

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 47 93
www.empa.ch

Bundesamt für Umwelt BAFU
Werner Riegger
Abteilung Wald, Sektion Holz- und Waldwirtschaft
Worbentalstrasse 68
3063 Ittigen

Untersuchungsbericht Nr. 5211.00838

Schallschutz Erweiterung Frequenzbereich auf 50 Hz – Empa: Erarbeitung einheitlicher Messempfehlungen und Messunsicherheiten

BAFU Bestellnummer (110002127 / 8V80/09.0063.PJ/0171)
BAFU Vertragsnummer (09.0063.PJ / N033-0168 / 5-14.03)

Inhalt

1	Projektbeschrieb	2
2	Experimentelle Untersuchungen	4
3	Analytische und Numerische Untersuchungen	28
4	Diskussion	39
5	Referenzen	42

Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Laboratory for Acoustics / Noise Control
Dübendorf, 17. Juni 2015

Projektleiter:
Dr. Stefan Schoenwald

Abteilungsleiter:
Kurt Eggenschwiler

1 Projektbeschreibung

1.1 Ausgangslage / Problemstellung

Seit Jahrzehnten sind tieffrequente Körperschallübertragungen unterhalb 100 Hz eine der häufigsten Ursachen für Beanstandungen seitens der Bewohner von Mehrfamilienhäusern. Expertisen erbringen in solchen Fällen meistens den Nachweis, dass die Anforderungen nach der Norm SIA 181 „Schallschutz im Hochbau“ - die gemäss Artikel 32 der Lärmschutzverordnung die Anforderungen für den Schallschutz in Gebäuden regelt - erfüllt sind. Der Grund dafür liegt darin, dass gemäss der bestehenden Praxis der Norm nur im Frequenzbereich von 100 Hz bis 3'150 Hz gemessen wird, und somit Störungen unterhalb 100 Hz gar nicht adäquat beurteilt werden können.

Das Fehlen des Frequenzbereichs unter 100 Hz ist nicht willkürlich, sondern hängt mit den Eigenschaften des Schallfelds bei diesen Frequenzen in Räumen mit kleinem Volumen zusammen: die tieffrequenten Schallwellen weisen vergleichbare Wellenlängen auf wie die Abmessungen von üblichen Wohnräumen. Die Messverfahren der internationalen Normen und der SIA 181 setzen ein diffuses Schallfeld im Raum voraus – eine Bedingung, die schon bei mittleren und höheren Frequenzen nur annähernd erfüllt ist. Im Tieftonbereich ist das Schallfeld mit seinen ausgeprägten Eigenmoden aber so speziell, dass nicht mehr mit den üblichen Ansätzen gearbeitet werden kann. Es wird auch sehr aufwändig, einen repräsentativen, mittleren Schalldruckpegel im Raum zu bestimmen.

In den Arbeitsgruppen der EN und ISO Normen wurde das Problem der tiefen Frequenzen in den vergangenen Jahren thematisiert. So enthält die Bewertungsnorm SN EN ISO 717 aus dem Jahr 2006 als Option spektrale Anpassungswerte ab 50 Hz, die heute z.T. verwendet werden. Bei den Messungen im Labor nach EN ISO 10'140 (2010) wird heute in der Regel ab 50 Hz gemessen. Und die Norm ISO 16283-1 vom Februar 2014, die zukünftig das bestehende Verfahren für die Messung der Luftschalldämmung am Bau nach EN ISO 140-4 ablösen soll, enthält konkrete Angaben, wie eine Messung auch für den Frequenzbereich von 50 bis 100 Hz durchgeführt werden kann. Das Verfahren wird sowohl für die Luft- wie auch die Trittschalldämmung (beschrieben in ISO 16283-2) angewendet.

Die EN ISO 16283-1 hat inzwischen mit dem Status als Schweizer Norm SN EN ISO 16283-1 SIA 181.054 Gültigkeit in der Schweiz erlangt. Messungen im 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz-Terzband sind jedoch nach wie vor optional, aber dennoch stellt sich die Frage, wie störungsadäquate Beurteilungen des tieffrequenten Schalls in der SIA 181 geregelt werden sollen: Welches sind die Messmethoden? Wie sehen die Beurteilungsgrössen aus? Was bedeutet dies für die Anforderungswerte?

Ziel dieser Untersuchung ist die Erstellung und Ausarbeitung einer einheitlichen Messrichtlinie für die Messung der Luft- und Trittschalldämmung in kleinen Räumen bei tiefen Frequenzen, um eine einheitliche, vergleichbare und reproduzierbare Erfassung der objektiven Messdaten zu gewährleisten.

Wie bereits erwähnt lässt die Norm EN ISO 16283-1 (im Folgenden nur ISO 16283-1 genannt) dem Messenden einen gewissen Ermessensspielraum für die Durchführung des Messprotokolls, um speziellen Bausituationen oder Möblierung Rechnung zu tragen. Um die Messunsicherheit durch verschiedene Auslegung des Regelwerkes zu verringern, ist deshalb eine Durchführungsempfehlung, die speziell an die Schweizer Bausituation angepasst ist, notwendig. Im ersten Schritt müssen die Parameter identifiziert werden, die grossen Einfluss auf die Messunsicherheit haben, sowie zuverlässige Werte für die Messunsicherheit bestimmt werden. Anschliessend muss überprüft werden ob und vor allem wie unter Berücksichtigung von Praktikabilität und den Herausforderungen der Wirklichkeit eine Minimalisierung des Messaufwandes erreicht werden kann. Ein weiterer wichtiger Punkt sind Empfehlungen zur Erfassung der konkreten Mess-Situation, insbesondere von Messpunkten und Möblierung, um Rückschlüsse zwischen Messungen zu erlauben, die zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt worden sind. Andere Lösungen, die nicht in der Norm ISO 16283-1 berücksichtigt werden [z. B. Moorhouse, 2006], sollen auch herangezogen und überprüft werden, ob sich mit deren Anwendung der Messaufwand bei gleicher Messunsicherheit minimieren lässt.

In der Vorgehensweise ist geplant, den genauen Schalldruckpegel bei tiefen Frequenzen für eine begrenzte, aber ausreichende Anzahl von Räumen bzw. Möblierungssituationen zu bestimmen und mit den Ergebnissen von vereinfachten Abschätzungsverfahren zu vergleichen. Vorzugsweise sollte die Untersuchung messtechnisch im Laborexperiment unter kontrollierbaren Bedingungen erfolgen. Gegebenenfalls werden zusätzlichen Berechnungen (z. B. Finite Elemente Methode FEM) durchgeführt, um den experimentellen Aufwand wenn möglich zu begrenzen. Die Grenzen der Messempfehlung werden mit Extremsituationen, z. B. kleine Räume mit hoher Möblierungsdichte, ausgelotet.

1.2 Internationaler und Nationaler Stand des Wissens

Tieffrequente Schallereignisse werden von Gebäudenutzern als sehr störend empfunden. Dies wurde in zahlreichen aktuellen wissenschaftlichen Veröffentlichungen untersucht, andere reichen schon Jahrzehnte zurück [z. B. Blazier, 1994; Rychtáriková, 2012; Simmons, 2011]. Um dem Rechnung zu tragen werden in der Arbeitsgruppe ISO TC43 SC2 WG18 AHG5 für die Überarbeitung der Bewertungsnorm ISO 717-1 und ISO 717-2 verschiedene neue Einzahl-Bewertungsmasse diskutiert, die sowohl den Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 100 Hz als auch das Spektrum des Störgeräusches (z. B. Wohngeräusche, Verkehrslärm) berücksichtigen [Scholl, 2011].

In der vom Mai 2009 bis November 2013 laufenden COST TU0901 Aktion „Integrating and Harmonizing Sound Insulation Aspects in Sustainable Urban Housing Constructions“ [Rasmussen, 2011, 2013] wurden Ergebnisse Europäischer Forschungsprojekte zur Bewertung der Schalldämmung als auch zur Höhe der erforderlichen Schallschutzanforderungen zusammengetragen und koordiniert. Im Rahmen dieser Initiative wurden Ergebnisse zahlreicher nationaler Forschungsprojekte zur Korrelation von Wahrnehmung der Schallübertragung und Bewertungsmassen vorgestellt. Dies erfolgt meist durch Befragung von Gebäudenutzern mit im Rahmen der COST Action entwickelten standardisierten Fragebögen und Messung der Schalldämmung im Gebäude oder durch Bewertung der Schalldämmung im Hörtest durch Versuchspersonen.

Leider fielen die Resultate für die Bewertung der Schalldämmung in verschiedenen Ländern sehr unterschiedlich aus und sind nicht direkt von einem Land auf das andere übertragbar. Gründe sind auf der einen Seite die unterschiedlichen landestypischen Bauweisen und auf der anderen Seite die unterschiedliche subjektive Bewertung der Schalldämmung auf Grund nationaler Besonderheiten.

Voraussetzung für eine Erweiterung des Frequenzbereichs für die Bewertung der Luft- und Trittschalldämmung ab 50 Hz ist, dass die Schalldämmung in diesem Frequenzbereich physikalisch korrekt und wiederholbar gemessen werden kann. Die vorgeschlagene Messmethodik für den tiefen Frequenzbereich in der ISO 16283-1 basiert auf einer wissenschaftlichen Untersuchung des Schallfeldes in leeren rechteckigen Räumen [Hopkins, 2005] und wurde bereits im Feld validiert [Simmons, 2011]. Die Methodik lässt jedoch einen gewissen Ermessens- und Auslegungsspielraum für Bausituation zu, z. B. für möblierte Räume oder Räume mit Dachschrägen, die nicht dem Idealfall entsprechen. Neben dem Normierten Verfahren gibt es noch weitere Ansätze zur Messung des Schalldruckes [Moorhouse, 2006] und der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen, z. B. mit Schallintensität.

In Deutschland werden die Fragen des tieffrequenten Schalls im Rahmen der Überarbeitung der Normen DIN 4109 und VDI 4100 diskutiert.

2 Experimentelle Untersuchungen

In einer umfangreichen experimentellen Parameterstudie wurde unter kontrollierten Laborbedingungen das Schallfeld in einem kleinen Raum (Volumen $<25 \text{ m}^3$) wiederholt detailliert in einem Messraster, welches das gesamte Raumvolumen abdeckt, sowie in zusätzlichen Punkten in den Raumecken und entlang der Raumdiagonalen vermessen.

Zwischen den Messungen wurden jeweils einzelne Parameter, im Wesentlichen der Möblierungszustand und Anreagesituation durch den Lautsprecher, verändert um so deren Einfluss auf das Messergebnis quantifizieren zu können. Für die Auswertung wurden die Messwerte von verschiedenen Positionen gemittelt, diese sind in Abschnitt 2.1 beschrieben.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde dann in weiteren Messserien der Einfluss einzelner Parameter, die einen grossen Einfluss vermuten lassen, wie zum Beispiel der Abstand von Messpunkten zu den Raumbegrenzungsflächen, detailliert untersucht.

2.1 Angewandte Messprotokolle

In dieser Studie wurden vier Auswerteverfahren basierend auf vier verschiedenen Messprotokollen angewandt. Drei sind schematisch in Abbildung 1 dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.



Abbildung 1: Schematische Darstellung der drei experimentell untersuchten Abtast- und Mittelungsverfahren

2.1.1 Referenz: Tatsächlicher mittlerer Schalldruckpegel im Raum – Mittelung über alle Messpunkte

Zur Ermittlung des tatsächlichen Schalldruckpegels im Raum wurden die Schalldruckpegel aller Messpunkte in einem gleichmässig verteilten Messraster mit einem Punktabstand von ca. 50 cm in allen Richtungen gemittelt. Hierbei befinden sich Messpunkte auch dicht in 10 cm Abstand vor den Raumbegrenzungsflächen, den Raumecken und den Raumkanten.

Dieser Wert entspricht weitestgehend dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum, da so die ungleichmässige Schalldruckverteilung im Raum berücksichtigt wurde, d. h. auch die Schalldruckanstiege vor den schallharten Raumbegrenzungsflächen, in den Raumkanten und -ecken im mittleren und hohen Frequenzbereich, als auch die ungleichmässige Schalldruckverteilung durch die Raummoden bei tiefen Frequenzen, werden erfasst.

Raummoden sind stehende Schallwellen in Räumen, die bei konkreten Frequenzen, den sogenannten Eigenfrequenzen, auftreten. Sie sind insbesondere von Bedeutung, wenn das Schallfeld im Raum nicht diffus ist, das heisst die Schallwellenlänge in Luft entspricht der Grössenordnung der Raumabmessungen. Dies ist der Fall bei kleinen Räumen und/oder tiefen Frequenzen. Raummoden sind bestimmt durch die Raumgeometrie, Beschaffenheit der Raumbegrenzungsflächen (schallhart oder absorbierend), sowie durch allfällige Objekte im Raum, welche eine Schallausbreitung beeinflussen. Sie zeichnen sich aus durch einen Anstieg

des Schalldrucks in den Schwingungsknoten (die Schallschnelle geht hier gegen null) und einem geringen Schalldruck in den Schwingungsbäuchen (die Schallschnelle wird wiederum hier sehr gross). Das modale Verhalten des Raumes ist detailliert in Abschnitt 3 erläutert.

Bei der Mittelung werden die an allen Positionen im Messraster gemessenen Schalldruckpegel energetisch gemittelt. Es erfolgt keine Gewichtung von einzelnen Messpositionen.

$$L_{tot} = 10 \lg \left(\frac{1}{np_0^2} \sum_{i=1}^n p_i^2 \right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

mit: L_{tot} Tatsächlicher mittlerer Schalldruckpegel im Raum [dB]

n Anzahl der Messpunkte

p_i Schalldruck an Messpunkt i [Pa]

p_0 Bezugs-Schalldruck von 20 μPa

2.1.2 Mittlerer Diffusfeld-Schalldruckpegel im Raum – Mittelung gemäss Standardverfahren in ISO 16283-1

Das Verfahren ist identisch mit dem bestehenden Verfahren in EN ISO 140-4 zur Abtastung und Mittelung der Schalldruckpegel in Räumen mit diffusen Schallfeldern. In einem diffusen Schallfeld fällt auf einen Empfänger aus allen möglichen Richtungen statistisch gesehen die gleiche Schallintensität ein und räumlich gesehen ist die Schalleistungsdichte konstant, d. h. der Schalldruckpegel ist ebenfalls konstant. Nur in geringem Abstand zu schallharten Raumbegrenzungsflächen, sowie in Kanten und Ecken des Raumes steigt der Schalldruckpegel auf Grund von Überlagerung der einfallenden und reflektierten Schallwellen an. Bedingung für ein diffuses Schallfeld in Räumen ist eine gleichmässig im Raum verteilte geringe bis moderate Schallabsorption, sowie dass die Luftschallwellenlänge sehr viel kleiner als die Raumabmessungen sind. ISO 16283-1 nimmt an, dass diese Bedingungen in normal grossen Wohnräumen mit einem Volumen $\geq 25 \text{ m}^3$ im Frequenzbereich von 50 Hz bis 5000 Hz annähernd erfüllt sind. Zur Ermittlung des mittleren Schalldruckpegels im Diffusfeld wird nur das zentrale Volumen des Raums mit einem kontinuierlich bewegten Mikrofon oder an mindestens 5 festen Mikrofonpositionen abgetastet. Bei einer Abtastung mit festen Mikrofonen dürfen diese wegen der Schwingungsformen von dennoch gegebenenfalls vorhandenen Raummoden nicht in einem gleichmässigen Raster verteilt oder in der gleichen Ebene liegen. Des Weiteren gelten folgende Bedingungen für Abstände zwischen Mikrofon und zu den Raumbegrenzungsflächen:

- 0.7 m zwischen den festen Mikrofonpositionen
- 0.5 m zwischen jeglicher Mikrofonposition und den Raumgrenzen
- 1.0 m zwischen jeglicher Mikrofonposition und dem Lautsprecher

Die an den einzelnen Positionen gemessenen Schalldruckpegel werden gemäss Gleichung 1 energetisch gemittelt.

Da die Bereiche in der Nähe der Raumbegrenzungsflächen, wo bei der Annahme eines diffusen Schallfeldes im Raum eine höhere Schalleistungsdichte herrscht, bei dieser Mittelung nicht berücksichtigt werden, ist der mit dem Standardverfahren ermittelte mittlere Schalldruckpegel im Raum normalerweise kleiner als der tatsächlich mittlere Schalldruckpegel im Raum.

Für Räume mit einem ideal diffusen Schallfeld gibt die sogenannte Waterhouse-Korrektur C_w [Waterhouse, 2006] eine Beziehung zwischen dem Diffusfeldpegel und dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum an.

$$L_{diff} = L_{tot} - C_W = L_{tot} - 10 \lg \left(1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

- mit:
- L_{diff} Mittlerer Diffusfeld-Schalldruckpegel [dB]
 - L_{tot} tatsächlicher mittlerer Schalldruckpegel im Raum [dB]
 - C_W Waterhouse Korrektur [dB]
 - S total area of room [m²]
 - V Room volume [m³]
 - λ Wellenlänge in Luft

In der experimentellen Untersuchung wurde der mittlere Schalldruckpegel im Raum gemessen mit dem Standardverfahren nach ISO 16283-1 aus demselben Messdatensatz ermittelt wie der tatsächliche mittlere Schalldruckpegel im Raum. Hierzu wurden jeweils fünf Messpunkte aus dem obigen Messraster, welche die oben beschriebenen Abstandsbedingungen erfüllen, für 10 verschiedene Datensets herausgegriffen und die an diesen Positionen gemessenen Schalldruckpegel nach Gleichung 1 ungewichtet energetisch gemittelt.

2.1.3 Mittlerer Schalldruckpegel in kleinen Räumen – Mittelung gemäss Verfahren für die Messung des Schalldruckpegels bei tiefen Frequenzen in ISO 16283-1

Für kleine Räume mit einem Raumvolumen von kleiner 25 m³ ist in ISO 16283-1 ein neues Verfahren zur Ermittlung des mittleren Schalldruckpegels im 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz Terzband beschrieben. Hierbei wird der räumliche Mittelwert für das gesamte Volumen als bewerteter Mittelwert des mittleren Schalldruckpegels im Raum gemessen (mit dem Standardverfahren beschrieben Abschnitt 2.1.2) sowie dem höchsten zeitlichen Mittelwert im jeweiligen Frequenzband aus einem Satz von Messungen in den Raumecken ermittelt.

$$L_{LF} = 10 \lg \left(\frac{1}{3} (10^{0.1L_{Corner}} + 2 \cdot 10^{0.1L_{diff}}) \right) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

- mit:
- L_{LF} Mittlerer Schalldruckpegel im Raum bei tiefen Frequenzen [dB]
 - L_{Corner} Maximaler Schalldruckpegel im jeweiligen Frequenzband (50 Hz, 63 Hz oder 80 Hz) gemessen in den Raumecken [dB]
 - L_{diff} Mittlerer Pegel im gemäss Standardverfahren nach ISO 16283-1 mit Annahme eines diffusen Schallfeldes im Raum [dB]

Bei der Messung des Schalldruckpegels in der Raumecke wird ein feststehendes Mikrofon im Abstand von 0.3 m bis 0.4 m von den Raumbegrenzungsflächen angeordnet. Für jede Lautsprecherposition müssen die Pegel in mindestens 4 Raumecken gemessen werden, wovon sich zwei in der Höhe des Fussbodens und zwei in der Höhe der Decke befinden. Die Mikrofone müssen mindestens 1 m vom Lautsprecher entfernt sein. Aus dem Datensatz für jede Lautsprecherposition wird jeweils der höchste in den Ecken gemessene Schalldruckpegel im 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz Frequenzband als L_{Corner} bestimmt, d. h. der maximal Pegel kann in verschiedenen Frequenzbändern auch in verschiedenen Ecken auftreten. Bei der Verwendung von mehreren Lautsprecherpositionen werden die Maximalpegel der Raumecken vor der Mittelung nach Gleichung 1 erst ungewichtet energetisch gemittelt.

Raumecken sind in der Norm definiert durch drei sich schneidende Oberflächen von mehr als 0.5 m² Fläche die senkrecht zueinander stehen. Es dürfen sich keine Möbel in einem Abstand von weniger als 0.5 m von der Ecke befinden. Falls diese obengenannten Bedingungen nicht von vier Raumecken erfüllt werden,

können nach ISO 16283-1 alternativ die Messungen auch in Ecken, bei denen die drei sich schneidenden Oberflächen Winkel von 45° bis 135° Grad aufweisen (z. B. bei Dachschrägen), und/oder in Ecken, nahe denen Gegenstände angeordnet sind, und/oder in Ecken, bei denen ein Gegenstand wie ein Schrank eine der sich schneidenden Oberflächen bildet, durchgeführt werden.

In der experimentellen Untersuchung wurden die Schalldruckpegel in allen freien Raumecken mit Ausnahme der, in welcher sich der Lautsprecher für die Anregung oder Möbelstücke befanden, gemessen. Anschliessend wurden aus den gemessenen Maximalpegeln sowie den mittleren Schalldruckpegeln des Standardverfahrens für die jeweils 10 Datensets der mittlere Schalldruckpegel in kleinen Räumen nach Gleichung 3 bestimmt.

2.1.4 Mittlerer Schalldruckpegel aus Messung entlang der Raumdiagonalen

Dieses nicht normierte Verfahren zur Ermittlung des mittleren Schalldruckpegels in Räumen bei tiefen Frequenzen mit modalen Schallfeldern wurde von Moorhouse [Moorhouse, 2006] vorgestellt und experimentell sowie numerisch für einen unmöblierten Raum validiert. Es basiert auf der Annahme, dass auf Grund der Verteilung des Schalldruckpegels mit Minima und Maxima durch stehende Wellen in Räumen, der mittlere Schalldruckpegel entlang einer der Raumdiagonalen sehr gut mit dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum übereinstimmt.

In der experimentellen Untersuchung in dieser Studie wurde das Verfahren als mögliche Alternative zu den oben beschriebenen Verfahren nach ISO 16283-1 getestet. Hierbei wurde mit minimalem zusätzlichem Aufwand der Schalldruckpegel an sechs Messpunkten entlang jeder Raumdiagonale gemessen und anschliessend ungewichtet energetisch gemittelt.

2.2 Verwendete Messkette und Auswertung

Die massgebliche Grösse im Mittelpunkt der experimentellen Untersuchung ist der Schalldruckpegel in den Terzbändern 50 Hz, 63 Hz sowie 80 Hz an verschiedenen Messpunkten im Raum. Da diese Grösse jedoch die Summe der Schallleistung in einem bestimmten Frequenzbereich, z. B. im 50 Hz Terzband im Frequenzbereich von 44 Hz bis 56 Hz, beschreibt, ist sie für eine detaillierte Untersuchung des Einflusses von einzelnen Raummoden, die sehr schmalbandigen Einfluss haben, auf den Terzband-Pegel ungeeignet. Um Änderungen am gemessenen Schalldruckpegel in Terzbändern auf Grund von Änderung von Moden bzw. deren Eigenfrequenzen und diese wiederum auf Modifikationen am Raum zurückführen zu können oder zur Validierung der analytisch oder numerisch berechneten Eigenfrequenzen und Frequenzgänge, sind detailliertere schmalbandige Messung des Schalldruckfrequenzganges notwendig.

Aus diesem Grund wurde an Stelle des absoluten Schalldruckpegels in Terzbändern die sogenannte Impulsantwort, beziehungsweise im Frequenzbereich die Raumübertragungsfunktion, zwischen der Quelle (dem Lautsprecher) und dem Empfänger (Messpositionen) mittels dem sogenannten Dekonvolutionsverfahren ermittelt. Hierbei wird die Raumantwort zu einem bekannten Anregesignal gemessen und aus diesen beiden Signalen mittels Dekonvolution die Impulsantwort und die Übertragungsfunktion des Raumes bestimmt. Diese beschreibt dann schmalbandig die Beziehung zwischen der Amplitude und der Phasenlage des Anregesignals und dem Schallsignal an der Empfangsposition im Raum.

Die Vorteile dieser Messmethode sind vielfältig. Zum einen sind schmalbandige Analysen des Schalldrucks möglich. Aus diesen Werten können zusätzlich Terzband-Spektren ermittelt werden, die im Mittelpunkt des eigentlichen Interesses dieser Studie stehen. Des Weiteren sind die Datensätze normiert, d. h. bei Verwendung einer linearen Schallquelle (die abgestrahlte Schallleistung ist proportional zur Erregerspannung) sind die Amplituden der Übertragungsfunktion für gleiche Anrege- und Empfangsposition unabhängig vom verwendeten Anregesignal und beschreiben sehr gut nur die tatsächlich vorgenommenen Änderungen im Raum, z. B. durch Veränderungen an der Möblierung. Als letztes bietet diese Methode auch

zahlreiche Vorteile bei der Messung, da so gezielt einzelne Frequenzen angeregt werden können und so Einflüsse durch Störgeräusche verringert werden.

Für die Messung wurde die kommerziell verfügbare Raumakustik Messsoftware *MReverb* von Müller BBM verwendet in der das oben beschriebene Messverfahren implementiert ist. Die Messsignale wurden von dem Messcomputer mittels einem angeschlossenen Audiointerface Typ 896 vom Hersteller Motu mit einer Sampling-Rate von 48 kHz generiert und erfasst. An dieses waren für die Messung der Schallsignale bis zu 8 kalibrierte Studiomikrofone des Typs 4006 von Brüel und Kjaer, sowie für die Schallerzeugung ein Aktivlautsprecher Typ 6301B von Fostex angeschlossen. Als Anregesignal wurde ein Sinesweep-Signal mit einem Rosa-Spektrum, d. h. einer Betonung der tiefen Frequenzen, einer Länge in der Regel von 20 Sekunden und einer Begrenzung auf den Frequenzbereich bis inklusive zum 630 Hz-Band verwendet. Die Messkette ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

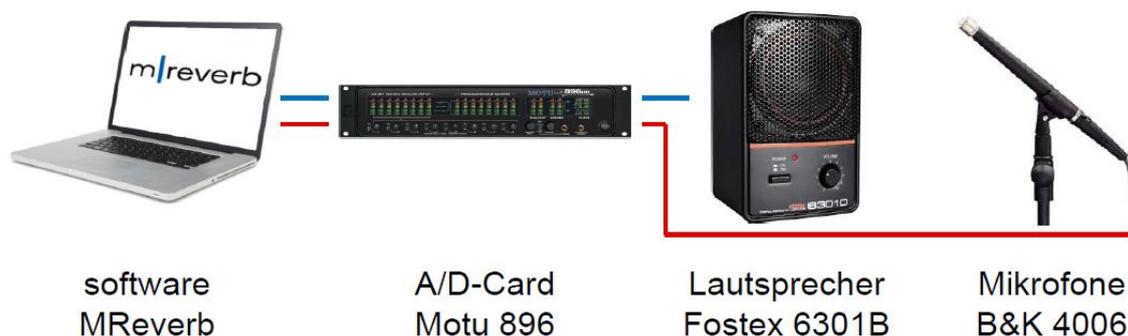


Abbildung 2: Schematische Darstellung der für die experimentelle Untersuchung verwendeten Messkette

Die verwendete Messsoftware erlaubt eine direkte Begutachtung der Qualität der Ergebnisse während der Messung an Hand von zahlreichen Parametern (Raumantwort, Impulsantwort, Schalldruckpegel in Terzbändern, Signal-zu-Rausch-Abstand, etc.). Als Rohdaten zur weiteren Signalverarbeitung wurden jedoch lediglich die gemessene Raumantwort, sowie die ermittelte Raumimpulsantwort für jeden Messpunkt als .wav-Datei gespeichert. Für die weitere Analyse wurden diese Dateien in die Software Matlab importiert, aus den Zeitdaten wurden die Frequenzgänge mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) ermittelt und anschliessend zu Terzband-Spektren gefiltert. Basierend auf diesen Daten wurden dann verschiedene räumliche Mittelungen gemäss den in Abschnitt 2.1 angewandten Messprotokollen durchgeführt.

2.3 Messaufbau und Ausführung

Für die vorliegende Untersuchung wurde am Laboratory for Acoustics & Noise Control an der Empa in Dübendorf eigens ein Versuchsraum aufgebaut. In einen existierenden Prüfraum (SH 132.1) wurde, in dem zwei der existierenden Innenwände aus Beton als Raumbegrenzung benutzt wurden, ein Versuchsraum mit den Dimensionen 3.7 m x 2.75 m x 2.4 m (L x B x H) realisiert. Die zwei zusätzlich benötigten Aussenwände wurden in Ziegelstein, raumseitig verputzt, aufgebaut. Als Decke wurde eine vorhandene Holzdecke, 140 mm Brettsperholz, verwendet. Somit wird ein Raumvolumen von 24.4 m³ erzielt (<25 m³).

In Abbildung 3 ist schematisch der Aufbau des für vorliegende Untersuchung verwendeten Raumes innerhalb des existierenden Prüfraumes dargestellt:

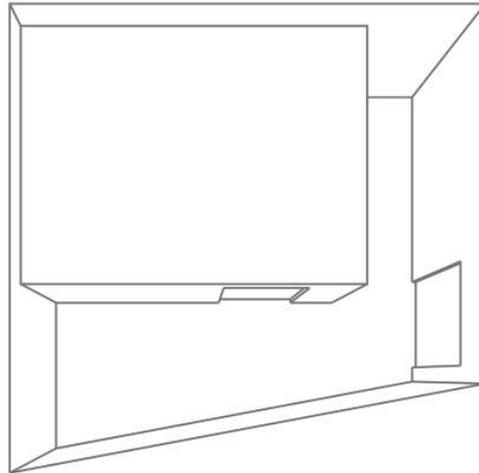


Abbildung 3: Für vorliegende Untersuchung aufgebauter Versuchsraum in existierendem Prüfraum am Laboratory for Acoustics & Noise Control der Empa in Dübendorf

In einer solchen Konfiguration ist es möglich, die Schallquelle sowohl innerhalb als auch ausserhalb des Raumes zu positionieren. Es kann untersucht werden, ob sich am sich etablierenden Schallfeld innerhalb des Raumes signifikante Änderungen feststellen lassen für den Fall, dass die Schallquelle sich ausserhalb des Raumes befindet, in der realen Situation beispielsweise beim Nachbarn.

Der aufgebaute Raum wurde messtechnisch sowohl im leeren als auch im möblierten Zustand untersucht. Als typische Möblierung für einen Raum dieser Dimension wurde ein Bett (90 cm), ein Sofa und ein kleiner Beistelltisch (siehe Abbildung 4) vorgesehen. Die Positionierung der Möbelstücke innerhalb des Raumes ist für eine untersuchte Situation schematisch dargestellt in Abbildung 5. Um das Schallfeld innerhalb des Raumes möglichst akkurat und in einem dichten Messraster mit einem Abstand von 50 cm zwischen den Messpunkten messtechnisch erfassen zu können wurde eine Vorrichtung, wie sie in Abbildung 6 zu sehen ist realisiert. Für die Erfassung der Schalldruckegel in den Raumecken sowie den Punkten entlang der Raumdiagonalen wurden Stative verwendet.



Abbildung 4: Möblierung für Prüfraum: Bett 90 cm, Zweier-Sofa und kleiner Beistelltisch



Abbildung 5: Schematische Darstellung einer typischen Möblierungssituation des untersuchten Raumes



Abbildung 6: Realisierte mechanische Vorrichtung, um Schallfeld im Raum effizient in feinem Raster messtechnisch erfassen zu können

2.4 Resultate

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung werden im Folgenden dargestellt und erläutert. Die gemessenen absoluten Schalldruckpegel hängen von zahlreichen Faktoren, wie z. B. der Amplitude des Anregesignals, der Anregesituation (Sende- oder Empfangsraum) und dem Möblierungszustand ab. Daher, werden die Ergebnisse grösstenteils in Form von Schalldruckpegeldifferenzen ausgedrückt, um eine einheitliche Darstellung in den Diagramm zu erhalten. Als Referenz wird der jeweils gemessene tatsächliche mittlere Schalldruckpegel im Raum nach Abschnitt 2.1.1 verwendet.

2.4.1 Signifikanz – Wiederholbarkeit von Messungen

Der gemessene mittlere tatsächliche Schalldruckpegel im Raum wird im Folgenden als Referenz bei dem Vergleich der verschiedenen Mittelungsmethoden verwendet. Um eine Aussage über die Signifikanz von Abweichung von diesem Mittelwert treffen zu können ist es daher unabdingbar, die Messunsicherheit der verwendeten Messmethode quantifizieren zu können. Für die Wiederholung der Messung, d. h. die Mikrofone wurden zwischen zwei Messungen nicht verschoben, ergaben sich hierbei vernachlässigbar kleine maximale Änderungen des gemessenen tatsächlichen mittleren Schalldruckpegels im Raum von weniger als ± 0.06 dB. Das bedeutet, die Unsicherheit für wiederholte Messungen an einem Punkt sind vernachlässigbar gering.

Für eine Reproduktion der Messung, d. h. die Mikrofone werden zwischen den Messungen verschoben, ist erfahrungsgemäss eine grössere Messunsicherheit in der Grössenordnung von ± 1 dB zu erwarten. Da aber für die Auswertung des tatsächlichen mittleren Schalldruckpegels, sowie die Berechnung der verschiedenen Mittelwerte Messdaten aus der gleichen Messung verwendet werden, sind bereits Unterschiede in der Grössenordnung von 1 dB als signifikant zu bewerten.

2.4.2 Mittlerer Schalldruckpegel im Raum – Mittelung gemäss Standardverfahren in ISO 16283-1

Der mittlere Schalldruckpegel im Raum wurde mit dem Standardverfahren in ISO 16283-1 für den Versuchsraum für vier Situationen bestimmt:

1. Unmöbliert (leer), Anregung mit Lautsprecher im Raum (Senderraumsituation)
2. Möbliert mit Standardmöblierung, Anregung mit Lautsprecher im Raum (Senderraumsituation)
3. Unmöbliert (leer), Anregung mit Lautsprecher von aussen (Empfangsraumsituation)
4. Möbliert mit Standardmöblierung, Anregung mit Lautsprecher von aussen (Empfangsraumsituation)

Für jede Situation wurden aus dem Messraster 10 Sets mit jeweils 5 Messpunkten gebildet und der Schalldruckpegel an diesen Punkten energetisch gemittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 bis Abbildung 10 für jede Situation als die Pegeldifferenz zwischen dem mittleren Pegel nach dem Standardverfahren und dem mittleren tatsächlichen Schalldruckpegel im Raum dargestellt. Negative Ergebnisse bedeuten, der mittlere Pegel des Standardverfahrens nach ISO ist geringer als der tatsächliche mittlere Schalldruckpegel im Raum. Bei positiven Ergebnissen ist dies umgekehrt der Fall.

Neben den einzelnen Ergebnissen für die 10 Datensets ist auch deren Mittelwert angegeben. Als weitere Referenz ist die Waterhouse-Korrektur dargestellt, die den Zusammenhang zwischen dem Diffusfeldpegel und dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum für ein ideal diffuses Schallfeld, d. h. für den Fall, dass die Wellenlänge sehr viel kleiner als die Raumabmessungen ist, beschreibt.

Wie zu erwarten sind die mittleren Schalldruckpegel des Standardverfahrens in allen Frequenzbändern geringer als der jeweilige tatsächliche mittlere Schalldruckpegel im Raum. Der Verlauf der Kurve entspricht jedoch unterhalb ca. 125 Hz nicht der systematischen Abweichung die gemäss der Waterhouse-Korrektur zu erwarten wäre. Die mittleren Diffusfeldpegel, die nach ISO 16283-1 ermittelt wurden, verzeichnen einen Anstieg, während hingegen die Waterhouse-Korrektur weiter exponentiell abfällt. Dies bestätigt die Annahme, dass das Schallfeld im Raum bei diesen Frequenzen stark modal geprägt ist. Die Wellenlänge

(6.80 m bei 50 Hz, 3.40 m bei 100Hz) entspricht in diesem Frequenzbereich den Raumdimensionen und so bestimmen einzelne Raummoden die Schalldruckverteilung im Raum. Das Schallfeld weist somit kein Diffusfeld mit einem konstanten Schalldruckpegel im zentralen Volumen des Raums und einem Schalldruckanstieg nahe den Raumbegrenzungsflächen auf, die Annahmen der Waterhouse-Korrektur sind somit nicht mehr erfüllt.

Ein Vergleich der beiden Messungen für die Senderraumsituation in Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigt deutlich, dass das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel und dem jeweiligen Mittelwert der 10 Datensätze für den leeren und möblierten Raum sehr gut übereinstimmt. Die Schalldruckpegel-Differenz beträgt ca. -1 dB bei 50 Hz, fällt auf ca. -4 dB bei 160 Hz ab und steigt anschliessend wieder auf -2 dB bei 630 Hz an. Die Streuung der Ergebnisse der einzelnen Datensets ist für die möblierte Situation etwas grösser.

Ein Vergleich der beiden Messungen für die Empfangsraumsituation in Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigt denselben tendenziellen Verlauf und Streuung wie bei der Senderraumsituation.

Ein Vergleich der Ergebnisse für alle vier Situation in Abbildung 11 zeigt deutlich auf, dass das Verhältnis zwischen dem mittleren Schalldruckpegeln abgetastet nach dem Standardverfahren der ISO 16283-1 und dem tatsächlichen mittleren Schalldruck im Raum gemessen in dem Messraster nicht durch die in den Raum eingebrachte Möblierung beeinflusst wird. Alle Ergebnisse liegen in einem Band mit ca. 1 dB Bandbreite. Die Änderung der Anregesituation hat ebenfalls nur im 100 Hz Terzband einen geringfügigen Einfluss und für die Empfangsraum Situation werden hier geringfügig ca. 1 – 2 dB geringere Pegeldifferenzen festgestellt, die signifikant sind, da sie Ausserhalb der Unsicherheit der Messergebnisse dargestellt in Form einer Standardabweichung liegen.

Kurzgefasst bedeutet dies, es gibt eine Beziehung, welche das Verhältnis zwischen dem mittleren tatsächlichen Schalldruckpegel und dem mit der Abtastung gemäss dem Standardverfahren nach ISO 16283-1 ermittelten Mittelwert für Schallfelder in kleinen Räumen bei tiefen Frequenzen beschreibt. Diese Beziehung ist unabhängig von dem Möblierungszustand in dem Raum. Die direkte und indirekte Anregung des Schallfeldes mit dem Lautsprecher als Sende- oder Empfangsraum hat ebenfalls nur einen geringfügigen Einfluss auf diese Beziehung.

Bei Frequenzen weit oberhalb des in der Untersuchung massgeblichen Bereiches wird dieser Zusammenhang annähernd durch die sogenannte Waterhouse-Korrektur beschrieben. Im Frequenzbereich unterhalb 100 Hz würde eine Abschätzung des tatsächlichen mittleren Schalldruckpegels im Raum aus dem Mittelwert gemäss dem Standardverfahren nach ISO 16283-1 und der Waterhouse-Korrektur zu erheblichen Fehlern führen.

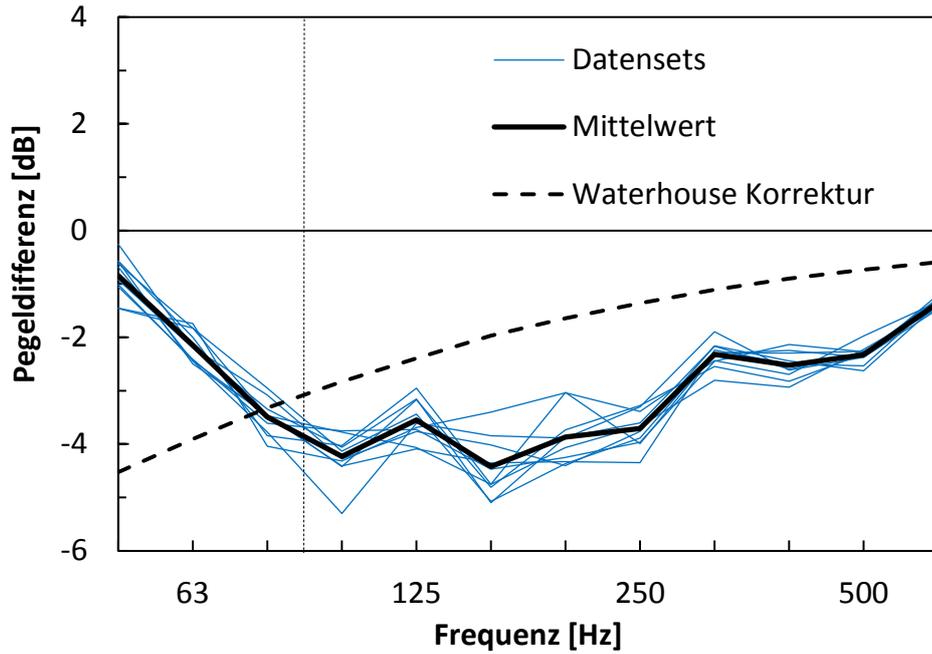


Abbildung 7: Differenz zwischen dem mittleren Schalldruckpegel des Standardverfahrens nach ISO 16283-1 und tatsächlichem mittleren Schalldruckpegel im Raum für Situation 1 (Raum leer, Senderraumsituation). Ergebnisse für die 10 Datensätze, deren Mittelwert und Waterhouse-Korrektur C_w für Raumgeometrie

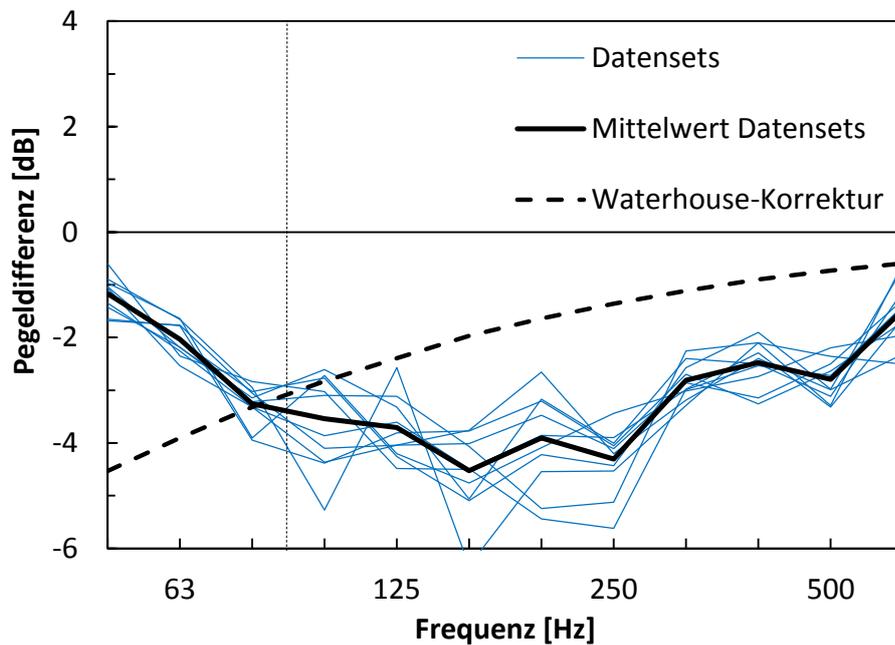


Abbildung 8: Differenz zwischen dem mittleren Schalldruckpegel des Standardverfahrens nach ISO 16283-1 und tatsächlichem mittleren Schalldruckpegel im Raum für Situation 2 (Raum möbliert, Senderraumsituation). Ergebnisse für die 10 Datensätze, deren Mittelwert und Waterhouse-Korrektur C_w für Raumgeometrie

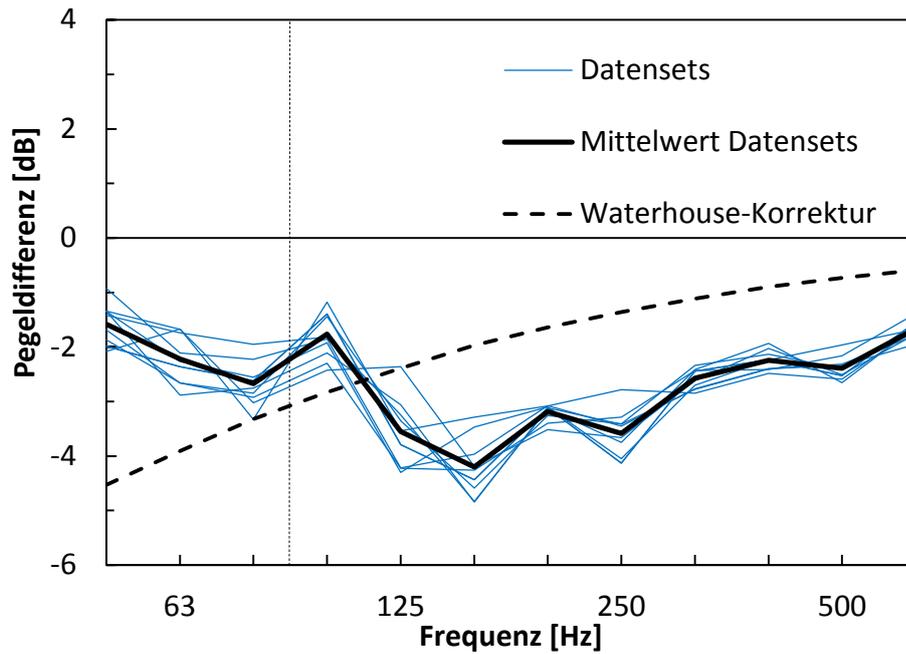


Abbildung 9: Differenz zwischen dem mittleren Schalldruckpegel des Standardverfahrens nach ISO 16283-1 und tatsächlichem mittleren Schalldruckpegel im Raum für Situation 3 (Raum leer, Empfangsraumsituation). Ergebnisse für die 10 Datensätze, deren Mittelwert und Waterhouse-Korrektur C_w für Raumgeometrie

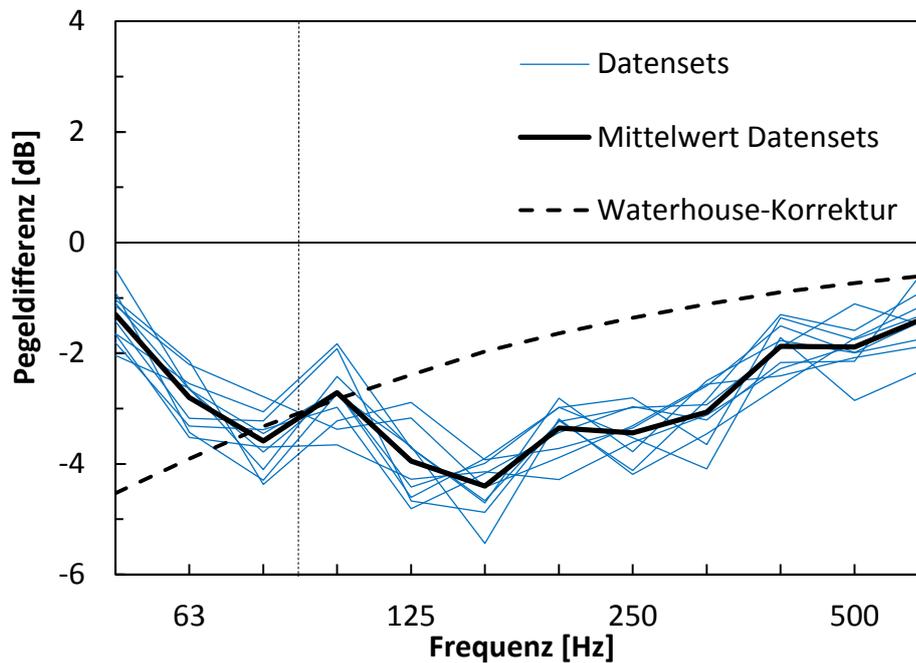


Abbildung 10: Differenz zwischen dem mittleren Schalldruckpegel des Standardverfahrens nach ISO 16283-1 und tatsächlichem mittleren Schalldruckpegel im Raum für Situation 4 (Raum möbliert, Empfangsraumsituation). Ergebnisse für die 10 Datensätze, deren Mittelwert und Waterhouse-Korrektur C_w für Raumgeometrie

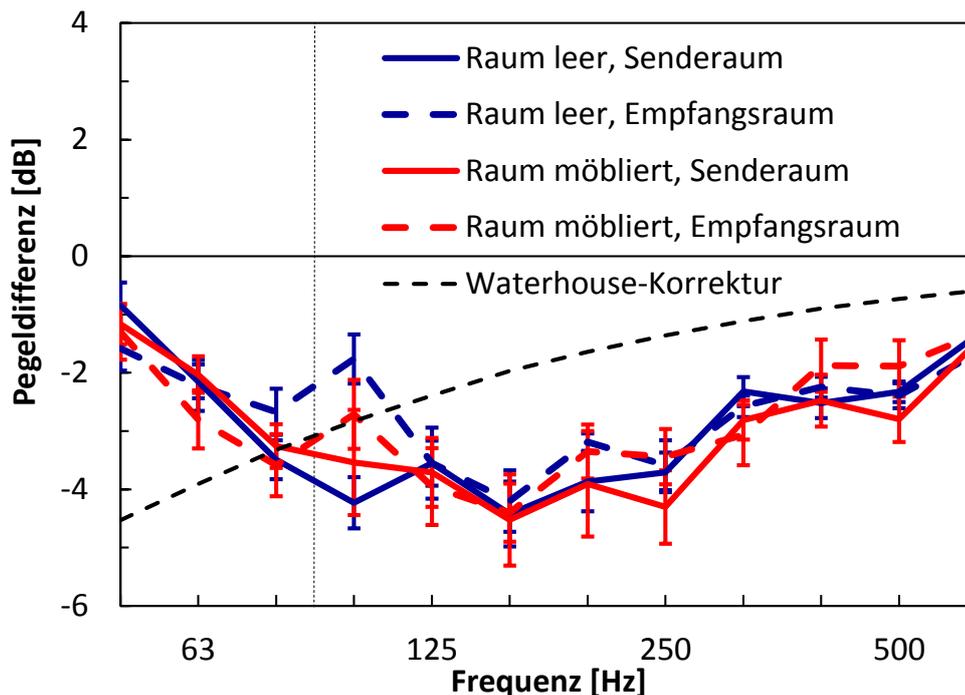


Abbildung 11: Differenz zwischen dem mittleren Schalldruckpegel des Standardverfahrens nach ISO 16283-1 und tatsächlichem mittleren Schalldruckpegel im Raum für alle vier Situationen, Mittelwert der vier Datensätze mit deren Streuung ausgedrückt in einer Standardabweichung und Waterhouse-Korrektur C_w für Raumgeometrie

2.4.3 Schalldruckpegel in den Ecken - Einfluss der Messposition

Beim Verfahren für die Abtastung und Mittelung der Schalldruckpegel bei tiefen Frequenzen in kleinen Räumen nach ISO 16283-1 wird der Schalldruckpegel zusätzlich unterhalb 100 Hz in den Raumecken gemessen; anschliessend wird der Maximalpegel bestimmt, der für eine gewichtete Mittelung mit den Ergebnissen des Standardverfahrens verwendet wird. Eine Frage, die oft aufgeworfen wird, ist die Abhängigkeit dieser Pegel von der jeweiligen Messposition. Diese Abhängigkeit wird im Folgenden zum Teil mit Hilfe von Extremsituation untersucht und verdeutlicht. Die Darstellung der Ergebnisse dieser Untersuchung sind auf den Frequenzbereich von 50 Hz bis 315 Hz reduziert.

2.4.3.1 Abstand der Messposition zu den Begrenzungsflächen

Als erster Schritt wurde der Abstand der Messpunkte zu den Raumbegrenzungsflächen untersucht. Nach ISO 16283-1 sollte dieser 30 cm bis 40 cm betragen. Im Zuge dieser Parameterstudie wurde in einer beliebigen Raumecke der Schalldruck auf einer Geraden mit jeweils 45°-Projektionswinkel zu allen Begrenzungsflächen beginnend von der Raumecke gemessen. Die Messungen erfolgten jeweils im 5 cm Raster von 5 cm bis 40 cm Abstand zur Raumecke. Ein Abstand von 40 cm von der Ecke entspricht in etwa einem Abstand von 30 cm von allen drei Begrenzungsflächen. Die geringeren Abstände wurden zur Verdeutlichung des Einflusses als Extremsituationen gewählt.

Die Messergebnisse für den leeren Raum sind in Abbildung 12 und für den möblierten Raum in Abbildung 13, wiederum normiert auf den tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum, dargestellt. Wie zu erwarten, sind die dargestellt Pegeldifferenzen positiv, d. h. die Schalldruckpegel in der Ecke sind grösser als der Raummittelwert.

Weiter ist deutlich zu erkennen, dass im massgeblichen Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz der Einfluss des Abstandes zur Ecke kleiner als 1 dB liegt und somit im Bereich der Messunsicherheit für eine reprodu-

zierte Messung. In diesem Frequenzbereich ist die örtliche Schalldruckverteilung im Raum durch einzelne Raummoden geprägt, welche in Abschnitt 3.2 in der analytischen und numerischen Untersuchung genauer analysiert werden. Das Schallfeld zeichnet sich in diesem Fall aus durch Schalldruckmaxima vor schallharten reflektierenden Oberflächen. Der Abstand des ersten Schalldruckminimums ist am geringsten für ebene Raummoden und beträgt $1/4$ -Wellenlänge. Diese beträgt für 50 Hz ca. 1.7 m und für 100 Hz ca. 0.85 m. Das bedeutet, der maximal zulässige Abstand von 0.4 m von den Begrenzungsflächen entspricht in dem massgeblichen Frequenzbereich weniger als $1/8$ -Wellenlänge und alle zugelassenen Mikrofonposition in den Raumecken liegen somit sicher im Bereich der Schalldruckmaxima aller Raummoden bei schallharten reflektierenden Raumboberflächen.

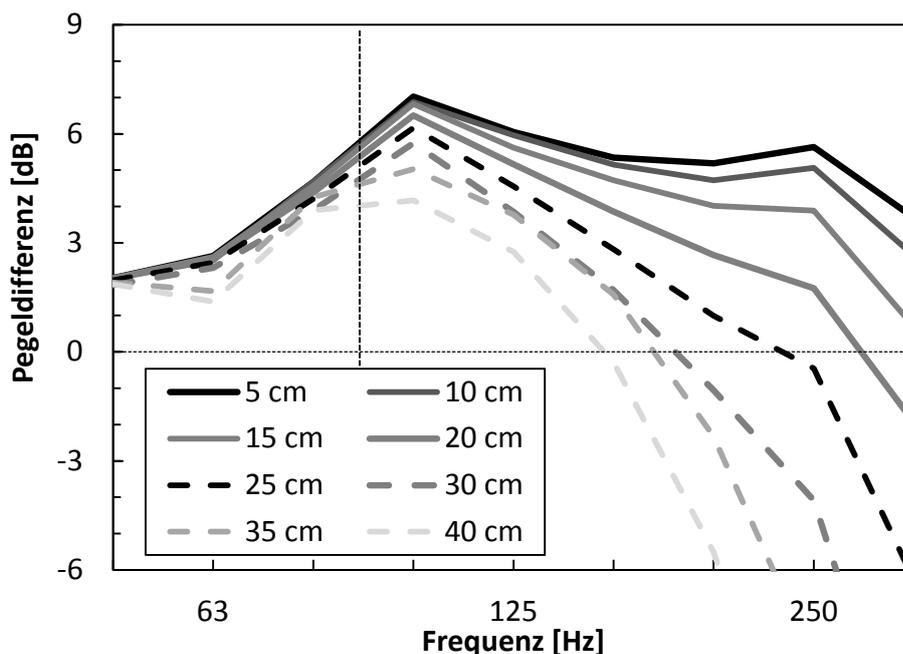


Abbildung 12: Differenz zwischen den im Abstand von 5 cm bis 40 cm von der Raumecke gemessenen Schalldruckpegeln und dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im leeren Raum

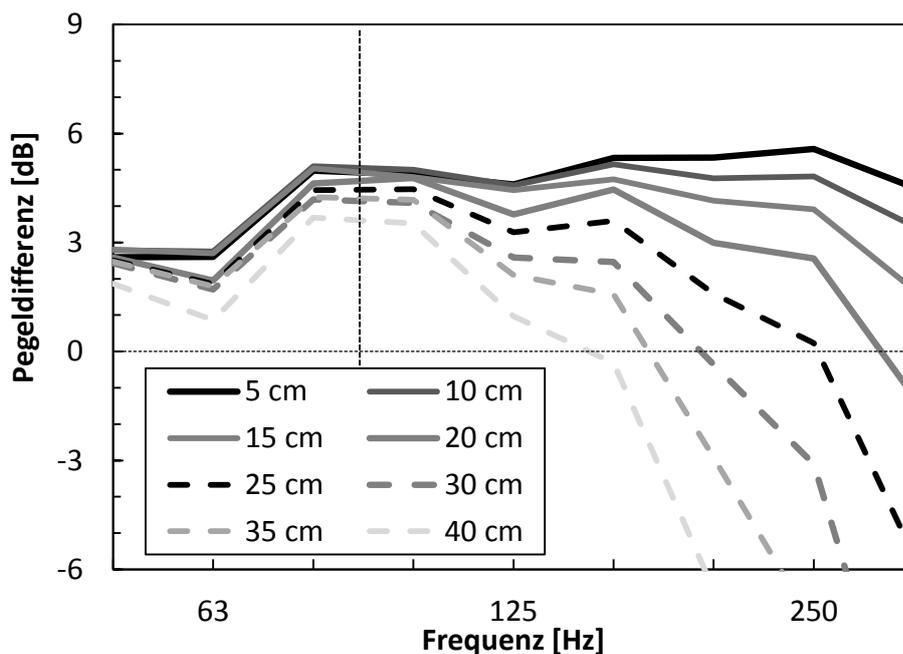


Abbildung 13: Differenz zwischen den im Abstand von 5 cm bis 40 cm von der Raumecke gemessenen Schalldruckpegeln und dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im möblierten Raum

Im Bereich oberhalb 100 Hz ist deutlich zu sehen, dass mit steigender Frequenz, d. h. abnehmender Wellenlänge, wie zu erwarten der gemessene Schalldruckpegel mit Abstand zur Ecke deutlich abnimmt. In diesem Frequenzbereich sind jedoch Messungen in den Ecken gemäss ISO 16283-1 ohnehin irrelevant. Der Vergleich der Verläufe für den leeren Raum und den möblierten Raum zeigt zudem, dass der ermittelte Verlauf ebenfalls weitestgehend unabhängig vom der Raummöblierung ist, allenfalls im 100 Hz Band ist ein Einfluss mit etwa 2 dB höheren Pegeln im Leerraum erkennbar. Zusammengefasst wurde gezeigt, der Einfluss der tatsächlichen Messposition in dem in ISO 16283-1 definierten Bereich auf den gemessenen Schalldruckpegel in der Raumecke ist vernachlässigbar gering. Selbst für Extremsituationen, z. B. eine Messung in nur 5 cm Abstand von der Ecke, wurden unterhalb 100 Hz sehr geringe Abweichungen im Bereich von 1 dB ermittelt.

2.4.3.2 Abhängigkeit von der Raumecke

Als nächster Schritt wurde die Pegelverteilung in den Raumecken untersucht. Hierzu wurden bei der Senderaum-Situation die Pegel in den 7 Raumecken gemessen, in denen sich der Lautsprecher für die Raum-anregung nicht befand. Die Benennung der Ecken ist in Abbildung 14 gegeben, der Lautsprecher befand sich in der Ecke neben dem Eingang auf dem Boden.

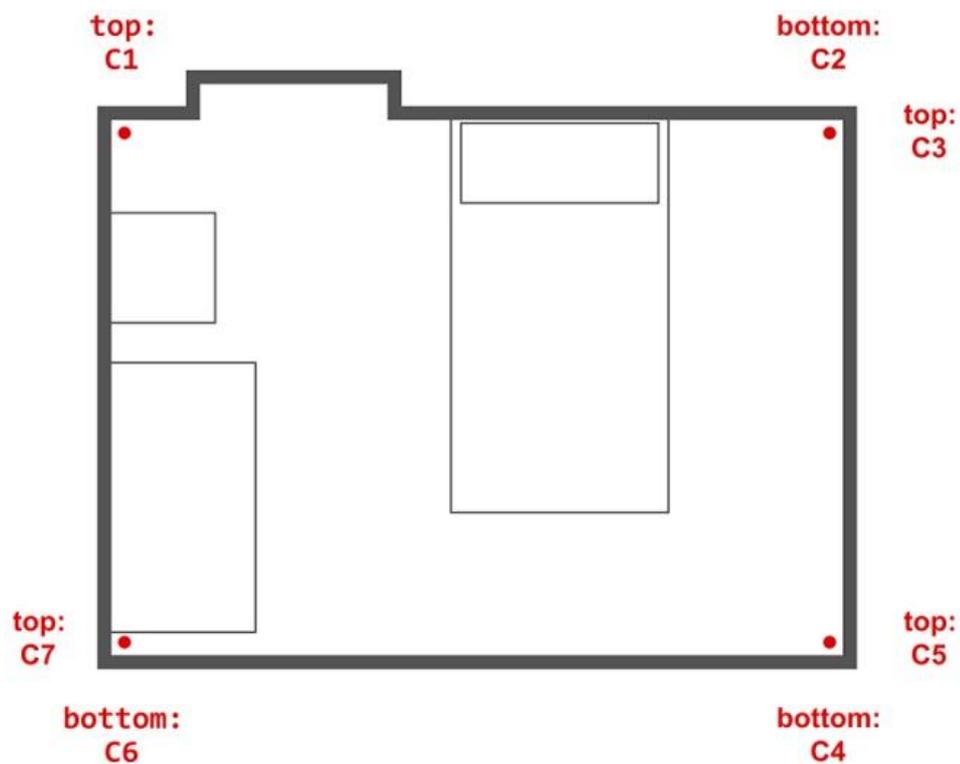


Abbildung 14: Raumsituation mit Benennung der Raumecken, (top: an der Decke, bottom: auf dem Boden)

Die Messergebnisse für den leeren Raum sind in Abbildung 15 und für den möblierten Raum in Abbildung 16, wiederum normiert auf den tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum, dargestellt. Wie zu erwarten sind die dargestellt Pegeldifferenzen ebenfalls positiv, d. h. die Schalldruckpegel in den Ecken sind grösser als der Raummittelwert.

Für den leeren Raum liegen die gemessenen Schalldruckpegel in allen Raumecken unterhalb von 160 Hz in einem Bereich mit einer Bandbreite von ca. 1.5 dB. Darüber ist deren Streuung wie zu erwarten grösser. Es kann keine systematisch Verteilung der Kurven, in Abhängigkeit davon ob sie sich in einer Ecke an der Decke oder am Boden gemessen wurden, festgestellt werden.

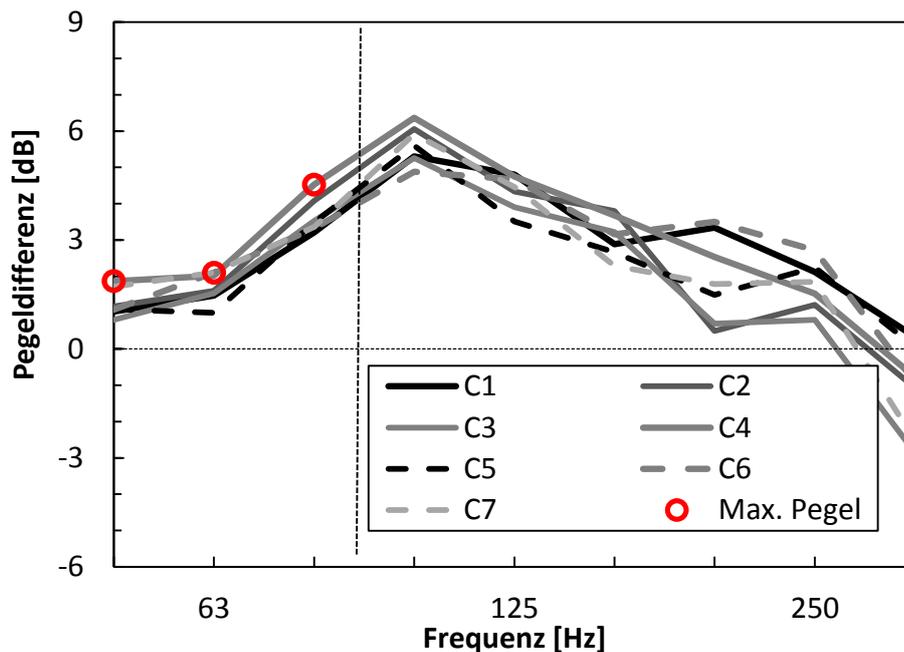


Abbildung 15: Differenz zwischen den in den Raumecken gemessenen Schalldruckpegeln und dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im leeren Raum, sowie maximaler Schalldruckpegel in den unverdeckten Ecken

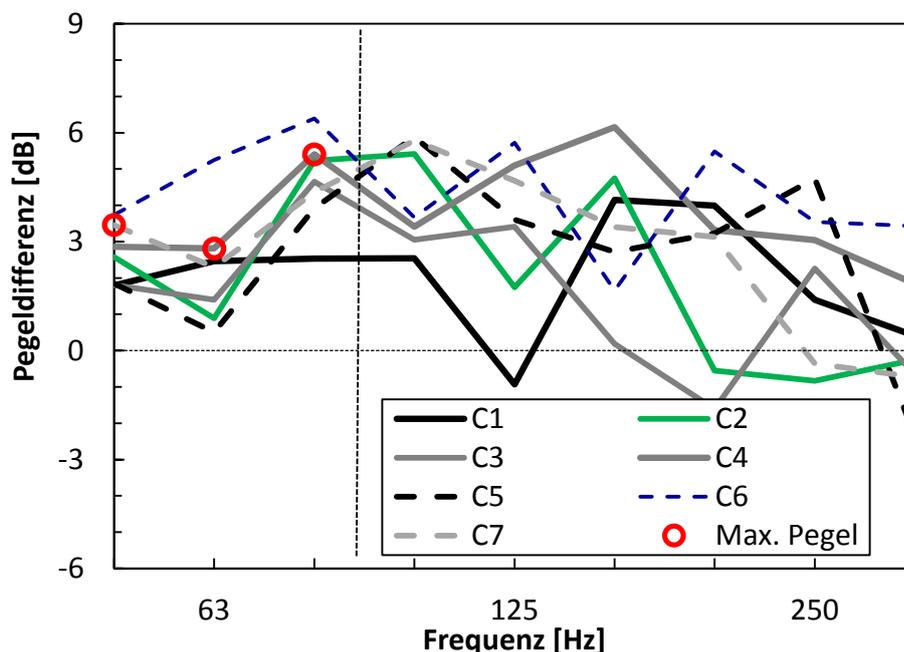


Abbildung 16: Differenz zwischen den in den Raumecken gemessenen Schalldruckpegeln und dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im leeren Raum, sowie maximaler Schalldruckpegel der unverdeckten Ecke n

Für den möblierten Raum in Abbildung 16 ist die Streuung der Messwerte auch bei tiefen Frequenzen weitaus grösser. Bei näherer Betrachtung ergibt sich jedoch hierbei, dass die blau gestrichelte Linie für Messpunkt C6 mit den sehr hohen gemessenen Pegeln bei tiefen Frequenzen direkt hinter dem Sofa liegt und somit nicht für die Auswertung gemäss ISO 16283-1 berücksichtigt werden darf. Ein weiterer Ausreisser ist die schwarze durchgezogene Kurve mit den Ergebnissen, welche in der oberen Ecke beim Eingang direkt über dem Lautsprecher gemessen wurden. Diese zeichnet sich durch viel geringere gemessene Pegel im Bereich von 80 Hz bis 125 Hz aus.

Nach Ausschluss dieser beiden Kurven, weisen die übrigen Messergebnisse unterhalb 125 Hz eine Bandbreite von ca. 2 dB auf, und die Streuung ist somit etwas grösser als die Ergebnisse für den leeren Raum. Der Abstand des Bettes zur Ecke C2 mit den grün gekennzeichneten Ergebnissen betrug 0.8 m. Dieser ist somit grösser als der minimal erlaubte Abstand von 0.5 m nach ISO 16283-1, die Ergebnisse in dieser Ecke dürfen somit bei der Auswertung berücksichtigt werden. Dies ist auch an Hand des Messergebnisses gerechtfertigt, da die Kurve mit ihren Pegeln in mitten der Schar der übrigen Messergebnisse liegt. Gemäss ISO 16283-1 muss der Schalldruckpegel in mindestens 4 Raumecken, wovon sich 2 am Boden und 2 an der Decke befinden, gemessen werden. Nach Ausschluss der Ecke C6 hinter dem Sofa, bleiben somit nur noch die Ecken C4 und C6 am Boden für die Messung übrig, sowie zwei Punkte aus den Punkten C1, C3, C5 und C7. Somit wäre sichergestellt, dass zumindest bei 3 der vier gewählten Raumecken die Messergebnisse innerhalb der Kurvenschar mit der reduzierten Streuungsbreite liegen würden. Mit Ecke C4 am Boden würde im vorliegenden Fall sogar der Schalldruckpegel auf jeden Fall in einer Ecke gemessen werden, die in zwei Frequenzbändern den Maximalwert und in einem Frequenzband den zweitgrössten Wert mit nur ca. 0.6 dB unter dem Maximalwert aufweist.

2.4.4 Gewichteter Mittelwert nach ISO 16283-1 – Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen

Als nächster Schritt wird bei dem Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen in ISO 16283-1 aus dem Mittelwert des Standardverfahrens nach ISO 16283-1 aus Abschnitt 0 und dem Maximalpegel in den Raumecken aus Abschnitt 2.4.3 wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben ein gewichteter Mittelwert gebildet. In Abbildung 17 bis Abbildung 20 ist für die vier untersuchten Situationen aus Abschnitt 0 (Sende- und Empfangsraumsituation jeweils leer und möbliert) jeweils aus den mittleren Schalldruckpegel für die 10 Datensets des Standardverfahrens und dem Maximalwert aller gültigen Raumecken der gewichtete mittlere Schalldruckpegel im Raum berechnet. Die Ergebnisse sind ebenso wie in den vorangegangenen Diagrammen auf den tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum normiert.

In dem Frequenzbereich mit und oberhalb 100 Hz rechts der vertikalen gestrichelten Linie sind die Ergebnisse in Abbildung 17 bis Abbildung 21 identisch mit denen in Abbildung 7 bis Abbildung 11, da das Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen nur den Frequenzbereich links der gestrichelten Linie berücksichtigt. In diesem Bereich ist durch die gewichtete Mittelung mit den Maximalpegeln der Raumecken ein Anstieg der Werte zu verzeichnen. Der Sprung von etwa 4 dB zwischen dem 80 Hz und 100 Hz Terzband ist nicht physikalischer Natur, sondern auf den Übergang zwischen den beiden Verfahren und der unterschiedlichen Abtastung des Schallfeldes und anschliessender Mittelwertbildung zurückzuführen. Für die Senderraumsituation in Abbildung 17 und Abbildung 18 entspricht der gewichtete Mittelwert links der gestrichelten vertikalen Linie sehr gut dem gemessenen tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten der Datensets des leeren und möblierten Raums ist sehr gering und beträgt maximal ca. 1 dB im 80 Hz Band. Die Streuung der Werte der Datensets nimmt in diesem Bereich im Vergleich zur Standard Methode nach ISO 16283-1 ab, da für die Bildung der gewichteten Mittelwerte immer derselbe Satz mit Maximalpegeln gemessen in den Raumecken verwendet wurde. Die gleichen Feststellungen wie für die Senderraumsituationen gelten auch für die beiden Empfangsraumsituationen in Abbildung 19 und Abbildung 20. Der Einfluss der Möblierung auf den gewichteten Mittelwert ist sehr gering und beträgt maximal ca. 1 dB. Die gewichteten Mittelwerte sind jedoch für die Empfangsraumsituationen, wie auch in Abbildung 21 deutlich wird, tendenziell ca. 1-2 dB grösser als für die Senderraumsituation. Da bei den mittleren Raumpegeln des Standardverfahrens nur kleine Unterschiede festgestellt wurden, ist der Unterschied beim gewichteten Mittelwert folglich auf höhere Maximalpegel in den Raumecken bei den Empfangsraumsituationen zurückzuführen.

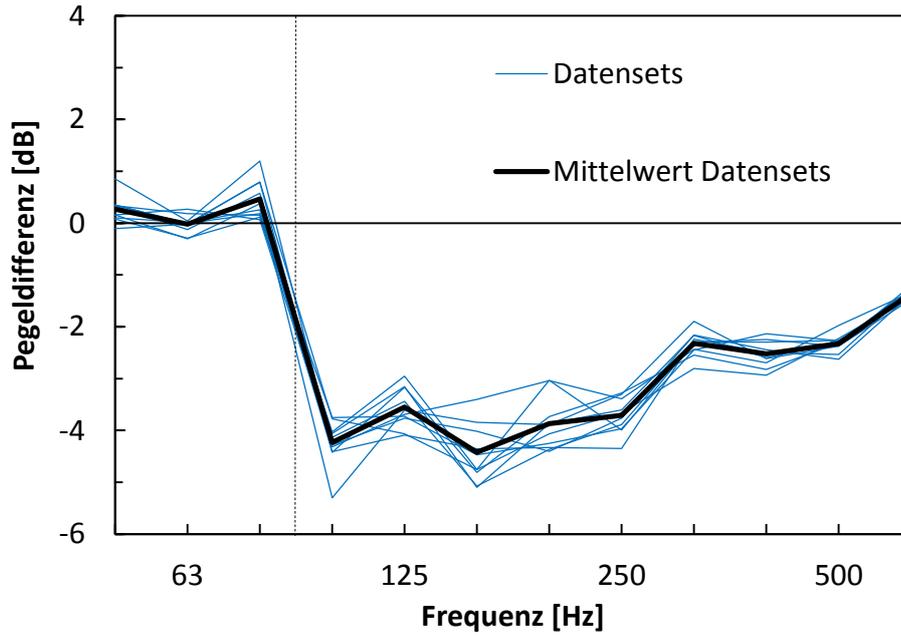


Abbildung 17: Differenz zwischen mittlerem Schalldruckpegel im Raum gemäss dem Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen in ISO 16283-1 und tatsächlichem mittlerem Schalldruckpegel im Raum für Situation 1 (Raum leer, Senderraumsituation). Ergebnisse für die 10 Datensätze und deren Mittelwert

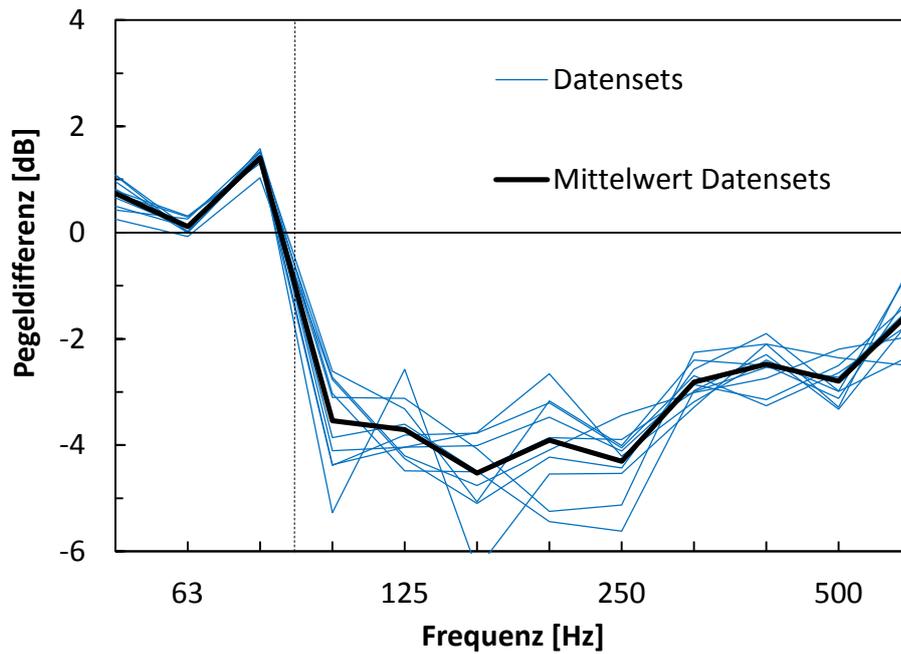


Abbildung 18: Differenz zwischen mittlerem Schalldruckpegel im Raum gemäss dem Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen in ISO 16283-1 und tatsächlichem mittlerem Schalldruckpegel im Raum für Situation 2 (Raum möbliert, Senderraumsituation). Ergebnisse für die 10 Datensätze und deren Mittelwert

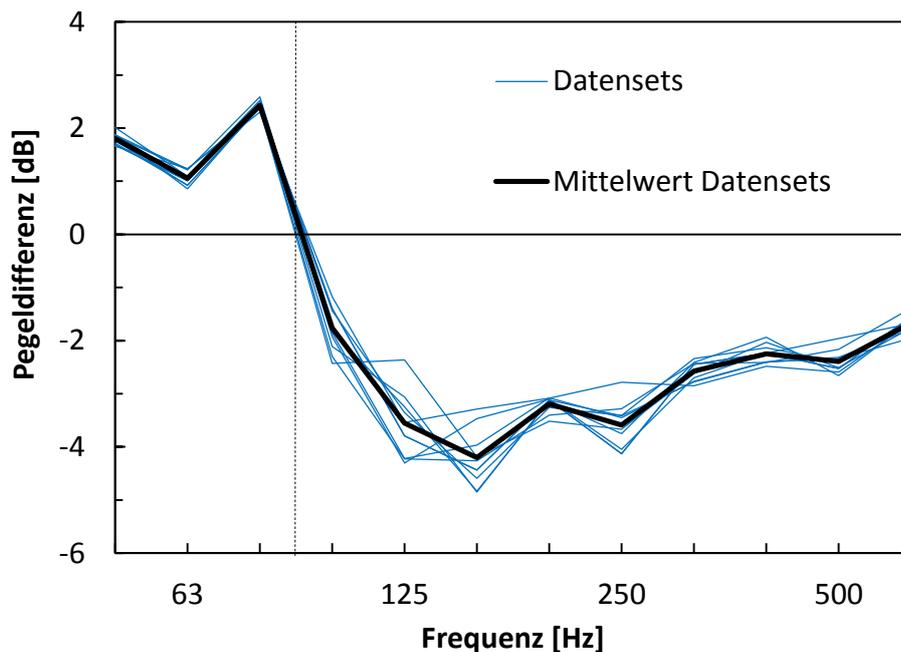


Abbildung 19: Differenz zwischen mittlerem Schalldruckpegel im Raum gemäss dem Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen in ISO 16283-1 und tatsächlichem mittlerem Schalldruckpegel im Raum für Situation 3 (Raum leer, Empfangsraumsituation). Ergebnisse für die 10 Datensätze und deren Mittelwert

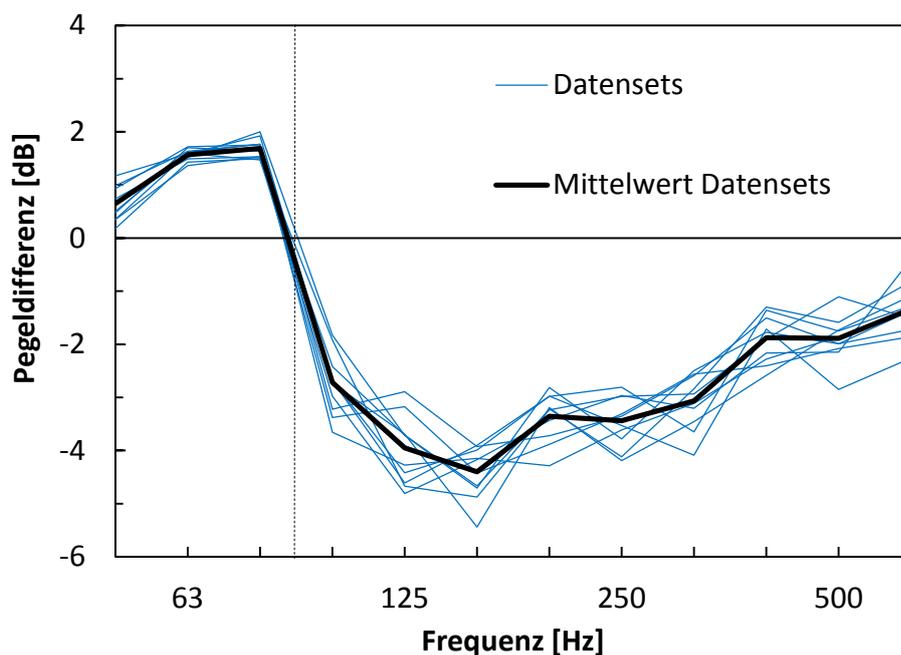


Abbildung 20: Differenz zwischen mittlerem Schalldruckpegel im Raum gemäss dem Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen in ISO 16283-1 und tatsächlichem mittlerem Schalldruckpegel im Raum für Situation 4 (Raum möbliert, Empfangsraumsituation). Ergebnisse für die 10 Datensätze und deren Mittelwert

Kurzgefasst bedeutet dies, in dem untersuchten Fall hat die Möblierung des Raumes einen geringeren Einfluss auf den gewichteten Mittelwert des Verfahrens für kleine Räume nach ISO 16283-1 als die Änderung der Anregesituation mit dem Lautsprecher. Während die gewichteten Mittelwerte für die Senderraumsituation sehr gut mit den tatsächlichen mittleren Schalldruckpegeln im Raum übereinstimmen, wurden für die Empfangsraumsituation tendenziell höhere gewichtete Mittelwerte bestimmt. Die Streuung reduziert sich durch die Mittelung der Ergebnisse des Standardverfahrens mit den Maximalpegeln der Raumecken. Dies ist dadurch begründet, dass bei der Untersuchung für die Mittelung mit den

Ergebnissen der jeweils 10 Datensets immer der gleiche Schalldruckmaximalpegel der Raumecke verwendet wurde. In Realität ist aber auch dieser Wert mit einer Unsicherheit behaftet, im Wesentlichen durch die Streuung der Messposition. Diese kann an Hand der Standardabweichung der Ergebnisse in Abschnitt 2.4.3.1 für jedes Frequenzband abgeschätzt werden. Sie beträgt im Mittel ca. 0.3 dB für die unmöblierte und ca. 0.5 dB für die möblierte Situation. Zur Bestimmung der kombinierten Unsicherheit des gewichteten Mittelwerts muss gemäss dem Fehlerfortpflanzungsgesetz diese Unsicherheit zu der Unsicherheit des mittleren Schalldruckpegels hinzu addiert werden. Die eigentliche kombinierte Unsicherheit beträgt dann ausgedrückt in der Standardabweichung für den unmöblierten Raum im Mittel ca. ± 0.6 dB und für den möblierten Raum ca. ± 0.8 dB

Der Übergang zwischen dem Verfahren für tiefe Frequenzen und Standardverfahren nach ISO 16283-1 führt zu einem künstlichen Sprung in den mittleren Schalldruckpegeln, der in den untersuchten Fällen ca. 4 dB beträgt.

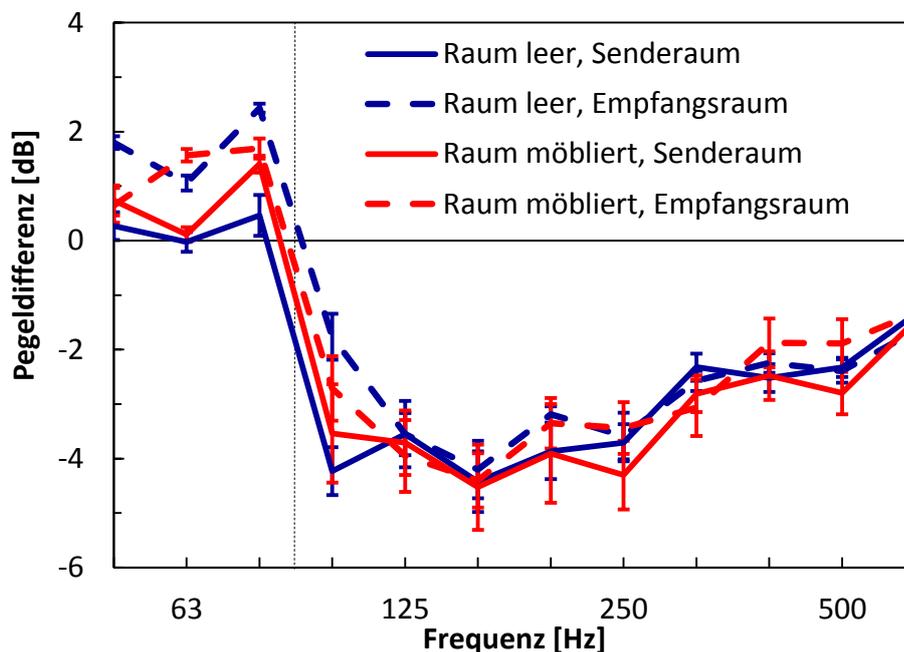


Abbildung 21: Differenz zwischen mittlerem Schalldruckpegel im Raum gemäss dem Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen in ISO 16283-1 und tatsächlichem mittlerem Schalldruckpegel im Raum, Vergleich der Mittelwerte der Datensets für alle vier Situationen und deren Unsicherheit ausgedrückt in einer Standardabweichung.

2.4.5 Mittlerer Schalldruckpegel aus Messung auf der Raumdiagonalen

Die Ergebnisse des alternativen, nicht-normiertem Verfahrens, bei dem der mittlere Schalldruck im Raum aus den Schalldruckpegeln, abgetastet entlang einer Raumdiagonalen, ermittelt werden, ist in Abbildung 22 bis Abbildung 25 für die Sende- und Empfangsraumsituation für jeweils den leeren und möblierten Raum dargestellt. Es werden die Ergebnisse für die vier einzelnen Raumdiagonalen, sowie deren Mittelwert gegeben. Für die Senderraumsituation wurde bei der Mittelwertbildung die Raumdiagonale, in deren einen Ecke sich der Lautsprecher zur Anregung befand, unberücksichtigt gelassen.

Die Mittelwerte der Ergebnisse sind für alle Situation in fast allen Frequenzbändern positiv und liegen im Bereich zwischen 0 dB und 2 dB, d. h. der tatsächliche mittlere Schalldruckpegel im Raum wird mit dieser Methode tendenziell leicht zu hoch eingeschätzt. Zu den höheren untersuchten Frequenzbändern nähern sich jedoch die Abweichungen aller Mittelwerte gegen null an.

Beim Vergleich der Leerraum-Situationen in Abbildung 22 und Abbildung 24 mit den möblierten Situationen in Abbildung 23 und in Abbildung 25 wird deutlich, dass die Streuung der Ergebnisse der einzelnen Diagonalen ohne Lautsprecher durch die Möblierung zu nimmt. Dies ist unter anderem dadurch begrün-

det, dass im möblierten Zustand zum Teil wegen der Möbelstücke nur Teildiagonalen abgetastet werden konnten.

Der Vergleich der Mittelwerte aller Situationen in Abbildung 26 zeigt jedoch auch deutlich, dass alle Mittelwerte sehr gut übereinstimmen. Sie liegen alle bis auf Ausnahme in wenigen Frequenzbändern in einem Bereich mit einer Bandbreite von 1 dB. Es ist kein systematischer Einfluss von Möblierung oder Anregesituation auf den mit dieser Methode gemessenen mittleren Schalldruckpegel im Raum festzustellen. Die Unsicherheit der Methode ausgedrückt in einer Standardabweichung beträgt ca. ± 1 dB unterhalb von 100 Hz und im Mittel ca. ± 1.5 dB darüber. Eine Reduzierung der Streuung könnte sicherlich durch ein Optimierung der Abtastung entlang der Diagonalen oder durch die Berücksichtigung von mehr als 6 Messpunkten erreicht werden.

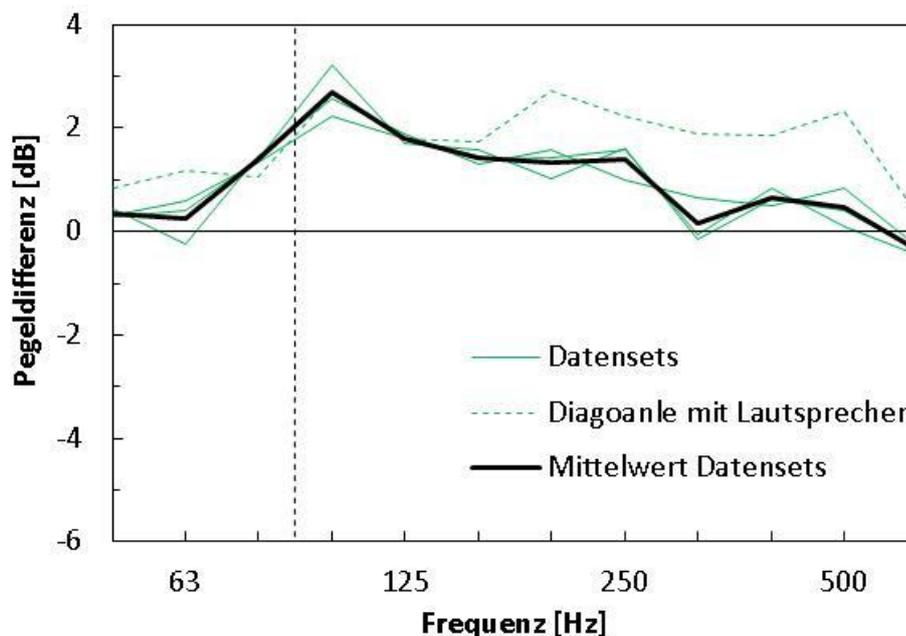


Abbildung 22: Differenz zwischen mittlerem Schalldruckpegel im Raum abgetastet entlang der Raumdiagonalen und tatsächlichem mittlerem Schalldruckpegel im Raum für Situation 1 (Raum leer, Senderaumsituation). Ergebnisse für die 4 Diagonalen und deren Mittelwert

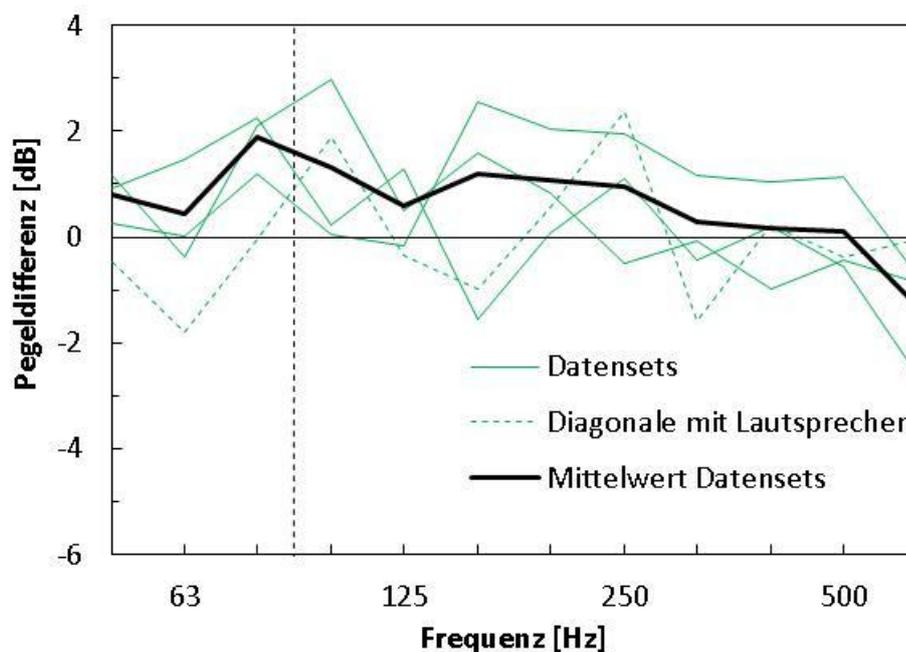


Abbildung 23: Differenz zwischen mittlerem Schalldruckpegel im Raum abgetastet entlang der Raumdiagonalen und tatsächlichem mittlerem Schalldruckpegel im Raum für Situation 2 (Raum möbliert, Senderraumsituation). Ergebnisse für die 4 Diagonalen und deren Mittelwert

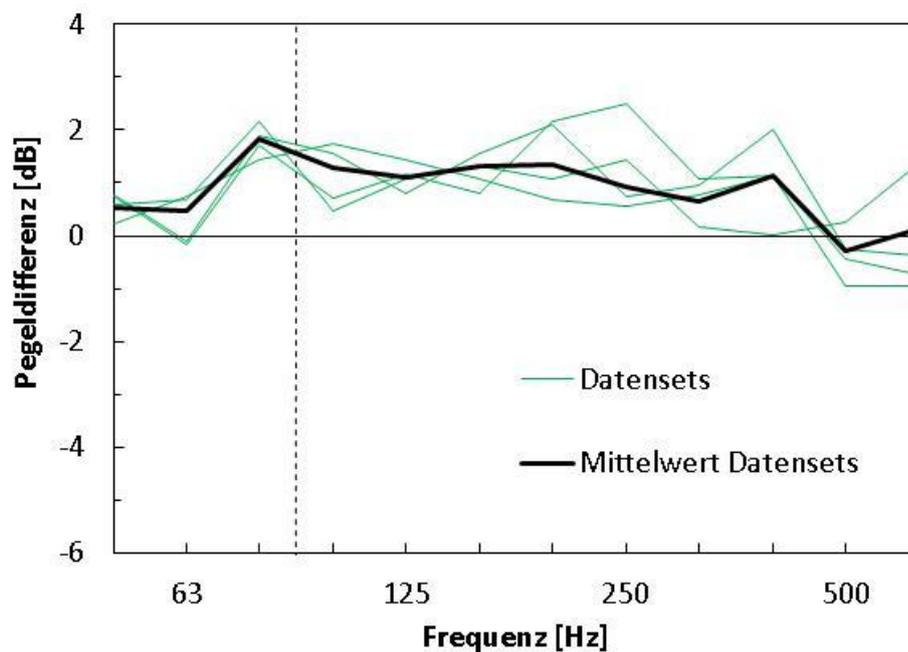


Abbildung 24: Differenz zwischen mittlerem Schalldruckpegel im Raum abgetastet entlang der Raumdiagonalen und tatsächlichem mittlerem Schalldruckpegel im Raum für Situation 3 (Raum leer, Empfangerraumsituation). Ergebnisse für die 4 Diagonalen und deren Mittelwert

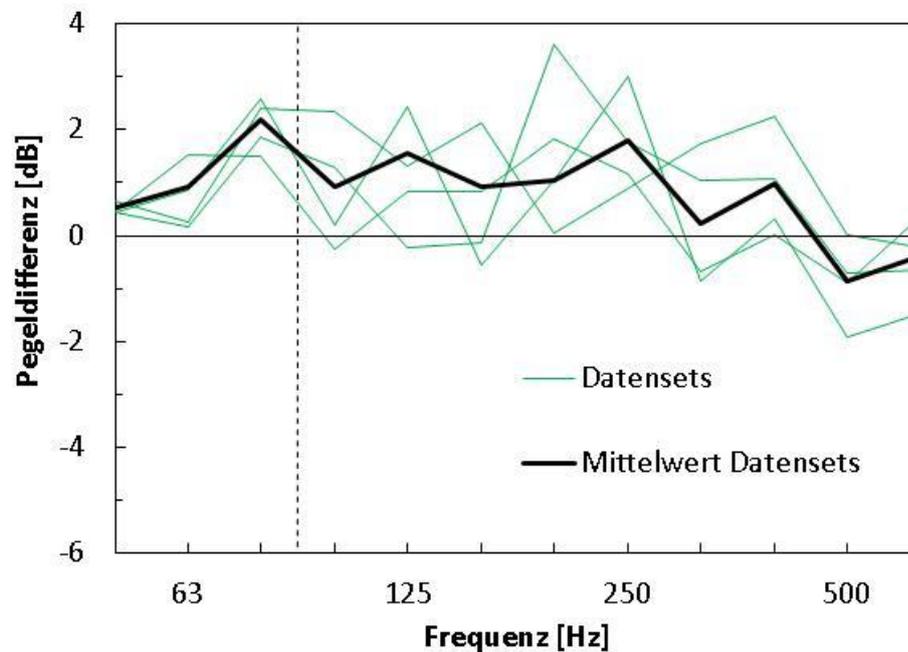


Abbildung 25: Differenz zwischen mittlerem Schalldruckpegel im Raum abgetastet entlang der Raumdiagonalen und tatsächlichem mittlerem Schalldruckpegel im Raum für Situation 4 (Raum möbliert, Empfangerraumsituation). Ergebnisse für die 4 Diagonalen und deren Mittelwert

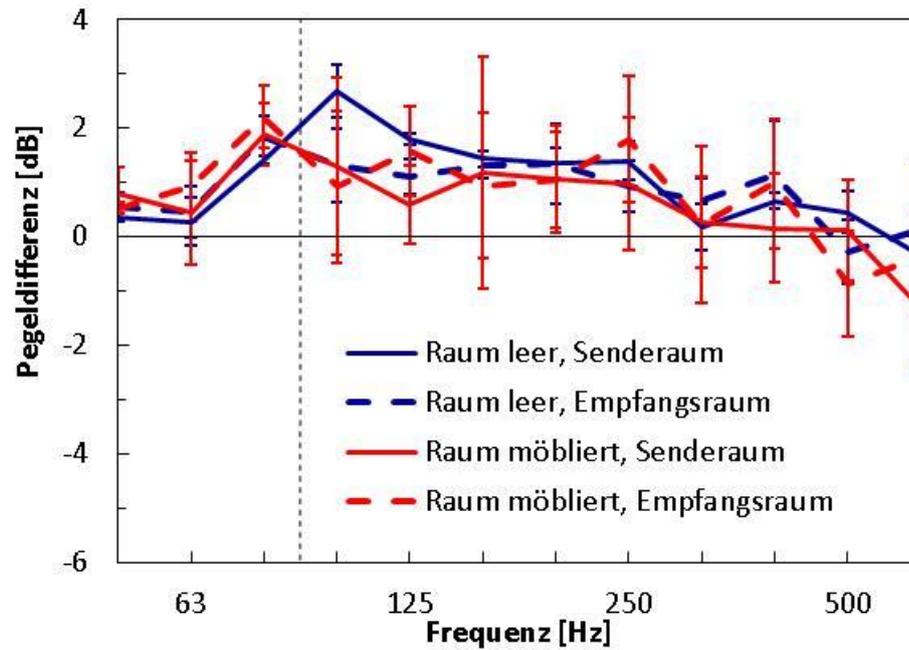


Abbildung 26: Differenz zwischen mittlerem Schalldruckpegel im Raum abgetastet entlang der Raumdiagonalen und tatsächlichem mittlerem Schalldruckpegel im Raum, Vergleich der Mittelwerte der Diagonalen für alle vier Situationen und deren Unsicherheit ausgedrückt in einer Standardabweichung.

Kurzgefasst scheint diese Methode am unempfindlichsten gegenüber Einflüssen auf Grund von Möblierung oder Änderung der Anregesituation zu sein. Die Streuung der Ergebnisse der einzelnen Diagonalen ist für die möblierte Situation insbesondere im Bereich von oberhalb von 100 Hz recht hoch, da nur Teildiagonalen abgetastet wurden.

2.5 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchung - Vergleich aller untersuchten Abtast- und Mittelungsverfahren

Abschliessend sind zur Veranschaulichung der Ergebnisse der vier angewandten Abtast- und Mittelungsverfahren zur Ermittlung des mittleren Schalldruckpegels im Raum die absoluten gemessenen Schalldruckpegel für die Senderraumsituation in Abbildung 27 und für die Empfangsraumsituation in Abbildung 28 jeweils für den leeren und den möblierten Raum dargestellt. Da die Anregungsamplitude optimal für die einzelnen Messungen angepasst wurde, ist ein eventueller Rückschluss von den Pegeldifferenzen auf den Einfluss der Absorption durch die Möblierung oder gar die Schalldämmung der Wände des Versuchsraums nicht möglich. Der Abfall der Pegel für die Senderraumsituation oberhalb von 315 Hz ist durch einen Tiefpassfilter verursacht der verwendet wurde um die Energie im tiefen Frequenzbereich zu konzentrieren. Generell zeigt sich jedoch für alle Situation ein qualitativ gleicher Verlauf der Kurven. Das Standardverfahren nach ISO 16283-1 mit Mittelung der Schalldruckpegel nur im zentralen Bereich des Raumes unterschätzt den tatsächlichen mittleren Pegel im Raum deutlich. Wie in Abschnitt 0 detailliert beschrieben entspricht die Abweichung nicht der sogenannten Waterhouse-Korrektur, welche oft zur Anpassung der Ergebnisse herangezogen wird.

Eine bessere Übereinstimmung ergibt sich durch das Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen nach ISO 16283-1, welches für Räume, kleiner 25 m³ Raumvolumen, für den Bereich von 50 Hz bis 80 Hz vorgeschrieben ist durch die Berücksichtigung der Maximalpegel gemessen in den Raumecken bei der Mittelwertbildung. Beim Übergang zu dem Standardverfahren zwischen dem 80 Hz und 100 Hz Terzband fallen die Werte jedoch relativ zum tatsächlichen mittlerem Raumpegel ab und der Mittelwert weicht wie gehabt von diesem wieder sehr stark ab. Um dieses Verfahren weiter zu verbessern, könnte über eine Anpassung und Ausweitung des massgeblichen Frequenzbereichs für das Verfahren für tiefe Frequenzen in Abhängigkeit vom Raumvolumen nachgedacht werden.

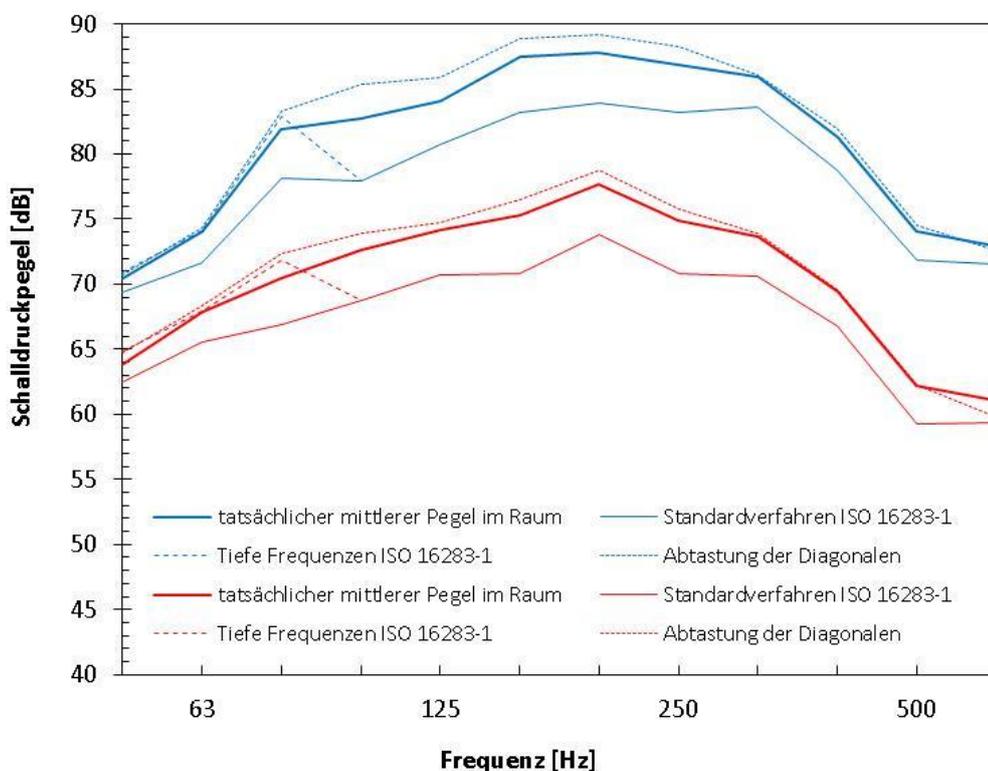


Abbildung 27: Vergleich der vier angewandten Abtast- und Mittelungsverfahren zur Bestimmung des mittleren Schalldruckpegels im Raum für die Senderraumsituation (blau: Leerraum, rot: möblierter Raum).

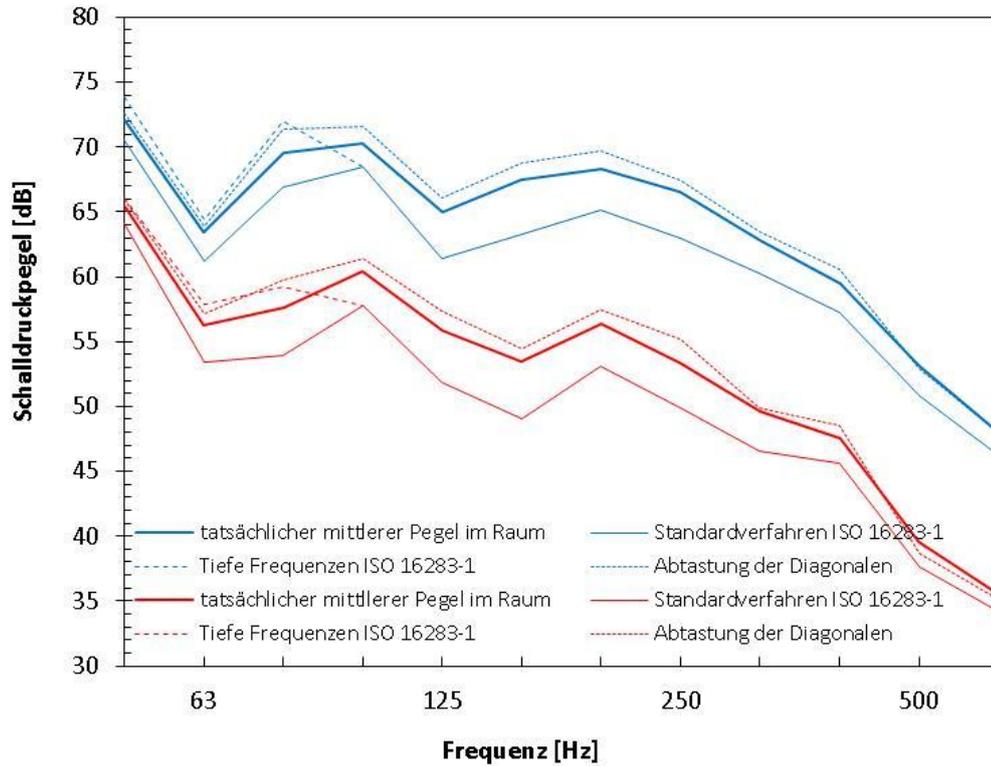


Abbildung 28: Vergleich der vier angewandten Abtast- und Mittelungsverfahren zur Bestimmung des mittleren Schalldruckpegels im Raum für die Empfangsrumsituation (blau: Leerraum, rot: möblierter Raum).

Die Ergebnisse des alternativen, nicht-standardisierten Verfahrens nach Moorhouse [Moorhouse, 2006] mit Abtastung und Mittelung des Schalldruckpegels entlang der Raumdiagonalen überschätzen den tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum leicht. Sie stimmen aber für alle Situationen im gesamten betrachteten Frequenzbereich recht gut mit diesem überein. Bei diesem Verfahren müsste ebenfalls der Übergang zum Standardverfahren nach ISO 16283-1 in Abhängigkeit vom Raumvolumen definiert und beschrieben werden.

3 Analytische und Numerische Untersuchungen

Ziel der analytischen und numerischen Untersuchungen ist es, die Genauigkeit, respektive Unsicherheit, der beiden Ansätze im Vergleich zu den experimentell erhobenen Daten herauszuarbeiten. Insbesondere soll untersucht werden, ob mit numerischen Methoden (Finite-Elemente-Methode, FEM) die raumakustischen Verhältnisse in Räumen mit einem Volumen $<25 \text{ m}^3$ und die Auswirkung der Möblierung auf das Schallfeld bei tiefen Frequenzen unterhalb von 100 Hz in genügender Genauigkeit im Vergleich zum Experiment prognostiziert werden kann. Des Weiteren ist hier auch von Interesse, mit welchem numerischen Aufwand prognostiziert werden muss, um belastbare Resultate aus den Simulationen zu erhalten.

Für den Fall, dass die numerische Prognosen genügend genaue Resultate liefern und sich die benötigten Ressourcen in moderatem Rahmen bewegen sollten, würden sich numerische Prognosen ideal eignen, um Parameterstudien durchführen zu können. Dies würde die Anzahl durchzuführender Messungen drastisch reduzieren. Auch könnte man sich vorstellen, dass, bevor das Experiment für eine spezifische Raumsituation geplant wird, mittels numerischer Prognose die idealen Mikrofonpositionen in einem ersten Schritt identifiziert werden könnten.

3.1 Analytische Untersuchungen

Das Schallfeld in einem geschlossenen Raum wird einerseits durch die Abmessungen, also die Geometrie des Raumes, beeinflusst, andererseits auch durch die Beschaffenheit der begrenzenden Oberflächen. Die akustischen Eigenschaften der begrenzenden Oberflächen wirken analog zu einem Filter, welcher in gewissen Frequenzbereichen Schallwellen beinahe ideal reflektiert und andere Schallwellen bis zu einem gewissen Grad absorbiert, auf das sich etablierende Schallfeld.

Die Phasenlage der einfallenden und der von den begrenzenden Oberflächen (teil-)reflektierten Schallwellen führt schliesslich zu konstruktiver, respektive destruktiver, Interferenz und es bilden sich stehende Wellen im Raum aus. Bei stehenden Wellen unterscheiden wir zwischen drei Typen: (1) den axialen stehenden Wellen, welche sich zwischen zwei parallelen Begrenzungsflächen ausbilden, (2) den tangentialen stehenden Wellen, welche von vier Oberflächen begrenzt werden und schliesslich (3) den schiefen stehenden Wellen, welche sich zwischen den sechs Begrenzungsflächen ausbilden und dementsprechend von allen sechs Begrenzungsflächen beeinflusst werden. Stehende Wellen, respektive Raummoden, weisen Punkte im Raum mit Schalldruckmaxima, den sogenannten Schwingungsknoten, und Punkte im Raum mit Schalldruckminima, den sogenannten Schalldruckknoten auf. Das Schallfeld in einem Raum ist also nicht nur eine Funktion der eigentlichen Quellencharakteristik und deren eingebrachter Schallleistung sondern stark beeinflusst durch die Charakteristik der umhüllenden Begrenzungsflächen.

Die für einen Raum, in Abhängigkeit der Längenmasse, charakteristischen Eigenfrequenzen, bei denen sich stehende Wellen etablieren werden, können im Falle eines Raumes mit senkrecht zueinander stehenden Begrenzungsflächen analytisch beschrieben werden anhand:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c_0}{2} \left[\left(\frac{l_x}{d_x} \right)^2 + \left(\frac{l_y}{d_y} \right)^2 + \left(\frac{l_z}{d_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

mit: c_0 Schallgeschwindigkeit in Luft in Abhängigkeit des Druckes und der Temperatur [m/s];
 d_x d_y d_z Raumdimensionen [m];
 l_x l_y l_z Ordnung der Eigenmoden.

Der Sinn und Zweck der Bestimmung der Lage der Raummoden im Frequenzbereich liegt in der Notwendigkeit, das Schallfeld charakterisieren zu wollen. Die Anzahl der Raummoden/Eigenfrequenzen in einem bestimmten Terzband beispielsweise lässt rückschliessen auf die Diffusivität des Schallfeldes. In einem

ideal diffusen Schallfeld ist die akustische Energiedichte im kompletten Volumen konstant. Es spielt somit keine entscheidende Rolle, wo der Schalldruck mit einem Mikrophon gemessen wird, solange der gemessene Schalldruckpegel nicht von den Eigenschaften der begrenzenden Oberflächen, sprich mit genügendem Abstand zu den Begrenzungsflächen, gemessen wird. Wird ein Schallfeld aber als nicht diffus taxiert sind die räumlichen Pegelunterschiede signifikant. Und dies ist ein zentraler Punkt bei Messungen in kleinen Räumen bei tiefen Frequenzen, weil hier geometriebedingt die Diffusivität im Vergleich zu grossen Räumen erst viel höher im Frequenzbereich gegeben ist.

Die Anzahl der Eigenmoden in einem bestimmten Frequenzband kann analytisch folgendermassen quantifiziert werden:

$$\frac{N}{\Delta f} = V \frac{4 \pi f^2}{c_0^3} + S \frac{\pi f}{2 c_0^2} + L \frac{1}{8 c_0} \quad (5)$$

$$\frac{N}{band} = \frac{N}{\Delta f} \cdot B \quad (6)$$

mit: V , S , L Raum-Volumen, -Oberfläche und -Kantenlänge, [m³], [m²], [m];
 B Bandbreite des Filters ($B = 0,23 \cdot f$ für Terzbandfilter)

Die Abhängigkeit der Lage der Eigenmoden im Frequenzbereich zu den Raumdimensionen wird offensichtlich. Für ein und dasselbe Raumvolumen verschiebt sich die Lage der Eigenfrequenzen entsprechend den Längenmassen des Raumes. Zur Illustration sind in Abbildung 29 die analytisch ermittelten Eigenfrequenzen für ein fast identisches Raumvolumen ($V \approx 25 \text{ m}^3$) aber unterschiedlichen Längenmassen abgebildet.

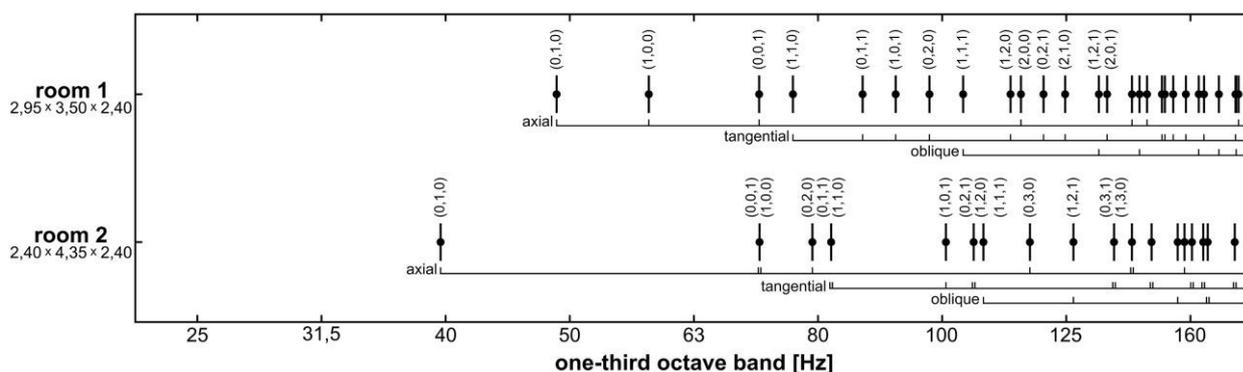


Abbildung 29: Lage der Eigenfrequenzen bei ähnlichem Raumvolumen aber unterschiedlichen Längenmassen

Werden schliesslich die Anzahl Raum-Eigenmoden pro Frequenzband quantifiziert, können Aussagen bezüglich Diffusivität des Schallfeldes in entsprechendem Frequenzband getroffen werden. In Tabelle 1 sind die Anzahl Eigenmoden pro Terzband für die in Abbildung 29 dargestellten Räume aufgeführt:

one-third octave band [Hz]	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
room 1	0	0	0	1	1	3	3	6	13
room 2	0	0	1	0	0	3	3	3	8

Tabelle 1: Analytisch ermittelte Anzahl Eigenmoden pro Terzband für Räume mit ähnlichem Volumen aber unterschiedlichen Längenmassen

Die im tiefen Frequenzbereich klar separierten Raum-Eigenmoden zeigen in höheren Frequenzbereichen eine sehr kleine Separation. Dies wird auch ersichtlich aus der steigenden Anzahl Moden pro Terzband (siehe Tabelle 1). Durch die steigende Anzahl Moden pro Terzband reduzieren sich die räumlichen Schalldruckpegelunterschiede bis hin zu einem als diffus zu betrachtenden Schallfeld. Der Übergang zu einem

als diffus zu betrachtenden Schallfeld wurde in genügendem Masse studiert, beispielsweise von Schroeder und Kuttruff [Schroeder und Kuttruff, 1962]. Sie definieren die kritische Frequenz, welche den Übergang zu einem als diffus zu betrachtenden Schallfeld beschreibt, als:

$$f_c = 2000 \left[\frac{T_{60}}{V} \right]^{1/2} \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

mit: f_c kritische Frequenz [Hz] (Übergang zu diffusem Schallfeld); V Raumvolumen [m^3]; T_{60} Nachhallzeit [s]

In der ursprünglichen Form wird für das Kriterium ein Wert für die Konstante in (7) von 4000, korrespondierend mit 10 überlappenden Eigenmoden pro Terzband empfohlen. Messungen haben allerdings gezeigt, dass die Theorie ihre Gültigkeit auch bei einem Wert von 2000 für die Konstante behält. In einer aktuellen Untersuchung [Skålevik, 2011] wird für einen Wert von 900 gezeigt, dass das ursprünglich geforderte Kriterium für ein diffuses Schallfeld noch erfüllt wird.

Die räumliche Variation des Schalldruckes in einem nicht-diffusen Schallfeld führt zu einer erhöhten Messunsicherheit und einer reduzierten Wiederholbarkeit der Messung. Eine Abschätzung der Standardabweichung für eine solche Situation wurde von Schroeder [Schroeder, 1969] erstellt für den Bereich $0.2 \cdot f_c - 0.5 \cdot f_c$. Lubman [Lubman, 1974] schliesslich hat die Abschätzung der Standardabweichung in einer verfeinerten Form vorgeschlagen:

$$\sigma = (1 + N/\pi)^{-1} \quad [\text{Pa}] \quad \sigma = 4,34 / (-0,22 + \sqrt{(1 + 0,319 N)}) \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

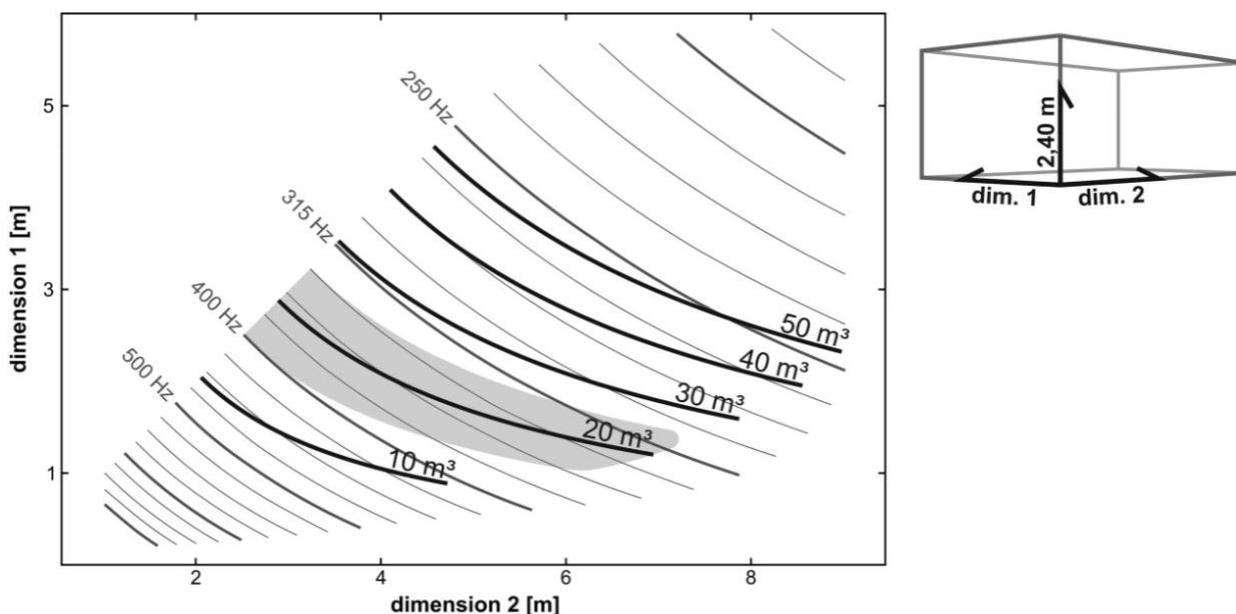


Abbildung 30: Grenzfrequenz für Räume mit konstantem Volumen und konstanter Höhe von 2.40 m, mittlerer Absorptionskoeffizient $\alpha = 0.1$, interessanter Parameterbereich grau hinterlegt

In Abbildung 31 sind die drei Parameter zusammengefasst als Funktion des Raumvolumens dargestellt welche für die analytische Untersuchung relevant sind. Dies ist die Anzahl Moden pro Terzband, die kritische Frequenz und Standardabweichung. Der für die vorliegende Untersuchung relevante Parameterbereich ist jeweils grau hinterlegt.

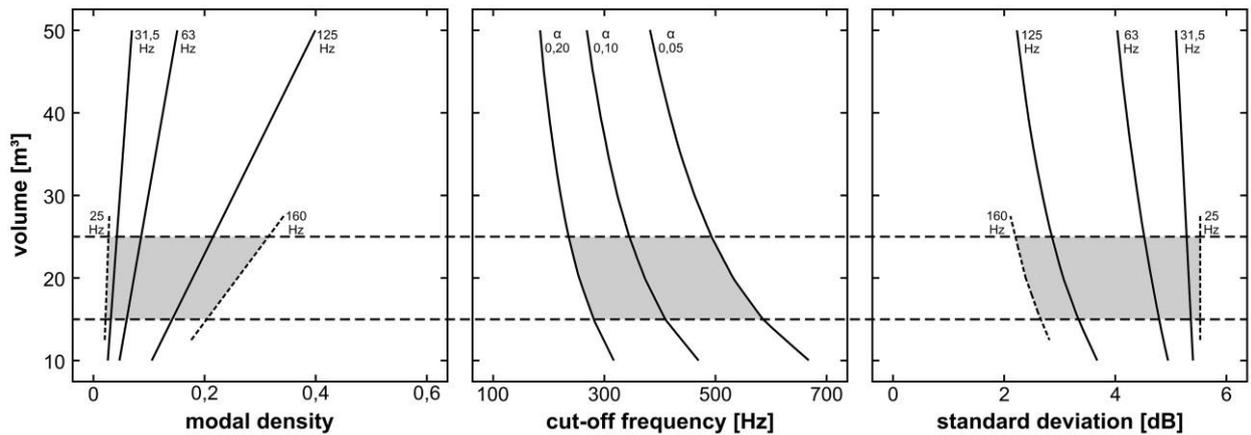


Abbildung 31: Anzahl Moden pro Terzband, kritische Frequenz und Standardabweichung als Funktion des Raumvolumens

3.2 Numerische Untersuchungen

Die numerischen Untersuchungen wurden mit dem kommerziellen Softwarepaket ANSYS Workbench V15 [ANSYS, 2013], basierend auf der Finite-Elemente-Methode, FEM, durchgeführt. Mit dieser Simulationsmethode ist es möglich sowohl die Entstehung als auch die Ausbreitungs- und Interaktionsmechanismen von Schallwellen zu berechnen. Es können modale, zeitharmonische oder transiente akustische Analysen durchgeführt werden.

Als Grundlage der Simulation dient die Annahme, dass ein kompressibles Medium (z. B. Luft) ohne überlagerte mittlere Strömung betrachtet wird. In vorliegender Untersuchung wird mit Ausnahme der Randbedingungen an begrenzenden Oberflächen auf die Modellierung der Fluid-Struktur-Interaktion, FSI, verzichtet, da die Auswirkungen einer solchen Interaktion auf das sich etablierende Schallfeld als nicht signifikant betrachtet werden dürfen. Das Gleichungssystem, für welches die Lösung numerisch approximiert wird reduziert sich somit von einem gekoppelten System der Form

$$\begin{bmatrix} [M_S] & 0 \\ \bar{\rho}_0 [R]^T & [M_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_e\} \\ \{\dot{p}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_S] & 0 \\ 0 & [C_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_e\} \\ \{\dot{p}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & -[R] \\ 0 & [K_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_e\} \\ \{p_e\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{f_S\} \\ \{f_F\} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

mit: $[M_S]$, $[C_S]$ und $[K_S]$ den Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrizen; $\{f_S\}$ dem externen Kraftvektor; $[R]$ der Kopplungsmatrix zwischen Fluid und Struktur; Indizes S, F bezeichnen strukturbezogene respektive fluidbezogene Größen

auf ein Gleichungssystem mit rein akustischen Termen:

$$[M_F]\{\ddot{p}_e\} + [C_F]\{\dot{p}_e\} + [K]\{p_e\} = \{f_F\} \quad (10)$$

Die Berechnung des Schallfeldes gemäss Gleichung (10) basierend auf der Finite-Elemente-Methode, FEM, setzt eine Diskretisierung der Gleichung voraus. Die physikalisch relevanten Parameter werden diskret, sowohl in Raum als auch in Zeit, berechnet. Die Diskretisierung des Raumes ist eine Funktion der Frequenz respektive der Wellenlänge des Schallfeldes, welches berechnet werden soll. Eine akkurate Prognose des Schallfeldes ist nur möglich, wenn die räumliche Diskretisierung zu mindestens 6 – 10 Stützpunkten pro Wellenlänge des zu lösenden Schallfeldes führt [ANSYS, 2013].

Um eine Abhängigkeit der numerischen Lösung von der räumlichen Diskretisierungsdichte ausschliessen zu können, wird bei numerischen Untersuchungen mit der Finite-Elemente-Methode üblicherweise eine Netzunabhängigkeitsuntersuchung durchgeführt. Das Schallfeld wird mit verschiedenen räumlichen Diskretisierungsdichten berechnet und schliesslich die damit verbundenen Resultate relativ zueinander verglichen. Naturgemäss entwickelt sich für die zu lösenden physikalischen Grössen eine asymptotische Trajektorie mit steigender räumlicher Diskretisierungsdichte. Anhand der Beobachtung dieses asymptotischen Verlaufes ist es möglich die notwendige räumliche Diskretisierungsdichte, um eine netzunabhängige Lösung zu erhalten, zu bestimmen und als Folge dessen den numerischen Aufwand abschätzen zu können. Hierin liegt auch der Grund, warum Finite-Elemente basierte Methoden nur sinnvoll für vergleichsweise tieffrequente Schallfeldsimulationen eingesetzt werden. Die Anforderung an die räumliche Diskretisierung bei sehr kleinen Wellenlängen übersteigt die aktuell vorhandenen Ressourcen und es ist daher vorteilhafter wellenbasierte Ansätze zur Simulation hochfrequenter Schallereignisse zu verwenden.

In vorliegender Untersuchung wurde die Netzunabhängigkeits-Untersuchung anhand eines rechteckigen Raumes mit den Dimensionen 2.00 m x 3.15 m x 2.40 m (B x L x H) durchgeführt. Dies entspricht einem Raumvolumen von ca. 15 m³ (<25 m³).

Für verschiedene Diskretisierungsdichten wurden sowohl die Raum-Eigenfrequenzen als auch Schalldruckpegel an definierten Punkten im Raum berechnet und anschliessend relativ verglichen. Der Vergleich wurde für Diskretisierungsgrössen von 5 cm bis 200 cm durchgeführt. Das Rechengitter mit der grössten räumlichen Diskretisierungsdichte dient jeweils als Referenz für den Relativvergleich. Der Unterschied aus dem Relativvergleich wurde anhand von Gleichung (11) quantifiziert:

$$\varepsilon_i = \frac{f_{i(mesh)} - f_{i(ref)}}{B} \quad (11)$$

mit: $f_{i(mesh)}$, $f_{i(ref)}$ prognostizierte Eigenfrequenz für betrachtetes Netz und prognostizierte Eigenfrequenz für Referenznetz für Eigenfrequenz i

In Abbildung 32 sind sowohl der relative Fehler in der Prognose der Raum-Eigenfrequenzen in Abhängigkeit der räumlichen Diskretisierungsdichte als auch der relative Fehler in der Prognose des Schalldruckpegels an einem definierten Punkt im Raum in Abhängigkeit der räumlichen Diskretisierungsdichte dargestellt.

Die Darstellung verdeutlicht, dass bei einer Diskretisierungslänge von beispielsweise 10 cm mit einem relativen Fehler in der berechneten Eigenfrequenz von weniger als 1% und einem relativen Fehler im berechneten Schalldruckpegel von maximal 1% im Vergleich zum Netz mit einer Diskretisierungslänge von 5 cm zu rechnen ist. Für beide Grössen bewegen wir uns im Bereich der Messunsicherheit im Falle der messtechnischen Bestimmung dieser beiden Grössen. Eine höhere Genauigkeit ist also für vorliegende Untersuchung nicht sinnvoll. Der zusätzliche rechentechnische Aufwand, um eine höhere numerische Genauigkeit zu erreichen wäre nutzlos.

In Abbildung 33 ist nun der relative Fehler in der berechneten Eigenfrequenz und die absolute Differenz im Schalldruckpegel im Vergleich zu einem Netz mit 5 cm Diskretisierungslänge als Funktion der Anzahl Elemente pro Wellenlänge dargestellt.

Um eine im Vergleich zu experimentell bestimmten Grössen sinnvolle Genauigkeit zu erzielen reicht eine räumliche Diskretisierung mit 10 Elementen pro Wellenlänge völlig aus. Für einen Raum mit den Dimensionen 3 m x 3.5 m x 2.4 m (B x L x H) (ca. 25 m³) wird somit für eine Berechnung des Schallfeldes bis ca. 250 Hz ein Rechengitter mit ungefähr 10'300 Netzknoten benötigt. Der Grund, warum in der realen Anwendung jedoch Rechengitter mit weit höherer Anzahl Netzknoten verwendet werden liegt in der Tatsache, dass mit 10 Knoten pro Wellenlänge bei einer Frequenz von 250 Hz geometrische Details nur mit einer Genauigkeit von 13 cm abgebildet werden können. Sobald wir Räume mit Möblierung simulieren möchten,

richtet sich die räumliche Diskretisierung auch nach den geometrischen Details der Möblierung oder geometrischen Details des Raumes an sich, welche abgebildet werden müssen für eine korrekte Prognose.

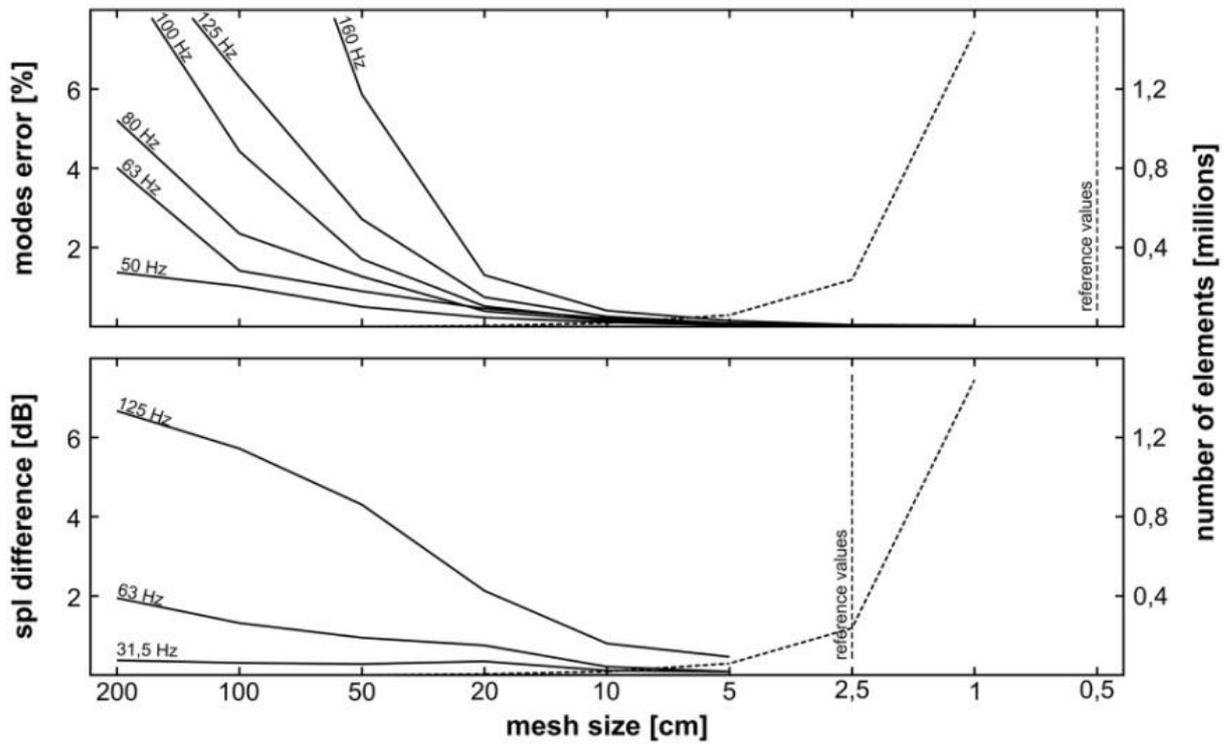


Abbildung 32: Analyse der Netzunabhängigkeit, Fehler in Prognose der Eigenfrequenzen und im Schalldruckpegel als Funktion der räumlichen Diskretisierungsdichte

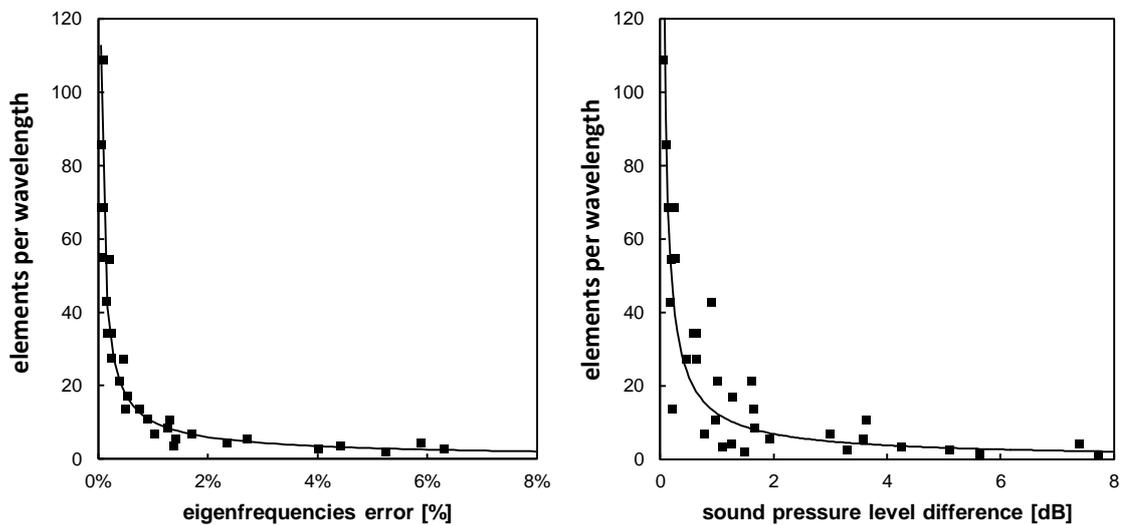


Abbildung 33: Analyse der Netzunabhängigkeit, Fehler in Prognose der Eigenfrequenzen und im Schalldruckpegel als Funktion der Anzahl Stützpunkte pro Wellenlänge

3.3 Resultate

Der Vergleich zwischen analytischer und numerischer Prognose wurde, auf Grund der Anwendbarkeit der analytischen Formulierung, vereinfachend für einen rechteckigen Raum vorgenommen. In Tabelle 2 sind die prognostizierten Eigenfrequenzen in aufsteigender Reihenfolge (Frequenz) dargestellt. Zusätzlich sind Angaben bezüglich Typ der Eigenform und zu welchem Terzband die korrespondierende Eigenfrequenz zugeordnet wird in den ersten beiden Spalten angegeben.

In einem ersten Vergleich werden in Tabelle 2 die Resultate aus dem analytischen und dem numerischen Ansatz für eine rein rechteckige Raumgeometrie verglichen (siehe Spalte „analytical – numerical“). Betrachtet wird der Frequenzbereich vom 50 Hz bis zum 160 Hz Terzband. Die Übereinstimmung zwischen dem analytischen und dem numerisch berechneten Resultat liegen im Bereich von -0.1% bis +0.9% (das analytische Resultat als Referenz betrachtet) für den Fall einer rein rechteckigen Raumgeometrie mit schallharten Begrenzungsflächen. Bei einer mittleren Abweichung zwischen analytischem und numerischem Ansatz von +0.2% über den betrachteten Frequenzbereich kann die Übereinstimmung für den Fall einer rechteckigen Raumgeometrie als sehr gut bezeichnet werden.

modes		analytical - numerical			numerical – numerical			numerical – experimental		
type f(x,lz,ly)	band [Hz]	analytical	model 1	differences [%]	model 2	model 3	model 4	model 5	experim.	differences [%]
(0,1,0)	50	54,5	54,5	0,0	54,5	55,3	54,8	55,5	54,0	2,7
(0,0,1)	80	71,6	71,5	-0,1	71,7	71,5	68,8	68,5	69,0	-0,7
(1,0,0)	80	85,0	85,8	0,9	86,2	85,4	87,1	87,8	84,6	3,6
(0,1,1)	100	90,0	89,9	-0,1	90,1	90,4	87,8	88,2	89,2	-1,1
(1,1,0)	100	101,0	101,7	0,7	101,9	101,2	104,4	105,2	101,6	3,4
(0,2,0)	100	109,1	109,0	-0,1	109,0	110,2	107,7	109,8	107,6	2,0
(1,0,1)	100	111,1	111,7	0,5	112,5	111,4	109,9	110,6	111,3	-0,6
(1,1,1)	125	123,8	124,3	0,4	125,0	123,9	122,3	123,1	118,7	3,6
(0,2,1)	125	130,4	130,3	-0,1	130,5	131,3	129,2	131,3	129,0	1,8
(1,2,0)	125	138,3	138,7	0,3	138,9	138,2	136,4	138,6	138,6	0,0
(0,0,2)	160	143,1	143,0	-0,1	143,2	143,0	142,7	142,8	140,4	1,7
(0,1,2)	160	153,2	153,1	-0,1	153,2	153,4	150,8	151,2	151,0	0,1
(1,2,1)	160	155,7	156,1	0,3	156,6	155,6	154,8	156,5	153,1	2,2
(0,3,0)	160	163,6	163,5	-0,1	163,5	162,0	163,8	164,1	162,6	0,9
(1,0,2)	160	166,5	166,8	0,2	167,2	166,6	164,2	165,3	163,9	0,8
(2,0,0)	160	170,1	171,6	0,9	172,4	173,4	171,1	171,6	169,7	1,1
(1,1,2)	160	175,2	175,5	0,2	175,9	175,2	176,0	175,3	174,5	0,5
		average	diff. %	0,2				average	diff %	1,3

Tabelle 2: Analytisch respektive numerisch Ermittelte Eigenfrequenzen für unterschiedliche Raumgeometrien

In einer weiteren Spalte werden nun die numerisch ermittelten Eigenfrequenzen für eine identische Raum-aussenhülle aber mit kleinen geometrischen Modifikationen dargestellt (siehe Spalte „numerical - numerical“ in Tabelle 2). Die ermittelten Unterschiede sind, in Abhängigkeit der Lage der Eigenform, signifikant. Schon kleine geometrische Veränderungen führen zu Verschiebungen der Raum-Eigenfrequenzen, welche numerisch reproduziert werden können.

Als letzter Vergleich sind in der letzten Spalte in Tabelle 2 (siehe „numerical – experimental“) die Werte der Eigenfrequenzen aus der numerischen Simulation und aus dem Experiment dargestellt. Die skizzierte Raumgeometrie entspricht einem kleinen Abstellraum, welcher am Laboratory for Acoustics & Noise Control an der Empa in Dübendorf tatsächlich existiert. Die angegebenen prozentualen Abweichungen in den einzelnen Eigenfrequenzen gehen vom experimentell ermittelten Wert als Referenz aus. Die Abweichungen liegen im Bereich von -1.1% bis +3.6%. Im Mittel über den gesamten Frequenzbereich wurde eine Abwei-

chung von 1.3% zwischen numerisch berechneten und experimentell bestimmten Eigenfrequenzen ermittelt. Auch hier lässt die Analyse den Schluss zu, dass mit dem numerischen Modell, unter Berücksichtigung der im Experiment zu erwartenden Messunsicherheit, die reale Situation mit genügend hoher Genauigkeit wiedergegeben werden kann. In Abbildung 34 sind die Resultate in aus Tabelle 2 graphisch zur besseren Lesbarkeit und Überschaubarkeit dargestellt.

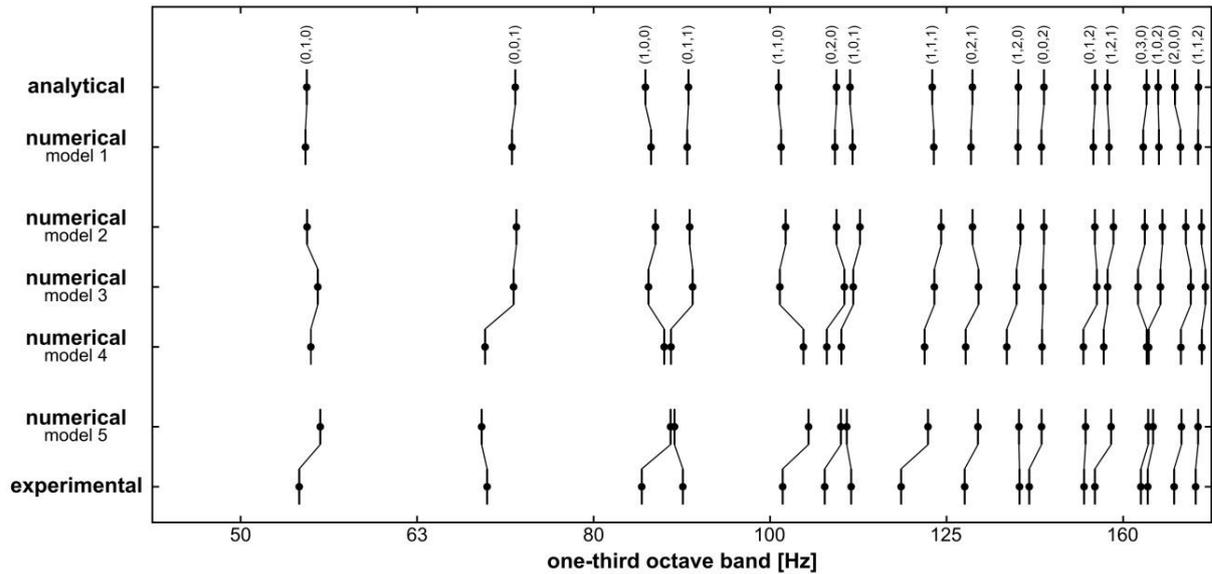


Abbildung 34: Graphische Darstellung der ermittelten Eigenfrequenzen für analytischen, numerischen und experimentellen Ansatz

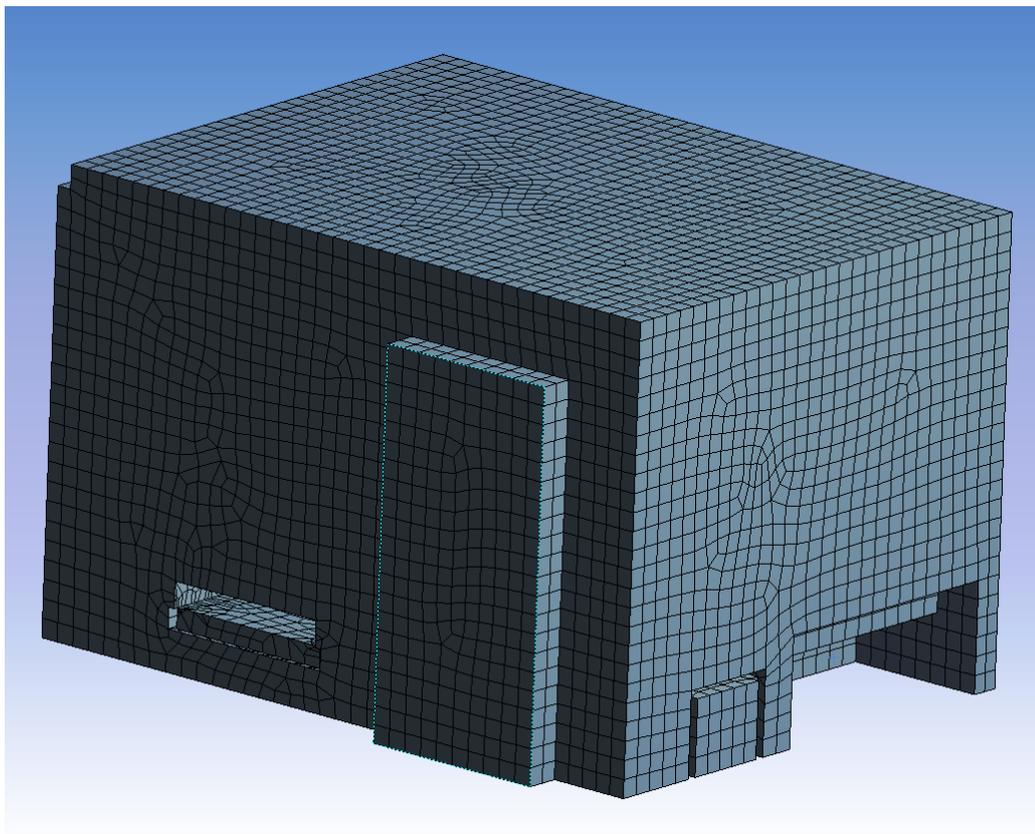
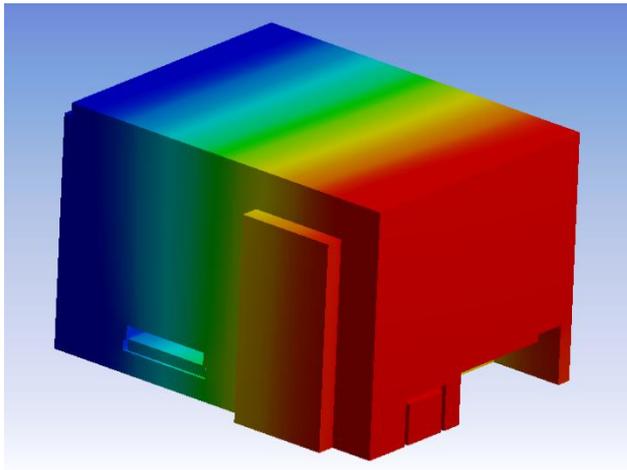
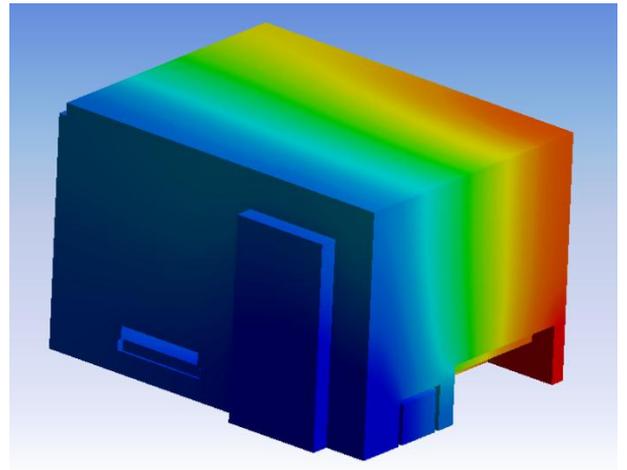


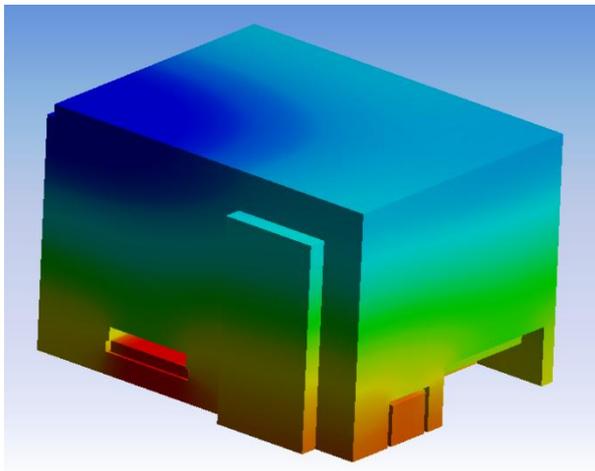
Abbildung 35: Räumliche Diskretisierung des für die Untersuchung aufgebauten Raumes



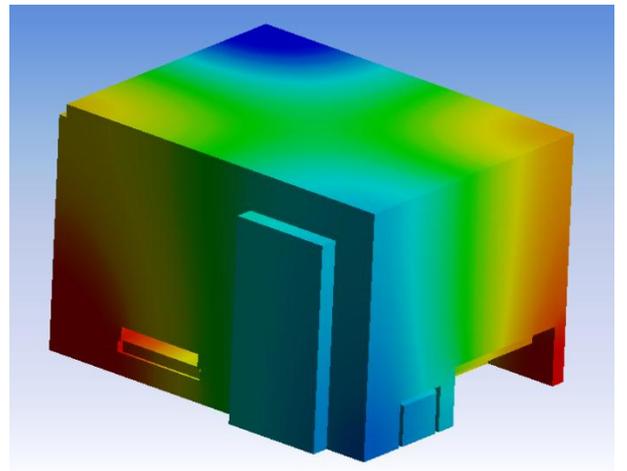
1. Eigenfrequenz bei 46.3 Hz



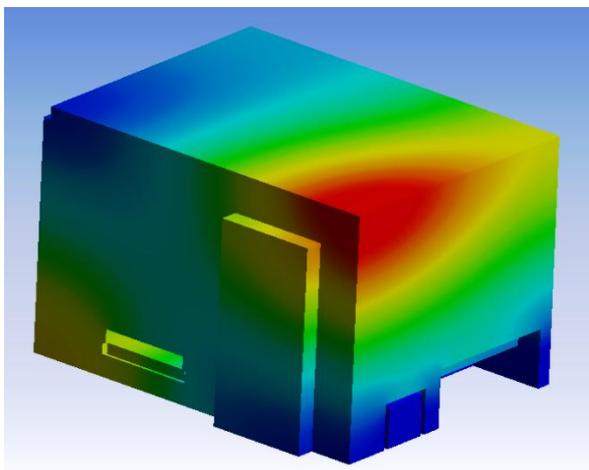
2. Eigenfrequenz bei 60.4 Hz



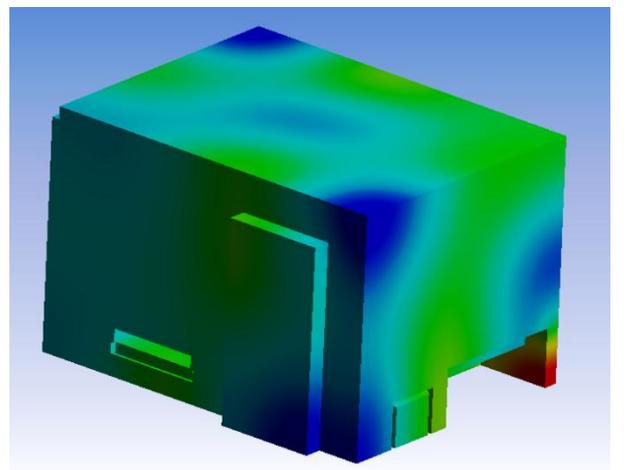
3. Eigenfrequenz bei 70.5 Hz



4. Eigenfrequenz bei 76.2 Hz



5. Eigenfrequenz bei 85.7 Hz



23. Eigenfrequenz bei 157.5 Hz

Abbildung 36: Prognostizierte Eigenfrequenzen in möbliertem Prüfraum

In einem letzten Schritt wurde der für diese Untersuchung speziell aufgebaute Raum (siehe Kapitel 3: Experimentelle Untersuchungen) modelliert. In Abbildung 35 ist die räumliche Diskretisierung mit 10 Elementen pro kleinster zu untersuchender Wellenlänge dargestellt. In vorliegendem Beispiel werden lokal höhere Diskretisierungsdichten benötigt, um die geometrischen Details, zum Beispiel die Möblierung, korrekt abbilden zu können. Für eine Prognose der Raum-Eigenfrequenzen wird somit ein Rechengitter mit ca. 150'000 Knoten verwendet.

In Abbildung 36 sind exemplarisch einige der berechneten Raum-Moden dargestellt. Die roten respektive dunkelblauen Regionen stellen die Zone mit maximalen Druckschwankungen der stehenden Wellen dar. In grüner Farbe sind die Zonen der Schalldruckknoten dargestellt. Die Schwierigkeit bei derart Berechnungen liegt in den Randbedingungen. Für die als nicht-schallhart zu modellierenden Oberflächen, beispielsweise ein Bett oder ein Polstersessel, müssen die entsprechenden Impedanzen oder Admittanzen spezifiziert werden. Für vorliegende Untersuchung wurden repräsentative Werte für die Admittanzen aus der Literatur verwendet.

In Abbildung 36 ist zu erkennen, dass typischerweise zuerst die axialen Raummoden, entsprechend den drei Dimensionen des Raumes, und anschliessend die tangentialen respektive schiefen Moden auftreten. Ach hier wurden die prognostizierten Eigenfrequenzen mit aus dem Experiment im entsprechenden Raum ermittelten Werten verglichen. In Tabelle 3 ist der Vergleich zwischen numerischer Prognose („numerical“) und experimentell bestimmtem Wert („experimental“) für den relevanten Frequenzbereich dargestellt. In der letzten Spalte sind die relativen Abweichungen, das Experiment als Referenz, angegeben. Die relative Abweichung bewegt sich im Bereich von -1.5% bis $+0.3\%$. Tendenziell werden die Eigenfrequenzen in der numerischen Simulation zu tief bestimmt. Zieht man aber die Unsicherheit der experimentell bestimmten Werte in Betracht, dann kann auch hier von einer sehr guten Übereinstimmung zwischen Modell und Messung ausgegangen werden.

type			numerical	experimental	diff
x	z	y	Hz	Hz	%
1	0	0	46.2	46.1	0.3
0	1	0	61.4	62.2	-1.2
0	0	1	71.1	71.6	-0.6
1	1	0	76.9	78.0	-1.5
1	0	1	84.9	85.6	-0.8
2	0	0	93.2	93.5	-0.3
0	1	1	94.2	94.9	-0.8
1	1	1	105.0	105.7	-0.7
2	1	0	112.5	113.3	-0.8
2	0	1	117.2	117.7	-0.4
0	2	0	122.0	122.8	-0.6
1	2	0	131.3	131.9	-0.4
2	1	1	133.1	133.7	-0.4
3	0	0	138.8	138.7	0.1
0	0	2	141.4	142.1	-0.5

Tabelle 3: Vergleich der prognostizierten und experimentell bestimmten Eigenfrequenzen im un-möblierten Raum

In Tabelle 4 schliesslich wird der Vergleich für denselben, eigens für diese Untersuchung aufgebauten Versuchsraum, dargestellt. Im Unterschied zu Tabelle 3 sind hier die Raum-Moden für den möblierten Fall dargestellt. Auch hier bewegt sich die relative Abweichung zwischen Berechnung und Messung im Bereich von -1.7% bis $+2.6\%$. Hier allerdings ist kein klarer Trend in der Abweichung mehr zu erkennen. Es ist viel-

mehr die räumliche Lage der Raum-Moden welche offensichtlich die relative Abweichung beeinflusst. Die Abweichungen zeigen aber doch, dass es gelungen ist, dort wo die Möblierung das Schallfeld beeinflusst, den Effekt abzubilden.

type			numerical	experimental	diff
x	z	y	Hz	Hz	%
1	0	0	46.3	45.3	2.2
0	1	0	60.4	61.1	-1.0
0	0	1	70.5	70.6	-0.2
1	1	0	76.2	76.2	0.0
1	0	1	85.7	83.5	2.6
2	0	0	91.9	92.5	-0.7
0	1	1	95.2	94.7	0.6
1	1	1	104.7	103.4	1.2
2	1	0	111.7	113.0	-1.2
2	0	1	116.8	116.8	0.0
0	2	0	121.2	121.1	0.1
1	2	0	130.6	130.5	0.1
2	1	1	131.9	132.3	-0.3
3	0	0	137.4	136.3	0.8
0	2	1	139.3	141.7	-1.7

Tabelle 4: Vergleich der prognostizierten und experimentell bestimmten Eigenfrequenzen für eine möblierte Situation des Raumes

Abschliessen kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass mit aktuellen kommerziellen Softwarepaketen, basierend auf der Finite-Elemente-Methode, FEM, eine Situation wie sie in vorliegendem Bericht untersucht wurde abgebildet und in genügender Genauigkeit prognostiziert werden kann. Dies mit einem moderaten numerischen Aufwand, sprechen wir doch über ein Finite-Elemente-Modell mit gerade einmal 150'000 Knoten. Somit sind die Rechenzeiten in moderatem Rahmen und die Grösse des Modells lässt sogar eine harmonische Analyse zu, welche es erlaubt mit einer definierten Schallleistung, welche in den Raum eingebracht wird, den Schalldruckpegel an jedem beliebigen Punkt im Raum und bei jeder beliebigen Frequenz innerhalb des für die Untersuchung relevanten Frequenzbereiches zu berechnen.

4 Diskussion

Abschliessend werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Studie kurz zusammengefasst und diskutiert. Es werden Schlussfolgerungen bezüglich Anwendbarkeit und Unsicherheit der untersuchten Messmethoden zur Ermittlung des mittleren Schalldruckpegels in kleinen Räumen bei tiefen Frequenzen angestellt, sowie weitere Untersuchungsansätze und offene Fragestellungen dargestellt.

Im Rahmen des experimentellen Teils der vorliegenden Studie wurde im Laboratory for Acoustics & Noise Control der Empa in Dübendorf ein Versuchsraum mit einem Volumen von etwas geringer als 25 m³ aufgebaut und das Schallfeld für die Sende- und Empfangsraum-Situation jeweils im leeren und möblierten Zustand detailliert vermessen zu können. Der mittlere Schalldruckpegel im Raum wurde mit zwei normierten Messverfahren, dem sogenannten Standardverfahren nach ISO 16283-1 und dem Verfahren für kleine Räume (<25 m³) bei tiefen Frequenzen (50 Hz, 63 Hz und 80 Hz-Terzband) nach ISO 16283-1, welches zusätzlich die Schalldruckpegel in den Raumecken bei der Bildung eines gewichteten Mittelwerts berücksichtigt, sowie mit einem nicht-normierten Verfahren, bei dem der Schalldruck entlang der Raumdiagonalen abgetastet wird, ermittelt. Als Referenz wurde der tatsächliche mittlere Schalldruckpegel im Raum aus einer Messung in einem dichten regelmässigen Messraster bestimmt. Stellvertretend für alle untersuchten Anrege- und Möblierungszustände, sind in Abbildung 37 die Verläufe der ermittelten mittleren Schalldruckpegel und deren Streuung für alle drei Verfahren sowie das Referenzverfahren für den Fall der Senderaumsituation ohne Möblierung dargestellt.

Für alle untersuchten Situationen, also unabhängig vom Möblierungszustand und Anregung des Raumes, zeigte sich derselbe tendenzielle Verlauf:

- Das Standardverfahren nach ISO 16283-1 unterschätzt wegen der Abtastung des Schallfeldes nur im zentralen Volumen des Raumes den tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel mit bis zu 4 dB. Die sogenannte Waterhouse-Korrektur beschreibt das Verhältnis zwischen diesem Mittelwert und dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum für ein diffuses Schallfeld, in diesem Fall nur oberhalb der Schroederfrequenz von ca. 400 Hz nach Gleichung (7), korrekt. Im Frequenzbereich darunter liegt ein modal geprägtes Schallfeld mit wenigen stehenden Wellen im Raum vor.
- Die Berücksichtigung des maximalen Schalldruckpegels bei der Bildung des gewichteten Mittelwerts gemäss dem Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen nach ISO 16283-1 führt zu einer besseren Übereinstimmung der Werte mit dem tatsächlichen Schalldruckpegel im Raum im 50 Hz, 63 Hz und 80 Hz Terzband. Es ergibt sich jedoch dadurch ein künstlicher Sprung (4 dB in dem vorliegenden Fall) in den Ergebnissen auf Grund des Übergangs vom einen zum anderen Verfahren.
- Die Abtastung des Raumes entlang seiner Diagonalen ergab die beste Übereinstimmung mit dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum.

Die Änderung der Möblierung im Raum hatte bei keiner der drei getesteten Methoden einen erkennbaren Einfluss auf das Verhältnis der Ergebnisse relativ zu dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum. Für die Änderung der Anregesituation mit dem Lautsprecher (Sende- und Empfangsraumsituation) wurde ein geringfügiger aber dennoch signifikanter Einfluss auf das Verhältnis bei den beiden normierten Verfahren festgestellt, nicht jedoch bei der alternativen Methode mit Messung des Schalldruckpegels entlang der Diagonalen. Durch die Möblierung im Raum stieg für alle Messmethoden die Unsicherheit der Messergebnisse an. Dies war besonders ausgeprägt - aber stets noch akzeptabel - für die Messung entlang der Diagonalen bei Frequenzen oberhalb 125 Hz. Insgesamt wurden auf jeder Diagonalen an nur 6 Messpunkten gemessen und im möblierten Zustand musste zum Teil die Anzahl der Messpunkte verringert werden, da sie von Möbeln verdeckt waren. Die Unsicherheit liesse sich daher sicher mit geringem Mehraufwand bei der Messung verbessern.

Bei dem Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenzen nach ISO 16283-1 wurden Untersuchungen speziell zur Bestimmung der maximalen Schalldruckpegel in den Raumecken angestellt. Der Einfluss des Abstandes zu den Raumbegrenzungsflächen ist sehr gering in dem in der Norm vorgeschriebenen Messbereich. Selbst bei sehr viel geringeren Abständen blieben die Pegel konstant, da das Mikrofon sich bei einem modalen Schallfeld mit schallharten Raumbegrenzungen in einem Schalldruckmaximum befindet. Daher bleibt anzumerken, dass Abstände von den Eckmesspunkten zu den Raumbegrenzungsflächen, die geringer sind als in der Norm vorgeschrieben, die Unsicherheit des Ergebnisses nicht beeinflussen. Weit- aus grössere Abstände sind hingegen problematisch, da dann der Messpunkt sich in Richtung eines Schalldruckpegelminimums bewegt.

Die Unterschiede der Schalldruckpegel in den verschiedenen Ecken eines leeren Raums sind ebenfalls sehr gering (Bandbreite 1 dB). Für den möblierten Raum wurden Ecken mit wesentlich höheren Schalldruckpegeln ermittelt, in denen sich jedoch Möbelstücke in geringen Abstand (ca. 20 cm) befanden und diese daher ohnehin von der Norm für die Messung ausgeschlossen wurden. In Ecken mit Möbelstücken, die sich weiter entfernt befanden, wurden vergleichbare Pegel wie in den freien Ecken gemessen. Die Bedingung der Norm für einen Mindestabstand von 0.5 m der Möbelstücke von Ecken, die für die Messung in Betracht kommen, wurde als sinnvoll bestätigt.

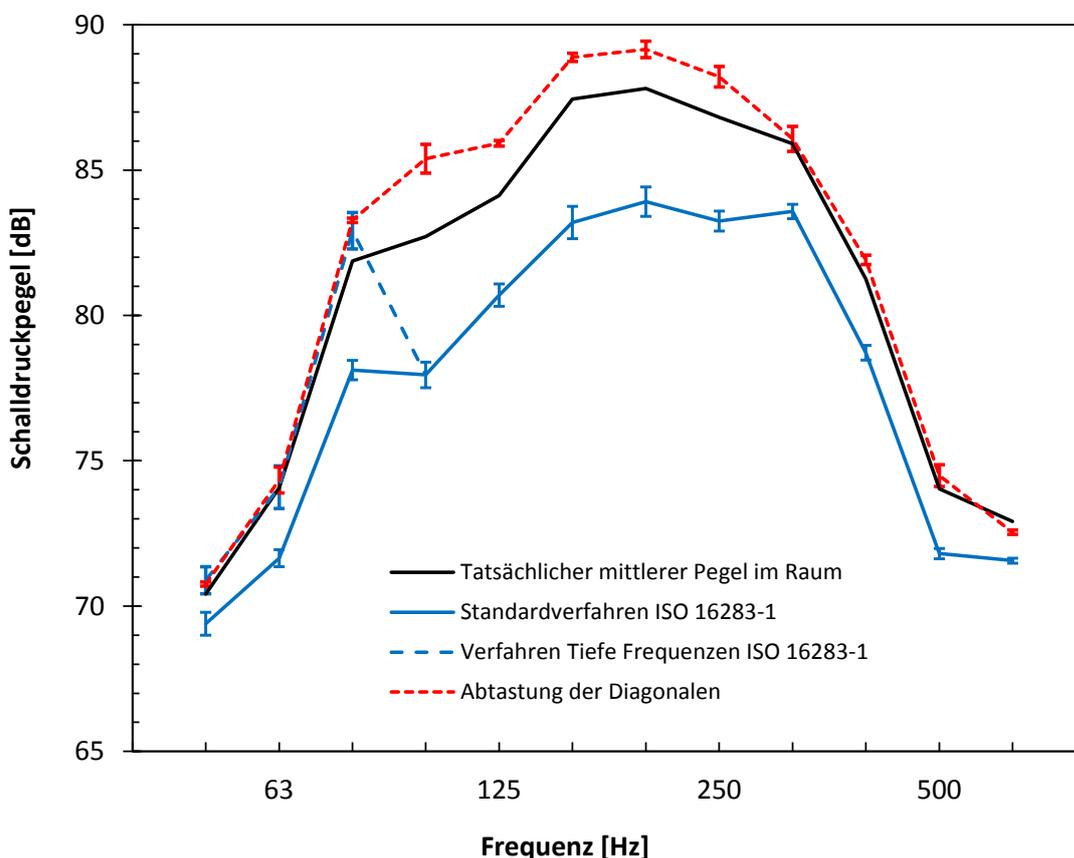


Abbildung 37: Vergleich der vier angewandten Abtast- und Mittelungsverfahren zur Bestimmung des mittleren Schalldruckpegels im Raum für die Senderaumsituation ohne Möblierung und deren Unsicherheit ausgedrückt in der Standardabweichung.

Die experimentelle Untersuchung wurde in nur einem Raum mit einer festen Raumgeometrie durchgeführt. Es muss unbedingt das Schallfeld in Räumen mit anderen Geometrien detailliert charakterisiert werden. Da eine solche Folgeuntersuchung experimentell sehr aufwendig ist, wurden parallel zu der experimentellen Studie in einer analytischen und numerischen Untersuchung die Grundlagen für eine Anwendung von kommerziellen Finite-Elemente-Programmen bei der Berechnung von Schallfeldern in kleinen

Räumen vorbereitet. Es wurden die optimalen Parameter für eine Diskretisierung von Räumen bestimmt, die eine effiziente Berechnung mit einer vertretbaren Unsicherheit sicherstellen, und anschliessend wurde auch die Anwendbarkeit der Methode validiert. Eine gute Abbildung der Möblierung in der Simulation anhand der verwendeten Eingangsdaten für Oberflächenadmittanzen wurde als nicht einfach aber auch nicht als unmöglich identifiziert. Da aber im Experiment kein erkennbarer Einfluss durch die Möblierung auf den Zusammenhang zwischen dem tatsächlichen mittleren Schalldruckpegel im Raum und den verschiedenen Mittelwerten festgestellt wurde, könnte in dieser numerischen Studie die Möblierung vernachlässigt werden, was das Raummodell in der Simulation wesentlich vereinfachen würde.

Die Auswirkung auf die gemessene Schalldämmung, die sich durch den Sprung beim Übergang von dem Verfahren für kleine Räume bei tiefen Frequenz und dem Standardverfahren zwischen dem 80 Hz und 100 Hz Terzband ergibt, und ob daherein festgelegter Übergang überhaupt sinnvoll ist, muss ebenfalls detailliert untersucht werden. Es sei der schlimmste mögliche Fall angenommen von zwei nebeneinander liegenden Räumen mit vergleichbaren Abmessungen wie in der Studie, wobei aber der eine ein Volumen von etwas über 25 m³ und der zweite ein etwas geringeres Volumen aufweist. In diesem Fall müsste im kleineren Raum der mittlere Schalldruckpegel gemäss dem Tiefen-Frequenzen-Verfahren bestimmt werden, während im grösseren das Standardverfahren angewandt wird. Auf Grund der unterschiedlichen Abtast- und Mittelungsverfahren in den Räumen würde sich im 80 Hz Terzband je nach Messrichtung eine ca. 8 dB unterschiedliche Schalldämmung ergeben. Daher muss unbedingt über einen vom Raumvolumen abhängigen Übergang zwischen den beiden normierten Verfahren, zum Beispiel basierend auf der Schroederfrequenz oder der Modenanzahl im Frequenzband als Entscheidungskriterium, oder ein alternatives Verfahren, wie zum Beispiel die Messung entlang der Diagonalen, nachgedacht werden.

Des Weiteren muss auch die Nachhallzeit und deren Messung in kleinen Räumen bei tiefen Frequenzen untersucht werden, da dies die zweite für die Berechnung des Schalldämm-Masses sowie des Norm-Trittschallpegels aus Messungen bestimmte Grösse ist, die streng genommen nur für ein diffuses Schallfeld definiert ist, welches in kleinen Räumen bei tiefen Frequenzen ganz sicher nicht vorliegt.

5 Referenzen

- SN EN ISO 717 (1996) „Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen“
- EN ISO 10'140 (2010) „Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand“
- ISO 16'283-1 (2014) „Acoustics -- Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements“
- VDI 4100 (2011) „Schallschutz im Hochbau - Wohnungen - Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz“
- DIN 4109-1 (2013) „Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Anforderungen an die Schalldämmung“
- ANSYS, ANSYS User Manual, Edition 15.0, ANSYS Inc., Southpointe 2600 ANSYS Drive, Canonsburg, PA 15317, USA, November 2013
- Blazier, W.E. Jr., DuPree, R.B., „Investigation of low-frequency footfall noise in wood-frame, multifamily building construction“, Journal of the Acoustical Society of America, Volume 96(3), 1994
- Hopkins, C., Turner, P. “Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies“, Applied Acoustics, Volume 66, 2005
- Lubman D., Precision of reverberant sound power measurements, Journal of the Acoustical Society of America 56 (1974) 523-533
- Moorhouse, A., Ramadorai, R., „Measurement of the Average Sound Pressure Level in a Room at Low Frequency“, Proceedings of ICSV 13, Vienna, Austria, 2006
- Rasmussen, B. “Sound Insulation between Dwellings – Overview of the Variety of Descriptors and Requirements in Europe“, Proceedings of Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark
- Rasmussen, B., Machimbarrena, M., Editors “COST Action TU0901 - Towards a common framework in building acoustics throughout Europe“, ISBN: 978-84-616-7124-3, 2013
- Rychtáriková, M., Mülner, H., Stani, M., Chmelik, V., Glorieux, C., „Does the living noise spectrum adaptation of sound insulation match the subjective perception“, Proceedings of EURONOISE 2012, Prague, Czech Republic
- Scholl, W., “Revision of ISO 717: Future single-number quantities for sound insulation in buildings“ Proceedings of Forum Acusticum 2011, Aalborg, Denmark
- Schroeder M.R., Effect of frequency and space averaging on the transmission responses of multimode media, Journal of the Acoustical Society of America 46 (1969) 277-283
- Schroeder M.R., Kuttruff H., On frequency response curves in room, Journal of the Acoustical Society of America 34 (1962) 76-80
- Simmons, C, Hagberg, K., Backman, E., “Acoustical Performance of Apartment Buildings – Resident’s Survey and Field Measurements“, AkuLite Report 2, SP Report 2011:58
- Simmons, C., „Uncertainties of room average sound pressure levels measured in the field according to the draft standard ISO 16'283-1 – Experiences from a few case studies“, AkuLite Report 3, SP Report 2012:28
- Skålevik M., Schroeder Frequency Revisited, Forum Acusticum (2011)
- Waterhouse, R.V. “Interference patterns in reverberant sound fields“, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 27(2), 1955