

Diploma Thesis

Numerical simulation of the sound reduction index in the low frequency range of an external composite thermal insulation concrete wall using the finite element method

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

Diplomarbeit

Numerische Simulation des Schalldämm-Maßes im tiefen Frequenzbereich einer Wärmedämmverbundsystem Betonwand anhand der finiten Elemente-Methode

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

von

Nicolà Magrini

Matr.Nr.: 01327878

unter der Anleitung von

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

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Maximilian Neusser**

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich Bauphysik
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13, 1040 Wien

Wien, im Februar 2022

Kurzfassung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, das Schalldämm-Maß bei niedrigen Frequenzen (50 bis 1000 Hz) an einer Betonwand mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) zu bestimmen und die Ergebnisse mit experimentell gewonnenen Daten zu vergleichen. Die sich daraus ergebende Forschungsfrage lautet: „Wie genau kann das Schalldämm-Maß einer WDVS Betonwand anhand der FEM Simulation prognostiziert werden und welche Modellierungsansätze werden dafür benötigt?“ Die Messungen des Schalldämm-Maßes wurden im Labor des Akustik Centers Austria durchgeführt. Die Eingangsdaten für die Simulation in der kommerziellen FEM-Software COMSOL wurden durch Messungen und Literaturdaten eingeholt. Für die Erstellung der verschiedenen Simulationsmodelle wurden unterschiedliche Modellierungsansätze herangezogen. Insgesamt wurden elf Modelle erstellt. Die simulierten Ergebnisse wurden bewertet, indem die durchschnittlichen, maximalen und minimalen Abweichungen der simulierten Schalldämm-Maße zu dem experimentell ermittelten Schalldämm-Maß verglichen wurden. Das Modell mit der geringsten durchschnittlichen Abweichung von 5,4 dB ist folgend aufgestellt: Der diffuse Schall wird als Summe unkorrelierter ebener Wellen auf der Wandoberfläche erzeugt und bildet die Anregung des Bauteils durch das Luftschallfeld des Senderraums ab. Die Dämmschicht wird als elastischer Festkörper und die Plattenschicht als Schalenelement modelliert. Der Empfangsraum ist in diesem bestimmten Modell anhand „Perfectly Matched Layers“ (PML) als unendlicher Halbraum modelliert. Die Berechnungszeit des Modells betrug 6:30 Stunden mit einer Anzahl von 118692 finiten Elemente.

Abstract

The goal of this thesis is to determine the sound transmission loss at low frequencies (50 to 1000 Hz) of a concrete wall with an external thermal composite system (ETICS) using the finite elements method (FEM) and to compare the obtained results to experimentally obtained data. Therefore, the research question is as follows: “How precise can the sound transmission loss of an ETICS concrete wall be simulated using the FEM and which modelling set-ups provide the best result?” The experimental data was measured in the laboratory Akustik Center Austria. The input data for the simulation in the commercial FEM software COMSOL was obtained through measurements and literature data. Different set ups were used to create different simulation models. There are in total eleven models. The simulated results were evaluated by determining the average, maximum and minimum deviations of the simulated sound reduction index from the experimentally determined one. The model with the smallest average deviation of 5.4 dB is set up as follows: The diffuse sound is generated as a sum of uncorrelated plane waves on the wall surface and maps the excitation of the test wall by the airborne sound field of the transmitter room. The insulation layer is modelled as an elastic solid body and the plaster layer as a shell element. The receiving room is modelled in this particular model as an infinite half-space using perfectly matched layers (PML). The calculation time of the model was 6:30 hours with a finite element count of 118692.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
1.1	Motivation, Zielsetzung und Relevanz	6
1.2	Literaturlauswertung	7
1.3	Methodik.....	8
2	Akustisches Verhalten einer Wärmedämmverbundsystem (WDVS) Wand	9
2.1	Aufbau und akustisches Verhalten	9
2.2	Einfluss der Resonanzfrequenz.....	10
2.3	Einfluss der Dämpfung	11
3	Messung im Labor – Akustik Center Austria.....	12
3.1	Geometrie der Räume	12
3.2	Abmessungen und Materialdaten der WDVS Betonwand	12
3.3	Messungsablauf	13
3.4	Ergebnisse der Messungen im Labor.....	13
3.4.1	Nachhallzeit im Empfangsraum	14
3.4.2	Nachhallzeit im Senderraum	14
3.4.3	Schallabsorptionsgrad im Empfangsraum	15
3.4.4	Schallabsorptionsgrad im Senderraum	15
3.4.5	Schalldämm-Maß der WDVS Wand	16
3.4.6	Verbesserung der Luftschalldämmung durch das WDVS.....	17
4	Modellbildung in der Finiten Elemente (FE) Umgebung COMSOL	18
4.1	Modellbildung der Messräume	18
4.2	Herleitung der Luftschallanregung durch ebene Wellen	20
4.2.1	Geometrische Interpretation von ebenen Wellen	20
4.2.2	Zerlegung des Wellenzahlenvektors in Kugelkoordinaten.....	21
4.2.3	Aufstellen des Schalldruckfeldes	22
4.3	„Perfectly Matched Layers“ (PML).....	22
4.4	Modellbildung der WDVS Betonwand.....	23
4.4.1	Lagerung der Betonwand	23
4.4.2	Modellierung der Dämmschicht.....	23
4.4.3	Modellierung der Putzschicht.....	25
4.5	Schallausbreitung in der Luft.....	26
4.6	Schallausbreitung in Festkörpern.....	28
4.7	Kopplung Akustik-Mechanik.....	30
4.8	Aufstellung der Modelle	30
4.8.1	Modell 1: Ebene Wellen und Perfectly Matched Layers.....	31

4.8.2	Modell 2: Senderraum und Empfangsraum	32
4.8.3	Modell 3: Ebene Wellen und Empfangsraum	33
4.8.4	Modell 4: Senderraum und Perfectly Matched Layers.....	33
4.9	Aufstellung der Untermodelle anhand der zweiten Gruppe von Modellierungsansätzen.....	34
5	Auswertung der Simulationsergebnisse.....	35
5.1	Auswertung der Simulationsergebnisse der Untermodelle von Modell 1	35
5.1.1	Modell 111	35
5.1.2	Modell 121	36
5.1.3	Modell 212	37
5.1.4	Modell 122	37
5.1.5	Modell 211	38
5.1.6	Modell 221	39
5.1.7	Modell 112	39
5.1.8	Modell 222	40
5.2	Vergleich der Ergebnisse der Untermodelle mit der Messung	41
5.3	Auswertung der Simulationsergebnisse der Modelle 2, 3 und 4	42
5.3.1	Ergebnisse der Simulation am Modell 2	42
5.3.2	Ergebnisse der Simulation am Modell 3	43
5.3.3	Ergebnisse der Simulation am Modell 4	44
5.4	Vergleich Modelle 1,2, 3 und 4 mit der Messung.....	44
5.5	Anzahl der finiten Elemente und Berechnungszeit der Modelle.....	46
6	Schlussfolgerung.....	47
	Literaturverzeichnis	49
	Abbildungsverzeichnis	50
	Tabellenverzeichnis.....	53
	Anhang.....	54

1 Einleitung

1.1 Motivation, Zielsetzung und Relevanz

Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) bestehen aus einer Dämmschicht auf der eine dünne Putzschicht aufgetragen wird. Dieses System wird mit Klebemörtel und Dübel an der Grundwand befestigt und bildet somit die Fassade eines Gebäudes. Die primäre Rolle eines WDVS ist der thermische Schutz des Gebäudeinneren. Dazu sind WDVS in der Herstellung nicht teuer und einfach aufzubauen, wodurch sie im Bauwesen vermehrt eingesetzt werden [1]. Des Weiteren beeinflussen Wärmedämm-Verbundsysteme die Schalldämmung der Grundwand. Das akustische Verhalten der Grundwand mit dem WDVS kann vereinfacht als die eines Masse-Feder-Masse Systems gesehen werden [1]. Dadurch wird im Bereich der Resonanzfrequenz dieses Masse-Feder-Masse Systems das Schalldämm-Maß der Grundwand verschlechtert. Oberhalb dieser Frequenz kommt es zu einer Verbesserung des Schalldämm-Maßes im Vergleich zum Schalldämm-Maß der Grundwand. Unterhalb der Frequenz gibt es keinen Unterschied der Schalldämm-Maße.

Im Bericht „Leitlinien für Umgebungslärm für die Europäische Region“ [2] besagt die World Health Organization (WHO), dass die Aussetzung an Lärm negative Effekte auf die menschliche Gesundheit zeigen kann. Die Lärmaussetzung kann z.B. zu Hörverlust oder Tinnitus führen und eine Langzeitaussetzung bei hohem Lärmpegel kann noch weitere negative Effekte auf die Gesundheit der Menschen bewirken. Da der Verkehrslärm ein Spektrum mit großen tieffrequenten Anteilen aufweist, ist die Schalldämmung der WDVS Wand im tiefen Frequenzbereich von besonderem Interesse.

Um das Schalldämm-Maß einer WDVS Wand zu bestimmen, wird dieses im Prüfstand gemessen. Somit können Planer*Innen je nach Anforderung, wie z.B. die in [2] beschriebenen Leitlinien, das passende WDVS zur Grundwand wählen. Der größte bekannte Nachteil der Messmethode [3] im Labor ist jedoch die Schwierigkeit ein diffuses Schallfeld bei tiefen Frequenzen zu erzeugen. Diese wesentliche Annahme des Messverfahrens bietet ebenso die Basis für Reproduzierbarkeit von Messergebnissen. Eine unzureichende Diffusität im Raum deutet auf das Vorhandensein von stehenden Wellen hin, die zu hohen Schwankungen des Schalldruckpegels führen [4]. Somit ist das Schalldämm-Maß der Bauteile abhängig von der Raumgeometrie und der Ausbildung der Schallfelder in den Prüfräumen des Messlabors [5]. Dazu kann der Prüfstand die tatsächlichen räumlichen Gegebenheiten nicht vollständig berücksichtigen, wodurch das gemessene Schalldämm-Maß beeinflusst wird.

In [5] wird das Schalldämm-Maß einer Betonwand anhand der Finiten Elemente Methode (FEM) in der Software COMSOL simuliert, welches dadurch laborunabhängig prognostiziert werden kann. Dadurch können Planungsfehler vermieden werden und der Einfluss des Labors entfällt. Derzeit gibt es jedoch noch keine Literatur zur Simulation des Schalldämm-Maßes einer WDVS Wand anhand der FEM. Daher wird in dieser Arbeit untersucht, ob das Schalldämm-Maß bei tiefen Frequenzen bei einer Betonwand mit WDVS auch in der FEM bestimmt werden kann. Dazu werden verschiedene Modellierungsansätze betrachtet, um unterschiedliche Simulationsmodelle aufzustellen. Die daraus resultierenden Ergebnisse sollen Auskunft über die Kombination der Modellierungsansätze zur Prognose des Schalldämm-Maßes liefern, welche die besten Übereinstimmungen mit den experimentell gewonnenen Daten aus dem Messlabor aufweisen. Die sich daraus ergebende Forschungsfrage lautet: „Wie genau kann das Schalldämmmaß einer WDVS Betonwand anhand der FEM Simulation prognostiziert werden und welche Modellierungsansätze werden dafür benötigt?“

1.2 Literaturlauswertung

Im folgenden Kapitel wird ein Einblick in die relevante Literatur zum Thema Luftschalldämmung von Bauteilen und dessen Prognoseverfahren gegeben.

Analytische Lösungsverfahren zur Prognose der Schalldämmung werden bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt. Die damals hergeleiteten Theorien beziehen sich prinzipiell auf unendlich ausgedehnten Flächen. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da die am Rande der Wand entstehenden Reflektionen der BiegeWellen bei unendlich ausgedehnten Platten unberücksichtigt bleiben. Schnell wurde herausgefunden, dass die Schalldämmung sowohl frequenz- als auch massenabhängig ist [6], [7]. Später konnte Cremer [8] zeigen, dass die Schalldämmung von flächigen unendlich ausgedehnten Platten von deren Biegesteifigkeit abhängt. Er entwickelte somit ein Modell das Massenträgheit, Biegesteifigkeit und Materialdämpfung der Trennwand berücksichtigt, wobei dieses Modell eine Vereinfachung darstellt, da die Lagerung der Platten nicht berücksichtigt wird. Da Bauteile jedoch nicht unendlich ausgedehnt sind, wurde später ein Berechnungsverfahren von Heckl [9] entwickelt, welches die Randeinflüsse auf das Schalldämm-Maß des Bauteils berücksichtigt. Sabine zeigte in [10] die Beziehung zwischen dem Volumen eines Raums, der Schallabsorption der im Raum vorhandenen Oberflächen und der Nachhallzeit. Einen ausführlicheren Einblick in die Entwicklung der Theorie der Schalldämmung gibt [11].

Ein anderes entwickeltes Verfahren, um die Schalldämmung zu prognostizieren, ist die Statistische Energie Analyse (SEA). Eine der ersten Anwendungen dieser Methode, um die Schalldämmung zu berechnen, ist in [12] wiederzufinden. Der Grundgedanke dieses Verfahrens ist es das System (z.B. WDVS) in mehreren gekoppelten resonanzfähigen Subsystemen zu unterteilen und den Schalleistungsfluss zwischen ihnen über Kopplungsverlustfaktoren zu quantifizieren. Diese Methode basiert auf einer Energiebilanz, um die Schalldämmung zu berechnen [13]. Die maßgebenden Größen sind die Erwartungswerte (Mittelwerte), die in der Resonanz gespeicherten Energie und dessen Leistungsfluss. Die SEA wird nur im Bereich hoher modalen Dichte (im hohen Frequenzbereich) als sinnvoll angesehen, da angenommen wird, dass die Energie gleichmäßig in den Subsystemen verteilt ist. Daher wird die Methode in dieser Arbeit nicht herangezogen.

Numerische Verfahren wurden ebenfalls zur Prognose des Schalldämmmaßes entwickelt. Die finiten Elemente Methode (FEM) ist in der Strukturmechanik weit verbreitet. Das Prinzip dieser Methode ist es die zugrunde liegenden Differentialgleichungen (DG) des physikalischen Problems durch numerische Methoden anzunähern [14]. Durch die schwache Formulierung der DG und der Teilung des Systems in finite Elemente ist es möglich ein Gleichungssystem aufzustellen und nach den Unbekannten zu lösen. Eine ausführliche Erklärung der FEM ist in [15] zu finden. Eine Detaillierung der FEM für Fluid-Struktur Interaktionen ist in [13],[16] zu finden. In [11] wurde anhand der FEM Methode das Schalldämm-Maß einschaliger Bauteile von endlicher Abmessung unter verschiedenen Lagerungsbedingungen untersucht. In [5] zeigt die FEM Software COMSOL wie das Schalldämm-Maß einer Betonwand bestimmt werden kann. .

Andere Prognoseverfahren sind die „Boundary Element Method“ (BEM), die wellenbasierte Methode und die Transfermatrixmethode. In [14] wird ein Überblick über diese Methoden gegeben und auf weiterer Literatur hingewiesen.

Erst später wurde versucht das akustische Verhalten von Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) auf Außenwänden theoretisch nachzubilden, jedoch mit begrenztem Erfolg [1]. Anfang des 21. Jahrhundert wurde vom Fraunhofer Institut [17] ein Rechenverfahren zur Prognose der Verbesserung zum Schalldämm-Maßes einer WDVS Wand vorgeschlagen, das sich auf semiempirische Formeln bezieht. Dieses erlaubt anhand der Eigenschaften des WDVS (Dämmung, Putz, etc.) im besten Fall eine Genauigkeit von 2,0 dB.

1.3 Methodik

Aus dem Stand der Forschung geht hervor, dass die Finiten Elemente Methode noch nicht zur Prognose einer WDVS Betonwand angewendet wurde. Diese Arbeit ist in aufeinander aufbauende Teilbereiche gegliedert, um dadurch die Forschungsfrage zu beantworten, wie genau das Schalldämm-Maß einer WDVS Betonwand anhand der FEM Simulation prognostiziert werden kann. Diese Teilbereiche sind im Folgenden kurz beschrieben:

- Der erste Abschnitt beinhaltet das aus der Literaturrecherche hervorgehende Forschungsinteresse und den derzeitigen Stand der Literatur. Darauf aufbauend wird in Kapitel 2 das akustische Verhalten einer Wärmedämmsystem (WDVS) Wand und der Einfluss des Systems auf die Schalldämmung der Grundwand beschrieben. Diese Erkenntnisse sind für den späteren Aufbau und die Auswertung der Modellierungen relevant.
- Im nächsten Schritt wird die Messung des Schalldämm-Maßes der WDVS Betonwand im Labor des Akustik Center Austria beschrieben. Dabei werden außerdem Eingangsparmeter gemessen, die für die Modellierung in der finiten Elemente (FE) Umgebung COMSOL benötigt werden. Die Messung dient als Basis für die Erstellung eines Simulationsmodells zur Prognostizierung der Schalldämmung durch die FE Berechnung.
- Nach Abschluss der Messungen im Labor werden die ermittelten Messdaten zur Modellierung anhand der FEM herangezogen. Zur Modellierung werden unterschiedliche Modellierungsansätze verwendet, die in Kapitel 4 detailliert beschrieben werden. Dabei wird auf die Vor- und Nachteile der jeweiligen Modellierungsansätze eingegangen. In dieser Arbeit werden 7 Modellierungsansätze betrachtet, die je nach Modell unterschiedlich miteinander kombiniert werden: der Senderraum, der Empfangsraum, ebene Wellen, „Perfectly Matched Layers“, die Lagerung der Betonwand, die Dämmschicht und die Putzschicht.
- Für die Modellierung der Simulationsmodelle werden die Modellierungsansätze in zwei Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe umfasst die Ansätze der Raumbildung und die Erzeugung des Schallfeldes. Mittels Permutation dieser vier Ansätze werden im ersten Modellierungsschritt vier Modelle (Modell 1 bis 4) entwickelt. Anschließend werden bei einem dieser Modelle weitere Untermodelle erstellt, welche auch die zweite Gruppe der Modellierungsansätze berücksichtigt. Dazu zählen die Lagerung der Betonwand, die Dämmschicht und die Putzschicht. Aus deren Kombination ergeben sich acht Untermodelle, welche das Schalldämm-Maß einer WDVS Wand prognostizieren. Die Bewertung erfolgt quantitativ anhand der durchschnittlichen Abweichung zur Messung, der maximalen Abweichung zur Messung und der minimalen Abweichung zur Messung. Es wird ebenfalls bewertet ob die Resonanzeinbrüche aus der Koinzidenz und dem Masse-Feder-Masse System in der Prognose vorhanden sind. Daraus wird die beste Kombination der zweiten Gruppe an Modellierungsansätzen bestimmt.
- Die beste Kombination der Modellierungsansätze aus den Untermodellen wird anschließend in Kombination mit den Modellierungsansätzen aus der ersten Gruppe, in den Modellen 1 bis 4 angewendet, um das Modell mit der genauesten Prognose zu bestimmen. Daraus lässt sich schlussendlich die beste Kombination an Modellierungsansätzen aus der ersten Gruppe bestimmen.
- Am Ende der Arbeit wird im Anhang einen Bericht über das Simulationsmodell mit dem besten Ergebnis bereitgestellt, sodass die Aufstellung und Berechnung des Modells in der kommerziellen FE Software COMSOL reproduzierbar ist

2 Akustisches Verhalten einer Wärmedämmverbundsystem (WDVS) Wand

2.1 Aufbau und akustisches Verhalten

Unter der Bezeichnung WDVS versteht man den gesamten Schichtenaufbau vor der Tragschale [18] (siehe Abbildung 1). Die verschiedenen Schichten bestehen aus einer mit Mörtel an der Wand verklebten Dämmschicht und aus einer Putzschicht [19]. Die Dämmplatten werden üblicherweise teilflächig mit einem Anteil von etwa 40 zu 60 Prozent verklebt. Auf der Wärmedämmplatte wird anschließend der Putz aufgetragen, welcher aus mehreren Schichten (Ober- und Unterputz) besteht. Der Unterputz wird zusätzlich mit einem eingebetteten Armierungsgewebe aus Kunststoff bewehrt. Aus statischen Gründen kann auch eine Verdübelung der Schichten an die Grundwand erforderlich sein. Beim Wärmedämmverbundsystem kommen laut [20] drei Arten von Dämmstoffen im Einsatz. Tabelle 1 listet diese auf.

Tabelle 1 Dämmstoffe die bei einem WDVS System zum Einsatz kommen

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen	Hanf, Holzfaserdämmstoffe, Holzwolle-Leichtbauplatten, Kork und Schilf
Mineralische Dämmstoffe	Mineralwolle, Mineralschaumplatte, expandierte Perlite, expandierter Obsidian
Synthetische Dämmstoffe	Expandiertes Polystyrol EPS, extrudiertes Polystyrol, PUR Hartschaum, Harzbasis

Um das akustische Verhalten einer homogenen isotropen Wand mit WDVS verstehen zu können, werden im Folgenden die wichtigen Einflussgrößen vorgestellt. Ein WDVS an einer Betonwand kann sehr vereinfacht als ein Masse-Feder-Masse System modelliert werden. Dabei sind die Betonwand und der Putz als Masse und die Dämmung als Feder zu verstehen. Da in der Praxis die Masse des Putzes viel geringer als die Masse der Betonwand ist, kann die Betonwand als unbeweglich angesehen werden [1]. Dadurch vereinfacht sich das System zu einem Einmassenschwinger. Die erste Resonanzfrequenz des Einmassenschwinger wird durch folgende Formel definiert

$$f_R = 2\pi\omega_R = 160 \sqrt{\frac{s'}{m''_{\text{Putz}}}} \quad (1)$$

Wobei s' die dynamische Steifigkeit des Dämmstoffs in MN/m^3 und m'' die flächenbezogene Masse vom Putz in kg/m^2 darstellt.

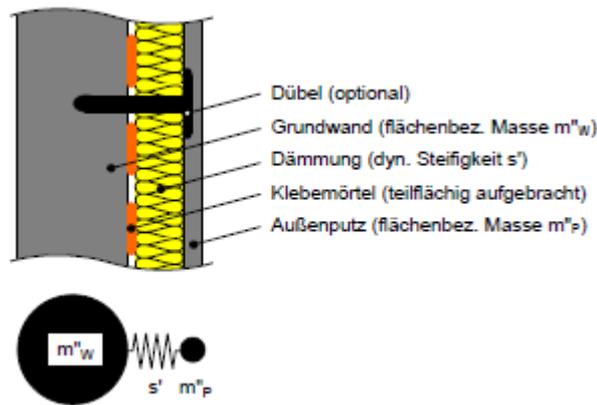


Abb. 1 Prinzipaufbau einer WDVS Wand (oben), Vereinfachtes Masse-Feder-Masse Modell eines WDVS auf einer Grundwand (unten) [1]

2.2 Einfluss der Resonanzfrequenz

Die Lage der Resonanzfrequenz im Frequenzspektrum kann anhand der beiden Parameter gesteuert werden. Je weicher die Dämmplatte und je höher die Putzmasse, desto geringer ist die Resonanzfrequenz. Die Putzschicht hat somit die Wirkung einer Vorsatzschale. Damit wird das Schalldämm-Maß einer Betonwand durch die Schalldämmung des WDVS im Resonanzbereich negativ und in anderen Bereichen positiv oder neutral beeinflusst. Der charakteristische Verlauf der Verbesserung ist in Abbildung 2 zu sehen. Das Schalldämm-Verbesserungsmaß zeigt den Einfluss des WDVS auf dem Schalldämm-Maß einer Grundwand (siehe Formel 2). Unterhalb der ersten Resonanzfrequenz kommt es zu keiner Änderung in der Schalldämmung. Im Bereich der Resonanzfrequenz kommt es zu einem Einbruch in der Verbesserung der Schalldämmung und somit zu einer Verschlechterung des Schalldämm-Maßes im Gesamtsystem. Wie tief der Einbruch ist, hängt vom inneren Verlustfaktor ab [14]. Oberhalb der Resonanzfrequenz steigt dann das Schalldämm-Maß mit dem theoretischen Wert von 12dB/Oktave. Im hohen Frequenzbereich kommt es zu einer Abflachung des Verbesserungsmaßes.

$$\Delta R = R_{WDVS+Grundwand} - R_{Grundwand} \quad (2)$$

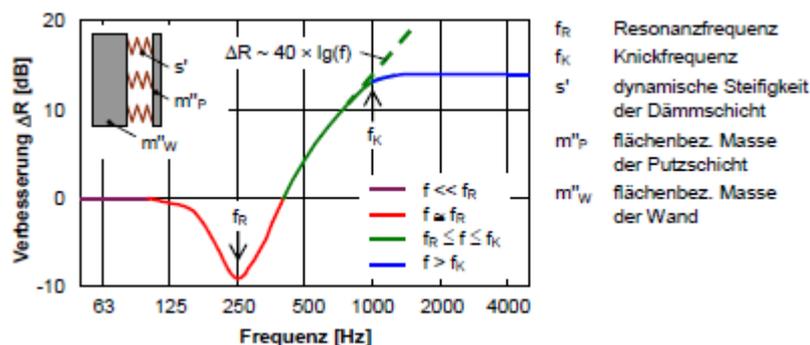


Abb. 2 Schalldämm-Verbesserungsmaß ΔR eines WDVS [1]

2.3 Einfluss der Dämpfung

In der Literatur gibt es viele mathematische Modelle, welche die Dämpfung von Strukturen darstellen können. Unter anderem gibt es die Coulomb'sche Dämpfung, die Rayleigh Dämpfung, die Caughey Dämpfung oder die hysteretische Dämpfung. Ein Überblick über diese Modelle wird in [21] gegeben. In dieser Diplomarbeit wird mit dem sogenannten inneren Verlustfaktor gearbeitet. Dieser ist material- und frequenzabhängig. Bei harmonischen Vorgängen lassen sich die Spannungs- und Dehnungsbeziehungen mathematisch in komplexer Weise schreiben. Durch Einführen eines komplexen E-Moduls kann der Verlustfaktor folgendermaßen beschrieben werden

$$\underline{E} = E' + iE'' = E'(1 + i\eta) \quad (3)$$

Wobei \underline{E} das komplexe E-Modul, E' das elastische E-Modul und E'' das Verlustmodul ist (siehe Abbildung 3). Die Einführung von η führt zu erheblichen Vereinfachungen im Rechnungsprozess [22]. Der Zusammenhang von Verlustfaktor und Schalldämm-Maß ist in Abbildung 4 zu sehen. Dort ist zu erkennen, dass der Einfluss vom Verlustfaktor nur im Bereich der Eigenfrequenzen und der Koinzidenzgrenzfrequenz vorhanden ist. Bei den anderen Frequenzen hat der Verlustfaktor keinen Einfluss auf das Schalldämm-Maß. Je größer der Verlustfaktor, desto größer die Dämpfung der Auslenkung der Struktur, und desto größer die Schalldämmung. [14]. Neben der Resonanzfrequenz und der Dämpfung wurde festgestellt, dass die Befestigung mit Dübeln und der Klebeflächenanteil einen Einfluss auf das akustische Verhalten aufweist [1].

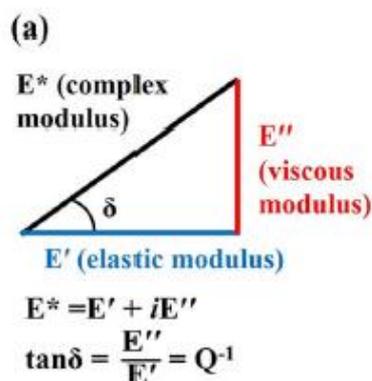


Abb. 3 Einführung eines Moduls im komplexen Raum [23]

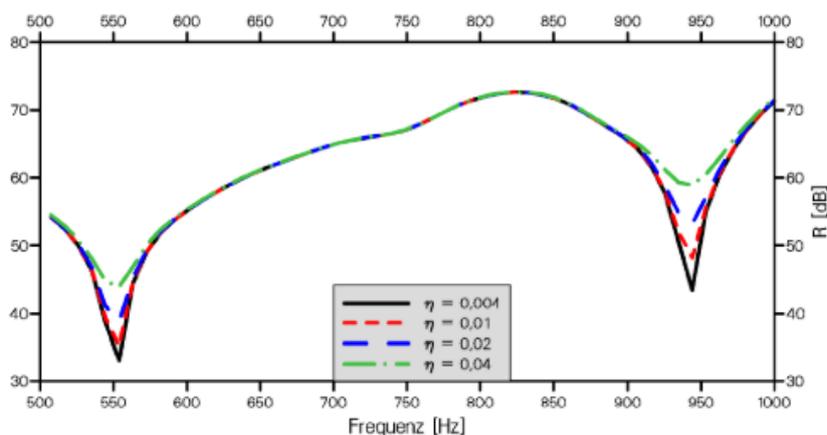


Abb. 4 Einfluss des Verlustfaktors auf den Einbruch im Bereich der Resonanzfrequenz [14]

3 Messung im Labor – Akustik Center Austria

Im folgenden Kapitel werden die im Akustik Center Austria durchgeführten Messungen des Schalldämm-Maßes beschrieben sowie die daraus resultierenden Ergebnisse erläutert. Um die Ergebnisse interpretieren zu können, werden in den folgenden Unterkapiteln die räumliche Geometrie, die Materialdaten der WDVS Betonwand sowie der Ablauf der Messungen beschrieben. Des Weiteren werden die Messungsergebnisse vorgestellt.

3.1 Geometrie der Räume

Die Messungen im Akustik Center Austria haben einen Sende- und Empfangsraum umfasst, welche durch eine WDVS Betonwand getrennt wurden. In Abbildung 5 wird der Prinzipaufbau des Prüfstandes dargestellt. Der Senderaum ist putzseitig und der Empfangsraum betonseitig definiert. In Tabelle 2 sind die geometrischen Daten des Sende- und Empfangsraumes aufgelistet. Diese Daten sind für die Aufstellung der Modelle relevant.

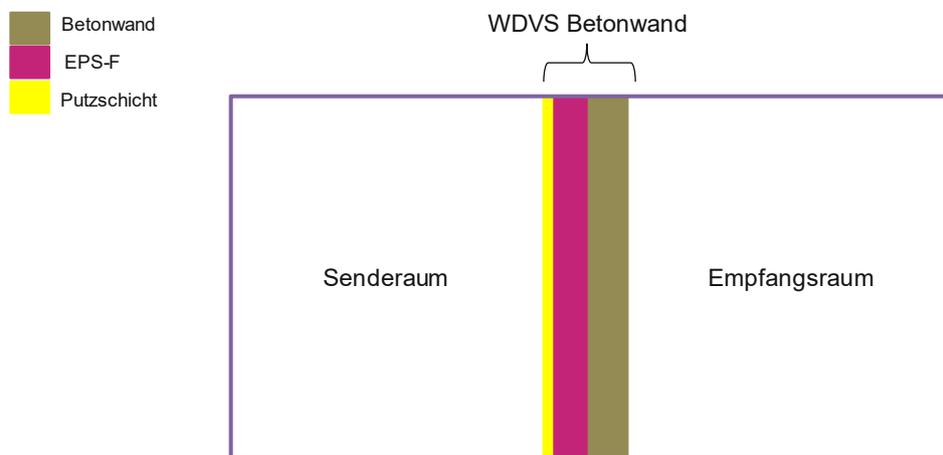


Abb. 5 Prinzipaufbau des Prüfstandes und der WDVS Prüfwand

Tabelle 2 Geometrische Daten vom Sende- und Empfangsraum

	Senderaum	Empfangsraum
Länge	5,5 m	5,2 m
Breite	4,0 m	4,0 m
Höhe	2,7m	2,7 m
Volumen	59,4 m ³	56,16 m ³
Summe der Flächen	95,3 m ²	91,28 m ²

3.2 Abmessungen und Materialdaten der WDVS Betonwand

In Tabelle 3 sind die Abmessungen und Materialdaten der WDVS Betonwand angegeben, welche für den Aufbau der Simulationsmodelle relevant sind. An dieser Stelle wird hingewiesen, dass manche Werte der Betonwand und des WDVS aus der Literatur entnommen wurden oder Erfahrungswerte sind. Auch nach Rücksprache mit den Autoren [21] kann nicht bestätigt werden, dass die verwendeten Werte eindeutig stimmen.

Tabelle 3 Materialdaten der WDV5 Wand

Betonwand	
Länge	4,0 m
Dicke	0,15 m [24]
Höhe	2,7 m
Dichte	2100 kg/m ³ [24]
Verlustfaktor	0,01
Dämmschicht EPS-F	
Dicke	0,16 m [24]
Dynamische Steifigkeit	52 MN/m ³
Verlustfaktor	0,1
Putzschicht	
Dicke	0,005 m [24]
Dichte	1500 kg/m ³ [25]
Verlustfaktor	0,01 [26]

3.3 Messungsablauf

Die Messung der Schalldämmung der WDV5 Betonwand nach Norm [3] bildet neben den Daten aus der Literatur, die Grundlage für die Eingangsdaten der Simulation sowie die Validierungsgrundlage für die in Kapitel 4 und Kapitel 5 durchgeführten Simulationen in der kommerziellen FEM Software COMSOL. Zur Berechnung des Schalldämm-Maßes werden folgende Daten benötigt, die durch die Messung im Labor bestimmt werden: der Schalldruckpegel im Sende- und Empfangsraum sowie die Nachhallzeit im Empfangsraum.

Außerdem wird die Berechnung der mittleren Schallabsorptionsgrade im Senderaum und im Empfangsraum als Eingangsdaten für die Aufstellung eines Simulationsmodells benötigt. Zur Berechnung der Schallabsorptionsgrade werden folgende Daten benötigt, die ebenso durch Messungen nach Norm [27] bestimmt werden: die Nachhallzeit im Senderaum und im Empfangsraum. Folgender Messablauf wurde im Akustik Center Austria durchgeführt:

- Messung der Nachhallzeit im Empfangsraum und im Senderaum
- Drei Messungen der Pegel mit einem Lautsprecher an drei verschiedenen Stellen
- Drei Messungen der Pegel mit zwei Lautsprechern an drei verschiedenen Stellen
- Eine Messung der Pegel mit drei Lautsprechern

Es wurden mehrere Messungen der Pegel mit einer jeweils unterschiedlichen Anzahl an Lautsprechern durchgeführt, da zum Zeitpunkt der Messung noch nicht gewiss war, wie viele Lautsprecher im Simulationsmodell benötigt werden. Ein Vorteil der mehrmaligen Messung der Schalldämmung ist, dass die Unsicherheiten der Messergebnisse reduziert werden.

3.4 Ergebnisse der Messungen im Labor

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen im Labor dargestellt.

3.4.1 Nachhallzeit im Empfangsraum

Das erste Ergebnis in Abbildung 6 zeigt die Nachhallzeit im Empfangsraum. Die Messung der Nachhallzeit wurde anhand des „swept-sine“ Verfahrens [27] durchgeführt.

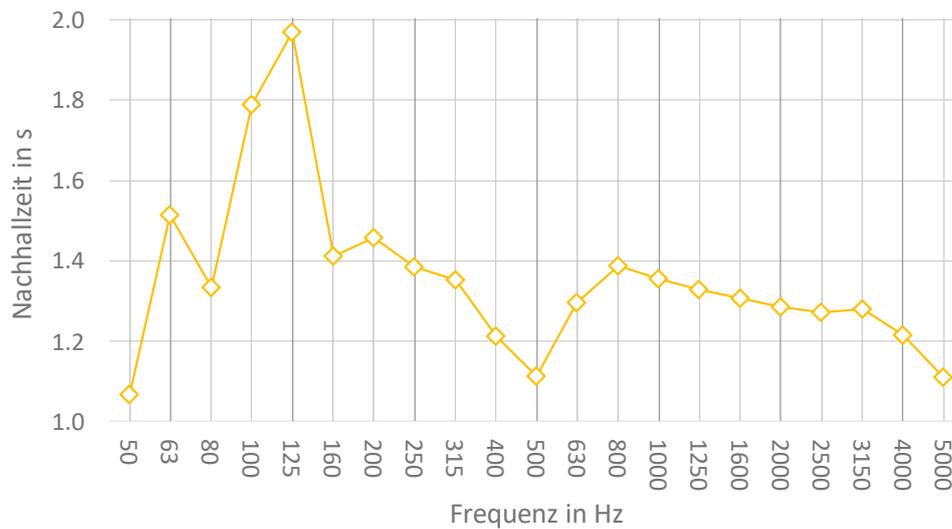


Abb. 6 Ergebnis der gemessenen Nachhallzeit über das Frequenzspektrum im Empfangsraum

3.4.2 Nachhallzeit im Senderraum

Die Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der gemessenen Nachhallzeit im Senderraum. Die Messung der Nachhallzeit wurde anhand des „swept-sine“ Verfahrens [27] durchgeführt.

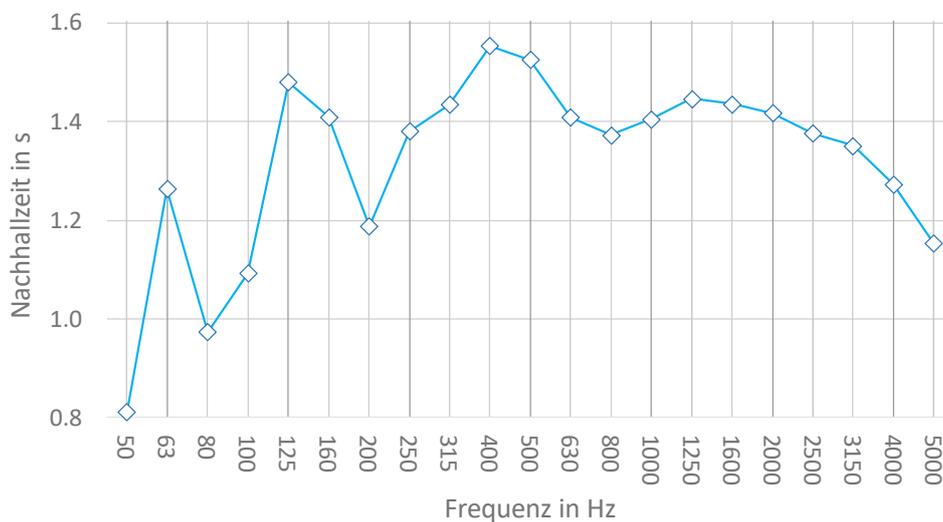


Abb. 7 Ergebnis der gemessenen Nachhallzeit über das Frequenzspektrum im Senderraum

3.4.3 Schallabsorptionsgrad im Empfangsraum

Der mittlere Schallabsorptionsgrad errechnet sich laut Formel (4)

$$\alpha = 0,163 \cdot \frac{V}{S \cdot T} \quad (4)$$

Mit α als mittlerer Schallabsorptionsgrad, V als Volumen des Raumes, S als Summe der geprüften Flächen und T die Nachhallzeit. Die Bestimmung des mittleren Schallabsorptionsgrades wird bei der Erstellung des Simulationsmodells benötigt. Abbildung 8 zeigt das Ergebnis des Schallabsorptionsgrades im Empfangsraum.

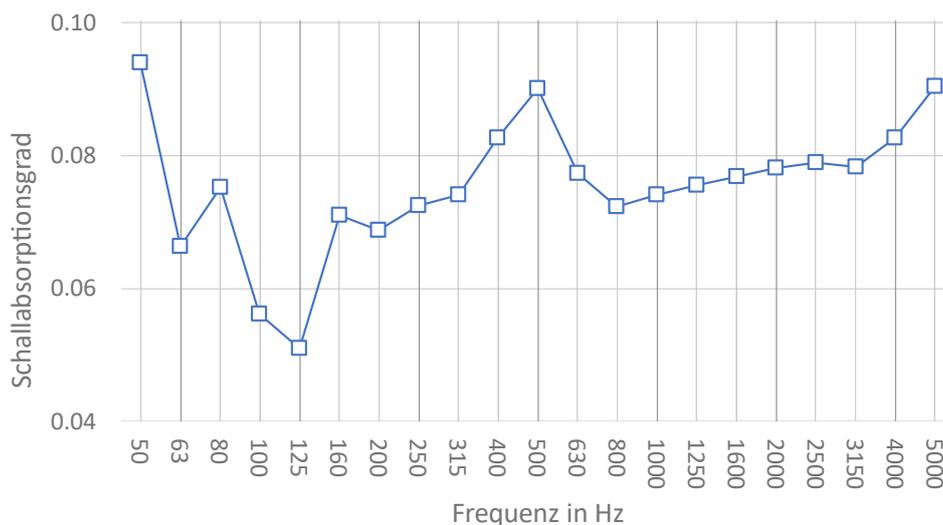


Abb. 8 Ergebnis des Schallabsorptionsgrades über das Frequenzspektrum im Empfangsraum

3.4.4 Schallabsorptionsgrad im Senderraum

Das vierte Ergebnis der Messung ist der Schallabsorptionsgrad im Senderraum. Dieser wird in Abbildung 9 dargestellt.

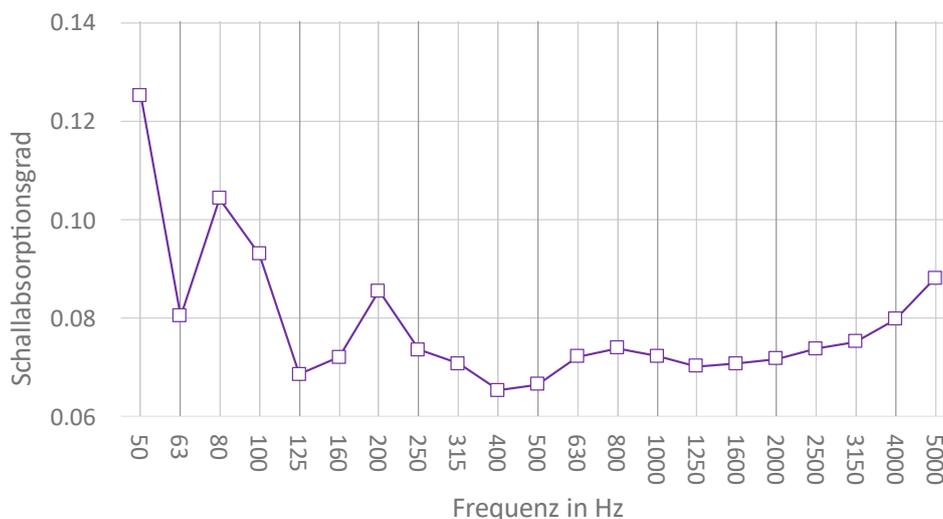


Abb. 9 Ergebnis des Schallabsorptionsgrades über das Frequenzspektrum im Senderraum

3.4.5 Schalldämm-Maß der WDV5 Wand

Das Schalldämm-Maß [3] errechnet sich laut Formel (5)

$$R = L_{\text{Senderraum}} - L_{\text{Empfangsraum}} + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \quad (5)$$

$L_{\text{Senderraum}}$ stellt den Pegel im Senderraum dar, $L_{\text{Empfangsraum}}$ den Pegel im Empfangsraum, S als Summe der geprüften Flächen und A als äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum. In dieser Arbeit wurde das Schalldämm-Maß nach Norm [3] dreimal bestimmt (siehe Abbildung 10). Die erste Kurve (rot) wurde durch einen Lautsprecher an drei verschiedenen Stellen bestimmt. Die zweite Kurve (blau) wurde durch 2 Lautsprecher an 3 verschiedenen Stellen und die dritte Kurve (grün) wurde durch 3 Lautsprecher gleichzeitig bestimmt. Die Durchführung der Messung mit Lautsprechern an verschiedenen Stellen und in unterschiedlicher Anzahl wird begründet, indem einerseits die gemessenen Ergebnisse dadurch bestätigt werden und andererseits damit diverse Möglichkeiten der Modellierung zu einem späteren Zeitpunkt angewendet werden können. Bei 125 Hz ist die Koinzidenzfrequenz zu erkennen und bei 400 Hz befindet sich die Resonanzfrequenz die durch den Masse-Feder System des WDV5 verursacht wird. Dies wird durch folgende Berechnung laut Gleichung 6 bestätigt.

$$f_R = 160 \sqrt{\frac{s'}{m''_{\text{putz}}}} = 160 \sqrt{\frac{52}{1500 \cdot 0,005}} = 421 \text{ Hz} \quad (6)$$

Die Werte wurden aus Tabelle 3 entnommen. s' ist die dynamische Steifigkeit des Dämmstoffs und m''_{putz} ist die flächenbezogene Masse des Putzes.

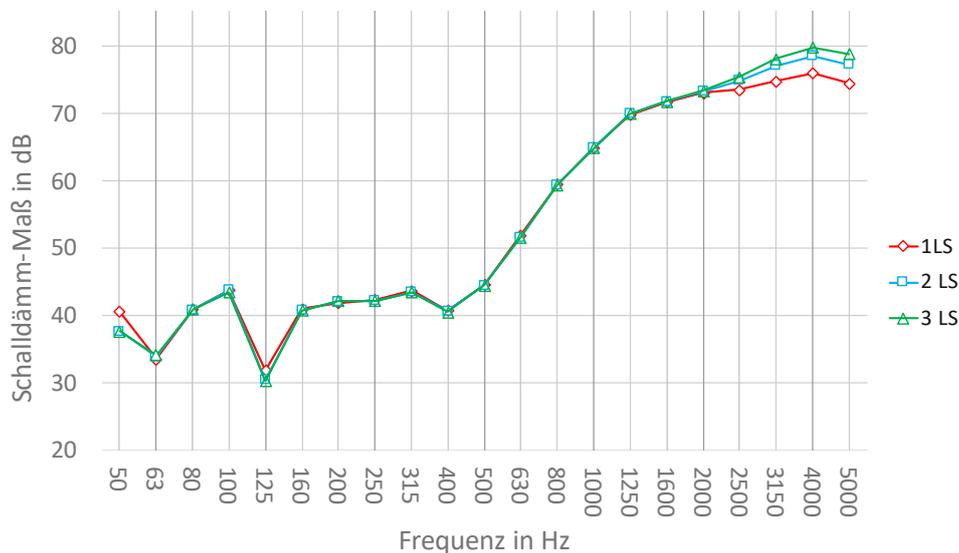


Abb. 10 Vergleich der gemessenen Schalldämm-Maße der WDV5 Wand. Anregung des Luftschallfeldes im Senderraum an einer unterschiedlichen Anzahl an LS Positionen: Anhand eines Lautsprechers (rot); zwei Lautsprecher (blau); drei Lautsprecher (grün)

3.4.6 Verbesserung der Luftschalldämmung durch das WDVS

Anhand von Gleichung 2 wird die Verbesserung der Luftschalldämmung bestimmt [28]. Die Daten der Grundwand wurden von den Autoren aus [24] mitgeteilt. Von 50 bis 400 Hz folgt die Kurve nicht der Theorie. Laut Abbildung 2 ist vor der Resonanzfrequenz die durch den Masse-Feder System des WDVS verursacht wird, mit keiner Verschlechterung oder Verbesserung des Schalldämmmaßes zu rechnen.

Auch nach Rücksprache mit den Autoren von [24] können die hohe Schwankungen im tiefen Frequenzbereich (siehe Abbildung 11) nicht erklärt werden. Es wird vermutet, dass die Anbindung der Betonwand an den Prüfstand unterschiedlich war, denn die Befestigung der Wand besitzt einen Einfluss auf das Schwingverhalten und dadurch auch auf das Schalldämm-Maß der geprüften Wand [14]. Jedoch ist zwischen 400 und 500 Hz die Resonanzfrequenz mit einer Verschlechterung bis zu 8 dB zu erkennen. Es wird angenommen, dass die Breite dieses Einbruchs an der Streuung der dynamischen Steifigkeit des Dämmstoffes, die durch Produktionsschwankung entsteht, liegt. Ab 1250 Hz flacht der Anstieg ab und es stellt sich eine Verbesserung der Schalldämmung um 8 dB ein.

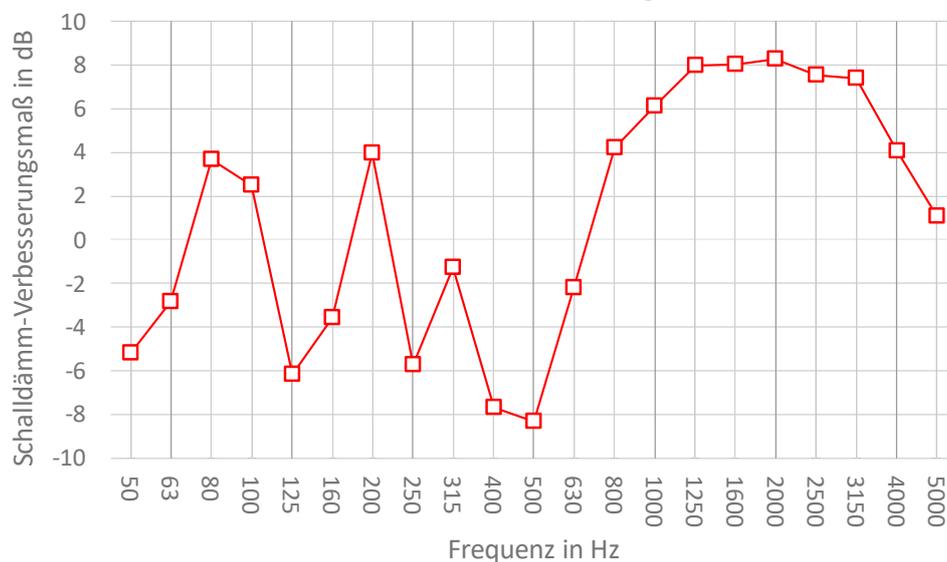


Abb. 11 Darstellung der Verbesserung der Luftschalldämmung durch das WDVS

4 Modellbildung in der Finiten Elemente (FE) Umgebung COMSOL

Ziel der Modellierung ist die Erstellung mehrerer Simulationsmodelle anhand der Finiten Elemente Methode (FEM) basierend auf unterschiedlichen Modellierungsansätzen. In dieser Arbeit werden sieben Modellierungsansätze berücksichtigt, die in zwei Gruppen eingeteilt werden. Das Modell mit der besten Übereinstimmung zwischen der Prognose in COMSOL und der Messung des Schalldämm-Maßes im Labor liefert die Erkenntnis, welche Modellierungsansätze für die Prognose des Schalldämm-Maßes einer WDVS Betonwand am besten geeignet sind.

In diesem Kapitel werden die gewählten Modellierungsansätze dargestellt und die verwendeten theoretischen Grundlagen beschrieben. Zunächst werden in Kapitel 4.1 bis 4.3 die Modellierungsansätze der ersten Gruppe beschrieben, welche die Ansätze der Raumbildung und Erzeugung des Schallfeldes berücksichtigen. Dabei werden die Definitionen des Schalldämm-Maßes und des Schalltransmissionsgrades τ erläutert. Anschließend werden zwei Methoden vorgestellt, die den Transmissionsgrad prognostizieren. Des Weiteren werden Methoden vorgestellt, die zur Generation von Schall eingesetzt werden können. Anschließend wird auf die mathematische Beschreibung ebener Wellen und deren geometrische Interpretation eingegangen. Dies dient als Basis dafür, wie ein diffuses Schallfeld anhand der Summe unkorrelierter ebener Wellen generiert werden kann.

In Kapitel 4.4 werden die theoretischen Grundlagen der zweiten Gruppe von Modellierungsansätzen beschrieben, welche die Modellierung der WDVS Betonwand betrifft. Diese beinhaltet folgende Ansätze: die Lagerung der Betonwand, die Dämmschicht als poröse oder porenlose Schicht und die Putzschicht als Volumen- oder Schalenelement.

Des Weiteren wird ein Überblick über die Schallausbreitung in der Luft und in Festkörpern gegeben, sowie deren Implementierung in der FEM beschrieben. Im Kapitel zur Kopplung Akustik Mechanik werden die Randbedingungen vorgestellt, um die Interaktion zwischen Fluid und Struktur zu koppeln.

Abschließend werden in diesem Kapitel die verschiedenen Modelle dargestellt, die mittels der beschriebenen Modellierungsansätze in COMSOL erstellt wurden.

4.1 Modellbildung der Messräume

Der Schalltransmissionsgrad τ ist eine Bauteileigenschaft und ist als Quotient zwischen der von der Wand in den Empfangsraum abgestrahlten Intensität I_{aus} und der im Senderraum auf der Wand einfallenden Intensität I_{ein} definiert (siehe Gleichung 7). Das Schalldämm-Maß wird laut Gleichung 8 bestimmt.

$$\tau = \frac{I_{aus}}{I_{ein}} \quad (7)$$

$$R = -\log_{10}(\tau) \quad (8)$$

Abbildung 12 zeigt zwei Methoden, wie das Schalldämm-Maß gemessen werden kann. Der Prüfstand ist eine Konfiguration aus zwei Räumen, einerseits dem Senderraum und andererseits dem Empfangsraum. Zwischen diesen beiden Räumen befindet sich das zu messende Bauteil. Die entwickelten Methoden messen die einfallende und ausstrahlende Intensität auf direktem [29] oder indirektem [3] Weg. Per Definition ist das Schallfeld im Senderraum als diffus vorausgesetzt [3]. In

Abbildung 12 werden zwei Konfigurationen für den Empfangsraum dargestellt. Die erste Konfiguration zeigt, dass das ausgestrahlte Schallfeld im Empfangsraum reflektiert wird und dadurch ein diffuses Schallfeld entsteht. Die zweite Konfiguration zeigt, dass das Schallfeld im Empfangsraum absorbiert wird.

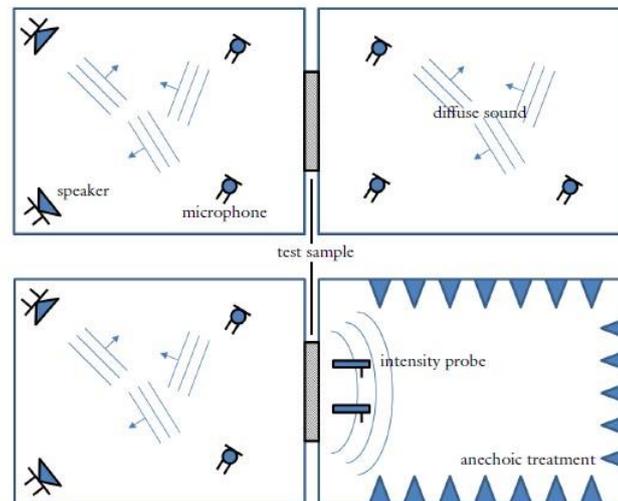


Abb. 12 Schematische Darstellung zweier Methoden zur Bemessung der Schalldämmung: In beiden Räumen herrscht ein diffuses Schallfeld (oben) – Im Senderaum herrscht ein diffuses Schallfeld und der Empfangsraum ist total schallabsorbierend (unten) [2]

In diesem Abschnitt werden mehrere Ansätze vorgestellt, um die einfallende und ausstrahlende Intensität in einer FE Umgebung implementieren und prognostizieren zu können.

Um die auf der Messwand einfallende Intensität I_{ein} zu prognostizieren, werden in dieser Arbeit zwei Modellierungsansätze betrachtet. Bei der ersten Methode wird versucht die Messsituation im Senderaum nachzubilden. Laut Norm [3] ist das gemessene Schalldämm-Maß bei tiefen Frequenzen von der Lage des Lautsprechers und dem daraus resultierenden modalen Schallfeld abhängig. Um das während der Messung erzeugte Schallfeld im Senderaum abzubilden, müssen der Lautsprecher und die Schallkennimpedanz der Luftdomäne und der umgebenden Wände des Senderraumes im Simulationsmodell implementiert werden. Der Schall im Senderaum wird in dieser Arbeit vereinfacht durch eine Punktquelle generiert. Diese Schallquelle kann als eine pulsierende Kugel betrachtet werden, die sich im Laufe der Zeit zusammenzieht und ausdehnt. Durch Angabe der Leistung des Lautsprechers, die während der Messung ausgestrahlt wird, kann die Schallquelle im Senderaum reproduziert werden. Die Schallkennimpedanz eines Materials ist eine frequenzabhängige, komplexe Größe und ist als Verhältnis von Schalldruck und Schallschnelle definiert. Je größer der Unterschied der Feldimpedanzen zwischen Luftdomäne und umgebenden Wände ist, desto größer ist der Anteil an reflektierter Schallenergie an der Grenzfläche. In dieser Arbeit wird vereinfachend angenommen, dass durch Angabe des mittleren Schallabsorptionsgrades der umgebenden Wände, der durch den Schallkennimpedanzunterschied entstehende Anteil an reflektierter Schallenergie, unabhängig vom Einfallswinkel ist.

Die zweite Möglichkeit, um die auf der Messwand einfallende Intensität I_{ein} zu prognostizieren, ist die in [5] präsentierte Methode anzuwenden. Die in der vorherigen Methode präsentierten Einflüsse von Lautsprecherposition, Einfluss des Raumes und das nicht diffuse Schallfeld im tiefen Frequenzbereich, werden hierbei nicht berücksichtigt. Stattdessen wird das auf die Messwand einfallende Schallfeld im Senderaum als diffuses, homogenes und isotropes Schallfeld angenom-

men [30]. In diesem Fall kann das diffuse Schallfeld im Senderaum als eine Summe von unkorrelierten ebenen Wellen definiert werden, die sich in zufällig generierten Richtungen bewegen [5]. In Kapitel 4.2 wird die Herleitung der Luftschallanregung durch ebene Wellen im Detail beschrieben. Bei dieser Methode entfällt somit die Modellierung des Lautsprechers, der Luftdomäne im Senderaum und der umgebenden Wände des Senderaumes.

Um die von der Messwand in den Empfangsraum abgestrahlte Intensität I_{aus} prognostizieren zu können, werden in dieser Arbeit zwei Ansätze gewählt. Der erste Ansatz berücksichtigt ein diffuses Schallfeld im Empfangsraum, in dem die akustischen Oberflächeneigenschaften der umgebenden Wände wieder vereinfachend durch den mittleren Schallabsorptionsgrad beschrieben werden. Der zweite Ansatz besteht darin, dass die Oberflächen des Empfangsraumes als absorbierend zu modellieren sind. Somit entstehen im Empfangsraum keine Reflexionen und dadurch wird der Empfangsraum als unendlicher Halbraum modelliert [30]. In [5] wird zur Absorption des abgestrahlten Schallfeldes die Luftdomäne durch „Perfectly Matched Layers“ (PML) umfasst. In Kapitel 4.3 wird näher darauf eingegangen.

4.2 Herleitung der Luftschallanregung durch ebene Wellen

4.2.1 Geometrische Interpretation von ebenen Wellen

Gleichungen (11) und (12) zeigen die mathematische Formulierung von Druck p als Funktion von Ort und Zeit. Diese Funktionen repräsentieren die Lösung zur Wellengleichung. Gleichung (11) zeigt die reelle und (12) die komplexe Schreibweise.

$$p(\vec{r}, t) = p_0 \sin(\omega t - \vec{k}\vec{r}) = p_0 \sin(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z) \quad (11)$$

$$p(\vec{r}, t) = p_0 e^{i(\omega t)} e^{-i(\vec{k}\vec{r})} \quad (12)$$

p_0 als Druckamplitude, ω als Kreisfrequenz, t als Zeit, \vec{k} als Wellenzahlenvektor und \vec{r} als Ortsvektor. Abbildung 13 zeigt die grafische Interpretation der obigen Formeln. Die schrägen Ebenen im Raum sind in grün dargestellt. Diese können zum Beispiel die Höchstamplitude der generierten ebenen Wellen darstellen. Die Wellen haben eine Wellenlänge λ . Die Ebenen stehen senkrecht auf dem Wellenzahlenvektor \vec{k} . Somit gibt \vec{k} die Ausbreitungsrichtung der ebenen Wellen an. Eine Ebene entsteht, wenn alle Ortsvektoren \vec{r} in derselben Ebene liegen. Mathematisch bedeutet dies, dass das Skalarprodukt $\vec{k}\vec{r}$ den gleichen Wert ergibt. Geometrisch gesehen repräsentiert das Skalarprodukt die Länge der Projektion des Vektors \vec{r} auf \vec{k} . Das bedeutet, dass Ebenen die senkrecht auf den Wellenzahlenvektor \vec{k} stehen, die gleiche Phase haben, weil das Skalarprodukt den gleichen Wert ergibt. In Gleichung (11) wird \vec{k} in seinen kartesischen Koordinaten zerlegt. Die Längen der Komponenten des Wellenzahlenvektors sind in Abbildung 13 in blau gezeichnet.

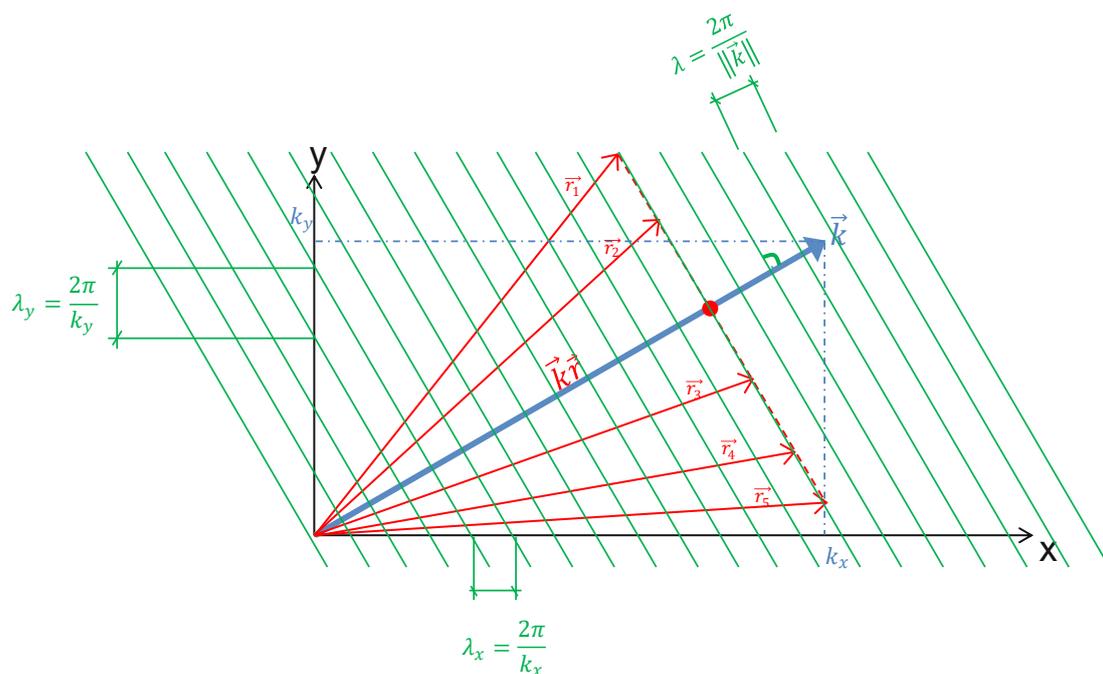


Abb. 13 Prinzipskizze des Skalarproduktes $\vec{k}\vec{r}$ zur mathematischen Beschreibung von ebenen Wellen im dreidimensionalen Raum

4.2.2 Zerlegung des Wellenzahlenvektors in Kugelkoordinaten

Die Komponenten des Wellenzahlenvektors \vec{k} werden anhand der Kugelkoordinaten beschrieben (Gleichungen 13). Diese sind grafisch in Abbildung 14 dargestellt. Dazu ist \vec{k} ein Einheitsvektor. (Gleichung 14)

$$k_x = \cos(\varphi) \sin(\theta) \quad (13)$$

$$k_y = \sin(\varphi) \cos(\theta)$$

$$k_z = \cos(\theta)$$

$$\|\vec{k}\| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = 1 \quad (14)$$

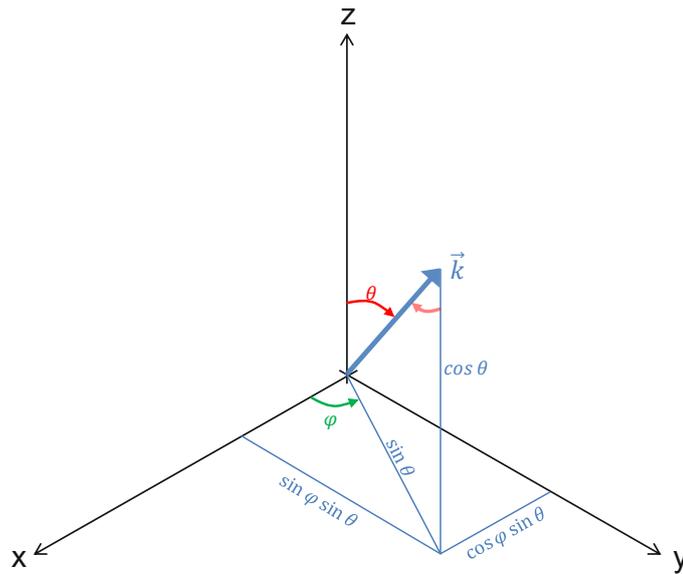


Abb. 14 Darstellung des Wellenzahlenvektors \vec{k} zur mathematischen Beschreibung von ebenen Wellen im dreidimensionalen Raum

4.2.3 Aufstellen des Schalldruckfeldes

Somit kann das Schallfeld auf der Senderaumseite als eine Summe von N unkorrelierten ebenen Wellen definiert werden. In dem Modell wird für jedes n in der Summe ein neuer Satz von Zufallsvariablen erzeugt. Der Term $\frac{1}{\sqrt{N}}$ stellt sicher, dass das Feld eine konstante Intensität für jede Wahl von N hat.

$$p_{\text{Bauteil}} = p_{\text{Raum}} + p_{\text{Reflexion}} \quad (15)$$

$$p_{\text{Raum}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{i\Phi_n} e^{-i(k_x x + k_y y + k_z z)} \quad (16)$$

$$p_{\text{Reflexion}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{i\Phi_n} e^{-i(-k_x x + k_y y + k_z z)} \quad (17)$$

4.3 „Perfectly Matched Layers“ (PML)

Eine Perfectly Matched Layer (PML) ist eine Domäne, die Schallwellen absorbiert. Wenn ein akustischer Bereich von einer PML umgeben ist, kann ein reflexionsarmer Abschluss am äußeren Rand der akustischen Domäne erreicht werden. Abbildung 15 stellt den Schalldruck in einer akustischen Domäne (blau) und in einer PML (gelb) dar. Dabei ist erkennbar, dass die Amplitude im gelben Bereich stetig abnimmt. Um dies zu erreichen, erfolgt eine Koordinatentransformation innerhalb der PML. Vertiefende Literatur über PML findet sich in [31]

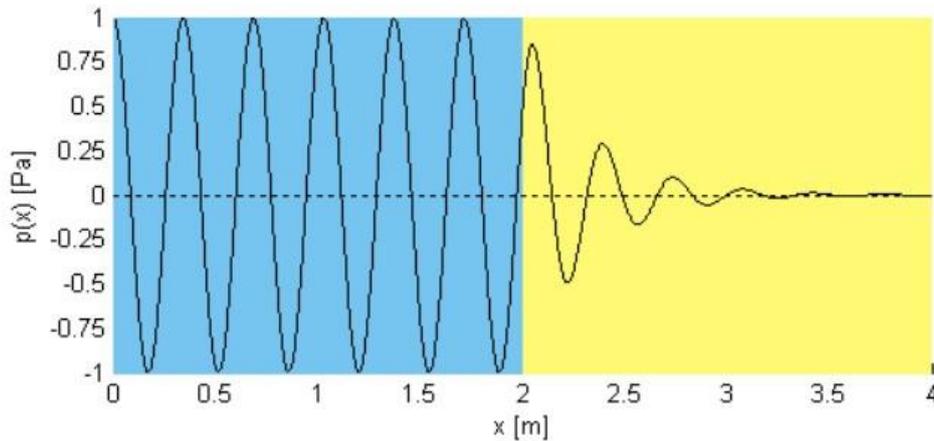


Abb. 15 Darstellung des Schalldruckes in einer akustischen Domäne (blau) und in einer PML (gelb) [31]

4.4 Modellbildung der WDVS Betonwand

In diesem Kapitel werden die Modellierungsansätze vorgestellt, die dazu dienen die WDVS Betonwand in der FE Umgebung COMSOL zu implementieren und deren Einflüsse auf die Schalldämmung zu berücksichtigen.

4.4.1 Lagerung der Betonwand

Wie in [11] festgestellt, hat die Lagerung des untersuchten Bauteils Einfluss auf die Luftschalldämmung. Die im Labor gemessene Betonwand mit WDVS ist über einen Betonrahmen, der dicker als die Betonwand ist, eingespannt. Die eingespannte Randbedingung fixiert die Wand, sodass alle sechs Freiheitsgrade gehalten werden. Die Translationen und Rotationen bleiben auf null. In dieser Arbeit wird die Einspannung der Wand über zwei unterschiedliche Ansätze betrachtet. Die Lagerung der Wand im Prüfstand über den Betonrahmen kann nicht klar definiert werden, daher wird die Betonwand entweder anhand einer flächigen Lagerung oder einer Linienlagerung untersucht. Abbildung 16 zeigt beide Lagerungsbedingungen einer Wand in der FE Umgebung COMSOL.

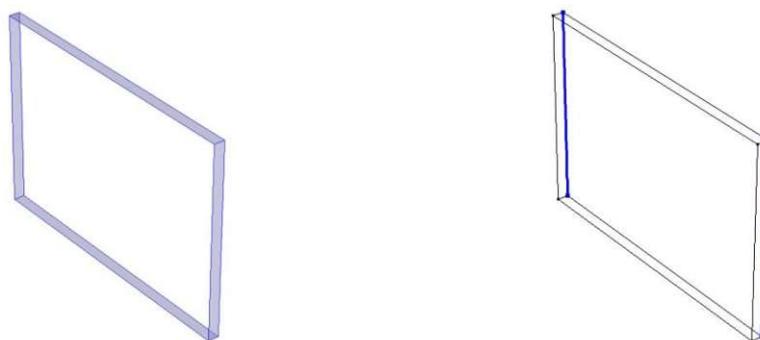


Abb. 16 Übersicht der zwei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen einer Wand. Links: Flächige Lagerung über die vier Seiten der Wand – Rechts: Linienlagerung auf zwei Seiten der Wand

4.4.2 Modellierung der Dämmschicht

Der zweite Modellierungsansatz, der Einfluss auf die Schalldämmung hat, ist die Dämmung. Die Verbesserung bzw. Verschlechterung der Dämmung am Schalldämm-Maß des Bauteils wird durch die Elastizität und die Entkopplung von Wand und Putzschicht erreicht (Masse-Feder-Masse) [1].

Der Dämmstoff in der FEM kann durch zwei Ansätze implementiert werden. Der erste Ansatz besteht darin, die Dämmung als porenlose elastische Schicht zu modellieren. Die zweite Möglichkeit ist die Dämmung als porige Struktur zu modellieren. Der Vorteil der Modellierung mit Poren ist, dass der Absorptionsvorgang der Schallenergie berücksichtigt wird. Der Nachteil ist, dass die feingliedrige Struktur und die Interaktion zwischen Luftporen und Dämmstoff keinen effizienten Aufbau im FE Modell ermöglicht [30]. Dieser Nachteil entfällt, wenn die Dämmung porenlos modelliert wird. Jedoch ist zu beachten, dass dieser Ansatz eine Vereinfachung gegenüber der Modellierung mit Poren ist. Daher wird in dieser Arbeit sowohl die Modellierung der Dämmschicht mit Luftporen und ohne Luftporen untersucht.

Diverse Forschungsgruppen haben in den letzten Jahren Untersuchungen zur Ausbreitung von Schall in porösen Medien und dessen Implementierung in der FE Umgebung geführt, woraus verschiedene Berechnungsmodelle entstanden sind. Grundsätzlich kann die Dämmung in zwei Teile getrennt werden. Einerseits die Struktur und andererseits die Luft in den offenen Poren (Abbildung 17). Um eine einfachere Implementierung in die Software zu ermöglichen, muss ein äquivalentes Modell aufgestellt werden. Dort wird die Rahmenstruktur vereinfacht als starr oder weich angenommen und die Luft als ein äquivalentes Fluid mit frequenzabhängigem Kompressionsmodul K und Rohdichte ρ_{rig} [32] beschrieben. Diese Eigenschaften können entweder experimentell bzw. empirisch oder analytisch bestimmt werden. Ein Überblick über die verschiedenen Ansätze wird in [14] gegeben. In COMSOL werden verschiedene poroakustische Modelle zur Auswahl angeboten. Für diese Arbeit wird das Johnson-Champoux-Allard Modell [33] ausgewählt (siehe Abbildung 17). Die analytischen Formeln dazu lauten

$$\rho_{rig} = \frac{\tau_{\infty} \rho_f}{\varepsilon_p} \left[1 + \frac{R_f \varepsilon_p}{i\omega \tau_{\infty} \rho_f} \sqrt{1 + \frac{4i\omega \tau_{\infty}^2 \mu \rho_f}{R_f^2 L_v^2 \varepsilon_p^2}} \right] \quad (9)$$

$$K = \frac{\gamma p_A}{\varepsilon_p} \left[\gamma - (\gamma - 1) \left(1 + \frac{8\mu}{i\omega L_{th}^2 Pr \rho_f} \sqrt{1 + \frac{i\omega L_{th}^2 Pr \rho_f}{16\mu}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (10)$$

Hier steht für ρ_{rig} die Dichte der starren Struktur, K das Kompressionsmodul, τ_{∞} die Tortuosität, für ρ_f die Rohdichte des Fluids, für ε_p die Porosität, für R_f den Luftströmungswiderstand, für μ die dynamische Viskosität, für p_A den Druck, für γ den Adiabatenexponent, für L_v die viskose charakteristische Länge, für L_{th} die thermische charakteristische Länge und für Pr die Prandtl Konstante. Die notwendigen Parameter zu diesem Modell wurden aus der Literatur entnommen [28]. In Tabelle 4 sind die gewählten Parameter aufgelistet. An dieser Stelle entsteht eine weitere Unsicherheit in den verwendeten Daten, da die Parameter nicht an der tatsächlichen Dämmung bestimmt wurden.

Tabelle 4 Parameter des JCA Modell nach [28]

Porosität in %	16,1
Tortuosität	1,61
Luftströmungswiderstand in Nsm^{-4}	25250
Viskosische char. Länge in mm	183
Thermische char. Länge in mm	287

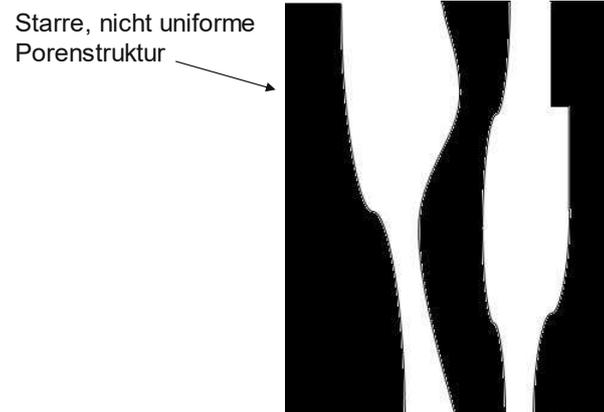


Abb. 17 Schematische Darstellung des analytischen Modells nach Johnson-Champoux-Allard als starre nicht uniforme Porenstruktur – schwarz: die starre Struktur, weiß: Luftporen

4.4.3 Modellierung der Putzschicht

Der dritte Modellierungsansatz betrifft die Putzschicht. Die Putzschicht bei einem WDVS hat eine geringe Dicke. Die untersuchte Putzschicht weist eine Dicke von fünf Millimeter auf. In COMSOL gibt es zwei Möglichkeiten diese Schicht zu modellieren. Entweder mit Volumenelementen mit einer bestimmten Dicke oder als Schalenelement. Abbildung 18 zeigt das Prinzip eines Schalenelements. Durch gewisse Annahmen und Vereinfachungen wird die Dickenrichtung des dreidimensionalen Schalenkontinuums zu einem flächigen Element reduziert. Dadurch wird keine Verformung in Dickenrichtung berücksichtigt und die Wellen können sich nicht in Dickenrichtung ausbreiten. Bei Volumenelementen können jedoch hohe Netzdichten entstehen, welche die Berechnung verlangsamen. In dieser Arbeit werden beide Modellierungsansätze der Putzschicht untersucht.

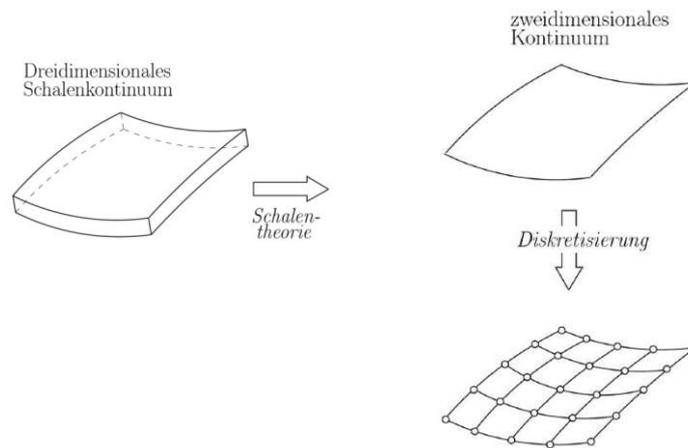


Abb. 18 Schematische Darstellung der Reduktion eines dreidimensionalen finiten Elementes in ein zweidimensionales Schalelement [34]

4.5 Schallausbreitung in der Luft

Die Ausbreitung einer akustischen Welle kann durch drei Gleichungen beschrieben werden: die Zustandsgleichung, die Kontinuitätsgleichung und die Euler-Gleichungen. Die Herleitung der Wellengleichung der linearen Akustik erfolgt durch die Kombination dieser Gleichungen:

Die Zustandsgleichung

$$(p - p_0) = (\rho - \rho_0) \cdot c^2 \quad (18)$$

Die Kontinuitätsgleichung

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (19)$$

Die Euler-Gleichungen

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p \quad (20)$$

Dazu werden in der linearen Akustik folgende Annahmen getroffen:

$$(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \ll \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} ,$$

$$\vec{v} \nabla \rho \ll \rho \nabla \vec{v} \approx \rho_0 \nabla \vec{v}$$

Somit vereinfachen sich die Euler Gleichungen

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right) = -\nabla p \quad (21)$$

Und die Kontinuitätsgleichung

$$\nabla \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (22)$$

Nun wird die Kontinuitätsgleichung nach der Zeit abgeleitet und in den Euler Gleichungen eingesetzt. Daraus ergibt sich

$$\Delta p = \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} \quad (23)$$

Setzt man schließlich die Zustandsgleichung ein, so erhält man die Wellengleichung der linearen Akustik

$$\Delta p = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (24)$$

Bei einer harmonischen Beanspruchung kann der Druck folgendermaßen beschrieben werden

$$p(\vec{x}, t) = \text{Re}[p e^{i\omega t}] \quad (25)$$

Setzt man dies in die Wellengleichung ein bekommt man die Helmholtz Gleichung

$$\Delta p + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 p = 0 \quad (26)$$

Für eine detailliertere Herleitung siehe [35]. Im nächsten Abschnitt wird die schwache Form der Helmholtz Differentialgleichung anhand der gewichteten Residuen Methode formuliert. Dies erlaubt annähernd eine Lösung zu finden. Für mehr Details dazu, wird auf folgende Literatur verwiesen [13].

$$\int_{\Omega} \varphi \left(\Delta p + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 p \right) d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{\varphi} \left(\frac{\partial p}{\partial n} \right) d\Gamma = 0 \quad (27)$$

Die Helmholtz Gleichung (linker Teil der Gleichung) muss über die Domäne Ω und die Randbedingung (rechter Teil der Gleichung) über den Rand Γ gelten. φ , $\bar{\varphi}$ stellen die Residuen Funktion dar die auch über Domäne und Rand gelten müssen.

In der FEM wird p nun zum folgenden Ausdruck erweitert

$$p = \sum_{i=1}^n N_i p_i = N \bar{p} \quad (28)$$

Mit N_i als Interpolationsfunktionen und p_i die Unbekannte vom Problem. Nun werden die gewichteten Residuen Funktionen als Interpolationsfunktionen angenommen. Dadurch ergibt sich folgende Gleichung,

$$\left(\int_{\Omega} N^T (\nabla^T \nabla N) d\Omega \right) \bar{p} + \omega^2 \left(\frac{1}{c^2} \int_{\Omega} N^T N d\Omega \right) \bar{p} + \left(\frac{1}{c^2} \int_{\Gamma} -N^T (n \nabla N) d\Gamma \right) \bar{p} = 0 \quad (29)$$

Nach Teilintegration des ersten Terms der Gleichung, erhält man einen vereinfachten Ausdruck

$$\left(\int_{\Omega} (\nabla N)^T (\nabla N) d\Omega \right) \bar{p} - \omega^2 \left(\frac{1}{c^2} \int_{\Omega} N^T N d\Omega \right) \bar{p} = 0 \quad (30)$$

Der links geklammerte Ausdruck ist bekannt als Steifigkeitsmatrix und der rechts geklammerte Ausdruck als Massenmatrix. Somit erhält man die bekannte Form des Eigenwertproblems.

$$[K - \omega^2 M] \bar{p} = 0 \quad (31)$$

4.6 Schallausbreitung in Festkörpern

In diesem Kapitel werden die kinematischen Gleichungen, die Spannungsresultanten und die konstitutiven Gleichungen der Reissner-Mindlin (RM) Plattentheorie erläutert. Nachdem die grundlegenden Gleichungen präsentiert werden, wird ein Überblick in den Ablauf gegeben, wie ein RM Schalenelement in der FEM implementiert wird. Für eine ausführliche Erklärung wird auf [15] verwiesen.

Bei der RM Theorie werden kinematische Annahmen getroffen, damit sich das Plattenelement rechnerisch vereinfacht. Wie bei der Kirchhoff'schen Theorie wird angenommen, dass die Normale zur unverformten Mittelebene auch nach einer Verformung eine Gerade bleibt. Jedoch muss die Gerade nicht mehr einen rechten Winkel zur verformten Mittelebene bilden. Somit werden in dieser Theorie auch die Schubverzerrungen berücksichtigt. Durch die Annahme kleiner Rotationen ψ_x , ψ_y folgt, dass die Durchbiegung w unabhängig der Koordinate z ist.

Das Verschiebungsfeld mit den getroffenen Annahmen lautet wie folgt

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= z \psi_x(x, y) \\ v(x, y, z) &= z \psi_y(x, y) \\ w(x, y, z) &= w(x, y) \end{aligned} \quad (32)$$

Mit

$$\begin{aligned} \chi_{xx} &= \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \\ \chi_{yy} &= \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \\ \chi_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (33)$$

Können dann die Längsverzerrungen

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= z \chi_{xx} \\ \varepsilon_y &= z \chi_{yy} \\ \varepsilon_z &= 0 \end{aligned} \quad (34)$$

Und die Schubverzerrungen angeschrieben werden

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= 2z \chi_{xy} \\ \gamma_{xz} &= \psi_y + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \gamma_{yz} &= \psi_x + \frac{\partial w}{\partial y}\end{aligned}\quad (35)$$

Die Spannungsresultanten lauten wie folgt

$$\begin{aligned}M_{xx} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} z \sigma_x dz \\ M_{yy} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} z \sigma_y dz \\ M_{xy} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} z \tau_{xy} dz \\ Q_x &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xz} dz \\ Q_y &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_z dz\end{aligned}\quad (36)$$

Abschließend werden die konstitutiven Gleichungen angegeben

$$\begin{aligned}M_{xx} &= D (\chi_{xx} + \nu \chi_{yy}) \\ M_{yy} &= D (\chi_{yy} + \nu \chi_{xx}) \\ M_{xy} &= D (1 - \nu) \chi_{xy} \\ Q_x &= kGh \gamma_{xz} \\ Q_y &= kGh \gamma_{yz}\end{aligned}\quad (37)$$

Mit

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)}\quad (38)$$

Wie in der FEM üblich ist, wird die schwache Form der kinematischen Gleichungen, der Gleichgewichtsbedingungen und der konstitutiven Gleichungen anhand des Prinzips der virtuellen Arbeit hergeleitet (PVA). Das PVA gilt als erfüllt, wenn die virtuelle Arbeit der inneren Kräfte gleich der äußeren Kräfte, für jede kinematisch zulässige virtuelle Verschiebung, ist.

$$\iint_{\Omega} \delta \varepsilon^T \sigma d\Omega - \iint_{\Omega} \delta d^T q d\Omega - \oint_{\Gamma} \delta d^T F d\Gamma = 0\quad (39)$$

Mit $\delta \varepsilon$ als virtueller Verzerrungstensor, σ als Spannungstensor. δd entspricht einem Vektor mit den Freiheitsgraden w , ψ_x und ψ_y . F und q entsprechen den außen einwirkenden Kräften. Im folgenden Schritt wird das Verschiebungsfeld anhand folgender Formel diskretisiert

$$d = \sum_{i=1}^n N_i a_i = Na \quad (40)$$

Dadurch bekommt man den gesuchten Gleichungssystem

$$(K_b + K_s)a = f \quad (41)$$

K_b entspricht dem Anteil der Biegung zur Steifigkeitsmatrix und K_s entspricht dem Scherbeitrag der Steifigkeitsmatrix.

4.7 Kopplung Akustik-Mechanik

Dieses Kapitel zeigt die Kopplungsbedingungen für die Fluid-Strukturinteraktion auf. Einerseits erzeugen die Schalldrücke eine Last auf die Struktur Domäne und andererseits wirkt die schwingende Struktur als eine Beschleunigung am Rande der Fluid Domäne. Diese Bedingungen sind in Abbildung 19 dargestellt. Es muss ein Gleichgewicht zwischen Normalkomponente des Schalldruckes und der Spannung an der Oberfläche herrschen. Um die Kontinuität an der Grenze Fluid/Struktur zu gewährleisten, müssen die Geschwindigkeiten der Strukturoberfläche und die des Fluides gleich groß sein. Die Implementierung der Kopplung in die FEM kann in folgender Literatur nachgelesen werden [36]

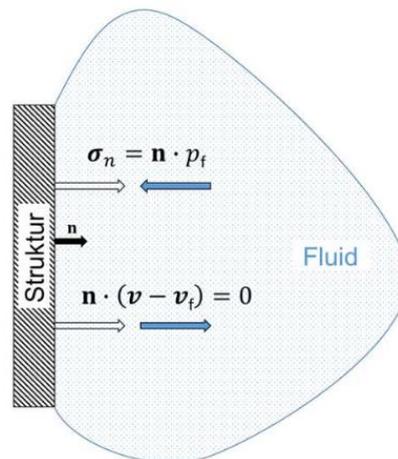


Abb. 19 Visualisierung der Kopplungsbedingungen für die Fluid-Strukturinteraktion [36]

4.8 Aufstellung der Modelle

Die in Kapitel 4.1 bis 4.4 beschriebenen Modellierungsansätzen können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Die erste Gruppe umfasst folgende vier Ansätze, welche die Raumbildung und die Erzeugung des Schallfeldes berücksichtigen und anschließend zur Modellbildung untereinander kombiniert werden:

- Das Generieren ebener Wellen oder die Modellierung eines Senderraumes.
- Perfectly Matched Layers oder die Modellierung eines Empfangsraumes.

Durch die Permutation dieser vier Modellierungsansätze entstehen vier Modelle (siehe Abbildung 20). Die zweite Gruppe der Modellierungsansätze umfasst drei weitere Ansätze, die in Kapitel 4.4. näher beschrieben wurden. Der erste Modellierungsansatz ist die Lagerung der Betonwand, die

flächlich oder linienförmig sein kann. Der zweite betrifft die Beschaffenheit der Dämmung, die entweder porenlos oder mit Poren sein kann. Der dritte Ansatz beschäftigt sich mit der Putzschicht, die als Volumenelement oder Schalenelement aufgestellt werden kann.

Im ersten Schritt werden die Modelle jedoch nur anhand der ersten Gruppe an Modellierungsansätzen aufgestellt. In Abbildung 20 sind ebenso die Elemente eines WDVS farblich gekennzeichnet. Diese bestehen aus der Betonwand (grau), der Dämmung (rosa) und der Putzschicht (gelb).

In den folgenden Unterkapiteln 4.8.1 bis 4.8.4 werden die Modelle, die durch die Permutation der Modellierungsansätze aus der ersten Gruppe entstehen, näher beschrieben.

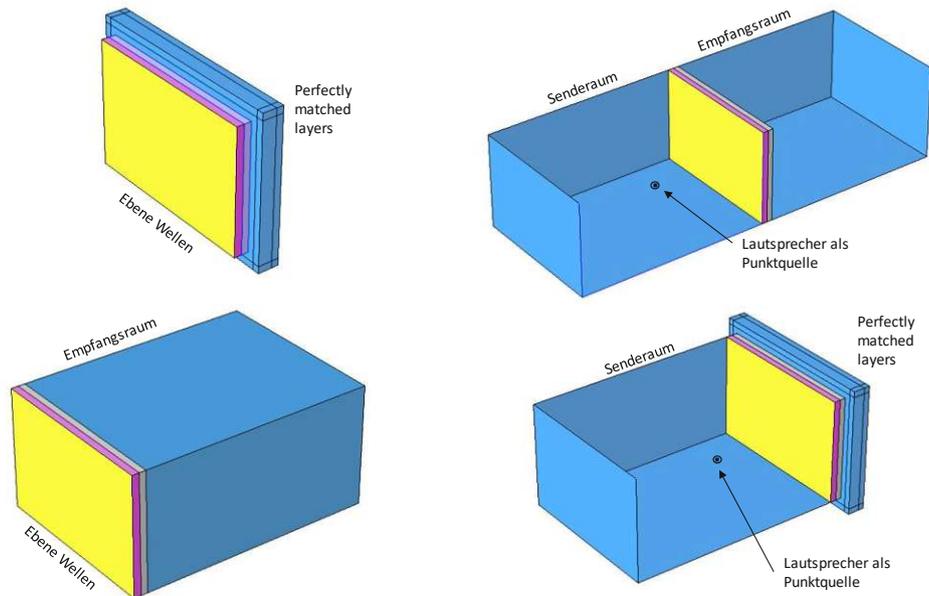


Abb. 20 Übersicht der verwendeten Modelle für die Simulation des Schalldämm-Maßes und Beschriftung der verwendeten Modellierungsansätze für den Schalldruck

4.8.1 Modell 1: Ebene Wellen und Perfectly Matched Layers

Das Modell 1 (siehe Abbildung 21) verfolgt die Kombination der beiden Modellierungsansätze ebene Wellen und Perfectly Matched Layers. Dabei wird das diffuse Schallfeld senderraumseitig durch die Summe ebener Wellen generiert. Somit entfällt in diesem Modell die Modellierung des Senderraumes und des Lautsprechers. Empfangsraumseitig wird der Schall durch die Verwendung der PML absorbiert.

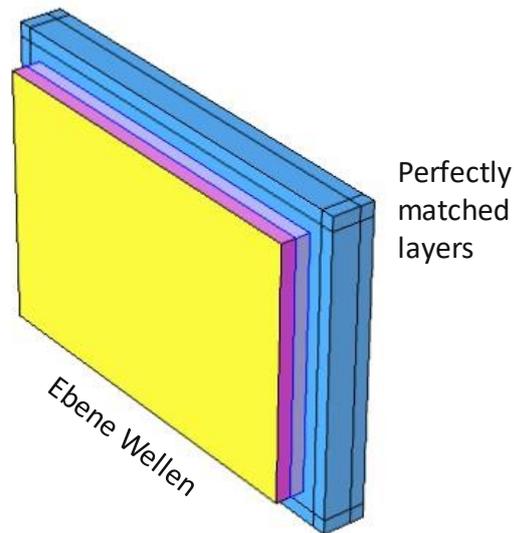


Abb. 21 Darstellung des ersten Modells: Links die WDVS Wand und rechts der Empfangsraum als „Perfectly Matched Layers“. Nachbildung des diffusen Schalldruckes im Empfangsraum durch Generieren ebener Schalldruckwellen an der Wand

4.8.2 Modell 2: Senderraum und Empfangsraum

Das Modell 2 (siehe Abbildung 22) verfolgt die Ansätze der Modellierung eines Sende- und eines Empfangsraumes. In diesem Modell wird das diffuse Schallfeld im Senderraum durch den Lautsprecher als Punktquelle generiert. Im Empfangsraum werden die Schallwellen durch die umgebenden Wände des Raumes reflektiert.

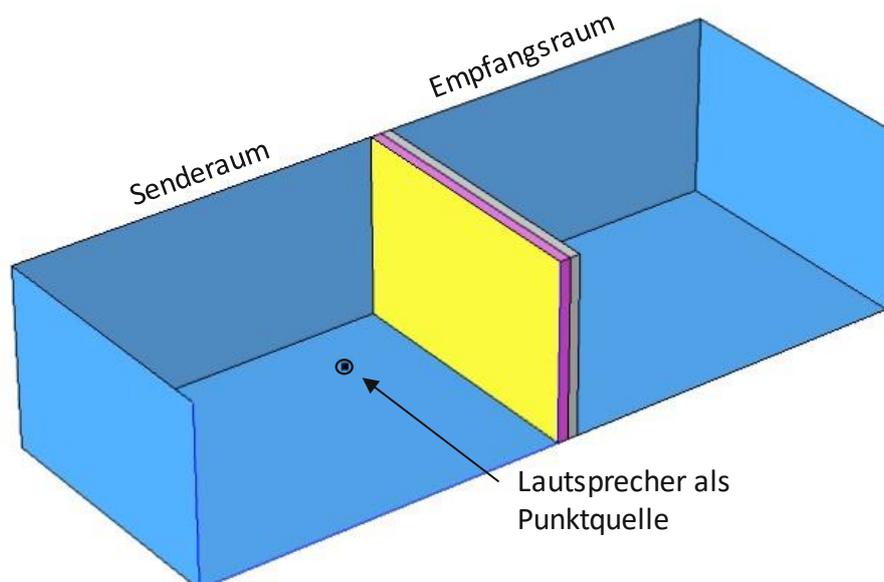


Abb. 22 Darstellung des zweiten Modells: Links der Senderraum, rechts der Empfangsraum und mittig das zu messende Wandsystem. Nachbildung des Lautsprechers mittels Punktquelle

4.8.3 Modell 3: Ebene Wellen und Empfangsraum

Das Modell 3 (siehe Abbildung 23) entsteht durch die Kombination der Modellierungsansätze der ebenen Wellen und der Modellierung eines Empfangsraumes. Dabei wird das diffuse Schallfeld senderaumseitig durch die Summe ebener Wellen generiert. Somit entfällt in diesem Modell die Modellierung des Senderaumes und des Lautsprechers. Im Empfangsraum werden die Schallwellen durch die umgebenden Wände des Raumes reflektiert.

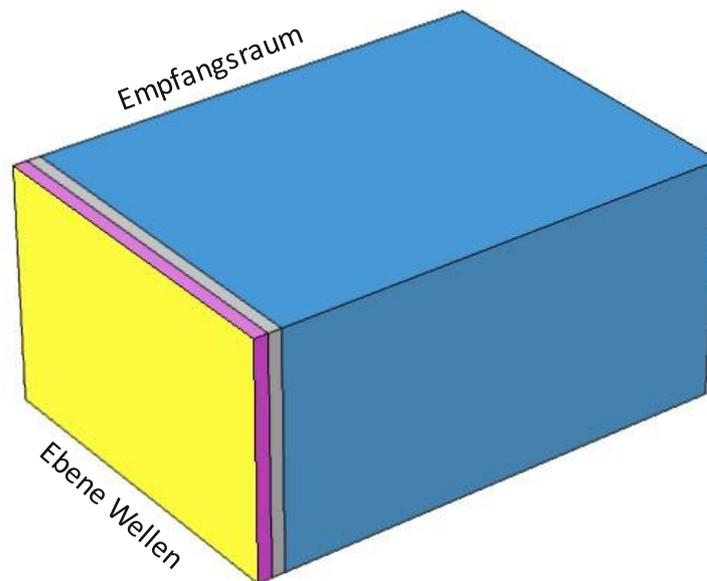


Abb. 23 Darstellung des dritten Modells: Links die WDVS Wand, rechts der Empfangsraum. Nachbildung des diffusen Schalldruckes im Empfangsraum durch Generieren ebener Schalldruckwellen an der Wand

4.8.4 Modell 4: Senderaum und Perfectly Matched Layers

Das Modell 4 (siehe Abbildung 24) verfolgt den Ansatz der Modellierung des Senderaumes mit Lautsprecher und der Perfectly Matched Layers. Dabei wird das diffuse Schallfeld im Senderaum durch den Lautsprecher als Punktquelle generiert. Empfangsraumseitig wird der Schall durch die Verwendung der PML absorbiert.

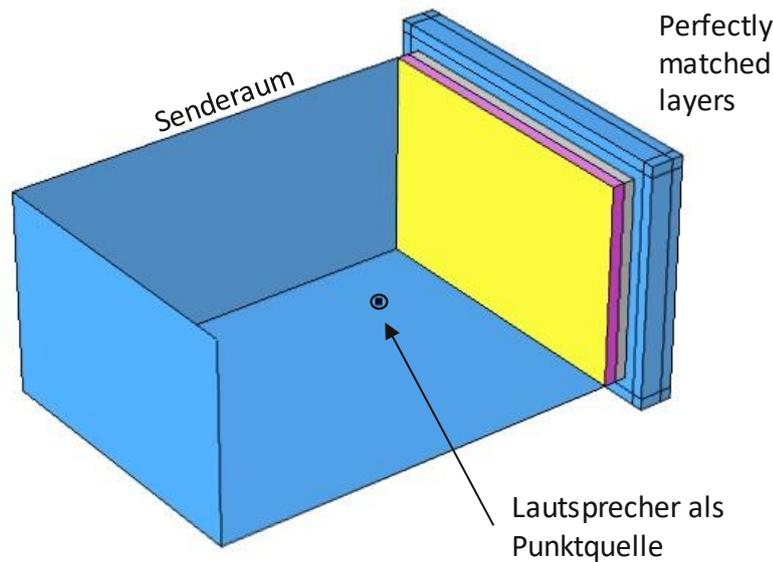


Abb. 24 Darstellung des vierten Modells: Links der Senderraum, rechts der Empfangsraum als „Perfectly Matched Layers“ und mittig das zu messende Wandsystem. Nachbildung des Lautsprechers mittels Punktquelle

4.9 Aufstellung der Untermodelle anhand der zweiten Gruppe von Modellierungsansätzen

Die in Kapitel 4.8 erstellten Modelle berücksichtigen nur die Modellierungsansätze bezüglich Raumbildung und Erzeugung des Schallfeldes. Sie bilden somit die Basis für die Aufstellung und Simulation der Untermodelle, welche zusätzlich die Einflüsse der zweiten Gruppe der Modellierungsansätze (Lagerung der Betonwand, Dämmung und Putzschicht) berücksichtigen. In diesem Kapitel wird die Methodik beschrieben, mit der diese Untermodelle erstellt werden.

Damit die Einflüsse der weiteren Modellierungsansätze nicht in jedem der vier Modelle untersucht werden müssen, wird die Analyse auf das Modell 1, mit der Kombination ebene Wellen und Perfectly Matched Layers (siehe Abbildung 21), beschränkt. Die Untermodelle von Modell 1 entstehen durch die Permutation der zweiten Gruppe an Modellierungsansätzen. Daraus ergeben sich acht Untermodelle, welche in Kapitel 5.1 simuliert und bewertet werden. Die Benennung der Modelle wird in Tabellen 5 und 6 erläutert.

Tabelle 5 Erklärung der Benennung der Untermodelle anhand der Zuordnung von Zahlen an den untersuchten Variablen

Stelle 1	Wandlagerung	Linienlagerung	1
		Flächenlagerung	2
Stelle 2	Dämmschicht	porenlose Dämmung	1
		poröse Dämmung	2
Stelle 3	Putzschicht	Putz als Volumenelement	1
		Putz als Schalenelement	2

Tabelle 6 Benennung der Untermodelle anhand der Variablen

Modell 111
Modell 121
Modell 212
Modell 122
Modell 211
Modell 221
Modell 112
Modell 222

5 Auswertung der Simulationsergebnisse

In Kapitel 5.1 werden die simulierten Ergebnisse der Untermodelle von Modell 1 mit der Messung verglichen. Anschließend werden in Kapitel 5.2 die simulierten Schalldämm-Maße der Untermodelle bewertet, indem die durchschnittlichen, die maximalen und die minimalen Abweichungen der simulierten Schalldämm-Maße zu dem experimentell ermittelten Schalldämm-Maß verglichen werden. Daraus lässt sich die Kombination der Modellierungsansätze aus der Gruppe 2 mit der besten Bewertung bestimmen und diese Kombination wird für die Modelle 2, 3 und 4 angewendet. In Kapitel 5.3 werden die simulierten Ergebnisse der Modelle 2, 3 und 4 mit der Messung verglichen. In Kapitel 5.4 werden die Modelle 1, 2, 3 und 4 untereinander verglichen und das Modell mit der besten Bewertung liefert die beste Kombination der Modellierungsansätze aus der ersten Gruppe. In Kapitel 5.5 werden die Anzahl der finiten Elemente und die Berechnungszeit pro Modell angegeben.

5.1 Auswertung der Simulationsergebnisse der Untermodelle von Modell 1

In den Abbildungen 25 bis 32 ist der Verlauf des simulierten Schalldämm-Maßes der WDVS Betonwand in rot und der Verlauf des Schalldämm-Maßes der Messung in blau dargestellt.

5.1.1 Modell 111

Das Modell 111 ist nach folgenden Modellierungsansätzen aufgebaut: Linienlagerung der Betonwand, porenlose Dämmung und Modellierung der Putzschicht als Volumenelement. In Abbildung 25 sind der Koinzidenzeinbruch bei 125 Hz und der Resonanzeinbruch bei 400 Hz, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, nicht im Verlauf des simulierten Schalldämm-Maßes vorhanden. Ab 630 Hz bricht die simulierte Kurve (rot) ein. Ein Grund dafür, könnte die Wahl eines zu groben Netzes an finiten Elementen sein.

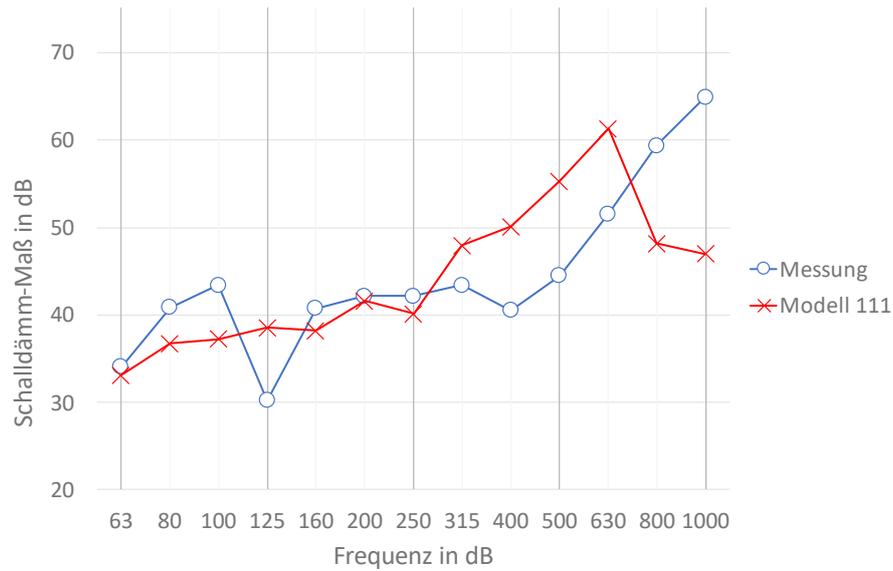


Abb. 25 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 111: Linienlagerung, porenlose Dämmung, Putz als Volumelement

5.1.2 Modell 121

Das Modell 121 ist nach folgenden Modellierungsansätzen aufgebaut: Linienlagerung der Betonwand, poröse Dämmung und Modellierung der Putzschicht als Volumelement. In Abbildung 26 sind der Koinzidenzeinbruch bei 125 Hz und der Resonanzeinbruch bei 400 Hz, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, nicht im Verlauf des simulierten Schalldämm-Maßes vorhanden. Durch Divergenz Probleme bei der Simulation ist das Schalldämm-Maßes nur bis 400 Hz berechnet.

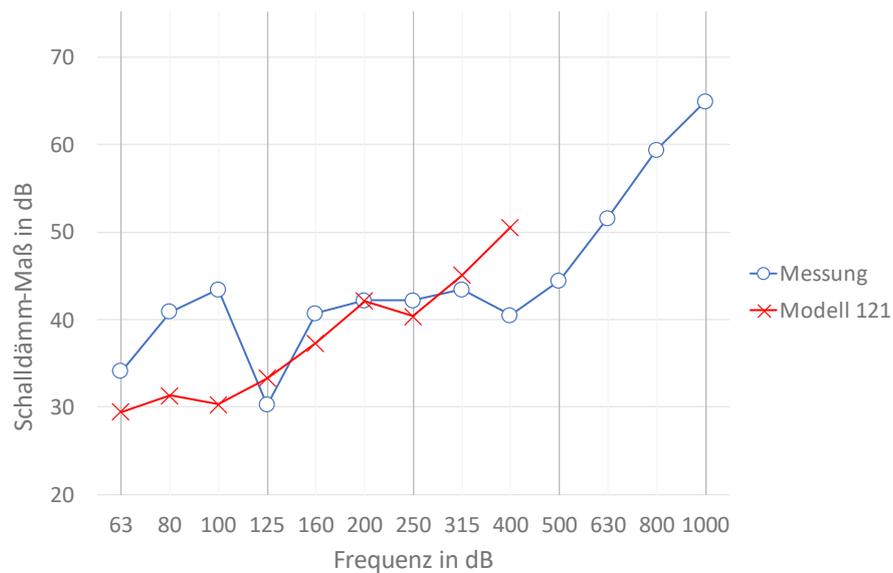


Abb. 26 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 121: Linienlagerung, poröse Dämmung, Putz als Volumelement

5.1.3 Modell 212

Das Modell 212 ist nach folgenden Modellierungsansätzen aufgebaut: Flächenlagerung der Betonwand, porenlose Dämmung und Modellierung der Putzschicht als Schalenelement. In Abbildung 27 befindet sich der Koinzidenzeinbruch in der Simulation bei 100 Hz statt bei 125 Hz. Der Resonanzeinbruch, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, erfolgt in der Simulation bei 400 Hz in Übereinstimmung mit der Messung. Nach 400 Hz liegt die simulierte Kurve des Schalldämm-Maßes höher als die gemessene Kurve des Schalldämm-Maßes.

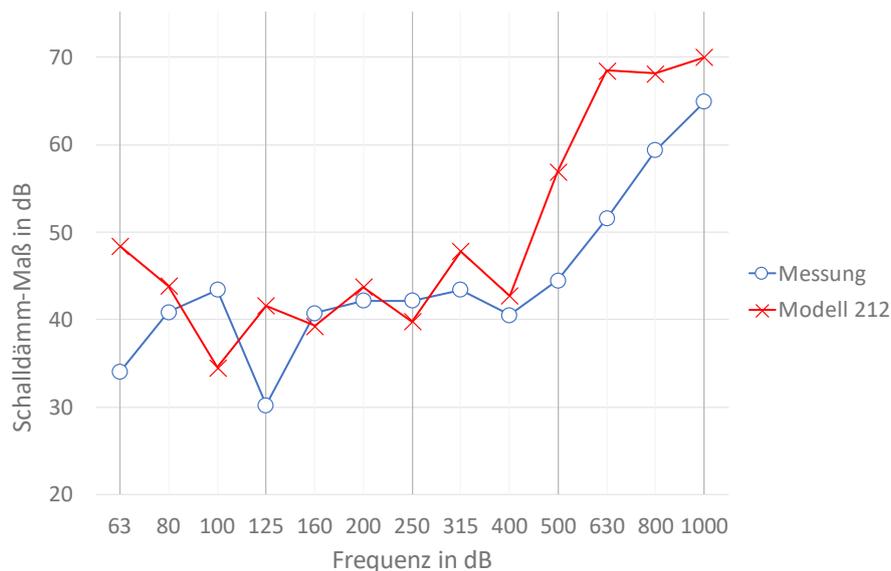


Abb. 27 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 212: Flächenlagerung, porenlose Dämmung, Putz als Schalenelement

5.1.4 Modell 122

Das Modell 122 ist nach folgenden Modellierungsansätzen aufgebaut: Linienlagerung der Betonwand, poröse Dämmung und Modellierung der Putzschicht als Schalenelement. In Abbildung 28 sind der Koinzidenzeinbruch bei 125 Hz und der Resonanzeinbruch bei 400 Hz, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, nicht im Verlauf des simulierten Schalldämm-Maßes vorhanden. Durch Divergenz Probleme bei der Simulation ist das Schalldämm-Maßes nur bis 400 Hz berechnet.

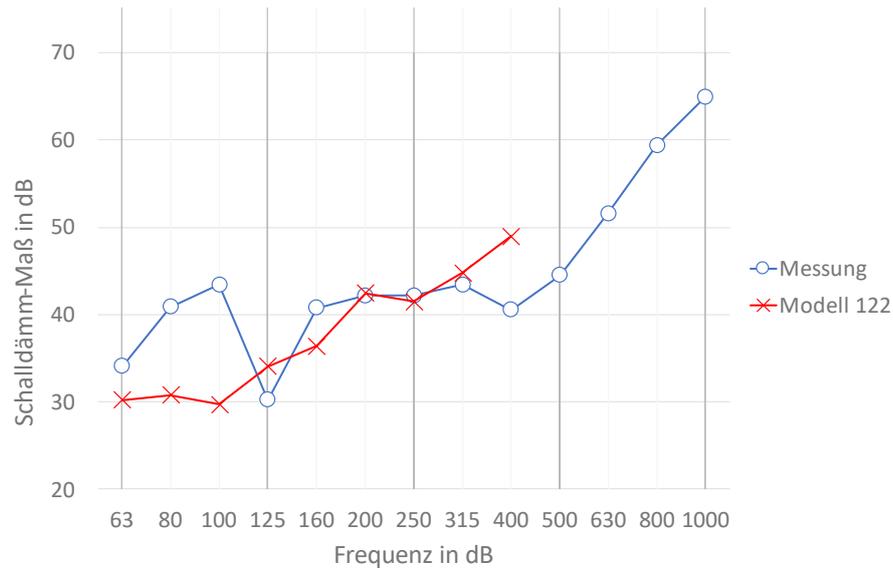


Abb. 28 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 122: Linienlagerung, poröse Dämmung, Putz als Schalenelement

5.1.5 Modell 211

Das Modell 211 ist nach folgenden Modellierungsansätzen aufgebaut: Flächenlagerung der Betonwand, porenlose Dämmung und Modellierung der Putzschicht als Volumenelement. In Abbildung 29 befindet sich der Koinzidenzeinbruch in der Simulation bei 100 Hz statt bei 125 Hz. Der Resonanzeinbruch, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, ist in der simulierten Kurve nicht abgebildet.

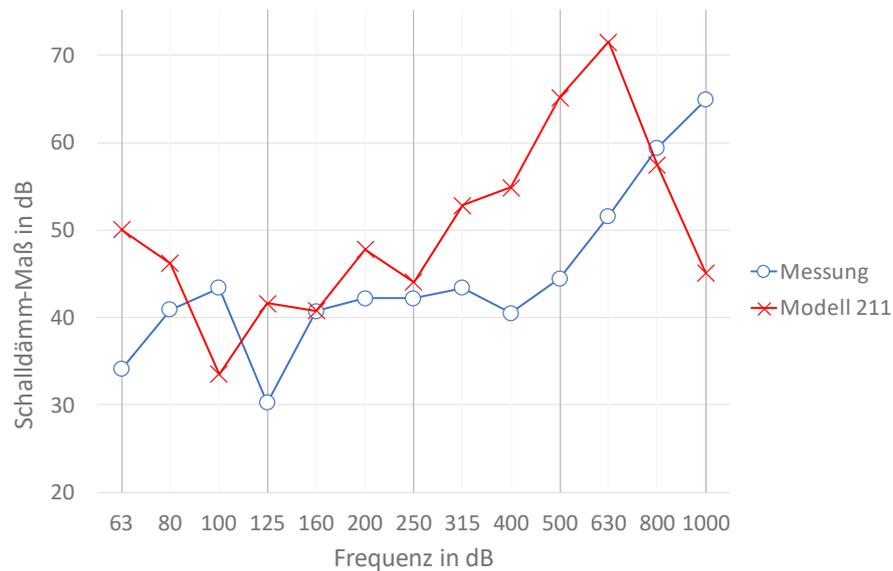


Abb. 29 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 211: Flächenlagerung, porenlose Dämmung, Putz als Volumenelement

5.1.6 Modell 221

Das Modell 221 ist nach folgenden Modellierungsansätzen aufgebaut: Flächenlagerung der Betonwand, poröse Dämmung und Modellierung der Putzschicht als Volumenelement. In Abbildung 30 befindet sich der Koinzidenzeinbruch der Simulation bei 100 Hz statt bei 125 Hz. Der gemessene Resonanzeinbruch bei 400 Hz, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, ist im Verlauf des simulierten Schalldämm-Maßes bei 250 Hz vorhanden. Durch Divergenz Probleme bei der Simulierung ist das Schalldämm-Maßes nur bis 400 Hz berechnet.

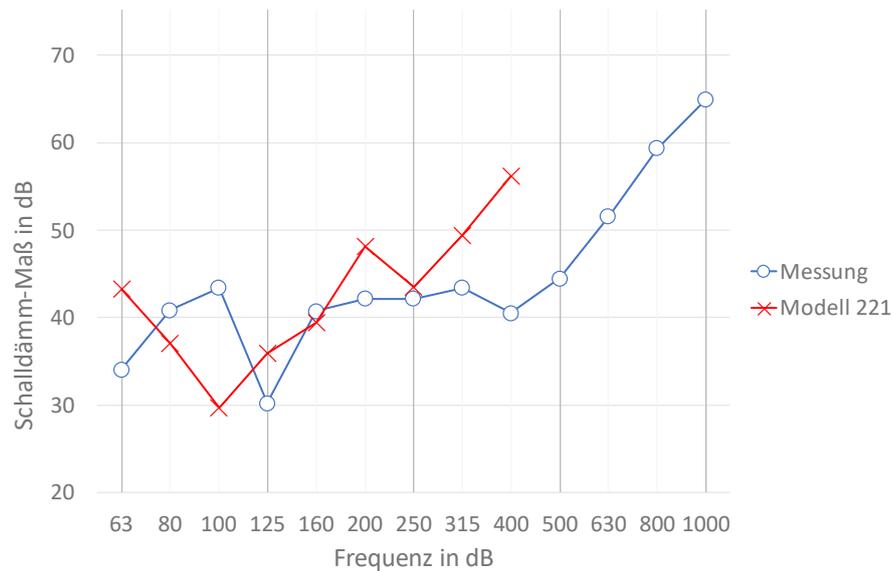


Abb. 30 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 221: Flächenlagerung, poröse Dämmung, Putz als Volumenelement

5.1.7 Modell 112

Das Modell 112 ist nach folgenden Modellierungsansätzen aufgebaut: Linienlagerung der Betonwand, porenlose Dämmung und Modellierung der Putzschicht als Schalenelement. In Abbildung 31 wird der Koinzidenzeinbruch bei 125 Hz nicht in der simulierten Schalldämmkurve abgebildet. Der Resonanzeinbruch des simulierten Schalldämm-Maßes, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, ist bei 400 Hz abgebildet, jedoch mit einem tieferen Einbruch.

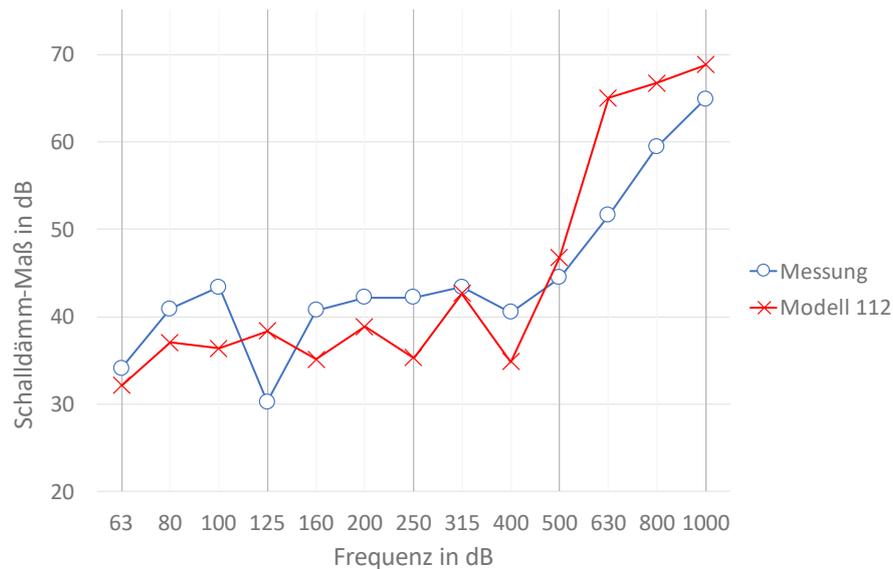


Abb. 31 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 112: Linienlagerung, porenlose Dämmung, Putz als Schalelement

5.1.8 Modell 222

Das Modell 222 ist nach folgenden Modellierungsansätzen aufgebaut: Flächenlagerung der Betonwand, poröse Dämmung und Modellierung der Putzschicht als Schalelement. In Abbildung 32 befindet sich der Koinzidenzeinbruch der Simulation bei 100 Hz statt bei 125 Hz. Der gemessene Resonanzeinbruch bei 400 Hz, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, ist im Verlauf des simulierten Schalldämm-Maßes bei 250 Hz vorhanden. Durch Divergenz Probleme bei der Simulation ist das Schalldämm-Maßes nur bis 800 Hz berechnet.

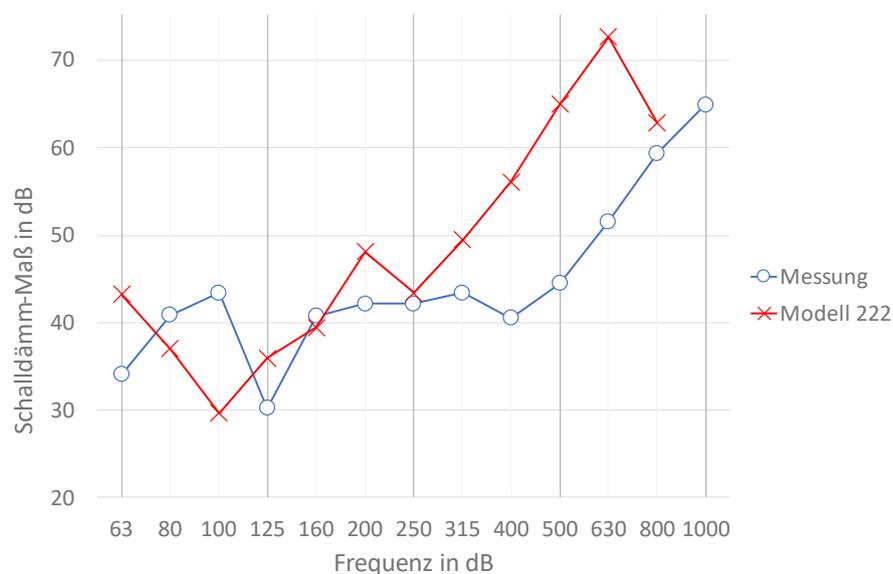


Abb. 32 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 222: Flächenlagerung, poröse Dämmung, Putz als Schalelement

5.2 Vergleich der Ergebnisse der Untermodelle mit der Messung

In Abbildung 33 ist der frequenzabhängige Verlauf des gemessenen Schalldämm-Maßes und das simulierte Schalldämm-Maß aller Untermodelle dargestellt. Die blaue Kurve zeigt die gemessene Kurve der Schalldämmung. Die Abbildung zeigt ebenfalls den Vergleich der Untermodelle untereinander. Beim Vergleich von Modell 111 und 112 mit der Messung ist erkennbar, dass Kurve 112, im Gegensatz zum Modell 111, den Einbruch der Resonanzfrequenz, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, bei 400 Hz darstellt. Dies zeigt, dass die Modellierung der Putzschicht als Schalenelement ein besseres Ergebnis aufweist, als die Modellierung der Schicht als Volumenelement. Beim Vergleich von 112 und 212 mit der Messung ist erkennbar, dass 212 näher an der Resonanzfrequenz liegt als 112. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass alle Modelle mit einer porösen Dämmung nach dem Johnson-Champoux-Allard Modell nicht bis zur 1000 Hz Frequenz simuliert werden können, da die Berechnung bereits davor divergiert. Eine weitere Erkenntnis ist, dass das Schalldämm-Maß von allen Untermodellen spätestens ab 500 Hz überschritten wird.

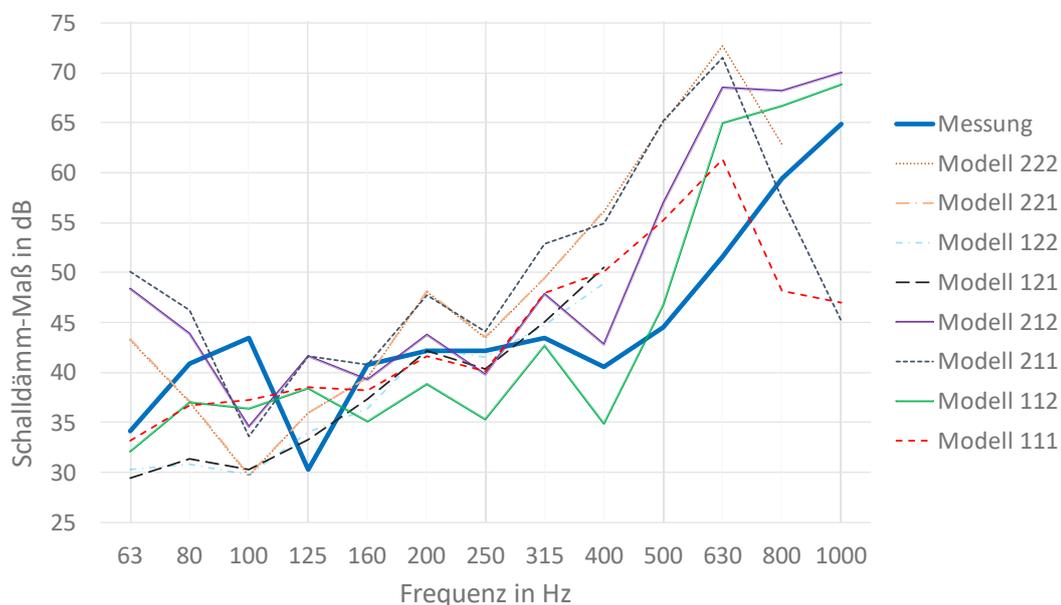


Abb. 33 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes und der simulierten Schalldämm-Maße

Um das Modell mit dem besten Ergebnis zu bestimmen wird eine quantitative Berechnung durchgeführt, bei der die durchschnittlichen, maximalen und minimalen Abweichungen der simulierten Schalldämm-Maße zu dem experimentell ermittelten Schalldämm-Maß verglichen werden. Laut Tabelle 7 ist Untermodell 212 das Modell mit dem zweitbesten Ergebnis, mit einer durchschnittlichen Abweichung von 5,39 dB. Obwohl Untermodell 121 die geringste durchschnittliche Abweichung aufweist, ist in Abbildung 33 klar festzustellen, dass das simulierte Schalldämm-Maß die Einbrüche im gemessenen Schalldämm-Maß nicht reproduziert. Daher wird dieses Modell nicht als beste Ergebnis herangezogen. Somit werden die Modellierungsansätze aus 212 für Modell 2, 3 und 4 gewählt. Das bedeutet, dass die Betonwand flächig gelagert wird, die Dämmschicht als porenlos und die Putzschicht als Schalenelement modelliert wird.

Tabelle 7 Durchschnittliche Abweichung zur Messung, Maximale Abweichung zur Messung und minimale Abweichung zur Messung für das Modell 1 (ebene Wellen – „Perfectly matched layers“)

ebene Welle- Perfectly matched layers							
Durchschnittliche Abweichung zur Messung in dB							
Modell 111	Modell 112	Modell 211	Modell 212	Modell 121	Modell 122	Modell 221	Modell 222
6,82	7,14	10,49	5,39	5,26	5,18	6,97	8,97
Maximale Abweichung zur Messung in dB							
17,97	16,90	20,73	13,43	13,11	13,68	15,68	21,10
Minimale Abweichung zur Messung in dB							
0,59	1,45	0,07	0,73	0,02	0,30	1,26	1,26

5.3 Auswertung der Simulationsergebnisse der Modelle 2, 3 und 4

Laut Kapitel 5.2 werden folgende Modellierungsansätze aus der Gruppe 2 in Modelle 2, 3 und 4 implementiert: Betonwand als Flächenlagerung, porenlose Dämmschicht und die Putzschicht als Schalenelement. In den Abbildungen 34 bis 36 ist der Verlauf des simulierten Schalldämm-Maßes der WDVS Betonwand in rot und der Verlauf des Schalldämm-Maßes der Messung in blau dargestellt.

5.3.1 Ergebnisse der Simulation am Modell 2

Das Modell 2 verfolgt die Ansätze der Modellierung eines Sende- und eines Empfangsraumes. Die simulierte Kurve des Schalldämm-Maßes in Abbildung 34 weist Einbrüche bei 100 Hz, 160 Hz, 250 Hz und 500 Hz. Jedoch sind der Koinzidenzeinbruch bei 125 Hz und der Resonanzeinbruch bei 400 Hz, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, nicht im Verlauf des simulierten Schalldämm-Maßes abgebildet.

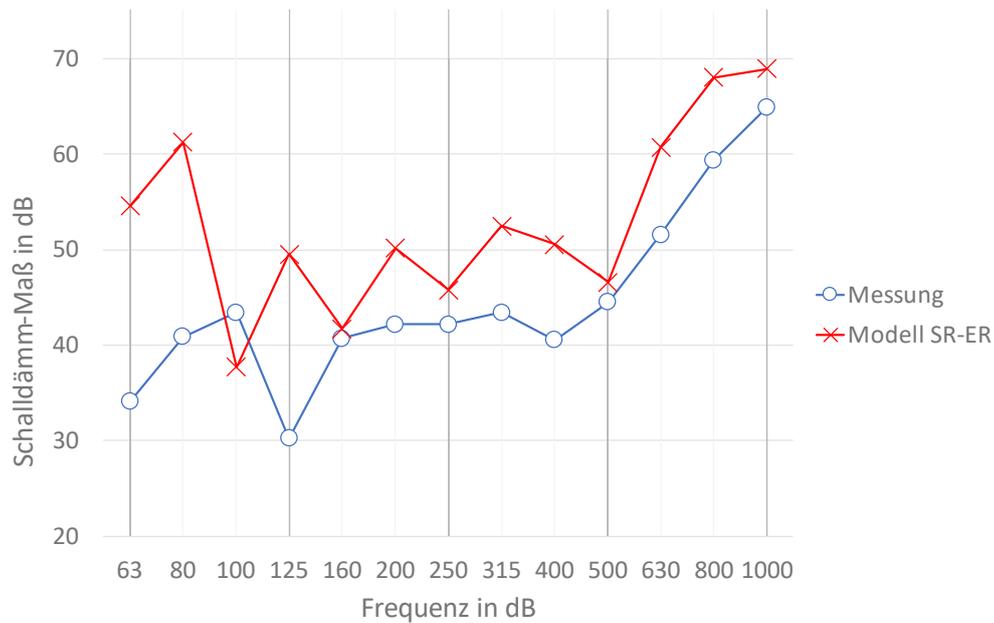


Abb. 34 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell Senderaum – Empfangsraum

5.3.2 Ergebnisse der Simulation am Modell 3

Das Modell 3 entsteht durch die Kombination der Modellierungsansätze der ebenen Wellen und der Modellierung eines Empfangsraumes. In Abbildung 35 wird der Koinzidenzeinbruch bei 125 Hz nicht in der simulierten Schalldämmkurve abgebildet. Der Resonanzeinbruch des simulierten Schalldämm-Maßes, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, ist bei 400 Hz abgebildet. Nach 400 Hz liegt die simulierte Kurve des Schalldämm-Maßes höher als die gemessene Kurve des Schalldämm-Maßes.

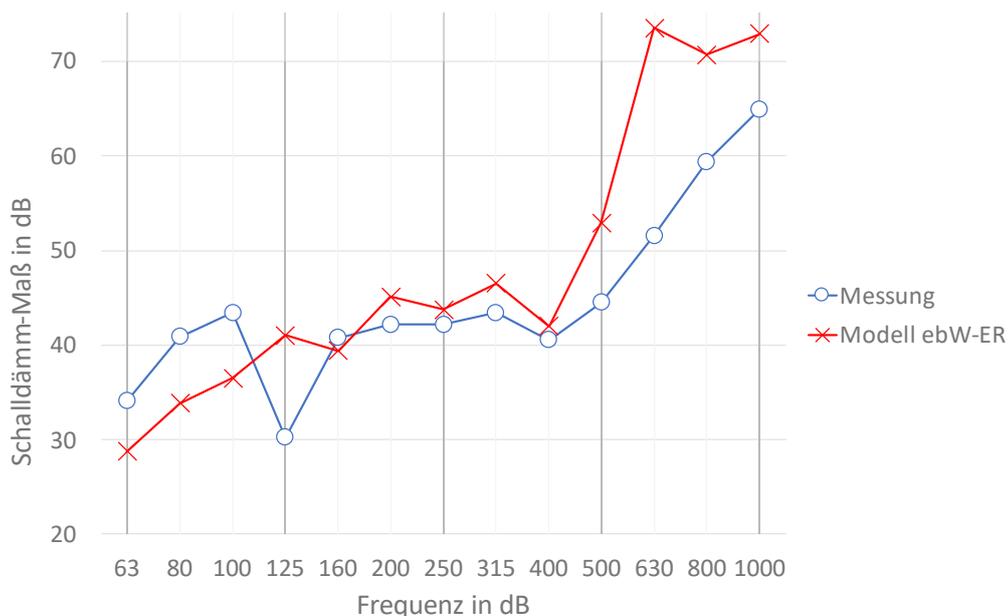


Abb. 35 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell ebene Wellen – Empfangsraum

5.3.3 Ergebnisse der Simulation am Modell 4

Das Modell 4 verfolgt den Ansatz der Modellierung des Senderraumes mit Lautsprecher und der Perfectly Matched Layers. Die simulierte Kurve des Schalldämm-Maßes in Abbildung 36 weist einen Koinzidenzeinbruch zwischen 100 Hz und 125 Hz. Jedoch ist der Resonanzeinbruch bei 400 Hz, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, nicht im Verlauf des simulierten Schalldämm-Maßes abgebildet.

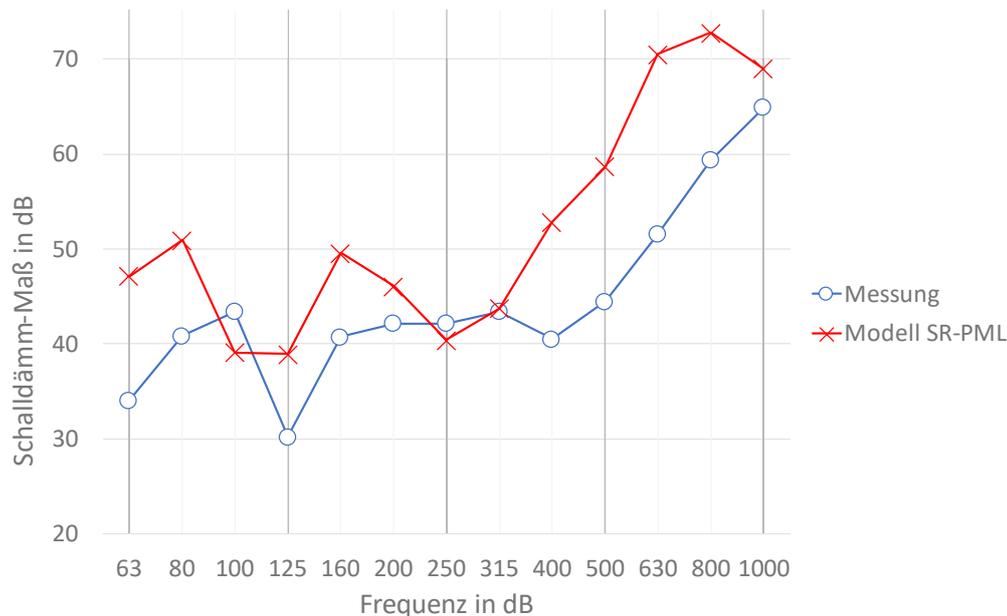


Abb. 36 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell Senderraum - „perfectly matched layers“

5.4 Vergleich Modelle 1,2, 3 und 4 mit der Messung

In Abbildung 37 ist der frequenzabhängige Verlauf des gemessenen Schalldämm-Maßes und das simulierte Schalldämm-Maß der Modelle 1 bis 4 dargestellt. Die blaue Kurve stellt die gemessene Kurve der Schalldämmung dar. Dies erlaubt ebenfalls den Vergleich der Modelle untereinander. Modell 212 und Modell 3 zeigen einen ähnlichen frequenzabhängigen Verlauf des gemessenen Schalldämm-Maßes. Dazu bilden beide Modelle den Resonanzeinbruch, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, bei 400 Hz nach. Somit kann argumentiert werden, dass der Einfluss des Raumes auf das Schalldämm-Maß durch Angabe eines mittleren Schallabsorptionsgrades ein guter Modellierungsansatz ist.

Modelle 2 und 4 (schwarze und grüne Kurve) bilden diesen Einbruch nicht. Dies könnte auf die Modellierung der Schallquelle als Monopolquelle zurückgeführt werden.

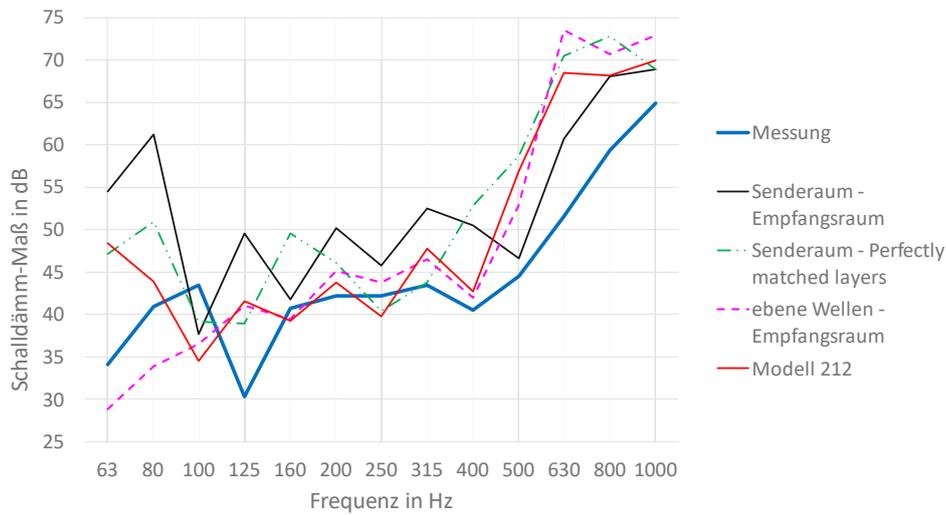


Abb. 37 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und der simulierten Schalldämm-Maße (Modell 1 bis 4)

Tabelle 8 vergleicht die durchschnittlichen, maximalen und minimalen Abweichungen der simulierten Schalldämm-Maße zu dem experimentell ermittelten Schalldämm-Maß. Modell 212 weist die geringste durchschnittliche, maximale und minimale Abweichung zur Messung auf. Laut der Bewertung liefert das Modell 1 (Untermmodell 212) das beste Ergebnis. Somit führen folgende Modellierungsansätze zur besten Prognose des Schalldämm-Maßes einer WDVS Betonwand: ebene Welle, PML, Flächenlagerung der Betonwand, porenlose Dämmung und Modellierung der Putzschicht als Schalelement.

Tabelle 8 Durchschnittliche Abweichung zur Messung, maximale Abweichung zur Messung und minimale Abweichung zur Messung für das Modell 1, 2, 3 und 4

ebeneWelle - Perfectly matched layers Modell 212	Senderaum- Empfangsraum	Senderaum- Perfectly matched layers	ebeneWellen- Empfangsraum
Durchschnittliche Abweichung zur Messung in dB			
5,39	9,36	8,76	6,94
Maximale Abweichung zur Messung in dB			
13,43	20,47	18,93	21,96
Minimale Abweichung zur Messung in dB			
0,73	1,02	0,36	1,32

5.5 Anzahl der finiten Elemente und Berechnungszeit der Modelle

Obwohl der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Netzbildung liegt, zeigt Abbildung 38 eine Darstellung der in finiten Elemente Diskretisierung der Geometrie des Modells 2. Tabelle 9 gibt die Anzahl an Elementen pro Modell, sowie deren Berechnungszeit, an. Hier ist die kurze Rechenzeit von Modell 3 (ebene Wellen –Empfangsraum) bemerkenswert, da das Modell den Resonanzeinbruch nachbildet, eine geringe durchschnittliche Abweichung zur Messung zeigt und mehr als doppelt so viele finite Elemente aufweist als das Modell 212. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine vertiefte Untersuchung im Hinblick auf weiterführende Forschung sinnvoll wäre.

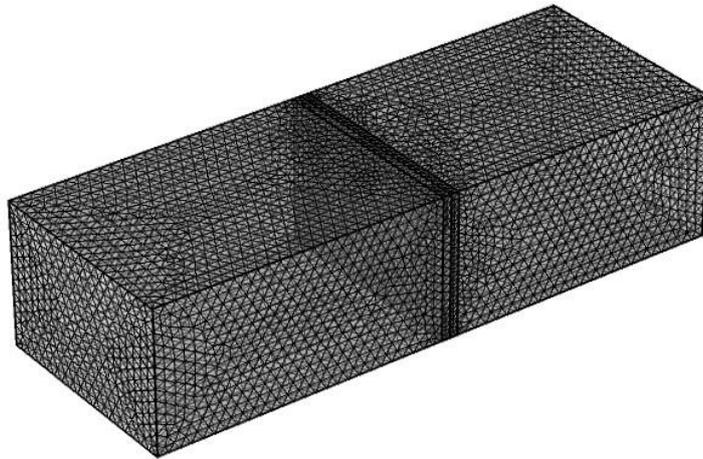


Abb. 38 Darstellung der in finiten Elemente diskretisierten Geometrie des Sende- und Empfangsraumes

Tabelle 9 Modellbenennung, Anzahl an finiten Elemente und Rechenzeit

Modellname	Anzahl an finiten Elementen [-]	Berechnungszeit [h:min]
111	118 692	03:45
211	118 692	03:47
121	343 556	07:17
ebene Welle - Perfectly matched layers	112	02:25
122	227 424	01:35
221	343 556	07:05
212	118 692	06:27
222	142 212	03:20
Senderaum Empfangsraum	200 854	00:53
Senderaum Perfectly matched layers	597 712	04:12
ebene WellenEmpfangsraum	322 560	00:27

6 Schlussfolgerung

Ziel dieser Diplomarbeit war die Aufstellung eines Simulationsmodells anhand der Finiten Elemente Methode (FEM) zur Prognose des Schalldämm-Maßes im tiefen Frequenzbereich eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) auf einer Betonwand und der Vergleich mit den experimentell ermittelten Daten. Es wurden verschiedene Modellierungsansätze betrachtet, damit unterschiedliche Simulationsmodelle aufgestellt werden konnten, um so das Modell mit der besten Übereinstimmung zwischen Prognose und Messung zu bestimmen. Die Forschungsfrage lautete: „Wie genau kann das Schalldämm-Maß einer WDVS Betonwand anhand der FEM Simulation prognostiziert werden und welche Modellierungsansätze werden dafür benötigt?“

Das akustische Verhalten einer WDVS Wand wurde erklärt und der Einfluss des Systems auf die Schalldämmung der Grundwand beschrieben, da diese Erkenntnisse für den Aufbau und die Auswertung der Modellierungen relevant waren.

Die Messungen des Schalldämm-Maßes der WDVS Betonwand wurden im Labor des Akustik Center Austria durchgeführt. Die gemessenen Daten wurden für die Modellierung in der finiten Elemente (FE) Umgebung COMSOL benötigt und dienten als Basis für die Erstellung eines Simulationsmodells zur Prognostizierung der Schalldämmung durch die FE Berechnung.

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von Modellierungsansätzen auf die Modellbildung der WDVS Wand studiert. In Summe wurden sieben Modellierungsansätze betrachtet, die in zwei Gruppen unterteilt wurden. Die erste Gruppe umfasste die Ansätze der Raumbildung und die Erzeugung des Schallfeldes. Dazu zählten die Ansätze der diffusen Schallbildung über eine Punktquelle oder über die Überlagerung ebener Wellen an der Wand sowie die Modellierung des Senderraumes, der als reflektierend oder absorbierend modelliert wurde. Die zweite Gruppe der Modellierungsansätze berücksichtigte die Lagerung der Betonwand als Linienlagerung oder Flächenlagerung, die Dämmschicht mit oder ohne Poren und die Putzschicht als Volumen- oder Schalelement.

Aus unterschiedlichen Kombinationen dieser Ansätze entstanden Modelle, welche das Schalldämm-Maß einer WDVS Betonwand prognostizieren. Die simulierten frequenzabhängigen Schalldämm-Maße wurden mit dem gemessenen Schalldämm-Maß verglichen und dabei das Modell mit der besten Übereinstimmung zwischen Prognose und Messung bestimmt. Die Bewertung erfolgte quantitativ anhand der durchschnittlichen Abweichung zur Messung, der maximalen Abweichung zur Messung und der minimalen Abweichung zur Messung. Ebenfalls wurde bewertet, ob die Resonanzeinbrüche aus der Koinzidenz und dem Masse-Feder-Masse System in der Prognose vorhanden waren.

Das Modell mit der Kombination 212 lieferte das beste Ergebnis. Dieses Modell erzeugte den Schalldruck an der Wand anhand der Summe unkorrelierter ebener Wellen und die Empfängerseite wurde im Modell als unendlich ausgedehnter Raum anhand „Perfectly Matched Layers“ modelliert. Die Anbindung der Betonwand zum Prüfstand erfolgte steif über die gemeinsame Fläche, die Wärmedämmung wurde als elastischer porenloser Körper und die dünne Putzschicht als Schalelement modelliert. Mit diesem Modell konnte der Einbruch im Schalldämm-Maß bei der Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenz bei 400 Hz abgebildet und eine Abweichung zwischen Messung und Berechnung in dem betreffenden Terzband von zwei Dezibel erzielt werden. Dazu zeigte die simulierte Kurve der Schalldämmung einen Koinzidenzeinbruch bei 100 Hz, während die gemessene Kurve einen Koinzidenzeinbruch bei 125 Hz aufweist. Die durchschnittliche Abweichung zur Messung betrug 5,39 dB, die maximale Abweichung 13,43 dB und die minimalste Abweichung zur Messung weniger als 0,73 dB. Dazu konnten noch folgende Feststellungen gemacht werden:

- Der Resonanzeinbruch, der durch das Masse-Feder-Masse System verursacht wird, konnte in den untersuchten Modellen nur erfolgreich nachgebildet werden, wenn die Putzschicht als Schalenelement modelliert wird.
- Eine weitere Erkenntnis ist, dass durch das Modellieren der Dämmschicht als poröse Schicht nach dem JCA Modell, der Verlauf der Schalldämmung nicht dem gemessenen Verlauf folgt. Ein Grund dafür könnten die hierfür verwendeten Werte aus der Literatur und damit eine unbekannte Abweichung zu den tatsächlichen Materialparametern sein. Um das Modell in dieser Hinsicht zu verbessern, könnten diese Parameter in einer Messung bestimmt werden. Zusätzlich entstanden schon bei niedrigen Frequenzen Konvergenzprobleme in der Berechnung. Um dieses Problem zu lösen können die Domänen diskretisiert werden.
- Ein Fehlerpotenzial bei der Prognose des Schalldämm-Maßes stellen die verwendeten Materialdaten dar, die ausschließlich aus der Literatur entnommen und nicht durch Messung bestimmt.
- Generell wurde die Prognose der Schalldämmung ab 500 Hz überschätzt. Um dieses Problem zu lösen können die Domänen diskretisiert werden. Jedoch kann dies zu längeren Rechenzeiten führen.
- Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass Simulationsmodelle, die den Modellierungsansatz der Modellbildung des Senderraumes mit einer Monopolquelle verfolgen, die Schalldämmeinbrüche nicht nachbilden können. Dadurch weist die Prognose der Schalldämmung eine hohe durchschnittliche Abweichung auf. Die Modellierung des Schallfeldes im Senderraum anhand einer Punktquelle und das gleichmäßige „Verschmieren“ der raumakustischen Maßnahmen (Diffusoren, Absorber) mittels mittleren Absorptionsgrad auf die virtuellen Messraumboberflächen stellen zu groben Vereinfachungen dar.
- Schlussendlich konnte festgestellt werden, dass der Einfluss des Raumes auf das Schalldämm-Maß durch Angabe eines mittleren Schallabsorptionsgrades ebenfalls ein gutes Ergebnis aufweist. Modell 3, in dem dieser Ansatz berücksichtigt wurde, zeigt eine durchschnittliche Abweichung zur Messung von 6,94 dB und einen ähnlichen Verlauf der Schalldämmung wie das Modell 212.

Durch die Untersuchung des Einflusses verschiedener, aus der Literatur bekannter Modellierungsansätze auf die Prognose des Schalldämm-Maßes einer WDVS Wand anhand der FE Methode, konnten neue Erkenntnisse festgestellt werden. Diese Arbeit zeigt welche Ansätze zielführend waren und welche nicht. Dazu präsentiert diese Forschung eine quantitative Bewertung der Modellbildung im Vergleich mit einer Messung im Labor.

Um die Prognose des Schalldämm-Maßes einer WDVS Wand anhand der FE Methode zu verbessern, könnten in einer zukünftigen Forschung weitere Modellierungsansätze wie beispielsweise die Verdübelung des WDVS oder der Klebeflächenanteil der Dämmschicht an der Grundwand berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] L. Weber and S. Müller, *Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen*. Fraunhofer IRB Verlag, 2015.
- [2] WHO (World Health Organization), *ENVIRONMENTAL NOISE GUIDELINES for the European Region*. Copenhagen, 2018.
- [3] “DIN EN ISO 10140-2:2010-12, Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 2: Messung der Luftschalldämmung (ISO 10140-2:2010).”
- [4] “DIN EN ISO 10140-5:2014-11, Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen (ISO 10140-5:2010 + Amd.1:2014).”
- [5] COMSOL Multiphysics 5.5, “Sound Transmission Loss Through a Concrete Wall,” p. 36.
- [6] J. W. S. Rayleigh, *The Theory of Sound*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [7] R. Berger, “Die Vorausberechnung der Luftschalldämmung,” *Die Schalltechnik* 5, vol. 2, pp. 21–26, 1932.
- [8] L. Cremer, “Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall,” *Akust. Zeitschrift* 7, vol. 5, pp. 81–104, 1942.
- [9] M. Heckl, “Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche,” *Acust.* 10, vol. 2, pp. 98–108, 1960.
- [10] W. Sabine, *Collected Papers on Acoustics*. Cambridge: Harvard University Press, 1923.
- [11] S.-R. Mehra, *Berechnung der Luftschalldämmung von einschaligen Trennbauteilen endlicher Abmessung*. 1995.
- [12] M. J. Crocker and A. J. Price, “Sound transmission using statistical energy analysis,” *J. Sound Vib.*, vol. 9, no. 3, pp. 469–486, May 1969, doi: 10.1016/0022-460X(69)90185-0.
- [13] M. Dhainaut, “Fluid-Structure Interactions in acoustics,” Norwegian University of Science and Technology, 1996.
- [14] M. Neusser, “Analyse des Einflusses von Verbindungsmitteln auf das Schalldämmmaß von leichten Trennwandkonstruktionen durch realitätsnahe Modellierung von Schraub- und Klebeverbindungen,” Technische Universität Wien, 2017.
- [15] O. Zienkiewicz, R. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 2005.
- [16] G. E. Sandberg, P.-A. Wernberg, and P. Davidsson, *Fundamentals of Fluid-Structure Interaction Fundamentals of Fluid-Structure Interaction*, no. November 2014. 2009.
- [17] L. Weber and D. Brandstetter, *Einheitliche schalltechnische Bemessung von Wärmedämmverbundsystemen*. Frunhofer IRB Verlag, 2004.
- [18] A. Kolbitsch, *Hochbaukonstruktionen I Teil B*. Technische Universität Wien, 2019.
- [19] “ETAG 004 - 11/07/2018 : Außenseitige Wärmedämm-Verbundsystem mit Putzschicht.”
- [20] M. Amtmann *et al.*, “Dämmstoffe richtig eingesetzt,” p. 124, 2014.
- [21] A. K. Chopra, *Dynamics of structures: Theory and Applications To Earthquake Engineering*, 4th ed. Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall, 2012.
- [22] L. Cremer and M. Heckl, *Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*, 2nd ed. Springer Verlag.
- [23] H. H. Lai, H. C. Cheng, S. H. Su, C. M. Lin, and W. Wu, “Evolution of internal friction in low-carbon steel during vibratory stress relief,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 5403–5409, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2020.03.066.

- [24] M. Neusser, N. B. Roozen, H. Müllner, and S. Hinterseer, "Messung des Einflusses von Dübeln zur Befestigung von Wärmedämmverbundsystemen auf das Luftschalldämmmaß von Außenwänden in Massivbauweise."
- [25] C. Churchill, T. Bednar, H. Müllner, M. Neusser, and S. Hinterseer, "Renovation and innovation using thermal insulation lining systems - Acoustic performance," *Build. Environ.*, 2021.
- [26] C. Churchill, T. Bednar, H. Müllner, M. Neusser, and S. Hinterseer, "A parametric study of the acoustic properties of thermal cladding systems," *Appl. Acoust.*, vol. 173, 2021.
- [27] "DIN EN ISO 18233, Akustik – Anwendung neuer Messverfahren in der Bau- und Raumakustik (ISO 18233:2006)."
- [28] "DIN EN ISO 10140-1:2020-08, Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 1: Anwendungsregeln für bestimmte Produkte (ISO/DIS 10140-1:2020)."
- [29] "DIN EN ISO 15186-1:2003-12, Akustik - Bestimmung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen aus Schallintensitätsmessungen - Teil 1: Messungen im Prüfstand."
- [30] M. Neusser and T. Bednar, "Modifikation eines Modells von Verbindungsmitteln zur Prognose des Schalldämmmaßes von Leichtbaukonstruktionen mittels Finiten Elemente Methode in dem erweiterten Frequenzbereich," p. 6.
- [31] H. Petritsch, "FEM-Simulationen mit COMSOL Multiphysics im Anwendungsbereich der Technischen Akustik," p. 166, 2010.
- [32] H. Kutruff, *Room Acoustics*, 6th ed. Taylor & Francis Group, 2017.
- [33] J. F. Allard and N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*. John Wiley & Sons, Ltd Registered, 2009.
- [34] M. Aminbaghai, "Skriptum zur Vorlesung Finite Elemente Methoden 2," 2020.
- [35] S. Engleder, "Stabilisierte Randintegralgleichungen für äußere Randwertprobleme der Helmholtz-Gleichung," Technische Universität Graz, 2006.
- [36] COMSOL Multiphysics, "Acoustics Module," *Interfaces (Providence)*, p. 214, 2010.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Prinzipaufbau einer WDVS Wand (oben), Vereinfachtes Masse-Feder-Masse Modell eines WDVS auf einer Grundwand (unten) [1].....	10
Abb. 2 Schalldämm-Verbesserungsmaß ΔR eines WDVS [1].....	10
Abb. 3 Einführung eines Moduls im komplexen Raum [23].....	11
Abb. 4 Einfluss des Verlustfaktors auf den Einbruch im Bereich der Resonanzfrequenz [14]	11
Abb. 5 Prinzipaufbau des Prüfstandes und der WDVS Prüfwand.....	12
Abb. 6 Ergebnis der gemessenen Nachhallzeit über das Frequenzspektrum im Empfangsraum.	14
Abb. 7 Ergebnis der gemessenen Nachhallzeit über das Frequenzspektrum im Senderraum.....	14
Abb. 8 Ergebnis des Schallabsorptionsgrades über das Frequenzspektrum im Empfangsraum..	15
Abb. 9 Ergebnis des Schallabsorptionsgrades über das Frequenzspektrum im Senderraum.....	15
Abb. 10 Vergleich der gemessenen Schalldämm-Maße der WDVS Wand. Anregung des Luftschallfeldes im Senderraum an einer unterschiedlichen Anzahl an LS Positionen: Anhand eines Lautsprechers (rot); zwei Lautsprecher (blau); drei Lautsprecher (grün).....	16
Abb. 11 Darstellung der Verbesserung der Luftschalldämmung durch das WDVS.....	17
Abb. 12 Schematische Darstellung zweier Methoden zur Bemessung der Schalldämmung: In beiden Räumen herrscht ein diffuses Schallfeld (oben) – Im Senderraum herrscht ein diffuses Schallfeld und der Empfangsraum ist total schallabsorbierend (unten) [2].....	19

Abb. 13 Prinzipskizze des Skalarproduktes \mathbf{kr} zur mathematischen Beschreibung von ebenen Wellen im dreidimensionalen Raum.....	21
Abb. 14 Darstellung des Wellenzahlenvektors \mathbf{k} zur mathematischen Beschreibung von ebenen Wellen im dreidimensionalen Raum.....	22
Abb. 15 Darstellung des Schalldruckes in einer akustischen Domäne (blau) und in einer PML (gelb) [31]	23
Abb. 16 Übersicht der zwei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen einer Wand. Links: Flächige Lagerung über die vier Seiten der Wand – Rechts: Linienlagerung auf zwei Seiten der Wand	23
Abb. 17 Schematische Darstellung des analytischen Modells nach Johnson-Champoux-Allard als starre nicht uniforme Porenstruktur – schwarz: die starre Struktur, weiß: Luftporen.....	25
Abb. 18 Schematische Darstellung der Reduktion eines dreidimensionalen finiten Elementes in ein zweidimensionales Schalenelement [34].....	26
Abb. 19 Visualisierung der Kopplungsbedingungen für die Fluid-Strukturinteraktion [36].....	30
Abb. 20 Übersicht der verwendeten Modelle für die Simulation des Schalldämm-Maßes und Beschriftung der verwendeten Modellierungsansätze für den Schalldruck.....	31
Abb. 21 Darstellung des ersten Modells: Links die WDVS Wand und rechts der Empfangsraum als „Perfectly Matched Layers“. Nachbildung des diffusen Schalldruckes im Empfangsraum durch Generieren ebener Schalldruckwellen an der Wand.....	32
Abb. 22 Darstellung des zweiten Modells: Links der Senderaum, rechts der Empfangsraum und mittig das zu messende Wandsystem. Nachbildung des Lautsprechers mittels Punktquelle	32
Abb. 23 Darstellung des dritten Modells: Links die WDVS Wand, rechts der Empfangsraum. Nachbildung des diffusen Schalldruckes im Empfangsraum durch Generieren ebener Schalldruckwellen an der Wand.....	33
Abb. 24 Darstellung des vierten Modells: Links der Senderaum, rechts der Empfangsraum als „Perfectly Matched Layers“ und mittig das zu messende Wandsystem. Nachbildung des Lautsprechers mittels Punktquelle.....	34
Abb. 25 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 111: Linienlagerung, porenlose Dämmung, Putz als Volumenelement.....	36
Abb. 26 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 121: Linienlagerung, poröse Dämmung, Putz als Volumenelement.....	36
Abb. 27 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 212: Flächenlagerung, porenlose Dämmung, Putz als Schalenelement	37
Abb. 28 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 122: Linienlagerung, poröse Dämmung, Putz als Schalenelement	38
Abb. 29 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 211: Flächenlagerung, porenlose Dämmung, Putz als Volumenelement.....	38
Abb. 30 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 221: Flächenlagerung, poröse Dämmung, Putz als Volumenelement.....	39
Abb. 31 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 112: Linienlagerung, porenlose Dämmung, Putz als Schalenelement	40

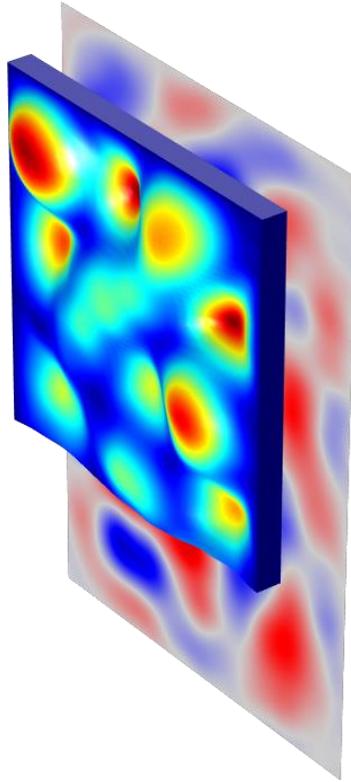
Abb. 32 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell 222: Flächenlagerung, poröse Dämmung, Putz als Schalenelement	40
Abb. 33 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes und der simulierten Schalldämm-Maße	41
Abb. 34 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell Senderaum – Empfangsraum.....	43
Abb. 35 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell ebene Wellen – Empfangsraum ..	43
Abb. 36 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und des simulierten Schalldämm-Maßes (rot) - Modell Senderaum - „perfectly matched layers“	44
Abb. 37 Darstellung des frequenzabhängigen Verlaufes des gemessenen Schalldämm-Maßes (blau) und der simulierten Schalldämm-Maße (Modell 1 bis 4).....	45
Abb. 38 Darstellung der in finiten Elemente diskretisierten Geometrie des Sende- und Empfangsraumes.....	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Dämmstoffe die bei einem WDVS System zum Einsatz kommen	9
Tabelle 2 Geometrische Daten vom Sende- und Empfangsraum	12
Tabelle 3 Materialdaten der WDVS Wand	13
Tabelle 4 Parameter des JCA Modell nach [28]	25
Tabelle 5 Erklärung der Benennung der Untermodelle anhand der Zuordnung von Zahlen an den untersuchten Variablen.....	34
Tabelle 6 Benennung der Untermodelle anhand der Variablen.....	35
Tabelle 7 Durchschnittliche Abweichung zur Messung, Maximale Abweichung zur Messung und minimale Abweichung zur Messung für das Modell 1 (ebene Wellen – „Perfectly matched layers“)	42
Tabelle 8 Durchschnittliche Abweichung zur Messung, maximale Abweichung zur Messung und minimale Abweichung zur Messung für das Modell 1, 2, 3 und 4.....	45
Tabelle 9 Modellbenennung, Anzahl an finiten Elemente und Rechenzeit.....	46

Anhang

Sound Transmission Loss Through an ETICS Concrete Wall



Author

COMSOL

Report date

Feb 3, 2022 6:31:24 PM

Contents

1	Global Definitions	3
1.1	Parameters	3
2	Component 1	4
2.1	Definitions	4
2.2	Geometry 1	9
2.3	Materials	9
2.4	Pressure Acoustics, Frequency Domain.....	12
2.5	Solid Mechanics	13
2.6	Shell	14
2.7	Multiphysics.....	15
2.8	Mesh 1	16
3	Study 1 - Frequency Analysis	17
3.1	Frequency Domain.....	17
4	Results	18
4.1	Tables	18
4.2	Applied Loads (solid)	21
4.3	Plot Groups.....	22

1 Global Definitions

Author	COMSOL
Date	Aug 25, 2021 10:38:52 AM

GLOBAL SETTINGS

Name	Model1 212 done.mph
Path	F:\Magrini\Model_1\Model1_212_done.mph
Version	COMSOL Multiphysics 5.6 (Build: 401)

USED PRODUCTS

COMSOL Multiphysics
Acoustics Module
Structural Mechanics Module

COMPUTER INFORMATION

CPU	Intel64 Family 6 Model 62 Stepping 4, 26 cores
Operating system	Windows 10

1.1 PARAMETERS

PARAMETERS 1

Name	Expression	Value	Description
T	150[mm]	0.15 m	Thickness of concrete wall
H	2.7[m]	2.7 m	Height of concrete wall
W	4[m]	4 m	Width of concrete wall
seed	42	42	Seed for random function
N	500	500	Number of random waves in sum
c0	343.2[m/s]	343.2 m/s	Speed of sound in air
rho0	1.2[kg/m ³]	1.2 kg/m ³	Density of air
fmax	1200[Hz]	1200 Hz	Maximum study frequency
m	2100[kg/m ³]*T	315 kg/m ²	Wall surface density

2 Component 1

2.1 DEFINITIONS

2.1.1 Variables

Variables: Diffuse Field

SELECTION

Geometric entity level	Entire model
------------------------	--------------

Name	Expression	Unit	Description
phi	phi_rnd(n, freq[1/Hz], 1, seed)		
theta	acos(costheta_rnd(n, freq[1/Hz], 2, seed))		
phase	phase_rnd(n, freq[1/Hz], 3, seed)		
kx	cos(theta)*k0	1/m	Partial wave vector, x-component
ky	sin(theta)*cos(phi)*k0	1/m	Partial wave vector, y-component
kz	sin(theta)*sin(phi)*k0	1/m	Partial wave vector, z-component
k0	2*pi*freq/c0	1/m	Propagation constant
p_room	1[Pa]/sqrt(N)*sum(exp(i*phase)*exp(-i*(kx*x + ky*y + kz*z)), n, 1, N)	Pa	Room diffuse field
p_refl	1[Pa]/sqrt(N)*sum(exp(i*phase)*exp(-i*(-kx*x + ky*y + kz*z)), n, 1, N)	Pa	Reflected acoustic field at x=0
p_wall	p_room + p_refl	Pa	Total wall pressure (mechanical load)

Variables: STL

SELECTION

Geometric entity level	Entire model
------------------------	--------------

Name	Expression	Unit	Description
Ix_tr	0.5*realdot(acpr.p_t, acpr.iomega*u)	W/m ²	Transmitted intensity

Name	Expression	Unit	Description
vx_room	$-\frac{1}{(\text{acpr} \cdot i \cdot \omega \cdot \rho_0) \cdot 1[\text{Pa}] / \sqrt{N}} \sum (d(\exp(i \cdot \text{phase}) \cdot \exp(-i \cdot (k_x \cdot x + k_y \cdot y + k_z \cdot z))), x, n, 1, N)$	m/s	Room acoustic particle x-velocity
lx_room	$0.5 \cdot \text{realdot}(p_{\text{room}}, vx_{\text{room}})$	W/m ²	Room intensity x direction
P_in	$\text{intop_in}(0.5 \cdot lx_{\text{room}})$	W	Incident power (intensity half space)
P_in_proom	$\text{intop_in}(0.5 \cdot \text{abs}(p_{\text{room}})^2) / (4 \cdot \rho_0 \cdot c_0)$	W	Incident power (room RMS pressure average)
p_rms_theo	$1[\text{Pa}] / \sqrt{2}$	Pa	RMS pressure in source room (theoretical limit, N -> infinity)
P_in_theo	$\text{intop_in}(1) \cdot p_{\text{rms_theo}}^2 / (4 \cdot \rho_0 \cdot c_0)$	W	Incident power (theoretical limit, N -> infinity)
P_tr	$\text{intop_tr}(lx_{\text{tr}})$	W	Transmitted power (intensity integral)

2.1.2 Functions

Random 1

Function name	costheta_rnd
Function type	Random

Random 2

Function name	phi_rnd
Function type	Random

Random 3

Function name	phase_rnd
Function type	Random

2.1.3 Selections

Save solution on boundaries

Selection type
Explicit

Selection
Boundaries 1–5, 7–10, 24, 31, 58

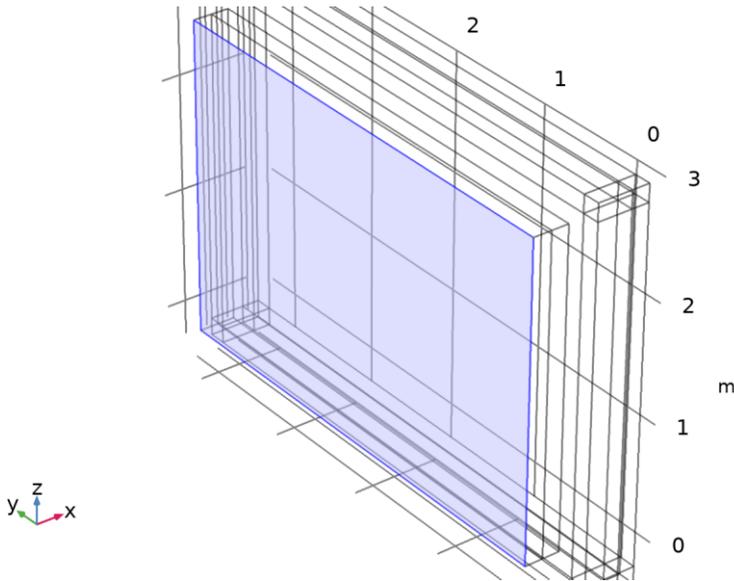
2.1.4 Nonlocal Couplings

Integration 1

Coupling type	Integration
Operator name	intop_in

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Boundary 1



Selection

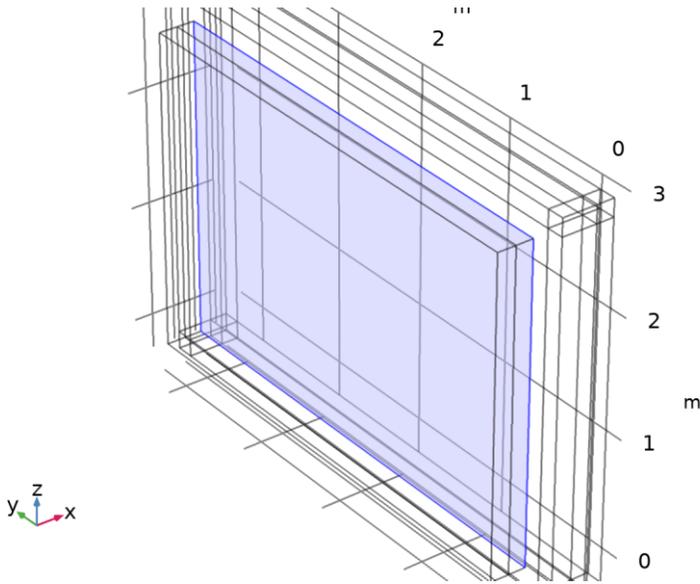
Integration 2

Coupling type	Integration
Operator name	intop_tr

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
------------------------	----------

Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Boundary 31
-----------	--



Selection

2.1.5 Coordinate Systems

Boundary System 1

Coordinate system type	Boundary system
Tag	sys1

COORDINATE NAMES

First	Second	Third
t1	t2	n

Shell Local System (shell)

Coordinate system type	Base vector system
Tag	shellsys

COORDINATE NAMES

First	Second	Third
xl	yl	zl

BASE VECTORS

	x	y	z
xl	root.comp1.shell.dsdX11	root.comp1.shell.dsdX12	root.comp1.shell.dsdX13
yl	root.comp1.shell.dsdX21	root.comp1.shell.dsdX22	root.comp1.shell.dsdX23
zl	root.comp1.shell.dsdX31	root.comp1.shell.dsdX32	root.comp1.shell.dsdX33

SIMPLIFICATIONS

Description	Value
Assume orthonormal	On

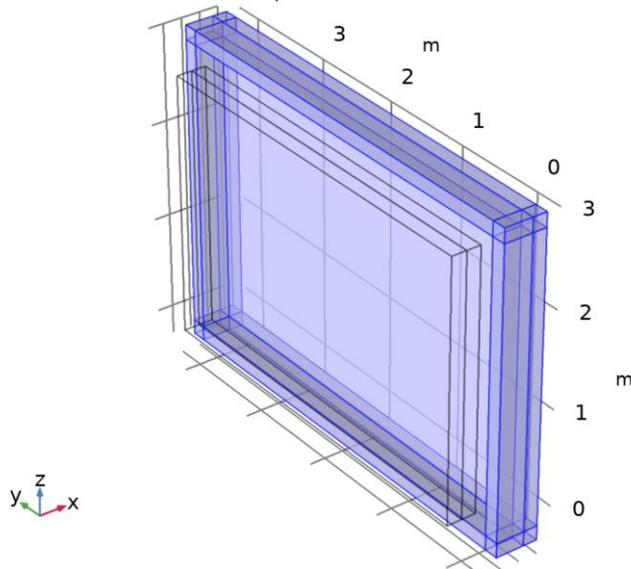
2.1.6 Artificial Domains

Perfectly Matched Layer 1

Tag pml1

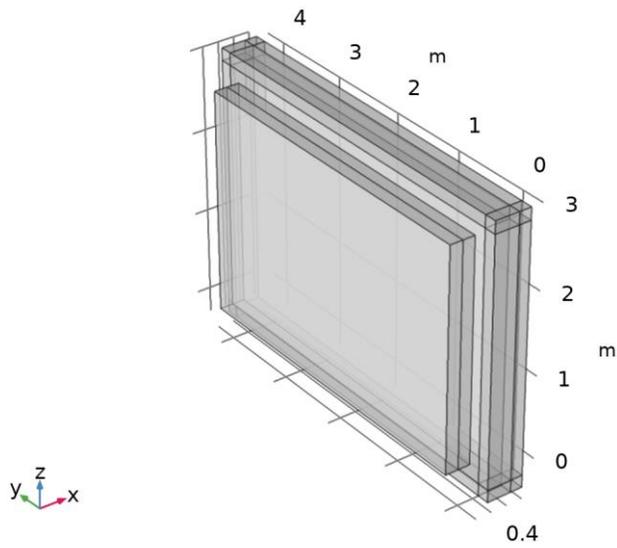
SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 3: Domains 3–6, 8–20



Selection

2.2 GEOMETRY 1



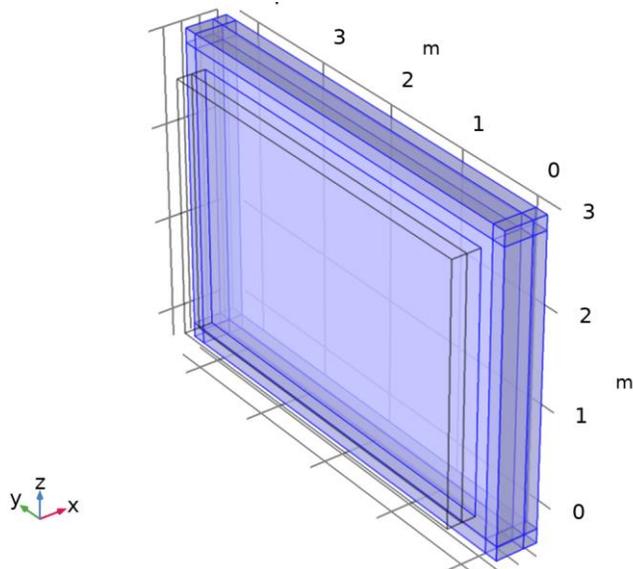
Geometry 1

UNITS

Length unit	m
Angular unit	deg

2.3 MATERIALS

2.3.1 Air

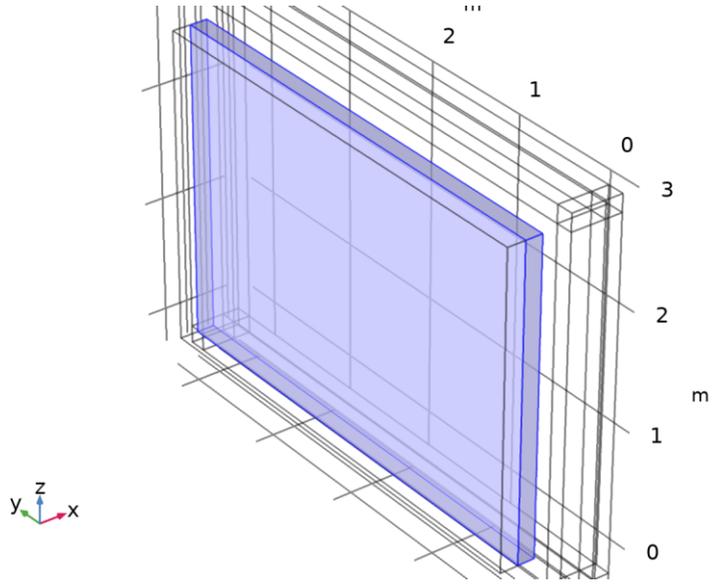


Air

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 3: All domains

2.3.2 Concrete

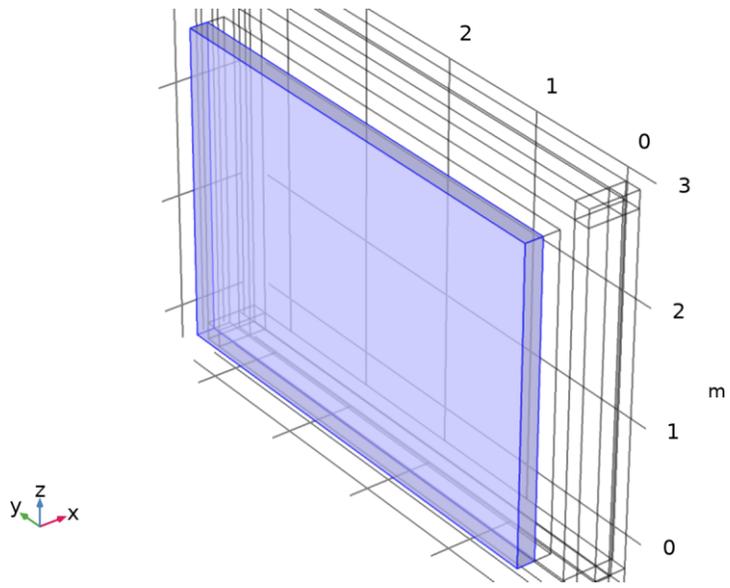


Concrete

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 3: Domain 2

2.3.3 Foam [solid,101 kPa]

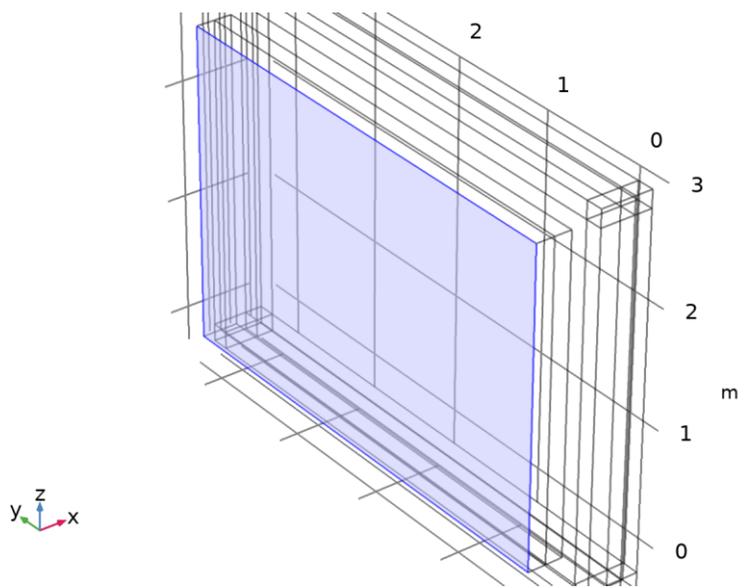


Foam [solid,101 kPa]

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 3: Domain 1

2.3.4 Plaster

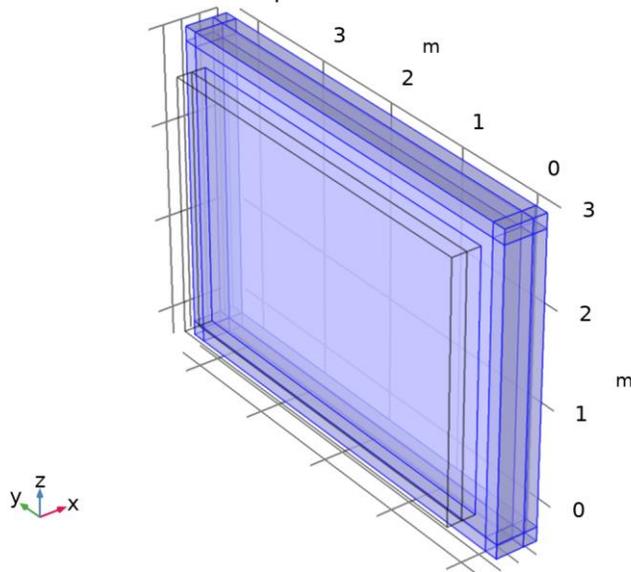


Plaster

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
------------------------	----------

2.4 PRESSURE ACOUSTICS, FREQUENCY DOMAIN



Pressure Acoustics, Frequency Domain

EQUATIONS

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m$$

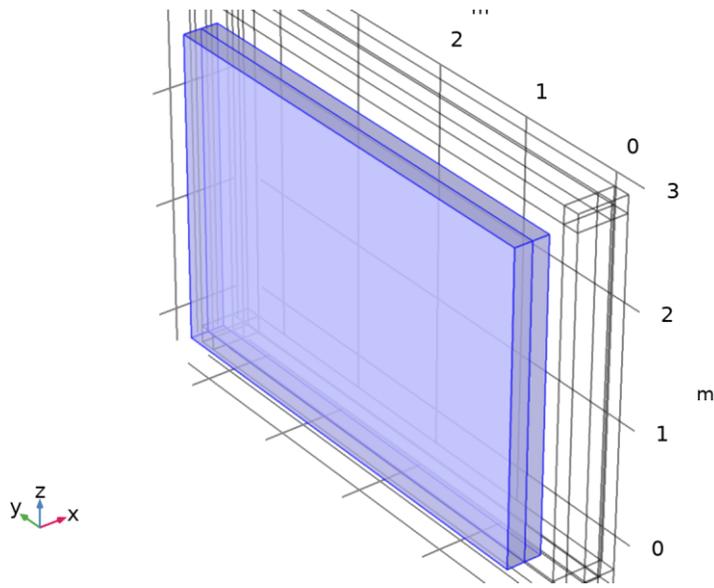
$$p_t = p + p_b$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2$$

FEATURES

Name	Level
Pressure Acoustics 1	Domain
Sound Hard Boundary (Wall) 1	Boundary
Initial Values 1	Domain

2.5 SOLID MECHANICS



Solid Mechanics

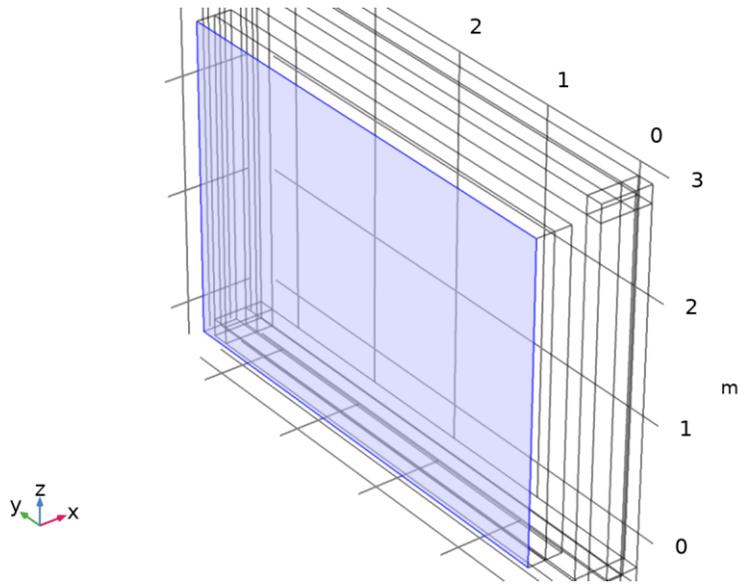
EQUATIONS

$$-\rho\omega^2\mathbf{u} = \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_{ve}^{\phi}$$

FEATURES

Name	Level
Linear Elastic Material 1	Domain
Free 1	Boundary
Initial Values 1	Domain
Fixed Constraint 2	Edge

2.6 SHELL



Shell

EQUATIONS

$$-\rho(\omega^2 \mathbf{u} + z\omega^2 \mathbf{a} \mathbf{r}) = \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{F}_v e^{i\phi} + 6(\mathbf{M}_v \times \mathbf{n}) \frac{z}{d} e^{i\phi}$$

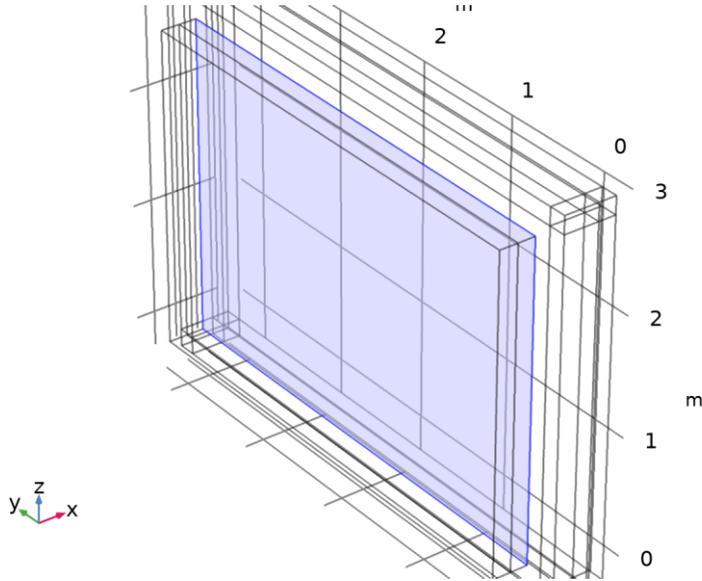
$$\sigma_z = 0, \quad -1 \leq z \leq 1$$

FEATURES

Name	Level
Linear Elastic Material 1	Boundary
Thickness and Offset 1	Boundary
Free 1	Edge
Initial Values 1	Boundary
Face Load 1	Boundary

2.7 MULTIPHYSICS

2.7.1 Acoustic-Structure Boundary 1



Acoustic-Structure Boundary 1

EQUATIONS

Exterior:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(\frac{1}{\rho_c} (\nabla \rho_t - \mathbf{q}_d) \right) = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_{tt}$$

$$\mathbf{F}_A = \rho_t \mathbf{n}$$

Interior:

$$-\mathbf{n} \cdot \left(\frac{1}{\rho_c} (\nabla \rho_t - \mathbf{q}_d) \right)_{\text{up}} = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_{tt}$$

$$-\mathbf{n} \cdot \left(\frac{1}{\rho_c} (\nabla \rho_t - \mathbf{q}_d) \right)_{\text{down}} = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_{tt}$$

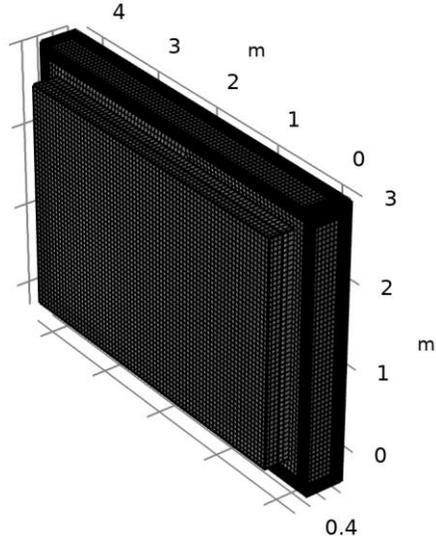
$$\mathbf{F}_A = \rho_{t\text{down}} \mathbf{n} - \rho_{t\text{up}} \mathbf{n}$$

2.7.2 Solid-Thin Structure Connection 1

EQUATIONS

$$\mathbf{u}_{so} = \mathbf{u}_{sh} \quad \text{on} \quad \partial\Omega_{so} \cap \partial\Omega_{sh}$$

2.8 MESH 1



Mesh 1

3 Study 1 - Frequency Analysis

COMPUTATION INFORMATION

Computation time	2 h 25 min 53 s
------------------	-----------------

3.1 FREQUENCY DOMAIN

Frequencies (Hz)
{50, 51.5, 53, 54.5, 56, 58, 60, 61.5, 63, 65, 67, 69, 71, 73, 75, 77.5, 80, 82.5, 85, 87.5, 90, 92.5, 95, 97.5, 100, 103, 106, 109, 112, 115, 118, 122, 125, 128, 132, 136, 140, 145, 150, 155, 160, 165, 170, 175, 180, 185, 190, 195, 200, 206, 212, 218, 224, 230, 236, 243, 250, 258, 265, 272, 280, 290, 300, 307, 315, 325, 335, 345, 355, 365, 375, 387, 400, 412, 425, 437, 450, 462, 475, 487, 500, 515, 530, 545, 560, 580, 600, 615, 630, 650, 670, 690, 710, 730, 750, 775, 800, 825, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1e3, 1.03e3, 1.06e3, 1.09e3, 1.12e3, 1.15e3, 1.18e3}

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	Off

SETTINGS

Description	Value
Frequencies	{50, 51.5, 53, 54.5, 56, 58, 60, 61.5, 63, 65, 67, 69, 71, 73, 75, 77.5, 80, 82.5, 85, 87.5, 90, 92.5, 95, 97.5, 100, 103, 106, 109, 112, 115, 118, 122, 125, 128, 132, 136, 140, 145, 150, 155, 160, 165, 170, 175, 180, 185, 190, 195, 200, 206, 212, 218, 224, 230, 236, 243, 250, 258, 265, 272, 280, 290, 300, 307, 315, 325, 335, 345, 355, 365, 375, 387, 400, 412, 425, 437, 450, 462, 475, 487, 500, 515, 530, 545, 560, 580, 600, 615, 630, 650, 670, 690, 710, 730, 750, 775, 800, 825, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1000, 1030, 1060, 1090, 1120, 1150, 1180}

VALUES OF DEPENDENT VARIABLES

Description	Value
Settings	For selections
Selections	Save solution on boundaries

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr)	physics
Solid Mechanics (solid)	physics
Shell (shell)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

4 Results

4.1 TABLES

4.1.1 Table 1

Global Evaluation 1

freq (Hz)	$10 \cdot \log_{10}(P_{in}/P_{tr})$
50.000	40.666
51.500	38.983
53.000	38.237
54.500	34.606
56.000	34.124
58.000	30.748
60.000	28.133
61.500	23.240
63.000	25.063
65.000	9.4321
67.000	25.803
69.000	28.266
71.000	30.303
73.000	21.348
75.000	24.389
77.500	23.848
80.000	31.069
82.500	34.043
85.000	35.768
87.500	40.030
90.000	32.738
92.500	41.997
95.000	36.933
97.500	38.829
100.00	34.953
103.00	33.023
106.00	26.163
109.00	16.386
112.00	29.326

freq (Hz)	10*log10(P_in/P_tr)
115.00	33.691
118.00	40.052
122.00	44.774
125.00	41.053
128.00	39.406
132.00	42.739
136.00	42.673
140.00	45.399
145.00	40.856
150.00	40.106
155.00	27.916
160.00	37.878
165.00	33.052
170.00	28.740
175.00	34.999
180.00	26.855
185.00	35.579
190.00	38.882
195.00	43.085
200.00	47.731
206.00	49.168
212.00	47.343
218.00	45.098
224.00	47.115
230.00	41.002
236.00	30.215
243.00	40.497
250.00	41.445
258.00	43.665
265.00	31.541
272.00	48.756
280.00	43.388
290.00	44.933
300.00	37.024
307.00	28.437

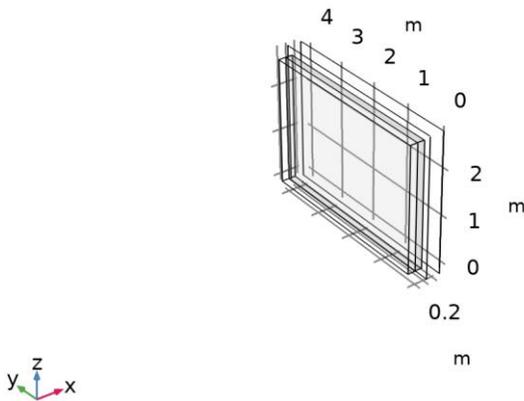
freq (Hz)	10*log10(P_in/P_tr)
315.00	47.362
325.00	46.381
335.00	51.319
345.00	48.307
355.00	50.327
365.00	39.234
375.00	34.785
387.00	26.236
400.00	33.695
412.00	35.711
425.00	18.761
437.00	21.201
450.00	27.714
462.00	39.435
475.00	50.303
487.00	55.849
500.00	55.525
515.00	44.555
530.00	48.483
545.00	57.894
560.00	57.606
580.00	70.445
600.00	75.165
615.00	75.287
630.00	77.371
650.00	76.202
670.00	67.257
690.00	60.863
710.00	64.177
730.00	62.735
750.00	72.576
775.00	74.373
800.00	71.969
825.00	67.630
850.00	58.616

freq (Hz)	10*log10(P_in/P_tr)
875.00	73.353
900.00	75.701
925.00	64.370
950.00	79.710
975.00	71.697
1000.0	69.398
1030.0	71.424
1060.0	72.232
1090.0	74.526
1120.0	74.500
1150.0	76.839
1180.0	76.888

4.2 APPLIED LOADS (SOLID)

4.2.1 Boundary Loads (solid)

freq(111)=1180 Hz Boundary Loads (solid)

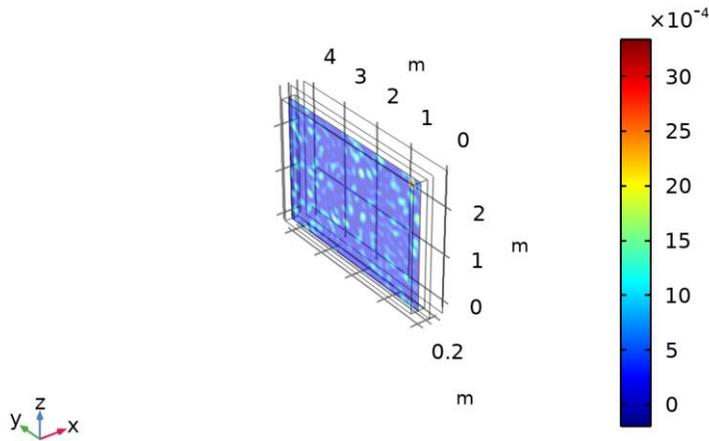


Boundary Loads (solid)

4.3 PLOT GROUPS

4.3.1 Incident Intensity

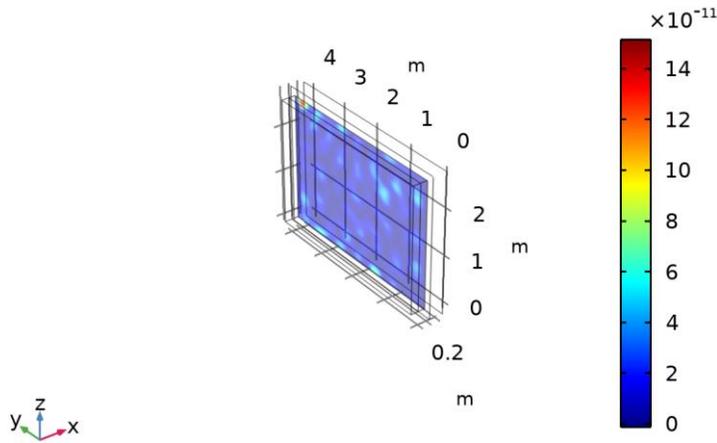
freq(111)=1180 Hz Surface: 0.5*I_{x_room} (W/m²)



Surface: 0.5*I_{x_room} (W/m²)

4.3.2 Transmitted Intensity

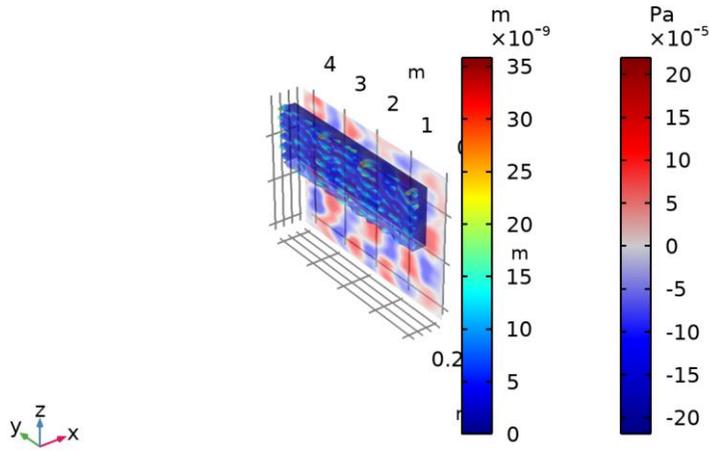
freq(111)=1180 Hz Surface: Transmitted intensity (W/m²)



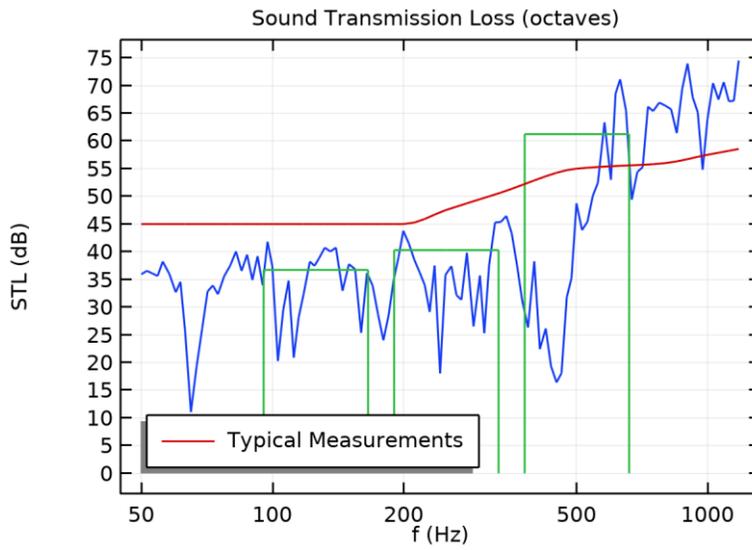
Surface: Transmitted intensity (W/m²)

4.3.3 Displacement

$f = 1180 \text{ Hz}$

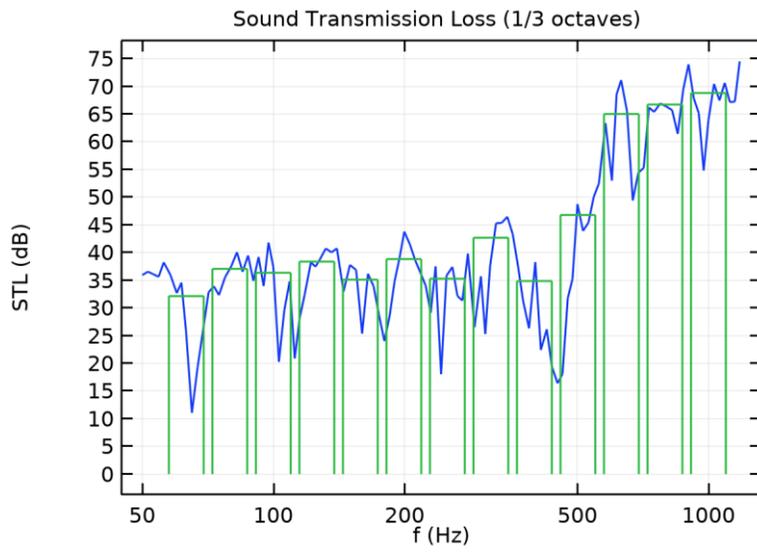


4.3.4 STL: P_{in}/P_{tr} (octaves)



Sound Transmission Loss (octaves)

4.3.5 STL: P_in/P_tr (1/3 octaves)



Sound Transmission Loss (1/3 octaves)