 dB, die Schwankungsbreite der Schalldruckpegel verringert sich geringfügig. Allgemein sind die in Kapitel 4.2.2 bei 'SR20' beschriebenen niedrigeren Schalldruckpegel im Bereich der Prüfraumrückwand sowie in der Nähe der Prüfwand ebenso in Variante 'SR22' ersichtlich. Die Ausprägungen im rückwärtigen Bereich des Prüfraums in der Mitte zwischen den Absorberpaketen ist allerdings nicht mehr so stark erkennbar wie in der Variante 'SR20'. Der dort platzierte Diffusor bringt augenscheinlich eine partielle Abschirmung der Mineralwollepakete mit sich. Das Schallfeld im hinteren Bereich des Senderaums wird allgemein in der Variante 'SR22' homogener. Konträr dazu ist eine deutlich stärkere Ausprägung der Zone mit geringem Schalldruckpegel nahe der Prüfwand zu erkennen ( $X=158$  cm). Hier ist ein sehr niedriger Schalldruckpegel in der sechsten XZ-Messebene ( $Y=460$  cm) ersichtlich; diese Ausprägung kann in der ersten XZ-Messebene ( $Y=70$  cm) nicht festgestellt werden. Auf Basis der asymmetrischen Anordnung der Diffusoren um die Raumlängsachse und dem ersichtlichen Einfluss dieser auch im tieffrequenten Bereich erscheint die asymmetrische Ausprägung der Raummoden als schlüssig. Wie in Kapitel 3.5 dargelegt, befinden sich große Diffusoren an der rückwärtigen Prüfstandswand leicht links der Mitte (von der Prüfwand aus gesehen), sowie an der rechten Prüfstandswand im hinteren Drittelpunkt.



**Abb. 4.7:** Randebenen der Schallfelder im 63 Hz Terzband der Senderaumkonstellationen 'SR20' (oben) | 'SR22' (unten), mit Blick aus Richtung der Prüfwand (Koordinatenursprung).  
Abmessungen in cm

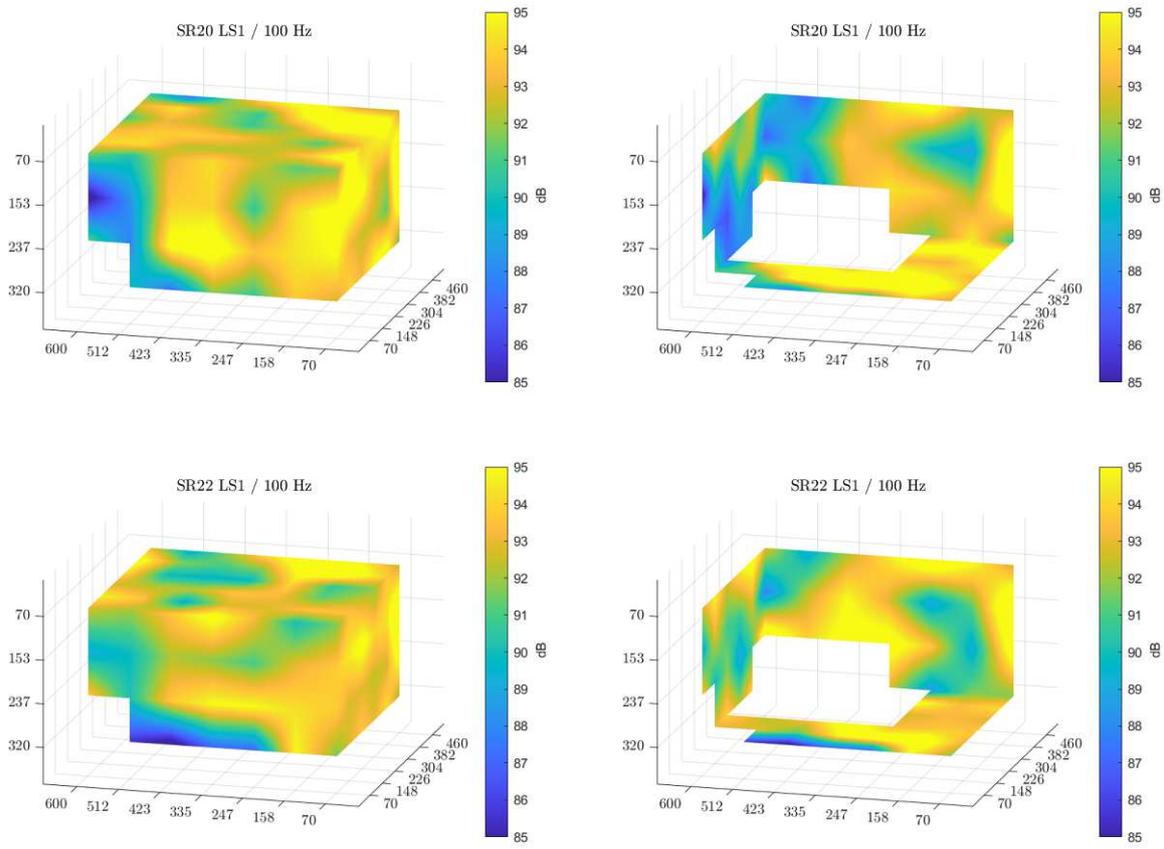
### 4.2.3.2 Schallfelder im Senderaum im 100 Hz Terzband

Auch im 100 Hz Terzband (Abbildung 4.8) zeigen sich durch das Hinzufügen der Diffusoren zur Variante 'SR20', welche somit zu 'SR22' wird, erkennbare Unterschiede der Schallfelder. Die im vorhergehenden Kapitel beobachtete Abschwächung des Schalldruckextrems im hinteren Bereich des Prüfraums wird, analog zum 63 Hz Terzband, durch die Variante 'SR22' homogenisiert; der Schalldruck in diesem Bereich zwischen den Absorberpaketen steigt etwas an. Wirft man einen Blick auf die statistischen Kennwerte in Tabelle 4.1, so verringert sich der äquivalente Schalldruckpegel um 0,2 dB beim Schritt von 'SR20' auf 'SR22' auf  $L_{eq} = 93,0$  dB, ebenso verringert sich die Standardabweichung geringfügig; die Schwankungsbreite bleibt gleich wie bei 'SR20'.

In der rückwärtigen YZ-Messebene ( $X=600$  cm) der Variante 'SR22' sind zwei eindeutige Hochs in Y-Richtung erkennbar, was auf eine Raummode ( $x-2-z$ ) hindeutet. Diese ist im Raum 'SR20' eher im vorderen Bereich des Prüfraums ersichtlicher. Heraus sticht auch der deutlich erhöhte Schalldruckpegel in der Mitte der X-Achse an der rechten Prüfstandswand; hier befindet sich in etwa einer der großen Diffusoren. In der Variante 'SR20' ist die Erhöhung des Schalldrucks in diesem Bereich wesentlich weniger ausgeprägt. Andererseits ist die Zone mit geringerem Schalldruck an der bodennahen Messebene entlang der linken Wand des Prüfstands deutlicher erkennbar. Hier wurden allerdings die selben Absorberpakete wie im 'SR20' platziert, zwischen diesen befinden sich aber nun zusätzlich kleine Diffusoren mit  $1.0\text{ m}^2$  Fläche. Es kann daher vermutet werden, dass diese zu einer erhöhten Absorption beitragen. Denn auch im Bereich nahe der Prüfwand stellt sich bei der Variante 'SR22' ein geringerer Schalldruckpegel als bei 'SR20' ein – auch hier ist zusätzlich ein kleiner Diffusor platziert.

#### Zusammenfassung – Einfluss der Diffusoren

Es kann also zusammengefasst werden, dass die Diffusoren im 63 Hz Terzband dieser stark bedämpften Senderaumkonfiguration durchaus einen Einfluss auf die Ausbildung der Raummoden haben. Die statistischen Kennwerte der 'Raster'-Messung werden allerdings nur marginal beeinflusst. Auch im 100 Hz Terzband sind die Veränderungen im Schallfeld durch das Einbringen der Diffusoren deutlich erkennbar. Die Ausprägungen des Schallfelds werden hier nochmals mehr beeinflusst als im 63 Hz Terzband. Der eingangs erwähnte markante Unterschied der Schallpegeldifferenz der Varianten 'SR20' und 'SR22' in der Messmethode 'Norm' im 63 wie auch 100 Hz Terzband kann allerdings nicht alleine durch die Veränderungen im Schallfeld des Senderaums begründet werden. Die Messpositionen bei der 'Norm'-Messung müssen hier den Löwenanteil der 3,9 dB Minderung im 63 Hz Terzband bzw. 6,8 dB Minderung im 100 Hz Terzband in der Schallpegeldifferenz liefern.



**Abb. 4.8:** Randebenen der Schallfelder im 100 Hz Terzband der Senderaumkonstellationen 'SR20' (oben) | 'SR22' (unten), mit Blick aus Richtung der Prüfwand (Koordinatenursprung). Abmessungen in cm

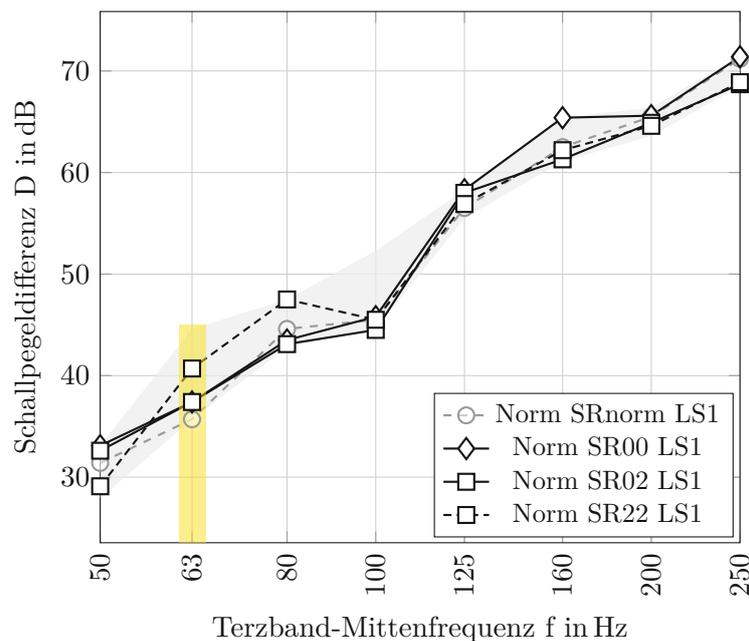
#### 4.2.4 Interpretation der Messergebnisse der Messmethode 'Norm' anhand der Mikrofonpositionen und der Schallfelder des Sende- und Empfangsraums

Einleitend sollen nochmals die Schallpegeldifferenzen der extremen Raumkonstellationen 'SRnorm' | 'SR00' | 'SR02' | 'SR22' in der Messmethode 'Norm' verglichen werden. Diese sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Neben der Messung mit der Messmethode 'Norm' kam hier auch die Rastermessung in Sende- wie auch Empfangsraum zum Einsatz. Auf Basis der generierten Messdaten sollen in diesem Kapitel die Schallfelder der extremen Raumkonfigurationen mit Blick auf die in der Messmethode 'Norm' verwendeten Mikrofonpositionen näher beleuchtet werden. Analog zu den bereits analysierten Terzbändern der vorhergehenden Kapitel wird hier beispielhaft das 63 Hz Terzband genauer beleuchtet. Die Schwankungen der Schallpegeldifferenzen sind hier abermals am größten: Der leere Senderaum 'SR00' weicht im 63 Hz Terzband um +1,8 dB von 'SRnorm' ab; 'SR02' liegt +1,7 dB über 'SRnorm', und 'SR22' liefert eine um +5,0 dB höhere Schallpegeldifferenz.

Die in den vorhergehenden Kapiteln 4.2.2 und 4.2.3 gezeigten Auswirkungen der Raumakustik im Senderaum analysieren wir nun im Sende- wie auch im Empfangsraum. Somit kann den in Abbildung 4.9 dargelegten Schwankungen der Schallpegeldifferenzen zwischen den einzelnen Raumsetups auf den Grund gegangen werden. Das gezeigte modale Schallfeld im tieffrequenten Bereich macht eine Messung eines repräsentativen äquivalenten Schalldruckpegels in der Messmethode 'Norm' sehr schwierig. Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, liegen die Schwankungsbreiten der Schalldruckpegel in den tiefen Frequenzen oftmals bei bis zu 20 dB. Je nach Wahl der fünf Mikrofonpositionen in den Prüfräumen kann das Messergebnis also markant beeinflusst werden.

Um den Einfluss des modalen Schallfelds zu verdeutlichen, sei ein Beispiel angeführt: Beleuchtet man die Kombinationen der fünf jeweils extremsten Messpunkte des Sende- wie auch Empfangsraums aus der Messmethode 'Raster 1m BT', so ergibt sich im 'SRnorm' im 63 Hz Terzband eine Schwankungsbreite der Schallpegeldifferenz von über 30 dB; im besten Fall beträgt die Schallpegeldifferenz  $D_{best} = 50,6$  dB, im schlechtesten Fall  $D_{worst} = 19,4$  dB. Hierbei ist zu beachten, dass die gewählten Messpunkte im normativ zulässigen Bereich liegen. Denn wie in Kapitel 3.5 angeführt, liegen alle Messpunkte der Messmethode 'Raster 1m BT' im normativ zulässigen Bereich. Selbst im 100 Hz Terzband liegt die Schwankungsbreite der Schallpegeldifferenz von analog ausgewählten Messpunkten bei über 10 dB; im besten Fall beträgt die Schallpegeldifferenz  $D_{best} = 55,1$  dB, im schlechtesten Fall  $D_{worst} = 44,6$  dB.

Beachtenswert ist dieses kurze Gedankenexperiment, da es sich beim XL-Prüfstand des ACA um einen überdurchschnittlich großen Prüfstand handelt. Die Abmessungen der Prüfräume wurden auf Basis der sich einstellenden Anzahl der Moden im 63 Hz Terzband gewählt. Die Anzahl der Moden im 63 Hz Terzband wurde gleich jener eines Standard-Prüfstands im 100 Hz Terzband gesetzt, wie in Kapitel 3.1.1 erläutert. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Schwankungen in einem Standard-Prüfstand in einer ähnlichen oder größeren Größenordnung liegen. Bei diesem Beispiel muss allerdings vor Augen gehalten werden, dass lediglich eine Lautsprecherposition betrachtet wird. Durch den Einsatz mehrerer Senderpositionen wird die Schwankungsbreite deutlich reduziert, wie im Anhang C kurz angerissen wird.



**Abb. 4.9:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz in der Messmethode 'Norm' im Vergleich der extremen Raumkonstellation 'SR00' | 'SR02' und 'SR22' als Referenz das Raumsetup 'SRnorm' (grau), ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs der Schallpegeldifferenz aller gemessenen Raumkonstellationen in grau und Markierung des näher betrachteten Terzbandes bei 63 Hz in gelb

#### 4.2.4.1 Analyse der Messpunkte im Schallfeld des Senderaums und Empfangsraums für 'SRnorm' und 'SR00'

In Abbildung 4.10 werden nun die Schallfelder des Senderaums (links) sowie des Empfangsraums (rechts) in den verschiedenen Raumsetups im 63 Hz Terzband dargestellt. Ausgehend vom normativen Raum 'SRnorm' analysieren wir im ersten Schritt die Messpositionen der Messmethode 'Norm', welche in den Abbildungen als Kreise dargestellt und nummeriert sind. An dieser Stelle sei nochmals angemerkt, dass es sich bei der Messmethode 'Norm' um eine Messung nach ISO 10140-2 [7] handelt, die die normativen Mindestanforderungen an die Anzahl der Mikrofonpositionen darstellt; es kamen pro Raum lediglich fünf Messpunkte zum Einsatz. Abweichend von den normativen Vorgaben, kam lediglich eine Lautsprecherposition (LS1) zu Messung. Weiters sei erwähnt, dass die Anzahl der sich einstellenden Raummoden für das 63 Hz Terzband laut amroc Raummoden-Rechner [26] im Senderaum fünf, im Empfangsraum sechs beträgt. Eine Übersicht der Schalldruckpegel über die einzelnen Mikrofonpositionen sowie der daraus resultierende äquivalente Schalldruckpegel  $L_{eq}$  je Sende- und zugehörigem Empfangsraum sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt.

Die Raumkonfiguration 'SRnorm' führt im 63 Hz Terzband zum niedrigsten Wert der Schallpegeldifferenz aller untersuchten Varianten, sie beträgt 35,7 dB. Die Ausprägung des Schallfelds im Senderaum wurde bereits in Kapitel 4.2.2 beleuchtet, hier wird nun der Fokus auf die Mikrofonpositionen der Messmethode 'Norm' gelegt.

Betrachtet man die Schnittebenen des Schallfeldes 'SRnorm' in der ersten Zeile der Abbildung 4.10, so ist eindeutig der geringe Schalldruckpegel im Messpunkt sechs erkennbar. Dieser liegt

mit 81,2 dB, wie auch die Messpunkte acht und neun, im Tiefpunkt der axialen Raummode in X-Richtung. Die Messpositionen sechs, acht und neun im Senderraum liefern auch Werte unterhalb des äquivalenten Schalldruckpegels von  $L_{eq} = 84,5$  dB. Die Messpunkte zehn und sieben bewegen sich räumlich immer weiter zur Mitte der Längsachse und werden folglich durch die erwähnte axiale Raummode geprägt – Mikro sieben stellt mit 87,1 dB das Maximum dieser Messung dar.

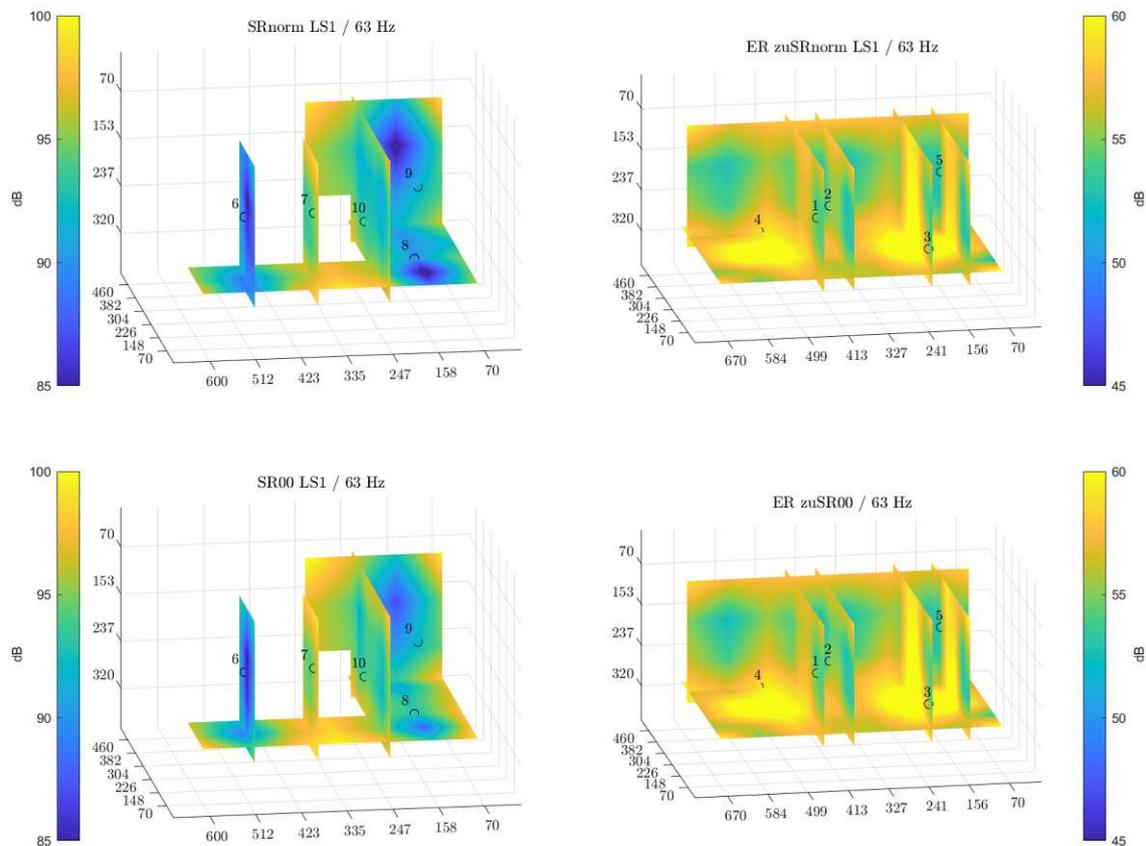
Schwenkt man den Blick auf den zugehörigen Empfangsraum 'ER zuSRnorm' in der ersten Zeile der Abbildung 4.10, sind auch hier deutliche Raummoden ersichtlich. Die beiden Hochs in den Drittelpunkten der zentralen Längsachse stechen hervor. Dadurch ergeben sich die prägenden Axialmoden in X- und Y-Richtung. Begutachtet man nun die Messpositionen, liefern Mikro vier und fünf die geringsten Schalldruckpegel mit knapp 48 dB. Diese beiden Messpunkte liegen eher am Rand des Messbereichs in Y-Richtung, und sind somit im Tief der erkennbaren Y-Mode. Die Messpunkte eins und drei liegen am gegenüberliegenden Ende des Messbereichs in Y-Richtung, liefern allerdings etwas höhere Werte. Der höchste Wert wird bei Mikro zwei gemessen, welches sich am nächsten der Mitte der Y-Achse befindet – der Schalldruckpegel beträgt 50,2 dB. Der ermittelte äquivalente Schalldruckpegel der fünf Messpunkte liegt bei  $L_{eq} = 48,8$  dB.

Sehen wir uns abermals die Schallpegeldifferenzen in Abbildung 4.9 an, so zeigt sich für den leeren Senderraum 'SR00' eine Schallpegeldifferenz von 37,4 dB im 63 Hz Terzband und somit 1,7 dB mehr als im Setup 'SRnorm'. Die zweite Zeile der Abbildung 4.10 zeigt das Schallfeld des Senderraums (links) und jenes des Empfangsraums (rechts) der Raumkonfiguration 'SR00'. Vergleicht man das Schallfeld des Senderraums 'SR00' mit jenem der Variante 'SRnorm', sind auf den ersten Blick nur geringe Unterschiede feststellbar. Zum einen ist die Zone des geringen Schalldruckpegels im Bereich der zweiten Messebene ( $X=158$  cm) nicht so deutlich ausgeprägt, zum anderen herrscht im Mittenbereich ein etwas höherer Pegel. Auch im Bereich mit geringem Schalldruckpegel, beim Messpunkt sechs liegt ein höherer Schalldruckpegel vor als im 'SRnorm'. Trotz dieser Beobachtung auf Basis des Schallfeldes und somit der Rasterdaten liegen die Schalldruckpegel der Messpunkte acht und neun um etwa 1 dB niedriger als jene der Variante 'SRnorm', wie in Tabelle 4.2 ersichtlich. Das Mikrofon Nummer sechs liefert aber tatsächlich einen höheren Pegel als bei 'SRnorm'. Der erkennbare höhere Schalldruckpegel im Mittenbereich des Raums schlägt sich auch in den Messwerten der Messpunkte sieben und zehn nieder; diese liegen knapp 2 dB über jenen der Variante 'SRnorm'. In Summe ergibt sich im leeren Senderraum 'SR00' ein etwas höherer äquivalenter Schalldruckpegel  $L_{eq} = 85,6$  dB als im 'SRnorm'.

Der zugehörige Empfangsraum 'ER zuSR00', in der zweiten Zeile der Abbildung 4.10 rechts, liefert ein sehr ähnliches Bild wie der 'ER zuSRnorm'. Einen geringfügigen Unterschied erkennt man im dem Prüfbauteil zugewandten Hoch ( $X=584$  cm), hier ist das Hoch etwas geringer ausgeprägt. Betrachtet man allerdings die Werte der Messpunkte, kommt ein differenziertes Bild zu Tage. Vor allem die Messpunkte zwei und vier liefern in der Messmethode 'Norm' wesentlich geringere Schalldruckpegel als bei 'ER zuSRnorm'. Die Werte liegen nahezu 5 dB unter den gleichen Messpunkten im 'ER zuSRnorm', wie in Tabelle 4.2 dargelegt. Vor allem erscheint es unerschwinglich, dass Messpunkt zwei vom Maximum im 'ER zuSRnorm' zu einem Messpunkt mit extrem niedrigen Schalldruckpegel im 'ER zuSR00' wird, obwohl im Schallfeld praktisch keine Unterschiede erkennbar sind. Die höchsten Schalldruckpegel sind bei Mikro eins und drei festzustellen. Es ergibt sich ein äquivalenter Schalldruckpegel  $L_{eq} = 48,2$  dB. Trotz optisch kaum zu unterscheidenden Schallfeldern im Empfangsraum werden in der Auswertung der Messpunkte der Messmethode 'Norm' große Unterschiede ersichtlich. Die Schwankungsbreite wie auch die Standardabweichung der fünf Messpunkte verdoppeln sich im Vergleich zu 'ER zuSRnorm'.

**Tab. 4.2:** Schalldruckpegel in dB der Messpunkte der Messmethoden 'Norm' für die Senderraum-Varianten und die zugehörigen Empfangsräume 'SRnorm' | 'SR00' | 'SR02' | 'SR22' im 63 Hz Terzband

63 Hz Terzband – Schalldruckpegel der Messmethode 'Norm'									
Senderraum					Empfangsraum				
Mikro	SRnorm	SR00	SR02	SR22	Mikro	zuSRnorm	zuSR00	zuSR02	zuSR22
6	81,2	82,4	83,1	73,8	1	48,2	49,7	49,2	40,3
7	87,1	89,3	87,9	83,5	2	50,2	45,9	50,3	43,2
8	83,8	80,9	87,7	85,6	3	49,3	50,3	49,4	43,8
9	82,1	81,1	83,5	79,8	4	47,9	44,9	47,9	45,1
10	85,6	87,2	87,8	86,3	5	47,7	47,8	48,3	39,7
$L_{eq}$	84,5	85,6	86,5	83,6	$L_{eq}$	48,8	48,2	49,1	42,9



**Abb. 4.10:** Schnittebenen der Schallfelder im Sende- (links) sowie Empfangsraum (rechts) an den Mikrofonpositionen der Messmethode 'Norm' im 63 Hz Terzband und den Senderraumkonstellationen 'SRnorm' | 'SR00'. Abmessungen in cm

#### 4.2.4.2 Analyse der Messpunkte im Schallfeld des Sende- und Empfangsraums für 'SR02' und 'SR22'

Fügen wir nun die Diffusoren der zweiten Stufe in den leeren Senderaum ein, sind die Auswirkungen abermals nur gering. Die Schallpegeldifferenz in Abbildung 4.9 der Variante 'SR02' ist ident mit jener des leeren Senderaums. Allerdings sind doch Auswirkungen auf die Schallfelder von 'SR02' und 'ER zuSR02' in der ersten Zeile der Abbildung 4.11 erkennbar. Der Mittenbereich im 'SR02' hebt sich im Vergleich zum leeren Senderaum nochmals etwas ab. Die Raummode in Y-Richtung ist in der Schnittebene des Messpunktes zehn deutlich erkennbar. Die Tiefs der Axialmode in X-Richtung nahe dem Prüfbauteil sowie der Rückwand des Prüfraums sind wieder deutlicher ausgeprägt als im leeren Senderaum, wobei diese hier eher als Säulen erkennbar sind. Dies ist durch den erhöhten Schalldruckpegel im Mittenbereich in Y-Richtung bedingt. Diese Beobachtung wird auch durch die gemessenen Werte an den Messpunkten widerspiegelt, so liegen die Messpunkte acht, zehn und sieben auf praktisch einem Niveau, wie in Tabelle 4.2 ersichtlich. Die Auswertung der Messpunkte sechs und neun bringt wiederum nahezu identische Werte, wobei aus dem Schallfeld 'SR02' der Messpunkt sechs mit etwas geringerem Schalldruckpegel erkennbar ist. Im Vergleich zum leeren Senderaum 'SR00' stellt sich interessanterweise bei diesen fünf Messpunkten im 'SR02' ein um knapp 1 dB höherer äquivalenter Schalldruckpegel von  $L_{eq} = 86,5$  dB ein.

Analysiert man den zugehörigen Empfangsraum 'ER zuSR02' in der ersten Zeile der Abbildung 4.11, zeigt sich das Schallfeld sehr ähnlich zu jenem des 'ER zuSR00'. Es können höchstens marginale Änderungen im Bereich der Hochs in den Drittelpunkten der X-Achse erkannt werden; diese sind geringfügig abgeschwächt im Vergleich zum 'ER zuSR00'. Die Mikros vier und fünf liefern analog zum 'ER zuSRnorm' und konträr zum 'ER zuSR00' die geringsten Werte. Analog liefert auch Mikro Nummer zwei wieder den höchsten Schalldruckpegel und die Mikrofonpositionen eins und drei liefern nahezu idente Werte. Der äquivalente Schalldruckpegel ergibt sich zu  $L_{eq} = 49,1$  dB und ist somit, wie auch im Senderaum, um knapp 1 dB höher als im 'ER zuSR00'.

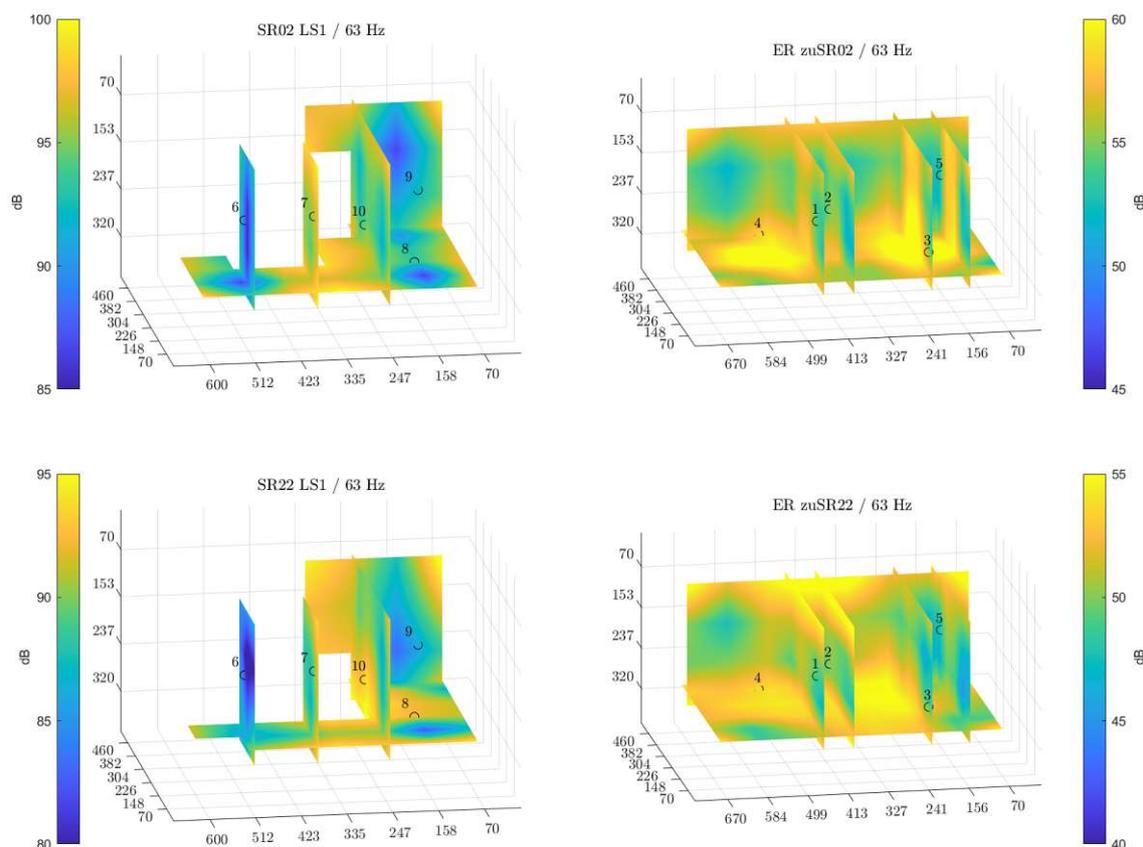
Im Senderaum 'SR22' in der zweiten Zeile der Abbildung 4.11 sind deutliche Veränderungen zu den bisher analysierten Schallfeldern erkennbar. Abgesehen davon wurde die Darstellungsskala abweichend zu den bisherigen um 5 dB nach unten gesenkt. Es wird nun der Bereich von 80 bis 95 dB farblich dargestellt; die Spreizung von 15 dB bleibt also bestehen. Die allgemeinen Merkmale des Schallfeldes im Senderaum 'SR22' wurden bereits im vorhergehenden Kapitel 4.2.3 beleuchtet. Das Hoch im Mittenbereich der Y-Achse sowie die Tiefs in den Drittelpunkten sind auch in dieser Darstellung deutlich erkennbar, genauso wie der geringe Schalldruck im Bereich der Prüfraumrückwand und der hohe Pegel in der Mitte des Raumes. Legt man den Fokus auf die gewählten Mikrofonpositionen der Messmethode 'Norm', so sticht der Messpunkt sechs eindeutig als niedrigster Wert aus den restlichen hervor, wie auch in Tabelle 4.2 ersichtlich. Die Messpunkte acht und zehn liefern die höchsten Werte, wie auch das Schallfeld vermuten lässt. Im Vergleich der Raumvarianten ist der Schalldruckpegel in 'SR22' mit einem energetischen Mittelwert von  $L_{eq} = 83,6$  dB also deutlich geringer als in 'SR02'; im Vergleich zu 'SRnorm' liegt 'SR22' allerdings nur knapp unterhalb.

Das Schallfeld des Empfangsraums 'ER zuSR22' ist im Vergleich zu den bisher betrachteten ebenfalls deutlich differenziert ausgebildet. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass die Skala des Schalldruckpegels um 5 dB abgesenkt wurde, die Spreizung verblieb analog bei 15 dB. Die deutlichen Hochs in der Mitte der Y-Achse in X-Richtung sind entscheidend weniger ausgeprägt, dafür ist eine Mode in Z-Richtung ersichtlich. In der Raummitte in X-Richtung sind im oberen und unteren Bereich erhöhte Pegel erkennbar, in der Raummitte geringere. Bei der Prüfstandrückwand ( $X=0$  cm) deutet sich allerdings wieder die in den bisherigen Schallfeldern beobachtete Mode in Y-Richtung mit einem Hoch in der Raummitte und Tiefs an den Rändern der Y-Achse an.

Im Mittenbereich des Empfangsraums ist auch eine Raummode in Z-Richtung erkennbar – so ist in der obersten und untersten XY-Ebene ein deutlich höherer Schalldruckpegel ersichtlich. So wie sich das Schallfeld ändert, verändern sich auch die Schalldruckpegel der Messpunkte in Tabelle 4.2. Das Mikro vier, zuvor zu den niedrigsten Werten zählend, liefert nun das Maximum. Der Messpunkt fünf bringt abermals den geringsten Wert zu Tage, was auch mit der Beobachtung der Y-Mode im Schallfeld im Bereich dieses Messpunkts zusammen passt. Es ist erkennbar, dass es im Mittenbereich des Raums zu einer Überlagerung einer Mode in Y- wie auch in Z-Richtung kommt, denn der Messpunkt zwei liefert einen deutlich höheren Wert als Messpunkt eins. Der 'ER zuSR22' liegt mit einem äquivalenten Schalldruckpegel  $L_{eq} = 42,9$  dB nochmals markant unter den Werten der bisher betrachteten Räume. Dadurch ergibt sich auch die um bis zu 5,0 dB höhere Schallpegeldifferenz der Variante 'SR22' im Vergleich zu den anderen extremen Raumkonfigurationen.

### Zusammenfassung – Einfluss der Mikrofonpositionen

Das kleine Gedankenexperiment auf Basis des Best- und Worstcase-Szenarios der Schallpegeldifferenz durch die Wahl der extremen Messpunkte aus dem normativ zulässigen Bereich ('Raster 1m BT') hat bereits eingangs den enormen Einfluss der Mikrofonpositionen auf die äquivalenten Schalldruckpegel in den Prüfräumen aufgezeigt. Dies kam auch bei Betrachtung der gewählten Messpunkte im Schallfeld der Prüfräume zu Tage. Beispielsweise lässt sich der im Verhältnis geringere äquivalente Schalldruckpegel im Empfangsraum der Variante 'SR22' eindeutig durch die Beeinflussung der ausgebildeten Moden im Sende- und in weiterer Folge natürlich auch im Empfangsraum erklären. Die Wahl der Messpositionen hat in modalen Schallfeldern eine entscheidende Auswirkung auf die Messergebnisse. Eine weitere Erkenntnis ist der steigende Schalldruckpegel im Empfangsraum vom leeren Raum 'SR00' hin zum Raum mit den Diffusoren der 'Stufe 2' im 'SR02'. Hier wird der energetische Mittelwert der Messpositionen um knapp 1 dB erhöht, obwohl die Diffusoren in diesem teiffrequenten Bereich auch als Plattenresonatoren fungieren, wie in Kapitel 4.2.3 erläutert. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Diffusoren auch zum Teil zu Reflexionen führen und somit die Schalldruckpegel an den gewählten Messpositionen erhöhen. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass unabhängig von der Raumkonfiguration das stark modale Schallfeld im 63 Hz Terzband bestehen bleibt. Repräsentative Größen aus fünf Messpunkten zu generieren erscheint daher nur sehr schwer möglich bzw. vom Zufall abhängig.



**Abb. 4.11:** Schnittebenen der Schallfelder im Sende- (links) sowie Empfangsraum (rechts) an den Mikrofonpositionen der Messmethode 'Norm' im 63 Hz Terzband und den Senderaumkonstellationen 'SR02' | 'SR22'. Die Skala des Schalldruckpegels in der Variante 'SR22' wurde um 5 dB abgesenkt. Abmessungen in cm

### 4.3 Vergleich der Ergebnisse der angewandten Messmethoden je Raumsetup

Im nachstehenden Kapitel werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Messmethoden der Schallpegeldifferenz je Raumkonstellation beleuchtet. Auch in diesem Kapitel werden lediglich die Lautsprecherposition LS1 und die Extrema der Raumkonfigurationen 'SRnorm' | 'SR00' | 'SR02' | 'SR22' betrachtet. Es werden die Messmethoden 'Norm' | 'Raster' | 'Anhang A' verglichen, die Unterschiede dieser können dem Kapitel 3.3 entnommen werden. Untersuchungen und Vergleiche verschiedener Messmethoden wurden unter anderem bereits von Kollegin Pirch [36, 37] angestellt und sollen daher hier nur kurz für die im Zuge dieser Arbeit generierten Daten im XL-Prüfstand des ACA gezeigt werden. Zu erwähnen ist, dass die hier gezeigten Ergebnisse lediglich auf je einer Messung basieren. Für einen sauberen Vergleich der Messmethoden sind zumindest zehn derartiger Messungen je Methode durchzuführen.

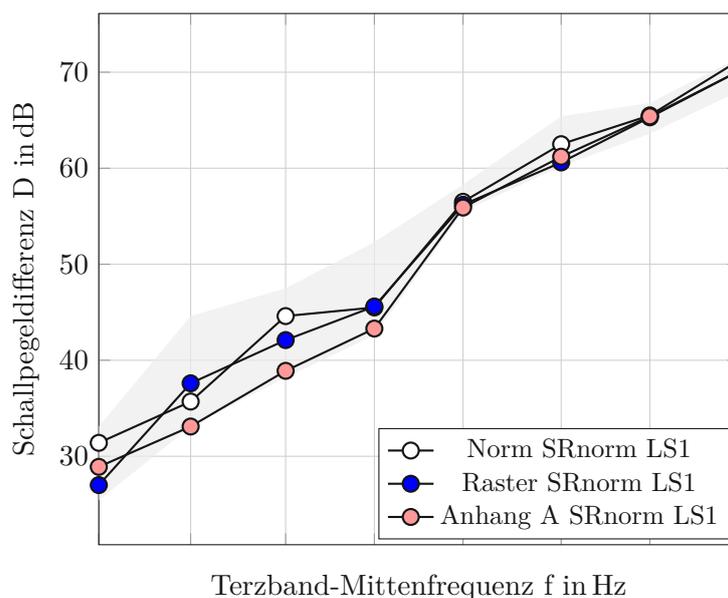
Auf Basis der ausgewerteten Daten zeigte sich, dass vor allem die Unterscheidung der Messmethode 'Raster' und der Subvariante 'Raster 1m BT' nicht zielführend ist. Bei dieser Variante wurde, wie in Kapitel 3.3 erläutert, die dem Prüfbauteil nächstgelegene Messebene 0,7 m vom Bauteil gegen jene der normativen Vorgabe entsprechende Messebene 1,0 m vom Bauteil ausge-

tauscht. Die Schwankungen der Schallpegeldifferenz liegen im Bereich von  $< 0,3$  dB und sind somit vernachlässigbar. Dies begründet sich durch die Tatsache, dass für die Ermittlung des äquivalenten Schalldruckpegels in den Prüfräumen lediglich  $1/6$  der Messpunkte im Senderraum bzw.  $1/7$  der Messpunkte im Empfangsraum um 30 cm verschoben wird und diese somit praktisch keinen Einfluss auf den äquivalenten Schalldruckpegel und in weiterer Folge die Schallpegeldifferenz nimmt. In den Grafiken wird daher nur die Messmethode 'Raster' angeführt und 'Raster 1m BT' nicht dargestellt.

Die Variation der Messmethode 'Anhang A' ist aufgrund der Empfehlung gemäß Anhang A der ISO 10140-4 [8], den Mittelbereich auszusparen, entstanden. Laut einschlägiger Norm ist auf Basis der zu erwartenden sehr niedrigen Schalldruckpegel im Bereich der Raummitte dieser auszunehmen. Bei Messungen im tieffrequenten Bereich wurde der Unterschied zwischen Aussparung der Mitte 'Anhang A' und Auswertung der Daten inkl. Mittelbereich betrachtet – die Variante 'Anhang A inkl. Mitte'. Wie im vorhergehenden Kapitel 4.2 gezeigt, trifft die Annahme der Norm nicht pauschal zu. Wir konnten im Mittenbereich des Sende- wie auch Empfangsraums keine dauerhaften niedrigen Schalldruckpegel in den tiefen Frequenzbändern feststellen. Trotzdem liefert die Variation 'Anhang A' (ohne Mittenbereich) die geringeren Schallpegeldifferenzen und liegt somit auf der sicheren Seite. Daher wird nachstehend lediglich diese Messmethode angeführt. Ein Vergleich der Auswirkungen auf die Schallpegeldifferenz durch die Variation der Messmethode 'Anhang A' – mit oder ohne Mittenbereich – ist im Anhang D angeführt.

In der nachstehenden Abbildung 4.12 ist die Schallpegeldifferenz in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Messmethoden für das Raumsetup 'SRnorm' dargestellt. Grundlegend kann man feststellen, dass für die Raumkonfiguration 'SRnorm' die Messmethode erst ab dem 100 Hz Terzband abwärts merklichen Einfluss auf die Schallpegeldifferenz hat. Wie auch schon in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt, ergeben sich auch im Terzband von 160 Hz erkennbare Abweichungen; hier liegt diese bei knapp 2 dB zwischen der Messmethode 'Norm' und 'Raster'. Wie in der Wertetabelle der Abbildung 4.12 ersichtlich, liefert im 100 Hz Terzband die Messmethode 'Anhang A' den geringsten und die 'Raster'-Messung den höchsten Wert. Die Schwankungsbreite von 2,3 dB erscheint nicht gravierend. Anders sieht es jedoch bereits im 80 Hz Terzband aus, hier liegt die Spreizung bereits bei 5,7 dB wobei die Messmethode 'Anhang A' den geringsten Wert und 'Norm' die höchste Schallpegeldifferenz liefert. Auch im 63 Hz Terzband bringt 'Anhang A' die geringste Schallpegeldifferenz zu Tage. Betrachtet man die Schallpegeldifferenz des 50 Hz Terzbandes, so dreht sich die Situation; die Messmethode 'Raster' liefert die geringste Pegeldifferenz und 'Norm' die Höchste.

Bei Messung der Schallpegeldifferenz im leeren Senderraum 'SR00' zeigt sich ein differenziertes Bild im Vergleich zum Setup 'SRnorm'. In Abbildung 4.13 ist abermals die Schallpegeldifferenz der verschiedenen Messmethoden dargestellt, diesmal für den leeren Senderraum 'SR00'. Grundlegend sind konträr zu 'SRnorm' auch Schwankungen im Bereich über 100 Hz erkennbar. Beispielsweise liegt die Schwankung im 160 Hz Terzband bereits bei 3,7 dB wobei die Messmethode 'Norm' den höchsten und 'Raster' den niedrigsten Wert ergibt. Analog zu 'SRnorm' zeigen sich die größten Abweichungen ab dem 100 Hz Terzband abwärts; hier ist erkennbar, dass die Messmethoden 'Norm' und 'Raster' ausgenommen vom 50 Hz Terzband sehr ähnliche Werte liefern. Wie auch schon im normativen Setup 'SRnorm' liegt ebenso die Messmethode 'Anhang A' am unteren und somit sicheren Ende des Schwankungsbereichs. Die Schwankungsbreite der Terzbänder unter 100 Hz liegt bei rund 5 dB, wie aus der Wertetabelle in Abbildung 4.13 ersichtlich.

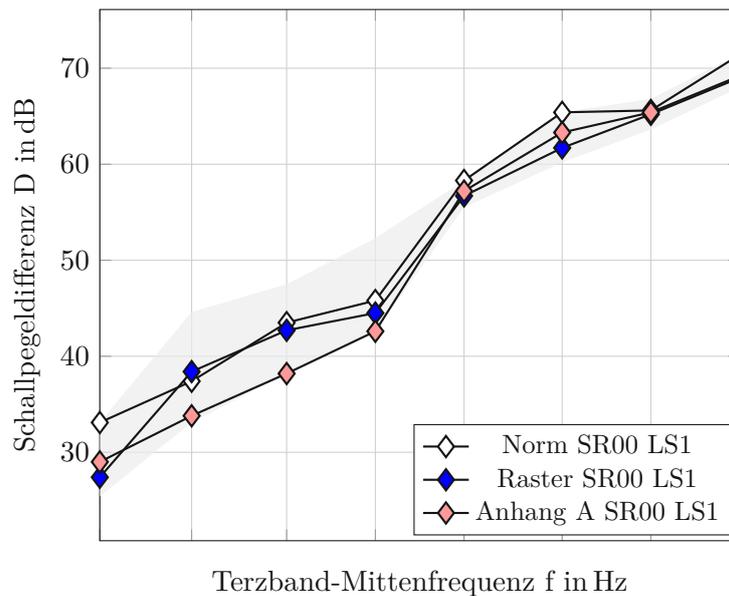


	50	63	80	100	125	160	200	250
○ Norm SRnorm LS1	31.4	35.7	44.6	45.5	56.5	62.5	65.5	71.2
● Raster SRnorm LS1	27.0	37.6	42.1	45.6	56.2	60.6	65.3	70.1
● Anhang A SRnorm LS1	28.9	33.1	38.9	43.3	55.9	61.2	65.4	70.1

**Abb. 4.12:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Messmethoden 'Norm' | 'Raster' | 'Anhang A' mit Raumkonstellation 'SRnorm' im Senderaum ermittelt mit Lautsprecherposition LS1, inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs aller gemessenen Konfigurationen grau im Hintergrund sowie einer Wertetabelle

Ein ähnliches Bild wie der leere Senderaum zeigt sich auch bei der Raumkonfiguration 'SR02' in Abbildung 4.14. Im Vergleich zu den bisher gezeigten Raumkonstellationen 'SRnorm' und 'SR00' konnten augenscheinlich die Unterschiede der Schallpegeldifferenz aufgrund der Messmethode durch die Diffusoren der Variante 'SR02' im 160 Hz Terzband minimiert werden. Allerdings verschieben sich die Schwankungen nun ins 200 Hz Terzband. Hier waren die Werte im leeren Senderaum 'SR00' noch nahezu ident, nun liegt die Schwankungsbreite bei knapp 2 dB. Die Beobachtung für die Terzbänder von 100 Hz abwärts aus den bisher analysierten Raumkonstellationen 'SRnorm' und 'SR00' sind auch nun in wiederum abgeschwächter Form erkennbar. Es zeigt sich ein nahezu linearer Verlauf der Schallpegeldifferenzen aus den Messmethoden 'Anhang A' und 'Norm', und ein deutliches Einknicken der 'Raster'-Werte im 50 Hz Terzband. Die Schwankungsbreiten reduzieren sich durchwegs; nur im 50 Hz Terzband zeigt sich abermals der besagte Ausreißer der Messmethode 'Raster', und die Schwankungsbreite liegt, ähnlich wie im leeren Senderaum 'SR00', bei und 5 dB.

In der Raumkonfiguration 'SR22', also bei sehr geringen Nachhallzeiten, zeigt sich ein differenziertes Bild im Vergleich zu den bisherigen Schallpegeldifferenzen der Setups, wie in Abbildung 4.15 dargestellt. Im Frequenzbereich über 100 Hz ist der Verlauf analog zu den Verläufen der anderen Senderaumkonfigurationen. Es fällt allerdings auf, dass die Schwankungsbreite hier wesentlich geringer ausfällt – diese beläuft sich auf deutlich unter 2 dB. Im tieffrequenten Bereich, den Terzbändern unter 100 Hz, zeigt sich ein wesentlich anderer Verlauf als bei den Schallpegeldiffe-



	50	63	80	100	125	160	200	250
◇	33.1	37.4	43.5	45.8	58.3	65.4	65.6	71.4
◆	27.4	38.4	42.7	44.5	56.7	61.7	65.2	69.0
◇	29.0	33.8	38.2	42.6	57.2	63.3	65.4	69.2

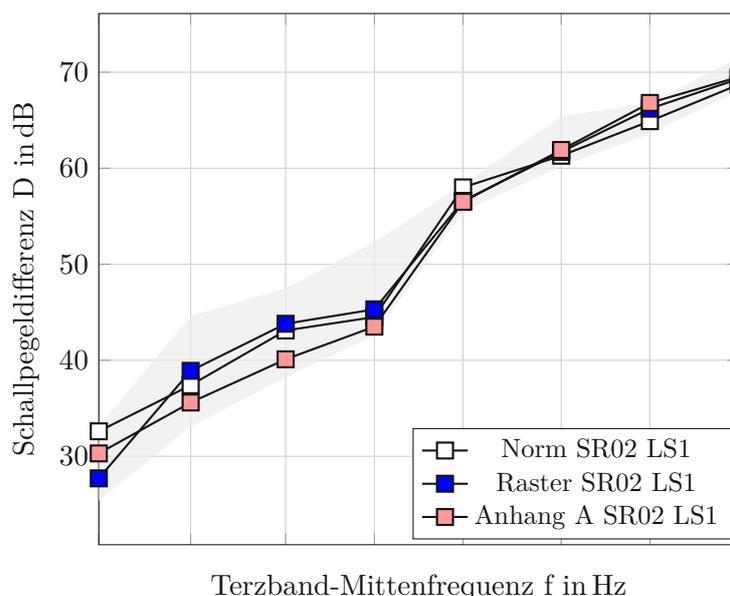
**Abb. 4.13:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Messmethoden 'Norm' | 'Raster' | 'Anhang A' mit Raumkonstellation 'SR00' im Senderraum ermittelt mit Lautsprecherposition LS1, inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs aller gemessenen Konfigurationen grau im Hintergrund sowie einer Wertetabelle

renzen aller bisher analysierten Messmethoden. Zum einen verlaufen diese vom Höchstwert der Schwankungsbreite aller gemessenen Varianten im 80 Hz Terzband hin zum geringsten Wert im 50 Hz Terzband. Im Vergleich hierzu brachten die bisherigen Raumsetups einen nahezu linearen Verlauf in diesem Frequenzbereich. Ein weiterer Punkt, welcher bei Betrachtung von Abbildung 4.15 sofort ins Auge sticht, ist der nahezu parallele Verlauf der Schallpegeldifferenzen der unterschiedlichen Messmethoden. Selbst im Frequenzbereich unter 100 Hz liegt die Schwankungsbreite in den Terzbändern für den Raum 'SR22' bei maximal 3,5 dB. Eine eindeutige Tendenz, welche Messmethode beispielsweise die geringsten Werte liefert, kann nicht festgestellt werden. Es ist allerdings erkennbar, dass durch die starke Bedämpfung des Senderraumes höhere Schallpegeldifferenzen in den tiefen Frequenzen gemessen werden. Dies haben wir auch bereits in Kapitel 4.2.1 beobachtet und analysiert.

### Zusammenfassung – Vergleich der Messmethoden

Auf Basis der Beobachtungen der Raumvariante 'SRnorm' kann man also summieren, dass die Messmethode 'Anhang A' im tieffrequenten Bereich Ergebnisse auf der sicheren Seite generiert. Ausgenommen ist in diesen konkreten Untersuchungen allerdings das 50 Hz Terzband, wo sowohl die Messmethode 'Norm' als auch 'Anhang A' eine höhere Schallpegeldifferenz ergeben als die genaueste Messmethode 'Raster'. An dieser Stelle sei nochmals aufgeworfen, dass die Schrittweite der Rastermessung etwa 80 cm beträgt – somit liegt  $\lambda/8$  von 50 Hz im Bereich der Schrittweite<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> $\lambda = c_0/f = 340 \text{ m/s}/50 \text{ Hz} = 6,8 \text{ m}$ ; daher ist  $\lambda/8 \approx 85 \text{ cm}$



	50	63	80	100	125	160	200	250
□	32.6	37.4	43.1	44.5	58.0	61.3	64.9	68.7
■	27.7	38.9	43.8	45.3	56.6	61.7	66.2	69.3
■	30.3	35.6	40.1	43.5	56.5	61.9	66.8	69.5

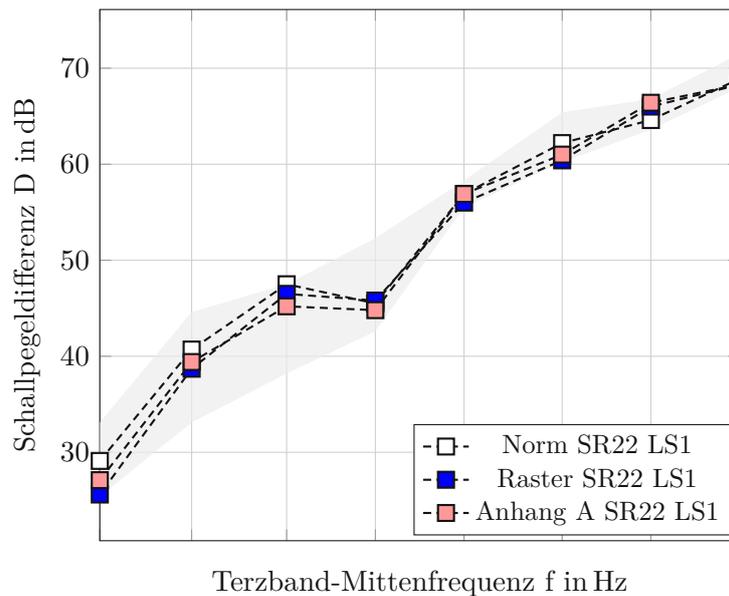
**Abb. 4.14:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Messmethoden 'Norm' | 'Raster' | 'Anhang A' mit Raumkonstellation 'SR02' im Senderaum, ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs aller gemessenen Konfigurationen grau im Hintergrund sowie einer Wertetabelle

Da die Messmethode 'Raster' im 100 Hz Terzband, und somit bei einem geraden Teiler der Wellenlänge von 50 Hz, allerdings keine Ausreißer liefert, erscheint es als Zufall.

Als Resümee zum leeren Senderaum 'SR00' lässt sich sagen, dass der beobachtete Verlauf der Schallpegeldifferenzen aus dem Raumsetup 'SRnorm' durch den leeren Senderaum 'SR00' reproduziert wird, sich aber in den Grundzügen deutlich verstärkt. Die Schwankungsbreite erhöht sich in praktisch allen betrachteten Terzbändern. Die Messmethode 'Anhang A' liefert in Summe abermals die niedrigsten Werte. Der Ausreißer der Schallpegeldifferenz der 'Raster'-Messung im 50 Hz ist auch im leeren Senderaum beobachtbar.

Durch das Hinzufügen der Diffusoren im Senderaum, was somit die Variante 'SR02' wird, kann die Schwankungsbreite der Schallpegeldifferenz reduziert werden. Trotz der in Kapitel 2.3.2 erläuterten theoretischen Wirkung der Diffusoren erst etwa ab einer Frequenz von 200 Hz zeigt sich ein Einfluss selbst in den tiefsten beobachteten Frequenzen über alle Messmethoden hinweg. Auch hier liefert mit Ausnahme des 50 Hz Terzbandes die Messmethode 'Anhang A' die geringsten Schallpegeldifferenzen.

Durch die starke Bedämpfung des Senderaums ('SR22') zeigt sich, dass Anzahl und Position der Messpunkte an Bedeutung verlieren. Hier sei abermals auf die geringe Anzahl an Messpunkten (fünf) der Messmethode 'Norm' verwiesen. Man kann somit nur Schlüsse auf Basis dieser konkreten Messungen ziehen. Der vorherrschende mittlere Bedämpfungsgrad liegt bei 'SR22' bei etwa  $\alpha_{m,50-250} = 0,2$  und ist somit ident mit dem durch Fuchs [20] ermittelten idealen Bedämpfungsgrad für bessere Wiederholbarkeit von Messergebnissen. Die nur bedingt bestätigten Ergebnisse aus Fuchs [20] im Zuge von Kapitel 4.2.2 – Einfluss der Absorber – können mit



	50	63	80	100	125	160	200	250
-□-	31.4	35.7	44.6	45.5	56.5	62.5	65.5	71.2
-■-	27.0	37.6	42.1	45.6	56.2	60.6	65.3	70.1
-■-	28.9	33.1	38.9	43.3	55.9	61.2	65.4	70.1

**Abb. 4.15:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Messmethoden 'Norm' | 'Raster' | 'Anhang A' mit Raumkonstellation 'SR22' im Senderraum, ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs aller gemessenen Konfigurationen grau im Hintergrund sowie einer Wertetabelle

Hilfe des Vergleichs der Ergebnisse der verschiedenen Messmethoden in diesem Kapitel mit Blick auf die Anzahl der Messpunkte nun doch bestätigt werden. Die Moden werden soweit bedämpft, dass durch die gewählten fünf Mikrofonpositionen ähnliche Ergebnisse wie in den anderen Messmethoden, und somit aus wesentlich mehr Messpunkten, generiert werden können.

# Kapitel 5

## Conclusio

Durch die angestellten Messungen konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Raumakustik im Senderraum auf die Schallpegeldifferenz bzw. in weiterer Folge auch auf das Schalldämm-Maß gegeben ist. Dies brachte die Analyse von insgesamt acht unterschiedlichen akustischen Raumausstattungen im Senderraum zu Tage. Es wurden neben dem normativen Setup im Senderraum auch der leere Senderraum ( $T > 4\text{ s}$ ), ein sehr stark bedämpfter Prüfraum ( $T < 0,5\text{ s}$ ) sowie Zwischenstufen zur Messung herangezogen. Als akustische Elemente wurden Diffusoren in zwei verschiedenen Größen sowie Absorber in Form von Mineralwollepaketen ebenfalls in unterschiedlichen Größen verwendet.

Die Untersuchungen fanden in einem Prüfstand mit überdurchschnittlich großen Prüfvolumina ( $150\text{ m}^3$ ) im Akustik Center Austria (ACA) statt. Gemessen wurde die Schallpegeldifferenz einer hochschalldämmenden zweischaligen Trennwand bestehend aus zwei symmetrischen Holzriegelkonstruktionen. Das bewertete Schalldämm-Maß der Prüfwand beträgt  $79,2\text{ dB}$ . Es wurde hauptsächlich der Schwachpunkt derartiger Konstruktionen – der tieffrequente Bereich – beleuchtet.

Der Fokus lag in weiterer Folge auf möglichen Auswirkungen auf die Schallpegeldifferenz der normativen Messmethoden nach ISO 10140. Abweichend von den normativen Vorgaben wurde nur eine Lautsprecherposition detailliert betrachtet – normativ sind die Messungen mit zumindest zwei Lautsprecherpositionen durchzuführen. Grund hierfür ist der enorme Zeitaufwand zur Durchführung der Messungen und eine begrenzte zur Verfügung stehende Messzeit. Um die Auswirkungen der Mikrofonpositionen auf die Schallpegeldifferenz zu analysieren, kamen neben der Messmethode 'Norm' mit fünf Messpunkten auch die Messmethode 'Anhang A' nach Anhang A der ISO 10140-2 [8] zum Einsatz. Um auch die sich einstellenden Schallfelder der unterschiedlichen Senderraumkonfigurationen begutachten zu können, kam eine dritte Messmethode – 'Raster' – zur Anwendung. Hierbei wurde ein regelmäßiger Raster im Sende- wie auch Empfangsraum mit Hilfe eines Roboters abgetastet und die Schalldruckpegel gemessen. So ergaben sich fünf Messpunkte in der Messmethode 'Norm', etwa 30 Messpunkte bei 'Anhang A' und in etwa 150 Messpunkten bei der 'Raster'-Messung. Die Lautsprecherposition sowie der Empfangsraum verblieben während der gesamten Messungen gleich. Eine Erkenntnis aus dem Vergleich der angeführten Messmethoden ist, dass die normativ empfohlene Messmethode 'Anhang A' für den Frequenzbereich unter  $100\text{ Hz}$  in ebendiesem Bereich zu den geringsten Schallpegeldifferenzen führt und somit auf der sicheren Seite liegt, bzw. die Dämmwirkung des Prüfbauteils unterschätzt. Auch konnte beobachtet werden, dass eine größere Anzahl von Messpunkten in den Prüfräumen vor allem bei üblichen und normativ empfohlenen Nachhallzeiten massiv zur erhöhten Qualität der Messung beitragen.

Berücksichtigt man die normativ empfohlene Nachhallzeit in den Prüfräumen von 1 bis 2 s, so sind die Abweichungen der Schallpegeldifferenz sehr gering und nicht eindeutig auf die veränderte Raumakustik im Senderraum zurückzuführen. In diesem Zusammenhang konnte auch die normative Vorgabe der ISO 10140-5 [9] zur Erweiterung der Spanne der Nachhallzeit bestätigt werden. Konkret ist auf Basis der einschlägigen Norm die Nachhallzeit zu erhöhen, wenn eine

Abhängigkeit der Schallpegeldifferenz von der Raumakustik im Senderaum festzustellen ist. Dies betrifft allerdings lediglich Prüfräume mit einem Volumen von mehr als  $50\text{ m}^3$ . Im Fall des XL-Prüfstands im ACA konnte daher die Nachhallzeit auf bis zu  $3,9\text{ s}$  adaptiert werden. Hierbei konnten wir feststellen, dass der Einfluss auf die Schallpegeldifferenz im Vergleich zu jenen Varianten mit starker Bedämpfung ('SR22') geringer ist.

Die theoretische Wirkungsweise von Diffusoren, erst ab höheren Frequenzen, konnte nicht eindeutig bestätigt werden. Üblicherweise ist die Wirkung von Diffusoren erst ab einer Größe, in der die Abmessungen der Diffusoren im Bereich der Wellenlänge liegen, zu erwarten. Zwar war der Einfluss der eingebrachten Diffusoren im Vergleich zu jenem der verwendeten Absorber ein geringerer, es konnten jedoch Auswirkungen der Diffusoren auf die Schallpegeldifferenz, vor allem bei stark bedämpften Räumen, festgestellt werden. Auf Basis der generierten Daten und Analyse der Schallfelder konnte die Ursache dieser Schwankungen allerdings nicht final geklärt werden.

Weiters konnten im Zuge dieser Arbeit die Ergebnisse von Fuchs [20] in mehreren Schritten bestätigt werden. Fuchs [20] hatte zum Ziel, die Wiederholbarkeit von Messungen des Schalldämmmaßes im tieffrequenten Bereich durch einfache Maßnahmen zu verbessern. Dies konnte er durch eine hinreichende Bedämpfung der Prüfräume bewerkstelligen. Auch im Zuge der Messungen für diese Arbeit konnte durch einen Bedämpfungsgrad  $\alpha_m = 0,2$  (analog zu [20]) ein homogeneres Schallfeld erzielt werden. Dies wiederum erhöht die Wahrscheinlichkeit, aus einer geringen Anzahl von Messpunkten einen repräsentativen äquivalenten Schalldruckpegel zu erhalten. Hierbei sei allerdings angemerkt, dass die starke Bedämpfung des Senderaums zu erhöhten Schallpegeldifferenzen vor allem im tieffrequenten Bereich führt, und somit Werte auf der unsicheren Seite zur Folge hat.

## Ausblick

Der Fokus dieser Untersuchungen lag auf den Auswirkungen der Mikrofonpositionen auf die Schallpegeldifferenz im tieffrequenten Bereich. Es konnte anhand der generierten Daten aber auch ein erheblicher Einfluss der Lautsprecherpositionen auf die Schallpegeldifferenz festgestellt werden. Dies wurde allerdings nur am Rande beleuchtet, daher sollten in weiterer Folge detaillierte Untersuchungen zu den Auswirkungen unterschiedlicher Senderpositionen auf die Schallpegeldifferenz im tieffrequenten Bereich angestellt werden. Unter anderem wäre auch interessant, neben der Anzahl der Lautsprecherpositionen auch den Einfluss der Größe und Geometrie der Prüfräume zu untersuchen. Vor allem sollte hierbei ein Vorschlag für ein mögliches Verfahren zur Bestimmung der optimalen Lautsprecherpositionen im Frequenzbereich unter  $100\text{ Hz}$  das Ziel sein.

# Literatur

- [1] C. Bethke und V. Wittstock. „Zur Unsicherheit der in Prüfständen gemessenen Luftschalldämmung von Ständerwänden“. In: *DAGA 2012 Darmstadt* (2012).
- [2] E. Buckingham. „Theory and Interpretation of Experiments on the transmission of sound through partition walls“. In: *Scientific Papers of the Bureau of Standards* Vol. 20 (1925), S. 193–219.
- [3] L. Cremer. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*. 2., völlig Neubearb. Aufl. Stuttgart: Hirzel, 1976. ISBN: 978-3-7776-0317-9.
- [4] L. Cremer und H. A. Müller. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik: Band I*. 2., völlig neubearbeitete Auflage. Stuttgart: S. Hirzel, 1978.
- [5] A. H. Davis. „VI. Reverberation equations for two adjacent rooms connected by an incompletely soundproof partition“. In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 50.295 (1925), S. 75–80. ISSN: 1941-5982.
- [6] C. Demanet, M. J. de Rozas, J. B. Chene und R. Foret. „European Round Robin Test for sound insulation“. In: *Inter Noise 2011*.
- [7] Europäisches Komitee für Normung. *EN ISO 10140-2: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand: Teil 2: Messung der Luftschalldämmung*. 9.2021.
- [8] Europäisches Komitee für Normung. *EN ISO 10140-4: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand: Teil 4: Messverfahren und Anforderungen*. 9.2021.
- [9] Europäisches Komitee für Normung. *EN ISO 10140-5: Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand: Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen*. 9.2021.
- [10] Europäisches Komitee für Normung. *EN ISO 15186-1: Akustik - Bestimmung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen aus Schallintensitätsmessungen: Teil 1: Messungen im Prüfstand*. 7.2003.
- [11] Europäisches Komitee für Normung. *EN ISO 16283-1: Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau: Teil 1: Luftschalldämmung*. 12.2017.
- [12] Europäisches Komitee für Normung. *EN ISO 18233: Akustik - Anwendung neuer Messverfahren in der Bau- und Raumakustik*. 6.2006.
- [13] Europäisches Komitee für Normung. *EN ISO 266: Akustik - Normfrequenzen*. 5.1997.
- [14] Europäisches Komitee für Normung. *EN ISO 3382-2: Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik: Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen*. 6.2008.
- [15] A. Farina, P. Fausti, R. Pompoli und F. Scamoni. „Intercomparison of laboratory measurements of airborne sound insulation of partitions“. In: *Inter Noise 96* (1996), S. 881–886.
- [16] W. Fasold und E. Veres. *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*. Berlin: Verlag Bauwesen, 2003. ISBN: 3-345-00801-7.

- [17] P. Fausti, R. Pompoli und R. S. Smith. „An Intercomparison of Laboratory Measurements of Airborne Sound Insulation of Lightweight Plasterboard Walls“. In: *Building Acoustics* 6.2 (1999), S. 127–140. ISSN: 1351-010X.
- [18] N. A. Fouad, Hrsg. *Bauphysik Kalender 2014: Raumakustik und Schallschutz*. Bauphysik-Kalender. Berlin: Ernst & Sohn, 2014. ISBN: 9783433030509.
- [19] H. V. Fuchs. *Raum-Akustik und Lärm-Minderung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN: 978-3-662-53162-4.
- [20] H. V. Fuchs und X. Zha. „Akustische Messräume für einen erweiterten Frequenzbereich“. In: *Bauphysik Kalender 2014* (2014), S. 541–577.
- [21] V. Hongisto, J. Keränen, M. Kylliäinen und J. Mahn. „Reproducibility of the Present and the Proposed Single-Number Quantities of Airborne Sound Insulation“. In: *Acta Acustica united with Acustica* 98.5 (2012), S. 811–819. ISSN: 16101928.
- [22] C. Hopkins. *Sound insulation*. 1. ed. Building and construction. Amsterdam und Heidelberg: Elsevier / Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN: 0750665262.
- [23] C. Lechner. *Monografie 1: Ringversuch für bauakustische Messungen 2018*. 2019.
- [24] D. Lubman. „Precision of reverberant sound power measurements“. In: *Journal of the acoustical society of America* 56.2 (1974), S. 523–533.
- [25] D. Lubman. „Spatial averaging in sound power measurements“. In: *Journal of Sound and Vibration* 16.1 (1971), S. 43–58. ISSN: 0022460X.
- [26] A. Melcher. *amroc - The Room Mode Calculator*. URL: <https://amcoustics.com/tools/amroc>.
- [27] A. Moorhouse und R. Ramadorai. „Measurement of the average sound pressure level in a room at low frequency“. In: *13th International Congress on Sound and Vibration 2006, ICSV 2006* 3 (2006), S. 2382–2389.
- [28] P. M. Morse und K. U. Ingard. *Theoretical acoustics*. First Princeton University Press edition, with errata page. Science. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1986. ISBN: 978-0691024011.
- [29] M. Möser. *Bauakustische Messungen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. ISBN: 978-3-662-57750-9.
- [30] M. Möser. *Technische Akustik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN: 978-3-662-47703-8.
- [31] G. Müller und M. Möser, Hrsg. *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Dritte, erweiterte und überarbeitete Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. ISBN: 978-3-642-18893-0.
- [32] S. Müller und P. Massarani. „Transfer-Function Measurement with Sweeps“. In: *Journal of the Audio Engineering Society* (2001), S. 443–471.
- [33] M. Neusser, H. Kondor und T. Bednar. „Sound pressure fields in two coupled rooms - Comparison of a finite element approach and an analytic solution“. In: *Euronoise* (2015).
- [34] B. Nusser und P. Pirch. „Das Akustik Center Austria – von der Planungsphase zur Umsetzung“. In: *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift* 162.1 (2017), S. 187–190.
- [35] P. Pirch und B. Nusser. „Entwicklung einer automatisierten Schallfeldabtastung für bauakustische Untersuchungen im Frequenzbereich unter 400 Hz“. In: *DAGA 2019 Rostock* (2019).

- [36] P. Pirch und B. Nusser. „Ermittlung der Schalldämm-Maße im tiefen Frequenzbereich nach EN ISO 10140 im Vergleich zum Diagonalverfahren“. In: *DAGA 2019 Rostock* (2019).
- [37] P. Pirch und B. Nusser. „Vergleich verschiedener Schallmessmethoden bei Bauteiluntersuchungen im tieffrequenten Bereich“. In: *BauphysikerInnen Treffen 2018* (2018).
- [38] R. Plag. *U-Wert-Rechner*. URL: [www.ubakus.com/at/u-wert-rechner](http://www.ubakus.com/at/u-wert-rechner).
- [39] S. Plagg und M. Pobitzer. „Eigenfrequenzen - Eigenmoden Resonanzfrequenzen - Raummoden“. Bachelorarbeit. Graz: TU Graz, 2011.
- [40] C. Riccabona und T. Bednar. *Baukonstruktionslehre 4: Bauphysik*. 9., überarb. Aufl. 2013. ISBN: 978-3-7068-4499-4.
- [41] S. Schoenwald, A. Zemp und S. Pedersoli. „Applicability of measurement method according to ISO 16283 in small rooms at low frequencies“. In: *Applied Acoustics* (2016). ISSN: 0003682X.
- [42] W. Scholl. „Revision of ISO 717: Future single-number quantities for sound insulation in buildings“. In: *Proceedings - European Conference on Noise Control* (2012), S. 700–704.
- [43] S. Schönwald und K. Eggenschwiler. *Schallschutz - Erweiterung Frequenzbereich auf 50 Hz, Empa: Erarbeitung einheitlicher Messempfehlungen und Messunsicherheiten: Untersuchungsbericht*. Hrsg. von Bundesamt für Umwelt BAFU. 2015.
- [44] C. Scrosati und F. Scamoni. „Sound Insulation Uncertainty of field measurements“. In: *Forum Acusticum 2014*.
- [45] V. Wittstock. „On the Uncertainty of Single-Number Quantities for Rating Airborne Sound Insulation“. In: *Acta Acustica United with Acustica* 93 (2007), S. 375–386.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Appendix

# Anhang A

## Koordinaten der Mikrofonpositionen zu den Messmethoden

**Tab. A.1:** Koordinaten in der Messmethode 'Norm' und Lautsprecherposition LS1 verwendeten Messpositionen. Maße in cm vom jeweiligen Koordinatenursprung gemessen

Senderraum				Empfangsraum			
<i>Mikro<sub>pos</sub></i>	X	Y	Z	<i>Mikro<sub>pos</sub></i>	X	Y	Z
6	500	177	191	1	512	158	190
7	377	119	171	2	438	317	220
8	162	228	2153	3	243	109	253
9	117	429	227	4	591	406	293
10	239	329	254	5	150	382	237

**Tab. A.2:** Koordinaten in der Messmethode 'Anhang A' und Lautsprecherposition LS1 verwendeten Messpositionen. Maße in cm vom jeweiligen Koordinatenursprung gemessen

Senderraum				Empfangsraum			
<i>Mikro<sub>pos</sub></i>	X	Y	Z	<i>Mikro<sub>pos</sub></i>	X	Y	Z
30	158	148	153	30	156	148	153
31	158	148	237	31	156	148	237
34	158	226	153	34	156	226	153
35	158	226	237	35	156	226	237
38	158	304	153	38	156	304	153
39	158	304	237	39	156	304	237
42	158	382	153	42	156	382	153
43	158	382	237	43	156	382	237
54	247	148	153	54	241	148	153
55	247	148	237	55	241	148	237
58	247	226	153	58	241	226	153
59	247	226	237	59	241	226	237
62	247	304	153	62	241	304	153
63	247	304	237	63	241	304	237
66	247	382	153	66	241	382	153
67	247	382	237	67	241	382	237
100	423	148	153	126	499	148	153
101	423	148	237	127	499	148	237
104	423	226	153	148	584	226	153
105	423	226	237	131	584	226	237
117	512	148	153	134	584	304	153
118	512	148	237	135	584	304	237
121	512	226	153	138	584	382	153
122	512	226	237	139	584	382	237
				150	584	148	153
				151	584	148	237
				154	584	226	153
				155	584	226	237
				158	584	304	153
				159	584	304	237
				162	584	382	153
				163	584	382	237

## Anhang B

# Lautsprecherpositionen zur Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition

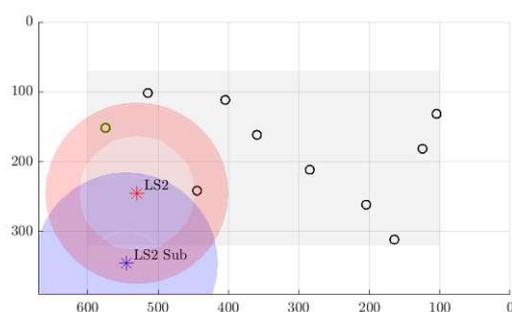
Nachstehend werden die für die Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition verwendeten Senderpositionen im Senderraum in Abbildung B.1 bis B.5 dargestellt, die zugehörigen Koordinaten sind in Tabelle B.1 aufgelistet. Alle Mikrofonpositionen wurden grundlegend beibehalten, sie sind in Tabelle B.2 angeführt. Einige Positionen mussten allerdings aufgrund von nicht eingehaltenen Mindestabständen verschoben werden. Vershobenen Messpositionen sind rot dargestellt, die neuen Mikrofonpositionen sind in grün gezeigt.

**Tab. B.1:** Koordinaten der für die Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition untersuchten Senderpositionen LS1 bis LS6. Maße in cm vom Koordinatenursprung des Senderraums

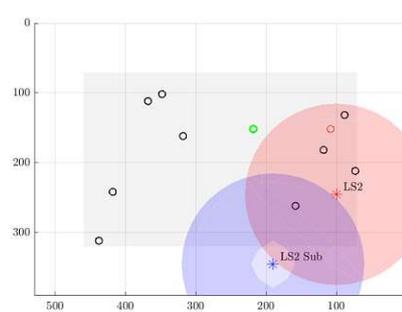
Lautsprecherpositionen			
$LS_{pos}$	X	Y	Z
$LS1$	485	360	215
$LS1_{sub}$	430	365	345
$LS2$	530	100	175
$LS2_{sub}$	545	190	345
$LS3$	405	115	230
$LS3_{sub}$	405	175	345
$LS4$	170	130	255
$LS4_{sub}$	230	130	345
$LS5$	600	460	235
$LS5_{sub}$	600	460	345
$LS6$	555	400	245
$LS6_{sub}$	505	415	345

**Tab. B.2:** Koordinaten der für die Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition verwendeten Messpositionen. Maße in cm vom jeweiligen Koordinatenursprung gemessen

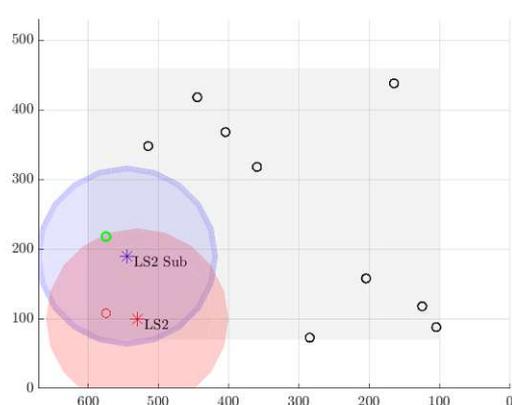
Senderraum				Empfangsraum			
<i>Mikro</i> <sub>pos</sub>	X	Y	Z	<i>Mikro</i> <sub>pos</sub>	X	Y	Z
1	105	88	132	1	79	143	88
2	125	118	182	2	114	313	318
3	165	438	312	3	134	453	138
4	205	158	262	4	224	343	268
5	285	73	212	5	274	76	168
6	360	318	162	6	344	193	218
7	405	368	112	7	424	273	108
8	445	418	242	8	504	98	248
9	515	348	102	9	584	373	158
10	575	108	152	10	634	293	188



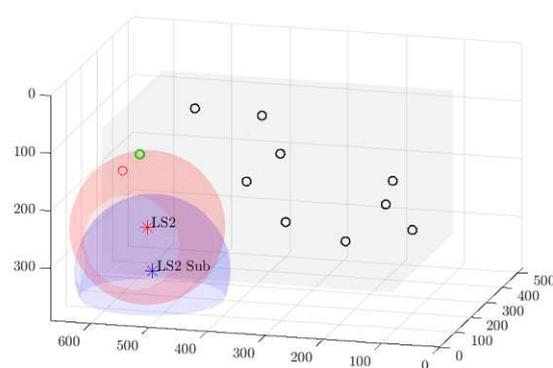
(a) Aufriß



(b) Kreuzriß

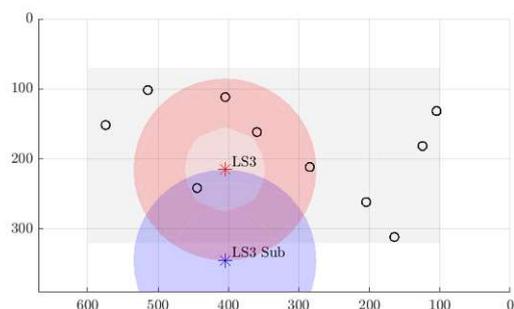


(c) Grundriß

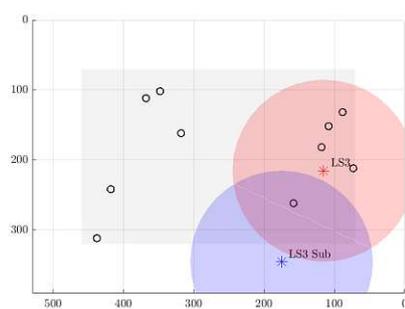


(d) Axonometrie

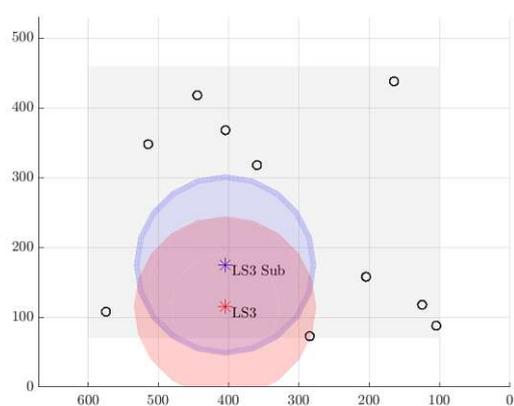
**Abb. B.1:** Lautsprecherposition 'LS2' im Senderraum für die Bestimmung der optimalen Lautsprecherpositionen – in dunkelblau der Subwoofer, in rot der Dodekader inkl. Einflussbereich des direkten Schallfelds von 1,3m nach [14] sowie die verwendeten Mikrofonpositionen und deren normativ zulässiger Bereich in grau



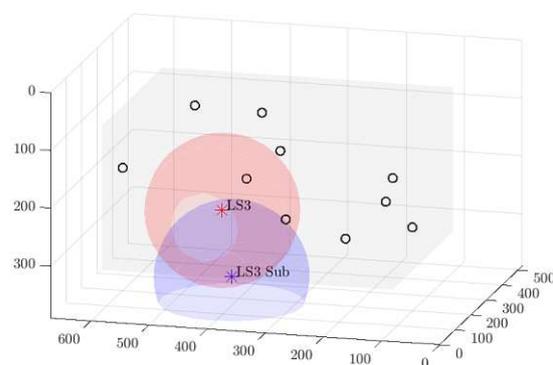
(a) Aufriß



(b) Kreuzriß

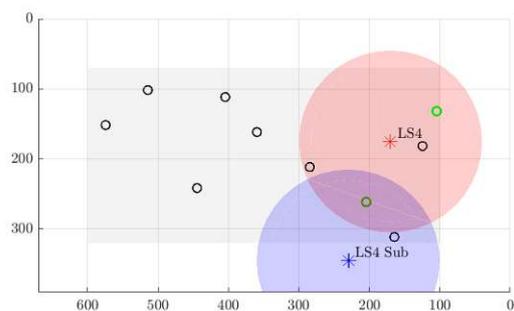


(c) Grundriß

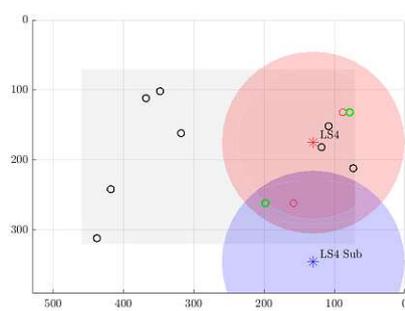


(d) Axonometrie

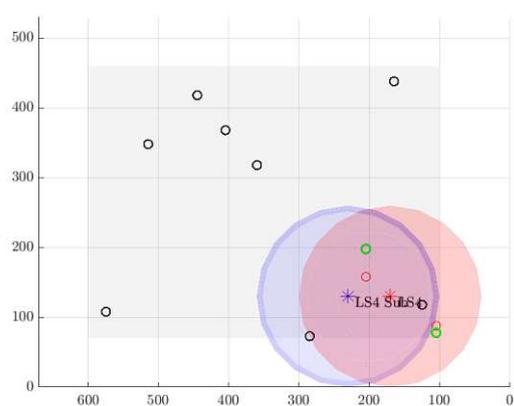
**Abb. B.2:** Lautsprecherposition 'LS3' im Senderraum für die Bestimmung der optimalen Lautsprecherpositionen – in dunkelblau der Subwoofer, in rot der Dodekader inkl. Einflussbereich des direkten Schallfelds von 1,3m nach [14] sowie die verwendeten Mikrofonpositionen und deren normativ zulässiger Bereich in grau



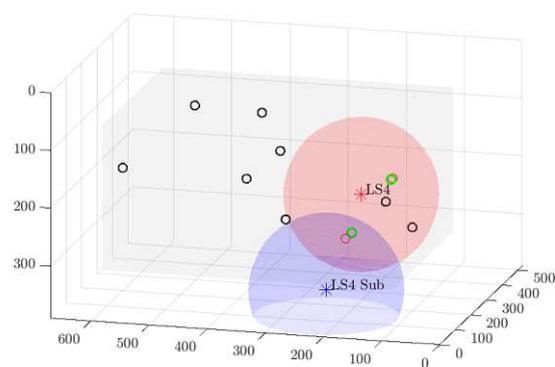
(a) Aufriß



(b) Kreuzriss

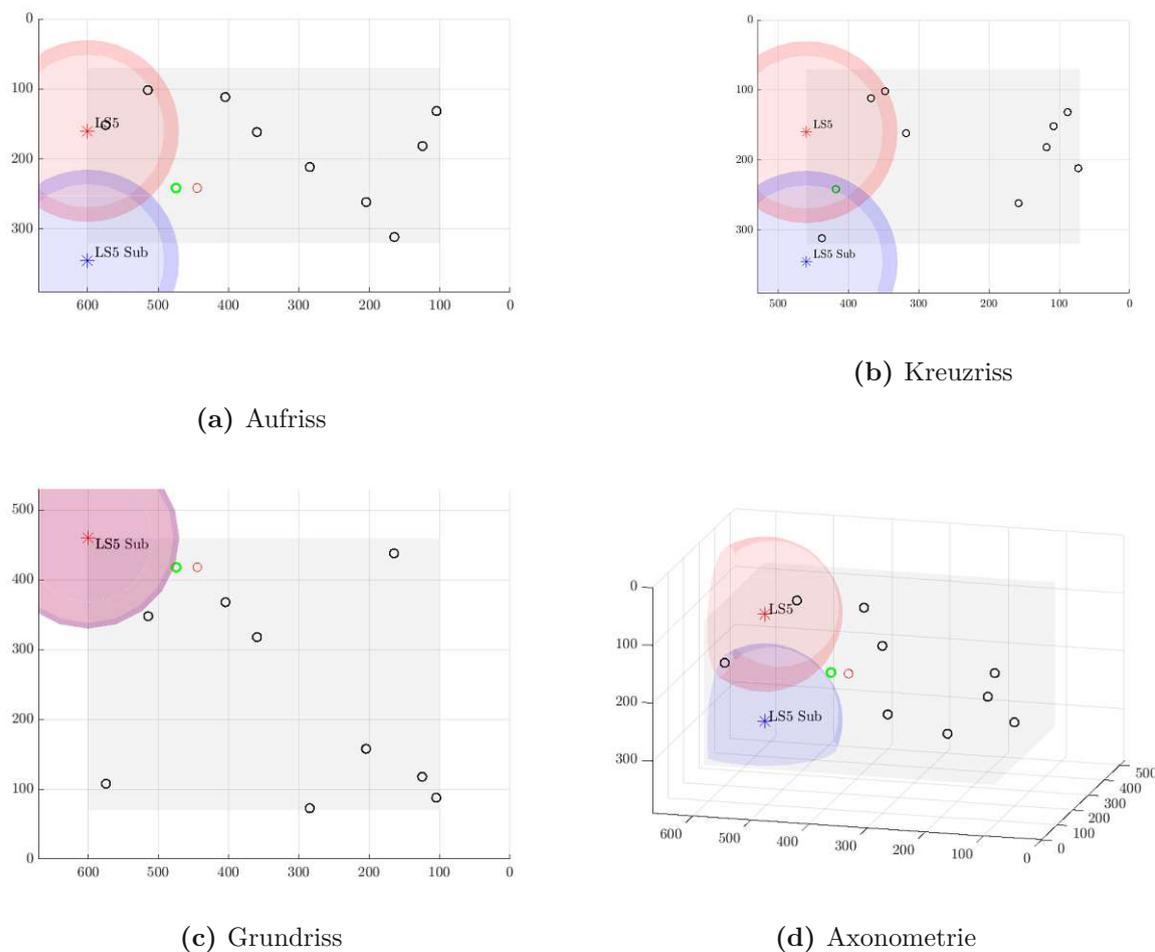


(c) Grundriss

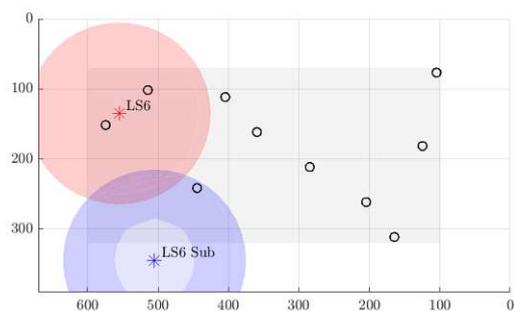


(d) Axonometrie

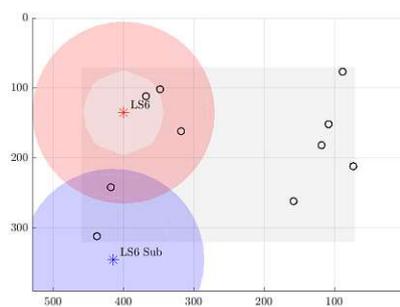
**Abb. B.3:** Lautsprecherposition 'LS4' im Senderraum für die Bestimmung der optimalen Lautsprecherpositionen – in dunkelblau der Subwoofer, in rot der Dodekader inkl. maximalen Einflussbereich des direkten Schallfelds von 1,3 m nach [14] sowie die verwendeten Mikrofonpositionen und deren normativ zulässiger Bereich in grau



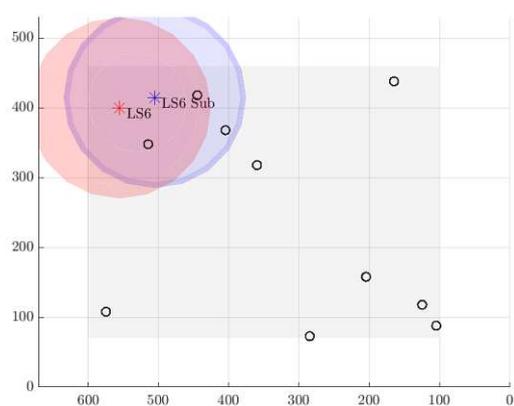
**Abb. B.4:** Lautsprecherposition 'LS5' im Senderaum für die Bestimmung der optimalen Lautsprecherpositionen – in dunkelblau der Subwoofer, in rot der Dodekader inkl. maximalen Einflussbereich des direkten Schallfelds von 1,3 m nach [14] sowie die verwendeten Mikrofonpositionen und deren normativ zulässiger Bereich in grau



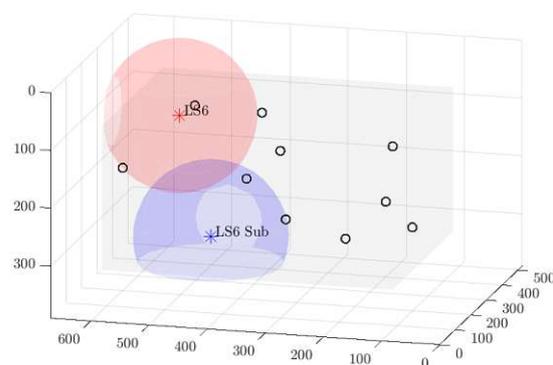
(a) Aufritt



(b) Kreuzriss



(c) Grundriss



(d) Axonometrie

**Abb. B.5:** Lautsprecherposition 'LS6' im Senderraum für die Bestimmung der optimalen Lautsprecherpositionen – in dunkelblau der Subwoofer, in rot der Dodekader inkl. maximalen Einflussbereich des direkten Schallfelds von 1,3 m nach [14] sowie die verwendeten Mikrofonpositionen und deren normativ zulässiger Bereich in grau

## Anhang C

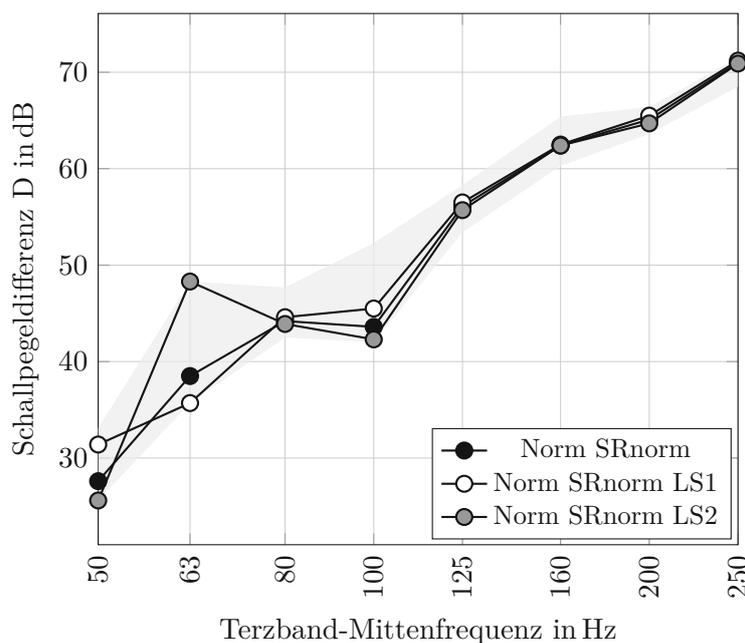
# Einfluss der Lautsprecherposition auf die Schallpegeldifferenz in der Messmethode 'Norm'

Im Zuge der Untersuchungen zum Einfluss der Raumakustik im Senderraum auf die Schallpegeldifferenz ergab sich auch die Möglichkeit, aufgrund der generierten Daten, den Einfluss der unterschiedlichen Lautsprecherpositionen zu beleuchten. Mit Hilfe der Methoden nach Anhang D der ISO 10140-5 [9] wurden die optimalen Lautsprecherpositionen bestimmt, diese wurde in Kapitel 2.1.4 erläutert. Auf Basis dieser optimalen Lautsprecherpositionen wurden die Messungen mit der besten Positionen durchgeführt. Hierbei ist abermals zu erwähnen, dass die Bestimmung der optimalen Lautsprecherposition lediglich in der Raumkonstellation 'SR00', also im leeren Senderraum, stattfand. Für alle weiteren Raumkonstellationen wurden ein und die selben Lautsprecherpositionen verwendet, um auch eine Vergleichbarkeit der Messdaten herstellen zu können. Die Lage der besten Lautsprecherposition (LS1) wurde in Kapitel 3.2 beschrieben. Die hier dargestellten Ergebnisse der Schallpegeldifferenz aus der normativen Messung wurden durch zwei Lautsprecherpositionen ermittelt. Konkret handelt es sich um die beschriebene Position LS1 sowie die in Kapitel B des Anhangs gezeigte Senderposition LS2.

Ganz allgemein ist aus der Darstellung des Schallpegeldifferenz der einzelnen Lautsprecherpositionen sowie deren Zusammenwirken erkennbar, dass die normative Überlagerung der beiden Schallpegeldifferenzen immer den niedrigeren der beiden Werte zugewandt ist und somit auf der sicheren Seite liegt.

Speziell im tiefen Frequenzbereich, unterhalb der Schröderfrequenz, in dem nicht-diffuse Schallfelder zu erwarten sind, sollte auch die Position der Lautsprecher einen großen Einfluss auf die Schallpegeldifferenz haben. Diese zu erwartenden Schwankungen sind auch aufgetreten und in der nachstehenden Abbildung C.1 für die Raumkonstellation 'SRnorm' ersichtlich. Es zeigt sich, dass sich vor allem im unterem Teil des erweiterten Frequenzbereichs, respektive unter 100 Hz, eine deutliche Abweichung aufgrund der unterschiedlichen Lautsprecherpositionen einstellt. Die Schallpegeldifferenz gemessen mit der Lautsprecherposition LS2 ist vor allem im Bereich des 63 Hz Terzbandes um über 12 dB höher als jenes gemessen mit Lautsprecherposition LS1; bei 100 Hz liegt die Schwankung bei etwa 3,0 dB. Die Abweichung ab 125 Hz aufwärts ist kleiner als 1,0 dB. Daher kann für die Raumkonstellation 'SRnorm' und den Frequenzbereich ab 100 Hz aufwärts der Unterschied in der Schallpegeldifferenz dieser beiden untersuchten Lautsprecherpositionen als gering eingestuft werden.

Ähnliche Verläufe der Schallpegeldifferenz über die Frequenz kann auch im leeren Raum, der Konstellation 'SR00' in Abbildung C.2 beobachtet werden. Hierbei sind marginal größere Schwankungen in den Terzbändern über 100 Hz erkennbar, diese bewegen sich etwa in der Größenordnung von 1,0 dB über jenen der Raumkonstellation 'SRnorm'. Fügt man in weiterer Folge schrittweise mehr Diffusoren hinzu, wie in den Abbildung C.3 'SR01' sowie C.4 'SR02' geschehen, so zeigt sich ein nur sehr geringer Einfluss der Diffusoren auf die Unterschiede der

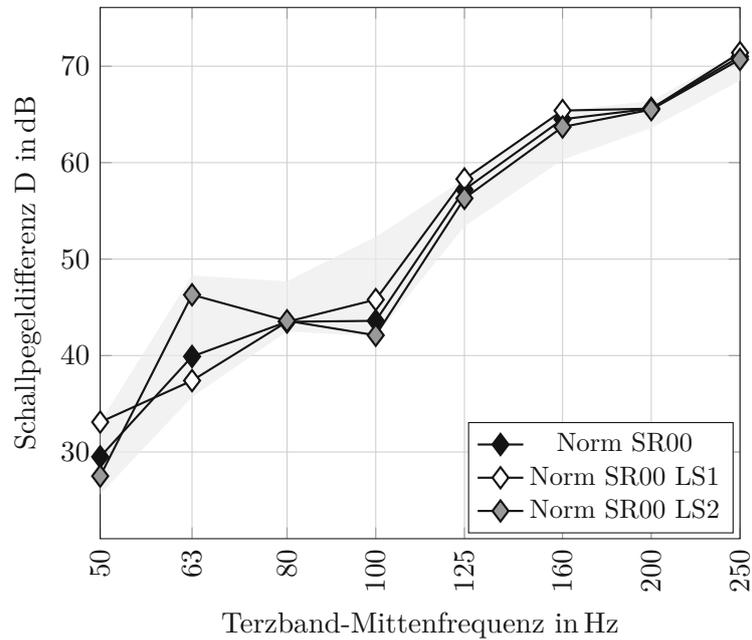


**Abb. C.1:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Lautsprecherpositionen 'LS1+LS2' | 'LS1' | 'LS2' mit Raumkonstellation 'SRnorm' im Senderaum inkl. Darstellung des Schwankungsbereich aller Konfigurationen grau im Hintergrund

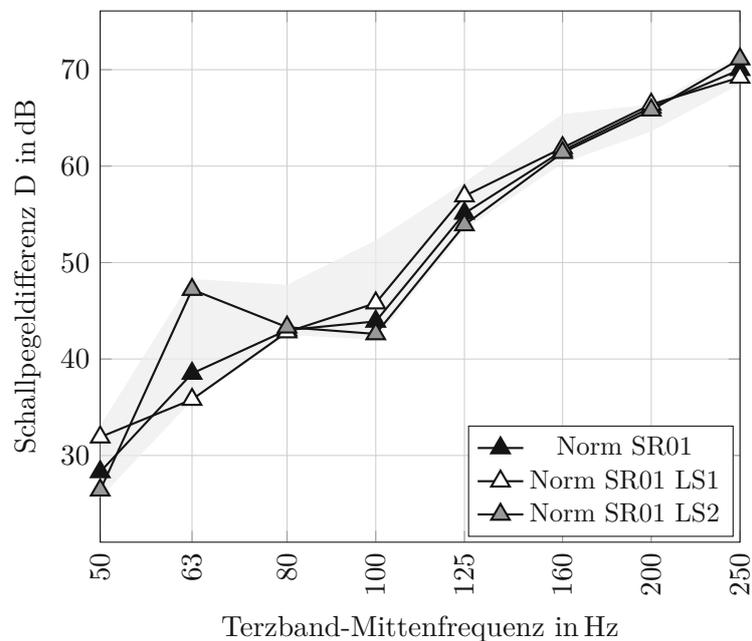
Schallpegeldifferenz aufgrund der Lautsprecherposition. Sehrwohl ist allerdings eine Verschiebung der Werte bei 160 und 200 Hz in Richtung jener Werte der Konstellation 'SRnorm' erkennbar.

Betrachtet man nun die Variation des Senderaumes bezüglich der Absorber, so zeigt sich ein wesentlich größerer Einfluss dieser auf die Abhängigkeit der Schallpegeldifferenz von der Lautsprecherposition. Bereits die lediglich Positionierung der ersten Absorber in den Ecken des Senderaumes im sonst leeren Raum - Konstellation 'SR10' - zeigt in Abbildung C.5 einen sehr geringen Einfluss der Lautsprecherposition auf die Schallpegeldifferenz bereits ab dem 80 Hz Terzband. Die Schwankungen im Bereich 63 Hz verringert sich auf etwa 9,0 dB. Die Kombination der ersten Absorber mit den ersten Diffusoren 'SR11' bringt, wie in Abbildung C.6 ersichtlich, keine wesentliche Veränderung im Vergleich zur Konstellation 'SR10' mit sich.

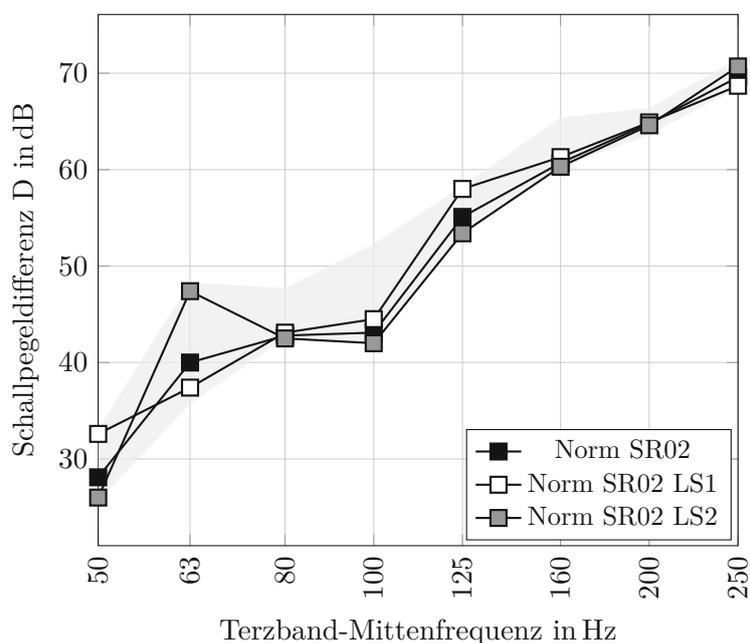
Mit Blick auf die Abbildung C.7 und somit die zweite Stufe der Absorber im Senderaum 'SR20' zeigt sich ein differenziertes Bild zu den bisherigen Schallpegeldifferenz-Verläufen. Die Schwankungen im 63 Hz Terzband werden wesentlich reduziert von etwa 9,0 dB im 'SR00' auf knapp 5,0 dB; im Bereich des 100 Hz Terzbandes ergeben sich allerdings größere Abweichungen aufgrund der unterschiedlichen Lautsprecherpositionen als bisher beobachtet. Diese Abweichung liegen bei etwa 7,0 dB. Fügt man nun auch hier die zweite Stufe der Diffusoren hinzu, erhält man die Senderaumkonstellation 'SR22'. Der Verlauf der Schallpegeldifferenz mit unterschiedlichen Lautsprecherpositionen ist in Abbildung C.8 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Schallpegeldifferenz auch im Frequenzbereich unter 100 Hz für die beiden betrachteten Lautsprecherpositionen praktisch ident ist. Die Schwankungen verringern sich von bis über 12 dB bei Konstellation 'SRnorm' hin zu etwa 0,5 dB im 63 Hz Terzband bei 'SR22'. Die größten Abweichungen im Schallpegeldifferenz aufgrund der Lautsprecherposition ergeben sich im Terzband bei 125 Hz und betragen 2,5 dB. Eine stärkere Dämpfung wirkt sich somit auch positiv auf den Einfluss der Lautsprecherposition auf die Schallpegeldifferenz aus.



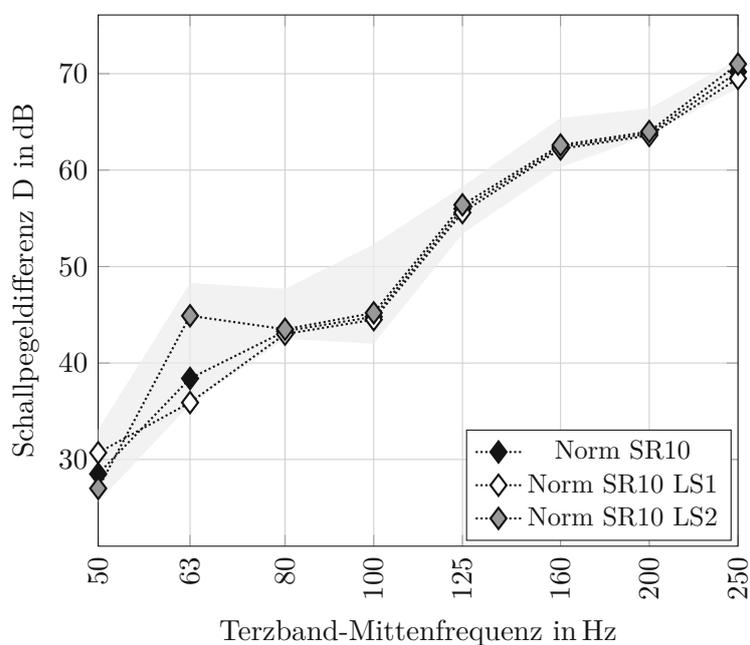
**Abb. C.2:** Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Lautsprecherpositionen 'LS1+LS2' | 'LS1' | 'LS2' mit Raumkonstellation 'SR00' im Senderraum inkl. Darstellung des Schwankungsbereich aller Konfigurationen grau im Hintergrund



**Abb. C.3:** Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Lautsprecherpositionen 'LS1+LS2' | 'LS1' | 'LS2' mit Raumkonstellation 'SR01' im Senderraum inkl. Darstellung des Schwankungsbereich aller Konfigurationen grau im Hintergrund



**Abb. C.4:** Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Lautsprecherpositionen 'LS1+LS2' | 'LS1' | 'LS2' mit Raumkonstellation 'SR02' im Senderraum inkl. Darstellung des Schwankungsbereich aller Konfigurationen grau im Hintergrund



**Abb. C.5:** Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Lautsprecherpositionen 'LS1+LS2' | 'LS1' | 'LS2' mit Raumkonstellation 'SR10' im Senderraum inkl. Darstellung des Schwankungsbereich aller Konfigurationen grau im Hintergrund

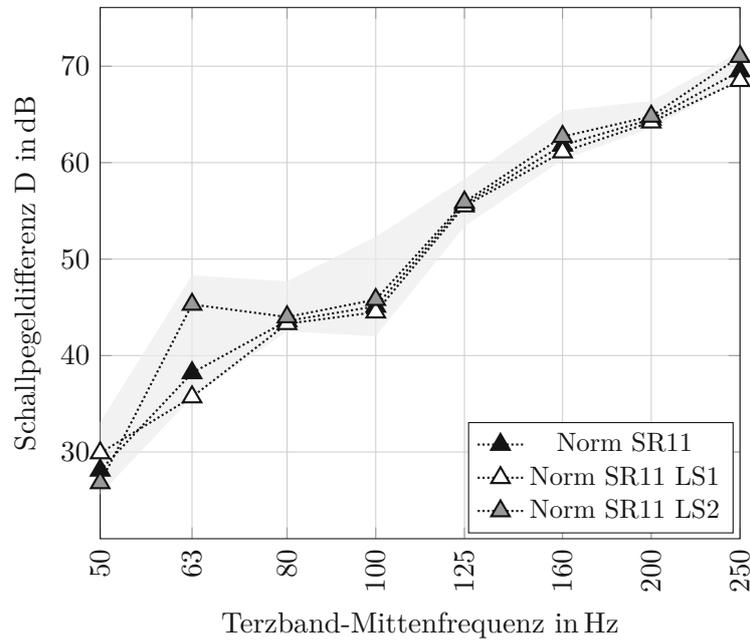


Abb. C.6: Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Lautsprecherpositionen 'LS1+LS2' | 'LS1' | 'LS2' mit Raumkonstellation 'SR11' im Senderraum

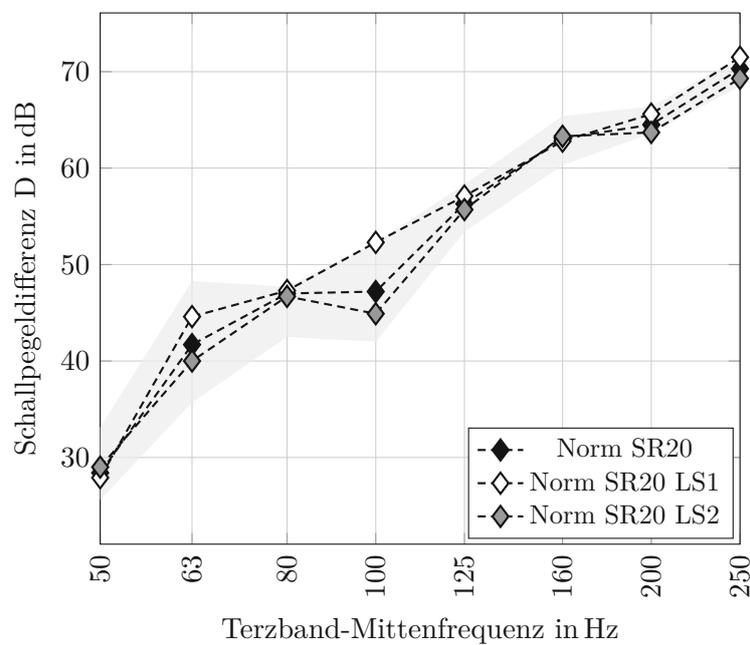
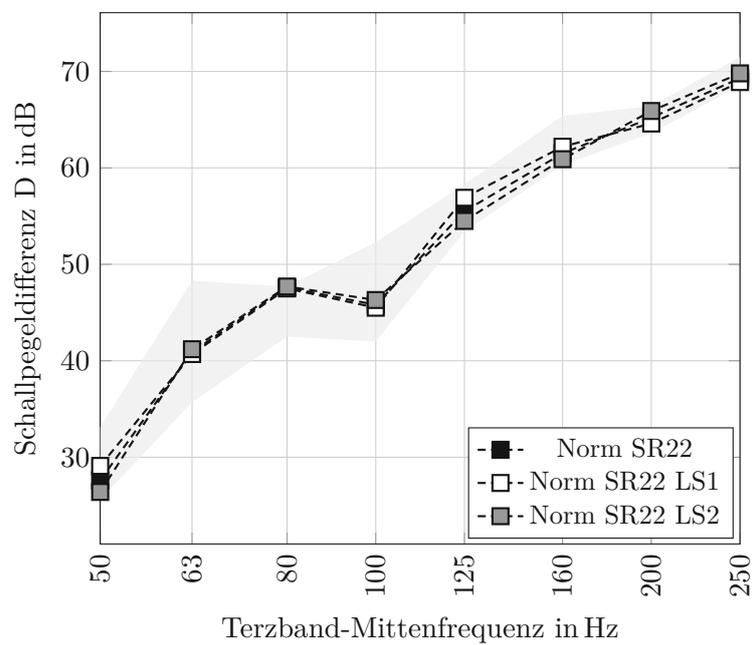


Abb. C.7: Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Lautsprecherpositionen 'LS1+LS2' | 'LS1' | 'LS2' mit Raumkonstellation 'SR20' im Senderraum inkl. Darstellung des Schwankungsbereich aller Konfigurationen grau im Hintergrund

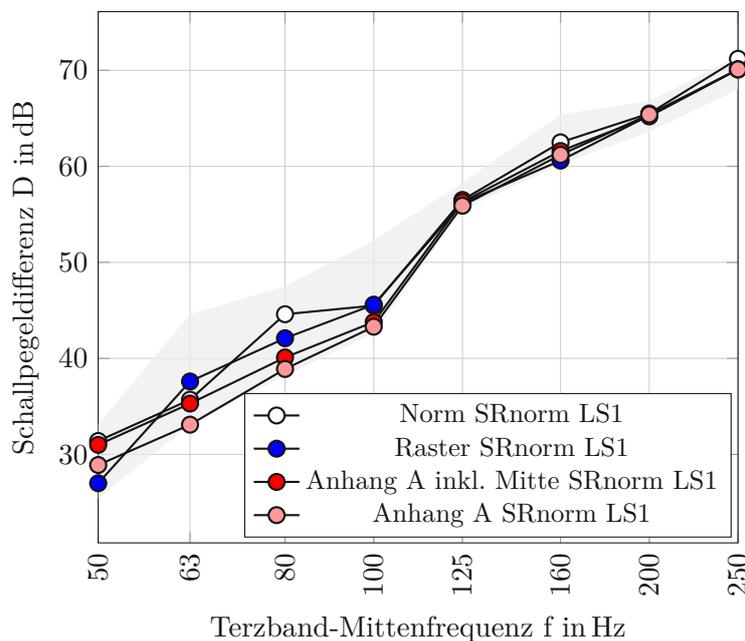


**Abb. C.8:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Lautsprecherpositionen 'LS1+LS2' | 'LS1' | 'LS2' mit Raumkonstellation 'SR22' im Senderraum inkl. Darstellung des Schwankungsbereich aller Konfigurationen grau im Hintergrund

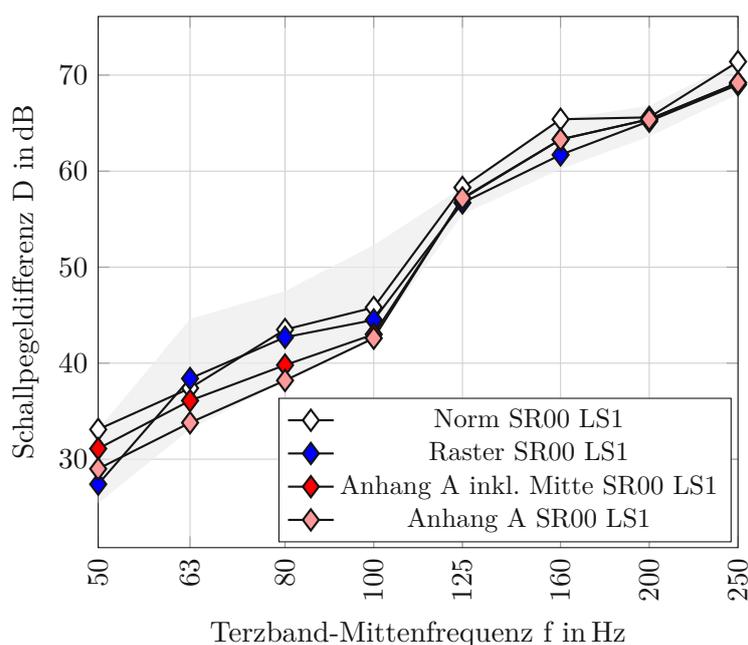
## Anhang D

### Schallpegeldifferenz der Messmethode 'Anhang A' vs. 'Anhang A inkl. Mitte'

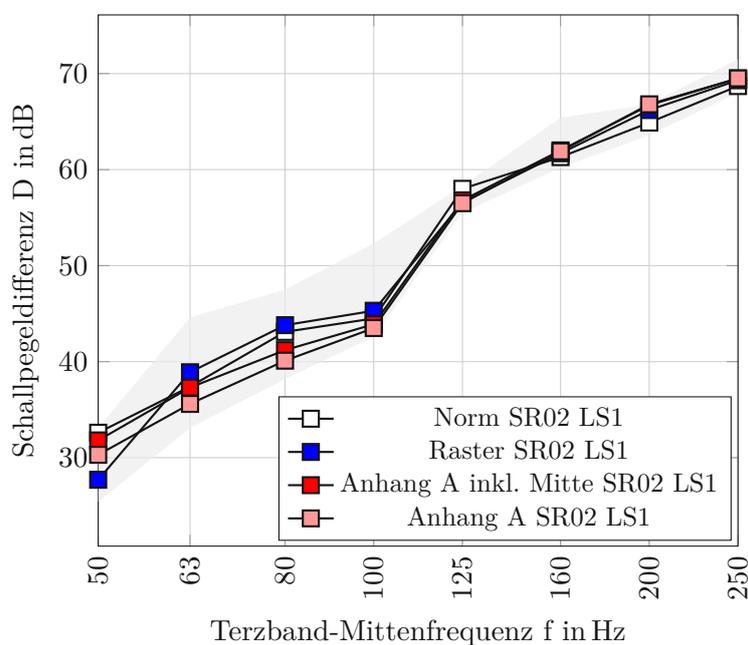
Die Unterschiede der Varianten der Messmethode 'Anhang A' können im ersten Schritt mit Hilfe der nachstehenden Abbildungen interpretiert werden. Es ist ersichtlich, dass die Variation 'Anhang A inkl. Mitte' die Schallpegeldifferenz im Frequenzbereich unter 100 Hz im Vergleich zur Variation 'Anhang A' kontinuierlich überschätzt; dies gilt für nahezu alle untersuchten Raumkonstellationen. Lediglich im Raumsetup 'SR22' ändert sich die Situation: Im Vergleich mit den bisherigen Raumkonfigurationen 'SRnorm' | 'SR00' | 'SR02' ist ersichtlich, dass die Messmethoden 'Anhang A' sowie 'Anhang A inkl. Mitte' nicht mehr zu einer konstanten Unterschätzung der Schallpegeldifferenz im Bereich unter 100 Hz führen. Die Werte liegen näher beisammen und befinden sich zwischen jenen der 'Norm'- bzw. 'Raster'-Werten. Dies konnte bereits in Kapitel 4.3 im Vergleich der Messmethoden beobachtet werden.



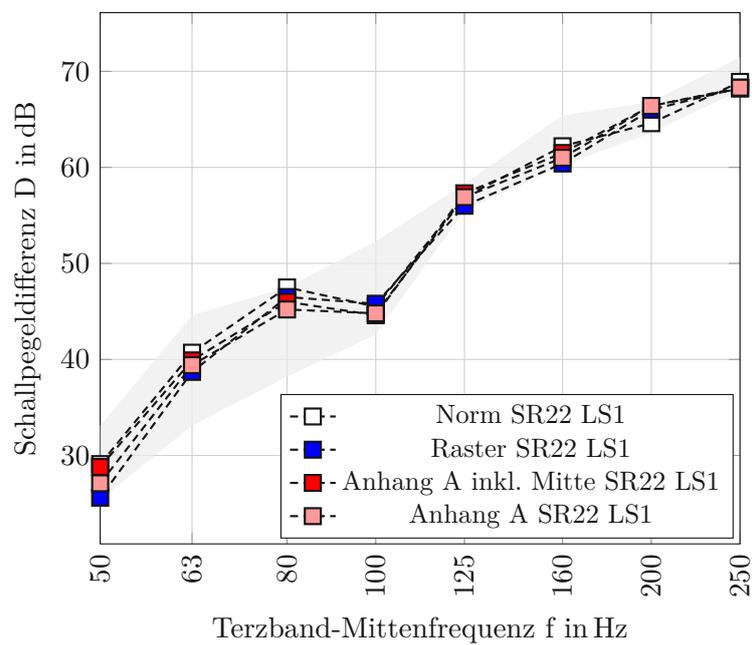
**Abb. D.1:** Schallpegeldifferenz D in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Messmethoden 'Anhang A' und 'Anhang A inkl. Mittenbereich', sowie den Messmethoden 'Norm' und 'Raster' als Referenz in der Raumkonstellationen 'SRnorm' ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs der Schallpegeldifferenz aller gemessenen Raumkonstellationen in grau



**Abb. D.2:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Messmethoden 'Anhang A' und 'Anhang A inkl. Mittenbereich', sowie den Messmethoden 'Norm' und 'Raster' als Referenz in der Raumkonstellationen 'SR00' ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs der Schallpegeldifferenz aller gemessenen Raumkonstellationen in grau



**Abb. D.3:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Messmethoden 'Anhang A' und 'Anhang A inkl. Mittenbereich', sowie den Messmethoden 'Norm' und 'Raster' als Referenz in der Raumkonstellationen 'SR02' ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs der Schallpegeldifferenz aller gemessenen Raumkonstellationen in grau



**Abb. D.4:** Schallpegeldifferenz  $D$  in Abhängigkeit der Frequenz im Vergleich der Messmethoden 'Anhang A' und 'Anhang A inkl. Mittenbereich', sowie den Messmethoden 'Norm' und 'Raster' als Referenz in der Raumkonstellationen 'SR22' ermittelt mit Lautsprecherposition LS1 inkl. Darstellung des Schwankungsbereichs der Schallpegeldifferenz aller gemessenen Raumkonstellationen in grau