

Toningenieur-Projekt

Filterbasierte Auralisation der Schalldämmung zwischen Räumen

Jonas Schültke

Betreuung: Dr. Franz Zotter

Graz, 28. Juni 2022



institut für elektronische musik und akustik



Zusammenfassung

Es gibt viele Vorschriften und Normen zur theoretischen Berechnung der direkten und indirekten Schallübertragung von Wänden und dem damit einhergehenden Schalldämmmaß R_w . Doch es ist oftmals nur sehr schwer vorstellbar, wie laut und in welchem Frequenzbereich Schall schlussendlich durch die Wände in einen anderen Raum vordringt. Das Ziel dieser Arbeit ist die Verdeutlichung der Schallübertragung über die praktische Auralisation in Form eines Plug-Ins. Dazu werden die wichtigsten Beziehungen aus der Norm ÖNORM EN ISO 12354 zur Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus Bauteileigenschaften mittels IIR-Filtern nachgebildet, um die Schallübertragung von Direktwegen zu simulieren. Vor allem gilt es den Einfluss zu verdeutlichen, den verschiedene, wandspezifische Eigenschaften (Bauteilmassen, Verluste, Resonanzen, Koinzidenzfrequenz, etc.) auf die Schallübertragung haben. Die angestrebte Anwendung soll den Unterschied zwischen dem durchtretenden Schall eines Nachbarraums im Vergleich zum dortigen Schall hörbar machen und erlauben, die Konstruktionseigenschaften von simulierten Trennwänden zu verändern.

Abstract

There are many regulations and standards for the theoretical calculation of the direct and indirect sound transmission of walls and the associated transmission R_w . But it is often very difficult to imagine how loud and in which frequency range sound finally passes through the walls into another room. The aim of this project is to illustrate sound transmission by means of practical auralization in the form of a plug-in. For this purpose, the most important relations from the standard ÖNORM EN ISO 12354 for the calculation of the acoustic properties of buildings are reproduced from component properties by means of IIR filters in order to simulate the sound transmission of direct and flanking paths. The main objective is to illustrate the influence that different, wall-specific properties (component masses, losses, resonances, coincidence frequency, etc.) have on sound transmission. The intended application is to make audible the difference between the sound passing through a neighboring room compared to the sound there and to allow to change the construction properties in the simulated wall.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Theorie zur Berechnung des Schalldämmmaßes R	5
2.1	Die Koinzidenzfrequenz f_c	5
2.2	Die Verlustfaktoren	7
2.2.1	Der innere Verlustfaktor η_{int}	7
2.2.2	Der Gesamtverlustfaktor η_{tot}	7
2.3	Abstrahlgrad erzwungener BiegeWellen σ_f und freier BiegeWellen σ . . .	8
2.3.1	Abstrahlgrad erzwungener BiegeWellen σ_f	8
2.3.2	Abstrahlgrad für freie BiegeWellen σ	9
2.3.3	1. Modenfrequenz f_{11}	9
2.3.4	Abstrahlgrad für resonante Schwingung	9
2.3.5	Biege feste Platten	10
2.4	Zusammenfassung	11
2.4.1	Erzwungene BiegeWellen einer unendlichen Platte mit Dämpfung	11
2.5	Transmissionsgrad τ	12
2.6	Schalldämmmaß R	14
3	Implementierung in Matlab	15
3.1	Einleitung	15
3.2	Theoretischer Verlauf der Schalldämmung	15
3.2.1	Vollziegel	15
3.2.2	Hochlochziegel	17
3.2.3	Beton	18
3.3	Diskussion	20
3.4	Zusammenhänge und Beobachtungen	22
4	Wall-E	24

<i>J. Schültke: Auralisation der Schalldämmung</i>	4
4.1 Einleitung	24
4.2 Programmierung	24
4.3 Klangbeispiele für Hörstudie	26
5 Hörstudie	29
5.1 Einleitung	29
5.2 Durchführung	29
5.3 1. Zuordnungsaufgaben	30
5.3.1 Konfiguration	30
5.3.2 Auswertung	30
5.4 2. Zuordnungsaufgaben	31
5.4.1 Konfiguration	31
5.4.2 Auswertung	32
5.5 3. Zuordnungsaufgaben	33
5.5.1 Konfiguration	33
5.5.2 Auswertung	33
5.5.3 Diskussion	34
6 Schlussfolgerung und Ausblick	35
7 Anhang A	36
7.1 Vereinfachungen der Kirch’hoff’schen Plattentheorie	36
7.2 Schematische Herleitung der Plattengleichung	36
7.2.1 Formeln	37
8 Anhang B	39
8.1 Herleitung der 1. Modenfrequenz f_{11}	39
9 Literaturverzeichnis	48

1 Einleitung

Geht es um die Konstruktionsplanung von Wänden, so ist die Schalldämmung ein wichtiges Thema. Doch wie funktioniert die Schalldämmung durch Wände? Wie wird sie berechnet? Wie klingt sie? "Die Schalldämmung zwischen Räumen kann nach ISO 16283-1 durch mehrere miteinander in Beziehung stehenden Größen dargestellt werden. Diese Größen werden in Frequenzbändern (Terz- oder Oktavbändern) ermittelt [...]". In dieser Arbeit werden allgemein, und später durch konkrete Wandabmessungen und Bauteildichten, die notwendigen Parameter berechnet, um das frequenzabhängige Schalldämmmaß R zu berechnen, das Auskunft darüber gibt, wie viel vom ursprünglichen Signal durch die Wand gedämpft wird. Das resultierende Schalldämmmaß wird in Matlab berechnet und für verschiedene Parameter grafisch dargestellt. Das ermöglicht Schalldämmmaße verschiedener Materialien, vergleichend zu diskutieren und anschließend zu auralisieren, was unter Zuhilfenahme von "JUICE" bewerkstelligt wird, einer open-source cross-platform für Desktop- und Mobil-Apps. Abschließend wurde ein Hörversuch in Pure Data implementiert, um zu evaluieren, ob Versuchspersonen die Resultate erkennen und den physikalischen Bauteilparametern korrekt zuordnen können.

2 Theorie zur Berechnung des Schalldämmmaßes R

Für das bewertete und unbewertete Schalldämmmaß wurden einerseits theoretische Literatur, wie die ÖNORM EN ISO 12354-1 [7] und ergänzenderweise das Buch "Sound Insulation in Buildings" von Jens-Holger Rindel [5], als auch praktisch bezogene Arbeiten, wie die der RWTH Aachen [6] und des Fraunhofer Instituts Stuttgart [2] herangezogen. Aus den theoretischen Zusammenhängen wird hier eine praktische Anwendung in Form eines Audio-Plugins realisiert, das einerseits das Verständnis über Schalldämmung fördern soll und andererseits seine praktische Umsetzung für Produktionsaufgaben, Filmtone oder sonstige akustisch-szenische Darstellungen erlaubt. Dieses Plug-In ist ein prototypisches Werkzeug und dient vorerst nur als Basis für eine kleine Studie.

2.1 Die Koinzidenzfrequenz f_c

Die Koinzidenzfrequenz f_c ist jene Frequenz in der Wand, ab der es theoretisch möglich ist, dass sich BiegeWellen gut angepasst an die Luft ausbreiten können und so der Schalldämmung entgegen wirken. Dazu muss die Longitudinalwellenlänge λ_L der freien Schallwelle in der Luft kleiner gleich der BiegeWellenlänge λ_B im Wandmaterial sein [1]. Mittels eines elastischen Balkens zeigt Anhang A die Herleitung der BiegeWellengleichung und erweitert sie zur Kirchhoff'schen Plattentheorie für Platten der Dicke, wodurch sich mit der Auslenkung ζ in z -Richtung ergibt

$$\Delta\Delta\zeta + \frac{\rho h}{EI} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = 0. \quad (1)$$

Hierbei ist $\Delta\Delta = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$ der zweifach angewandte Laplace-Operator, der aus der Verformung ζ eine Größe errechnet, die über das Biegemoment und der Plattendicke proportional zur lokalen Querkraft auf das Flächenelement ist. $\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}$ beschreibt hier die Querbeschleunigung. Da im zweidimensionalen Kontinuum Querkontraktion nicht wie beim Stab möglich ist, erhöht sich die Steifigkeit, beschrieben durch die Vergrößerung des Elastizitätsmoduls $\bar{E} = \frac{E}{1-\mu^2}$ im Gegensatz zu E , dem am Stab gemessenen Elastizitätsmoduls. Für einen rechteckigen Querschnitt ist das Flächenträgheitsmoment $I = \frac{h^3}{12}$ und da sich das Elastizitätsmodul $E = \rho c_L^2$ über die longitudinale Schallgeschwindigkeit c_L und Dichte des Plattenmaterials beschreiben lässt [4], ergibt sich $\frac{\rho h}{EI} = \frac{\rho h(1-\mu^2)12}{\rho c_L^2 h^3} = \frac{(1-0.35^2)12}{c_L^2 h^2} = \frac{10.5}{c_L^2 h^2}$. Die Poisson'sche Querkontraktion wurde mit $\mu = 0.35$ angenommen, da dies ein typischer Wert für Bauteilmaterialien ist [3]. Damit folgt also aus Gl. (1), dass

$$\Delta\Delta\zeta + \frac{10.5}{c_L^2 h^2} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

oder im Frequenzbereich, mit $\frac{\partial^2}{\partial t^2} \hat{=} -\omega^2$,

$$\Delta\Delta\zeta - \frac{10.5}{c_L^2 h^2} \cdot \omega^2 \zeta = 0 \quad (3)$$

ist. Da sich für ebene Wellen in x-Richtung auf einer unendlichen Platte $\zeta = e^{ik_B x}$ annehmen lässt und die Differentiale in y-Richtung entfallen, kann mittels Einsetzen von $\zeta = e^{ik_B x}$ in Gleichung (3) und der Vierfachableitung die Wellenzahl der Biegewelle k_B bestimmt werden. Daraus folgt, mit

$$\Delta\Delta\zeta - \frac{10.5}{c_L^2 h^2} \cdot \omega^2 \zeta = \left[\Delta\Delta - \frac{10.5}{c_L^2 h^2} \omega^2 \right] \zeta = \frac{\partial^4}{\partial x^4} e^{ik_B x} - \frac{10.5}{c_L^2 h^2} \cdot \omega^2 e^{ik_B x}, \quad (4)$$

dass die Wellenzahl der Biegewelle

$$k_B = \sqrt{\frac{\sqrt{10.5}}{\sqrt{c_L^2 h^2}} \omega} \quad (5)$$

ist und da $k_B \lambda_B = 2\pi$ ist, kann die Biegewellenlänge λ_B zu

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{2\pi c_L h}{\sqrt{10.5} f}} \quad (6)$$

berechnet werden. Da die Longitudinalwellenlänge der Luft $\lambda_L = \frac{c}{f}$ ist und wir, wie oben erwähnt, $\lambda_L^2 \leq \lambda_B^2$, also $\frac{c^2}{f^2} \leq \frac{2\pi c_L h}{\sqrt{10.5} f}$ fordern, berechnet sich die Koinzidenzfrequenz f_c , nach Umstellen, zu

$$f_c \geq \frac{\sqrt{10.5} c^2}{2\pi c_L h} \approx \frac{c^2}{1.9 c_L h}. \quad (7)$$

Hierbei sind c die Schallgeschwindigkeit in Luft ($= 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), c_L die Geschwindigkeit longitudinaler Wellen, also die Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Körperschallwellen, die vom Material abhängt und h die Dicke des Bauteils. In der Literatur findet sich der Faktor 1.9 bzw. 1.8. Die korrekte Wahl hängt davon ab, ob das Elastizitätsmodul E am Stab ($=1.8$) oder an der Platte ($=1.9$) gemessen wurde [4].

2.2 Die Verlustfaktoren

BiegeWellen, die Schall entlang von Bauteilen transportieren, unterliegen auch materialeigenen Verlustfaktoren, die zu Energieverlusten führen und so die Ausbreitung von BiegeWellen dämpfen. Zur Berechnung des Schalldämmmaßes R laut Ö-NORM [7] sind sowohl innere Verluste η_{int} , als auch Verluste an den Bauteilrändern η_{border} und Strahlungsverluste η_{rad} relevant. Sie werden in der Formel für den Gesamtverlustfaktor η_{tot} durch das Herauslesen aus Tabellen (Abb. 1) berücksichtigt.

Werkstoff	Dichte ρ (kg/m ³)	Quasi-Longitudinalwellen- phasengeschwindigkeit c_L (m/s)	Innerer Verlustfaktor η_{int} (-)
Beton	2 200	3 800	0,005
Kalksandstein	1 800	2 500	0,01
Dampfgehärteter Porenbeton	400 bis 800	1 900	0,012 5
Leichte Gesteinskörnungen	1 400	2 200	0,01
Dichte Gesteinskörnungen	2 000	3 200	0,01
Ziegelstein	1 500 bis 2 000	2 700	0,01
Gipskarton (Naturgips)	860	1 490	0,014 1
Gipskarton (Rauchgas und Naturgips)	680	1 810	0,012 5
Schrenznpappe	760	2 200	0,01

Abbildung 1 – Werte für η_{int} für verschiedene Materialien aus der ÖNORM EN ISO 12354-1:2017

2.2.1 Der innere Verlustfaktor η_{int}

Zunächst wird die Umwandlung der Energie behandelt, die auch als Dämpfung oder Dissipation bezeichnet wird. Treten in einem Festkörper Schwingungen auf, so sind diese naturgemäß durch Energieverluste gedämpft. Um diese Materialdämpfung mathematisch zu berechnen, beschränkt man sich auf harmonische Vorgänge, aus denen letztendlich wieder beliebige Zeitverläufe zusammengesetzt werden können. Die exakte mathematische Herleitung wird hier nicht weiter angeführt, aber typische Werte für η_{int} liegen hier für Beton, Holz und Gips bei $\eta_{int} = 5 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-2}$, während typische Werte für Kunststoffe und andere Polymere zwischen $\eta_{int} = 1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-3}$ liegen [6], siehe auch Abb. 1.

2.2.2 Der Gesamtverlustfaktor η_{tot}

Der Gesamtverlustfaktor η_{tot} beinhaltet Verluste hin zu anderen Bauteilen an den Baurändern, sowie Abstrahlungsverluste. Dieser Wert ist eine Annäherung an den tatsächlichen Wert, der unter Laborbedingungen zu

$$\eta_{tot,situ} \approx \eta_{int} + \frac{c}{\sqrt{f}} \approx 0.01 + \frac{c}{\sqrt{f}} \quad (8)$$

berechnet wurde.

Dabei ist c die Konstante, die von dem jeweiligen Gebäude und der flächenbezogenen Masse $m' = \rho \cdot h$, wobei ρ die Dichte des Wandmaterials und h die Dicke der Wand ist, abhängt und nach [10] und [11] wie folgt vorgegeben ist:

$c = 1$ für Mauerwerk- oder Betonbauteile, die mit mindestens zwei Wänden auf jeder der vier Seiten verbunden sind.

$c = 0,5$ für Bauteile mit $m > 150 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ in typischen Gebäuden aus Mauerwerk oder Beton in Deutschland und Frankreich und

$c = 0,05$ für schwere Bauteile in einer Umgebung mit vorwiegend Leichtbauteilen.

2.3 Abstrahlgrad erzwungener Biegewellen σ_f und freier Biegewellen σ

Erzwungene Biegewellen entstehen auf unendlichen Platten, wenn diese durch ein Luftschallfeld (schräger Schalleinfall) entlang eines endlichen Rechteckausschnitts der unendlichen Platte zu Biegeschwingungen angeregt werden. Die Bewegung der Platten folgt in diesem Fall der vom Luftschallfeld ausgeübten Verteilung der Flächenkraft mit der selben Schwingungsform. Der Abstrahlgrad von Biegewellen auf Platten wird unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz mit abnehmender Frequenz schnell kleiner. Der Verlauf des Abstrahlgrades unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz ist somit ausschlaggebend dafür, welche Schalldämmung diese Bauteile aufweisen [2]. Durch die Randbedingungen endlicher Wände ergeben sich zusätzlich zu den erzwungenen Biegewellen resonante Biegewellen, oder auch freie Biegewellen, die durch das Nachschwingen der Wand mit der Bauteilnachhallzeit gekennzeichnet sind. Diese resonanten Biegewellen folgen nicht mehr dem Anregungsmuster des Luftschalls. Bei Luftschallanregung endlicher Platten liegt nun also auf den Platten ein Gemisch aus freien und erzwungenen Biegewellen vor. Der Anteil der freien und der erzwungenen Biegewellen hängt dabei von den Plattenabmessungen und der Größe der Plattendämpfung ab. Oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz werden erzwungene Biegewellen irrelevant und alleine der Abstrahlgrad der resonanten, nachschwingenden Biegewellen reicht aus, um die Schalltransmission zu beschreiben.

2.3.1 Abstrahlgrad erzwungener Biegewellen σ_f

Um nun den Abstrahlgrad erzwungener Biegewellen σ_f zu berechnen, wird ein Zusammenhang aus der Wellenzahl k_0 , den Wandabmessungen l_1 und l_2 , der mittleren Quadratlänge $\sqrt{l_1 l_2}$ und dem Faktor Λ , der das Verhältnis der Kantenlängen l_1 und l_2 berücksichtigt, berechnet [7][12]:

$$\sigma_f = 0,5 \ln(k_0 \sqrt{l_1 l_2} - \Lambda), \quad (9)$$

wobei $\sigma_f \leq 2$.

Die Wellenzahl k_0 der Luft ist

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c_0} \quad (10)$$

und Λ definiert als:

$$\Lambda = -0,964 - \left(0,5 + \frac{l_2}{\pi l_1}\right) \ln \frac{l_2}{l_1} + \frac{5l_2}{2\pi l_1} - \frac{1}{4\pi l_1 l_2 k_0^2}. \quad (11)$$

2.3.2 Abstrahlgrad für freie Biegewellen σ

Reflexion der erzwungenen Biegewellen an Diskontinuitäten, wie z. B. Plattenrändern oder Versteifungen, erzeugen freie Biegewellen, die den erzwungenen Biegewellen überlagert sind [2]. Um die Abstrahlgrade der freien Biegewellen berechnen zu können, muss zuvor die 1. Modenfrequenz f_{11} berechnet werden, da diese einen großen Einfluss auf die Schallübertragung und das Verhalten von Begrenzungsflächen hat [7].

2.3.3 1. Modenfrequenz f_{11}

Die erste Modenfrequenz einer allseitig momentfrei aufgelagerten Wand/Platte (s. Anhang B) ergibt sich nach dem Einsetzen des Ansatzes $\zeta = \sin(k_x x) \sin(k_y y)$, in die Biegewellengleichung für die ersten Modenindizes $l = m = 1$ zu:

$$f_{11} = \frac{c_0^2}{4f_c} \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} \right). \quad (12)$$

Diese Frequenz ist für den Abstrahlgrad freier Biegewellen relevant und dient dabei zur Abschätzung der Grenzfrequenz, ab der die Modendichte und Überlappungen steigt. Weiter ist wichtig, wie diese Frequenz in Bezug auf die Koinzidenzfrequenz liegt, ab der Biegewellen gut an den Luftschall im Raum angekoppelt sind.

2.3.4 Abstrahlgrad für resonante Schwingung

Für biegeeweiche Platten liegt die erste Plattenmode tiefer als die halbe Koinzidenzfrequenz ($f_{11} \leq \frac{f_c}{2}$) und für Frequenzen unterhalb der Koinzidenzfrequenz $f < f_c$, hat die Fläche der Wand einen großen Einfluss auf die Schalldämmung. Sie bestimmt, wie gut tiefe Frequenzen abgestrahlt werden können. Die tieffrequente Grenze wird vom Verhältnis zwischen dem Umfang $2(l_1 + l_2)$ und der Fläche ($l_1 l_2$) bestimmt. Um nun den Abstrahlgrad der freien Biegewellen σ mit den Wandabmessungen l_1 und l_2 zu berechnen, wird Gl. (13), die aus der ÖNORM [7], S. 35 zitiert und durch Maidanik [13] hergeleitet wurde, herangezogen:

$$\sigma = \frac{2(l_1 + l_2)c_0}{l_1 l_2 f_c} \delta_1 + \delta_2. \quad (13)$$

Mit $\delta_1 = \frac{(1-\lambda^2) \ln(\frac{1+\lambda}{1-\lambda}) + 2\lambda}{4\pi^2(1-\lambda)^{1,5}}$ und $\lambda = \sqrt{\frac{f}{f_c}}$, sowie $\delta_2 = \frac{8c_0^2(1-2\lambda^2)}{f_c^2 \pi^4 l_1 l_2 \lambda \sqrt{1-\lambda^2}}$, sofern $f \leq \frac{f_c}{2}$ ist. Andernfalls ist $\delta_2 = 0$.

Für tiefere Frequenzen ($f < f_{11} < \frac{f_c}{2}$) und $\sigma > \sigma_2$ gilt weiter ([7], S. 35) dass sich der Abstrahlgrad vereinfacht zu

$$\sigma = \sigma_2 = 4l_1l_2\left(\frac{f}{c_0}\right)^2. \quad (14)$$

Oberhalb der Koinzidenzfrequenz ($f \geq f_c$) dagegen, der Abstrahlgrad der freien Biege- wellen angegeben mit ([7], S. 34, 35):

$$\sigma = \sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}}. \quad (15)$$

Die Koinzidenzfrequenz spielt bei dünnen Platten eine große Rolle hinsichtlich der Schall- dämmung, da an dieser Stelle normalerweise ein Einbruch stattfindet, der sich als Pol- stelle in σ_1 widerspiegelt. Unterhalb der Koinzidenzfrequenz ist die Schwingung, ver- ursacht durch Resonanzschwingung gering, aber die der erzwungenen Biege wellen do- minant. Oberhalb der Koinzidenzfrequenz dagegen dominiert die Resonanzschwingung. Ein hoher Abstrahlgrad für resonante Biege wellen ist insbesondere ab der Koinzidenz- frequenz für eine geringe Schalldämmung verantwortlich, da die Luftschallenergie leicht in resonante Biege wellenenergie umgewandelt werden kann, was letztlich zu mehr auf- genommenem Schall im Senderraum, und mehr abgestrahltem Schall im Empfangsraum führt.

2.3.5 Biege feste Platten

Für biege feste Platten liegt die erste Plattenmode oberhalb der halben Koinzidenzfrequenz ($f_{11} > f_c/2$) und für Frequenzen unterhalb der Koinzidenzfrequenz $f < f_c$ gilt nach [7], für $\sigma_2 < \sigma_3$, dass $\sigma = \sigma_2 = 4l_1l_2\left(\frac{f}{c_0}\right)^2$, ähnlich dem Abstrahlgrad biege weicher Platten bei tiefen Frequenzen, ist. Gilt, dass $\sigma_1 < \sigma_3$, dann ist $\sigma = \sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}}$, was dem Ab-

strahlverhalten der biege weichen Platte oberhalb der Koinzidenzfrequenz entspricht. An- dernfalls gilt allgemein, dass $\sigma = \sigma_3 = \sqrt{\frac{2\pi f(l_1+l_2)}{16c_0}}$ und, $\sigma \leq 2$ ist [13].

Diese Gleichungen gelten für eine in eine unendlich ausgedehnte Schallwand eingebaute Platte in derselben Ebene. In Gebäuden sind Wände und Decken jedoch üblicherweise von orthogonalen Bauteilen umgeben, die die Abstrahlwirksamkeit bis unter die Koinzidenz- Grenzfrequenz mit einem Faktor von 2 (Randmoden) bis 4 (Eckmoden) erhöhen. Für die Abstrahlwirksamkeit stehen alternative Gleichungen aus neuerer Literatur (siehe Lite- raturhinweise [14], [15] und [16]) zur Verfügung [7].

2.4 Zusammenfassung

2.4.1 Erzwungene Biegewellen einer unendlichen Platte mit Dämpfung

Trifft eine ebene Luftschallwelle unter einem Winkel ϑ (bezogen auf die Flächennormale) auf eine Platte, dann prägt sich die Wellenstruktur der einfallenden Luftschallwelle der Platte auf und erzeugt auf diese Weise eine erzwungene Biegewelle, die mit der gleichen Frequenz schwingt wie die Luftschallwelle. Auf der anderen Plattenseite wird eine Luftschallwelle unter einem Winkel abgestrahlt, der mit dem Einfallswinkel übereinstimmt. Bei erzwungenen Biegewellen ist nicht die freie Biegewellenlänge λ_B die akustisch maßgebliche Größe, sondern die Spurwellenlänge λ_{Sp} der einfallenden Luftschallwelle. Unter der Spurwellenlänge versteht man die Wellenlängenkomponente der Luftschallwelle parallel zur Plattenebene ([2] S. 20ff).

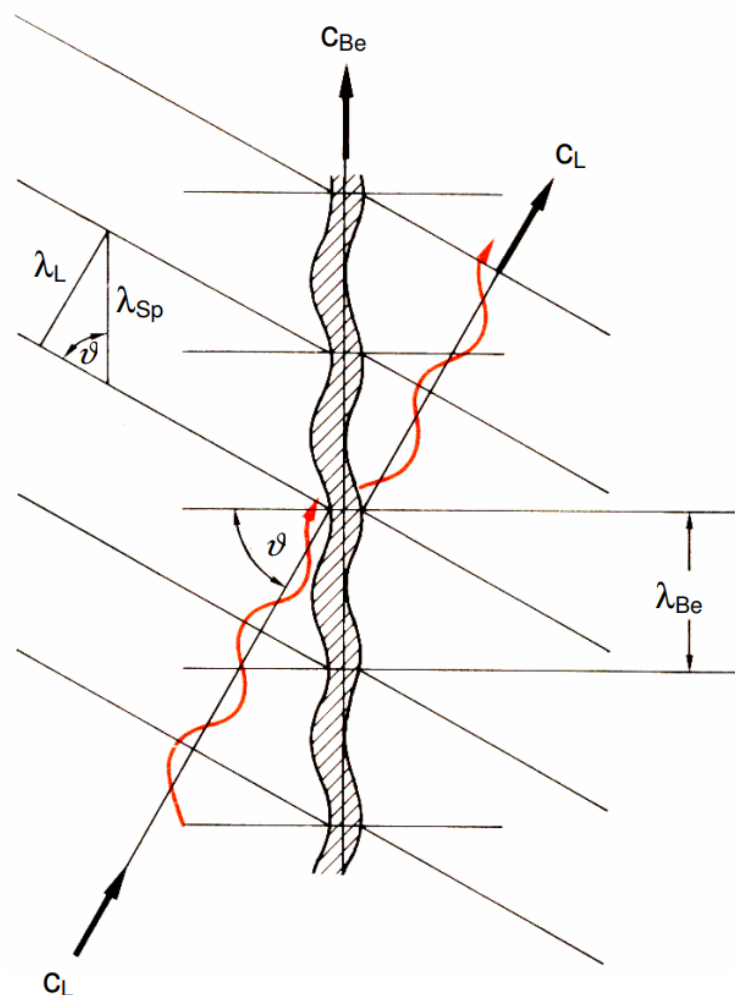


Abbildung 2 – Erzwungene Biegewellendurch einfallende Luftschallwelle und abgestrahlte Luftschallwelle [2]

Die Spurwellenlänge λ_{Sp} ist identisch mit der Wellenlänge λ_{Be} der erzwungenen Biege-
welle. Wegen $\sin(\vartheta) \approx 1$ gilt daher stets $\lambda_{Be} \geq \lambda_L$, sodass bei erzwungenen Biege-
wellen ähnliche Verhältnisse herrschen, wie dies bei freien Biege-
wellen oberhalb der Koinzidenz-
grenzfrequenz f_c der Fall ist.

Die Beziehungen und Berechnungen des Abstrahlgrades beziehen sich hierbei auf Gi-
deon Maidanik [13], der mit Hilfe von Kreuzkorrelationsfunktionen den Strahlungswi-
derstand von gelenkig gelagerten Rechteckplatten, welche in Einzelschwingungsformen
schwingen, untersucht hat. Den Übergang der Einzelschwingungsformen zur multimoda-
len Schwingungsform auf den Platten, deren Schwingungszustand durch ein Körperschall-
Hallfeld beschrieben werden kann, vollzieht er weiter unter der Annahme der Energie-
Gleichverteilung in den Eigenformen und einer genügend großen Eigenfrequenzdichte,
indem er die für die Eigenformen gefundenen Strahlungswiderstände über Kreisbogenab-
schnitte im Wellenzahlraum integriert. So tragen alle Plattenmoden zur Schallabstrahlung
bei.

2.5 Transmissionsgrad τ

Der Transmissionsgrad τ beschreibt das Ausmaß der Weiterleitung von Schallintensität
durch ein Bauteil hindurch. Damit beschreibt er das auf Fläche bezogene Verhältnis der
abgestrahlten Gesamtschalleistung im Empfangsraum zur auf den gemeinsamen Teil des
trennenden Bauteils treffenden Schalleistung [7]. Typischerweise sinkt die Transmission
der resonanten Übertragung zu hohen Frequenzen hin, allerdings nur bis zu einer unteren
Schwelle, ab der sich neben Biege-
wellen auch Scher- und Dickenwellen auf der Platte
ausbreiten können, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit dann nicht mehr frequenzabhän-
gig ist. Als sichere Abschätzung kann ein unterer Plateauwert angenommen werden:

$$\tau_{\text{Plateau}} = \left(\frac{4\rho_0 c_0}{1,1\rho c_L} \right)^2 \frac{0,02}{\eta_{\text{tot}}} \quad (16)$$

Bei den hohen Frequenzen, für die dies zutrifft, kann der Verlustfaktor als innerer Ver-
lustfaktor angenommen werden, auch weil Scherwellen kaum Schwingungsenergie an
umliegenden Bauteilen weitergeben können. Da die Frequenzbereiche hinsichtlich ihrer
Moden und dem Einfluss ihrer Abstrahlgrade stark variieren, wird das Frequenzspektrum
in drei Teile aufgeteilt.

Nach Jossler und Lamure [17] ergibt sich für die tieffrequente Transmission $f < f_c$:

$$\tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left(2\sigma_f \left(\frac{f_c^2 - f^2}{f_c^2} \right)^{-2} + \frac{2\pi f_c \sigma^2}{4f \eta_{\text{tot}}} \right), \quad (17)$$

mit dem Beitrag der erzwungenen Transmission, die nicht von der inneren Verformungs-
dämpfung, sondern nur der Bauteilmasse und den endlichen Abmessungen abhängt. Für
den Beitrag der resonanten Transmission sind hingegen auch Verformungsverluste im
Bauteil und an seinen Rändern relevant, weil sie die Bauteilnachhallzeit verkürzen. Für
 $f \geq f_c$ [7] liefert die erzwungene Übertragung keine Beiträge mehr und es dominiert

die resonante Übertragung:

$$\tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{2f \eta_{tot}} \quad (18)$$

Die Berechnungen werden für Frequenzen in Terzbandbreite durchgeführt und die Ergebnisse über die Bandbreite von einer Oktave gemittelt, um einen glatten Übergang zwischen den Frequenzabschnitten sicherzustellen. Der Frequenzabschnitt um die Koinzidenz-Grenzfrequenz wird als $\frac{f_c}{1.12} < f < 1.4f_c$ angenommen, unter Verwendung von $f = f_c$ in diesem gesamten Bereich mit $\sigma^2 = \frac{1}{0.71}$ und $c_0 = 340 \frac{m}{s}$ [7]. Als Beispiel zeigt Abbildung 3 den Verlauf von τ bei einer 5 Meter breiten, 2,5 Meter hohen und 0.3 Meter dicken Wand, wobei die Wand aus Vollziegeln besteht. τ ist hier in Dezibel dargestellt, da diese Darstellungsform audioteknisch typisch ist und auch im Hörversuch gewählt wurde. Als Leistungsgröße wird der Transmissionsgrad mit $10\lg(\tau)$ in dB dargestellt.

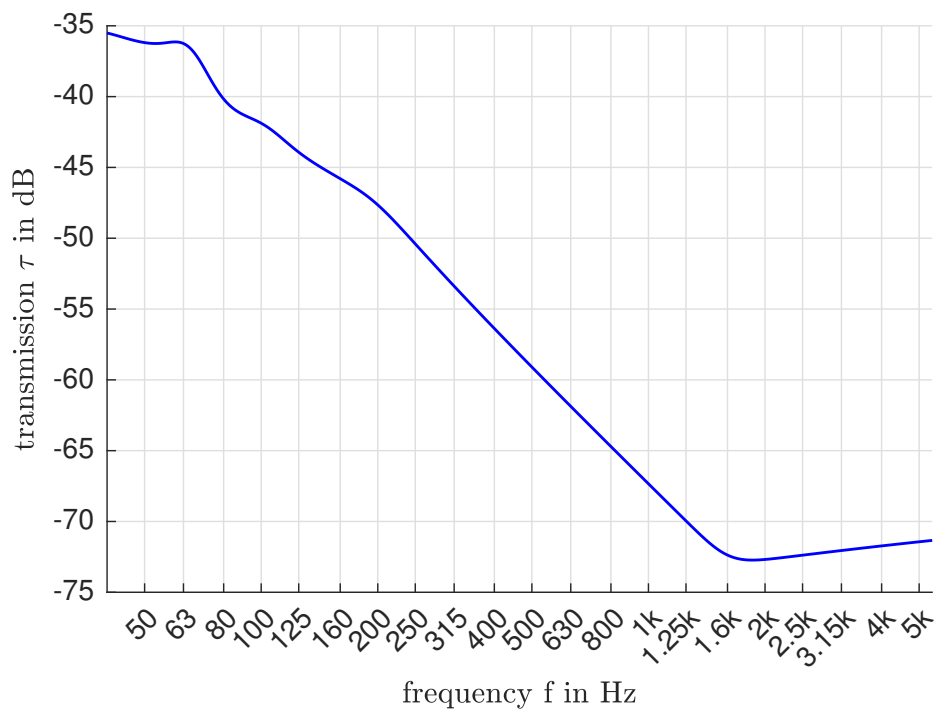


Abbildung 3 – Transmissionsgrad τ der 5 x 2.5 x 0.3 Meter Vollziegelwand

2.6 Schalldämmmaß R

Das Schalldämmmaß R (Abbildung 4) ist zur Transmission reziprok, daher der negative Wert der logarithmierten Transmission τ :

$$R = -10\lg\tau \quad (19)$$

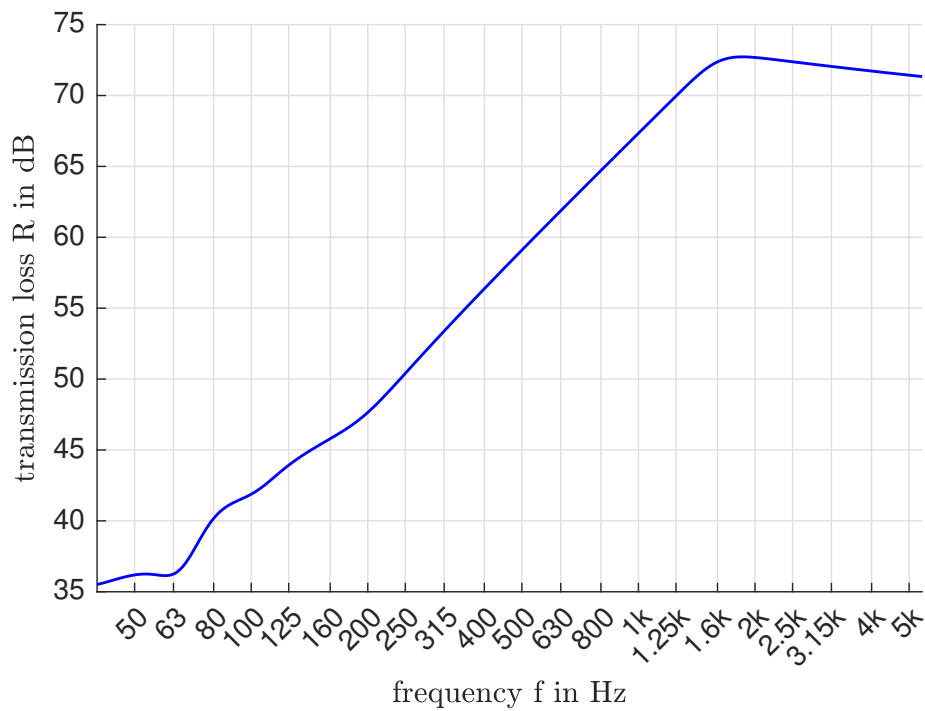


Abbildung 4 – Schalldämmmaß R der 5 x 2.5 x 0.3 Meter Vollziegelwand

3 Implementierung in Matlab

3.1 Einleitung

Zur Veranschaulichung der Formeln aus dem theoretischen Teil wurde ein Matlab-Skript erstellt. Mittels dieses Skripts kann das frequenzabhängige Schalldämmmaß R und der Transmissionsgrad τ dargestellt werden.

Zuvor wurden die Parameter "Wandabmessung" mit $7 \times 3 \times 0,12$ Meter (Breite \times Höhe \times Dicke) und das jeweilige Material (Vollziegel, Hochlochziegel oder Beton) vorgegeben. Zur Berechnung des Schalldämmmaßes R müssen die oben erwähnten Rechenoperationen und Gleichungen, den Vorgaben entsprechend, befolgt werden. Da es bei der Berechnung sehr schnell frequenzabhängig wird, sind im Folgenden lediglich die Werte berechnet, die bei Fallunterscheidungen von Bedeutung sind!

3.2 Theoretischer Verlauf der Schalldämmung

3.2.1 Vollziegel

Unter Zuhilfenahme der ÖNORM 12354-1, die besagt, dass Vollziegel eine Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Körperschallwellen von $c_L = 2700 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aufweisen, kann unter Verwendung der vorgegebenen Dicke der Wand, die Koinzidenzfrequenz zu $f_c = \frac{c_0^2}{1,8c_L h} \approx 198 \text{ Hz}$ berechnet werden.

Weiter gibt die Norm nicht nur $\eta_{int} = 0,01$, sondern auch eine Dichte von $\rho = 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ vor, mit welcher die flächenbezogene Masse $m' = \rho \cdot h = 2000 \cdot 0,12 = 240 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ berechnet und die Konstante c auf $c = 0,5$ fixiert werden kann.

Für das weitere Verfahren muss die Plattenmode f_{11} noch bestimmt werden, da diese ausschlaggebend dafür ist, auf welche Art der Abstrahlgrad freier BiegeWellen berechnet wird.

$$f_{11} = \frac{c_0^2}{4f_c} \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} \right) \approx 19 \text{ Hz}$$

Da $f_{11} = 19 \text{ Hz}$ kleiner ist als die Hälfte der Koinzidenzfrequenz ($\frac{f_c}{2} = \frac{198}{2} \approx 100 \text{ Hz}$), wird, wie unter 2.3.4 beschrieben, weiter gerechnet.

Der Transmissionsgrad bringt erneut drei verschiedene Berechnungen mit sich, da der Frequenzbereich in drei Teile aufgeteilt wird. Um den Bereich um die Koinzidenzfrequenz abschätzen zu können, wird erneut der Bereich als $\frac{f_c}{1,12} < f < 1,4f_c$ definiert. In diesem Bereich wird $\sigma^2 = \frac{1}{0,71}$ angenommen [7]. Für τ , mit Gleichungen (17) und (18) und R , mit Gleichung (19), ergeben sich die frequenzabhängigen Werte, die in Abbildung 5 und 6 dargestellt sind:

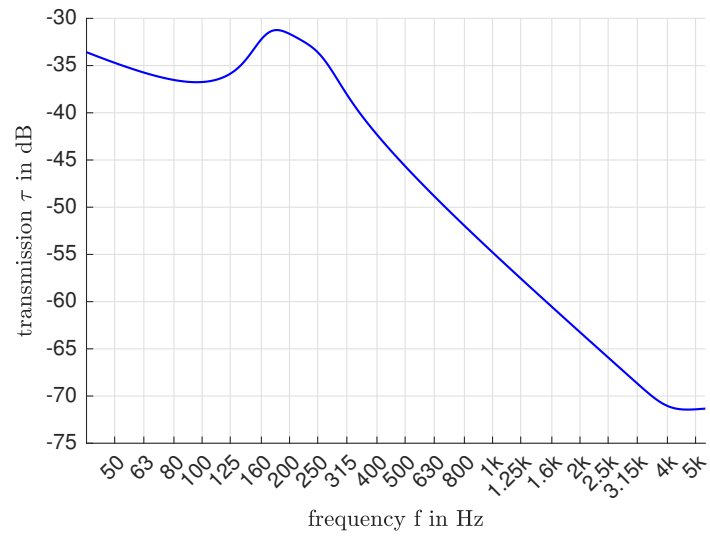


Abbildung 5 – Transmissionsgrad τ der 7 x 3 x 0.12 Meter Vollziegelwand

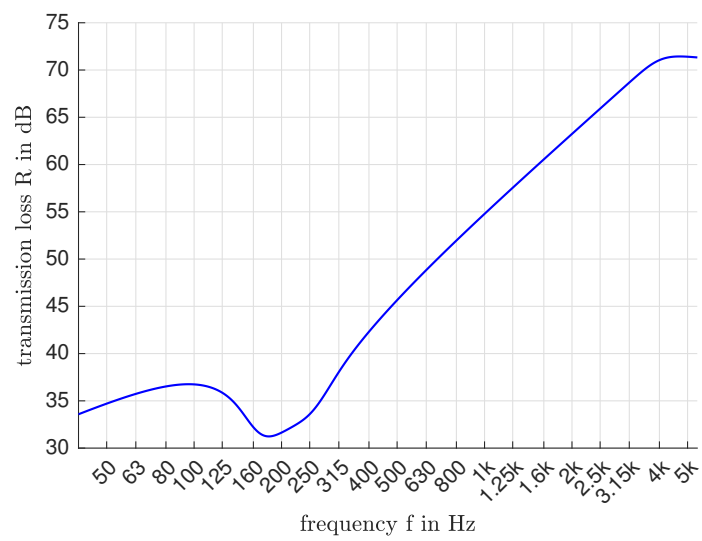


Abbildung 6 – Schalldämmmaß R der 7 x 3 x 0.12 Meter Vollziegelwand

3.2.2 Hochlochziegel

Ein erneuter Blick in die ÖNORM 12354-1 Tabelle B.3 zeigt, dass Hochlochziegel eine Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Körperschallwellen von $c_L = 2700 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aufweisen. Damit kann unter Verwendung der vorgegebenen Dicke der Wand die Koinzidenzfrequenz zu $f_c = \frac{c_0^2}{1,8c_L h} \approx 198 \text{ Hz}$ berechnet werden.

Weiter gibt die Norm nicht nur $\eta_{int} = 0,01$, sondern auch eine Dichte von $\rho = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ vor, mit welcher sich die flächenbezogene Masse $m' = \rho \cdot h = 800 \cdot 0,12 = 96 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ berechnet und die Konstante c auf $c = 0,05$ fixiert werden kann.

Für das weitere Verfahren muss die Plattenmode f_{11} noch bestimmt werden, da diese ausschlaggebend dafür ist, auf welche Art der Abstrahlgrad freier BiegeWellen berechnet wird.

$$f_{11} = \frac{c_0^2}{4f_c} \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} \right) \approx 19 \text{ Hz}$$

Da $f_{11} = 19 \text{ Hz}$ kleiner ist als die Hälfte der Koinzidenzfrequenz ($\frac{f_c}{2} = \frac{198}{2} \approx 100 \text{ Hz}$), wird, wie unter 2.3.4 beschrieben, weiter gerechnet.

Der Transmissionsgrad bringt erneut 3 verschiedene Berechnungen mit sich, da der Frequenzbereich in 3 Teile aufgeteilt wird. Um den Bereich um die Koinzidenzfrequenz abschätzen zu können, wird erneut der Bereich als $\frac{f_c}{1,12} < f < 1,4f_c$ definiert. In diesem Bereich wird $\sigma^2 = \frac{1}{0,71}$ angenommen [7]. Für τ , mit Gleichungen (17) und (18) und R , mit Gleichung (19), ergeben sich die frequenzabhängigen Werte, die in Abbildung 7 und 8 dargestellt sind:

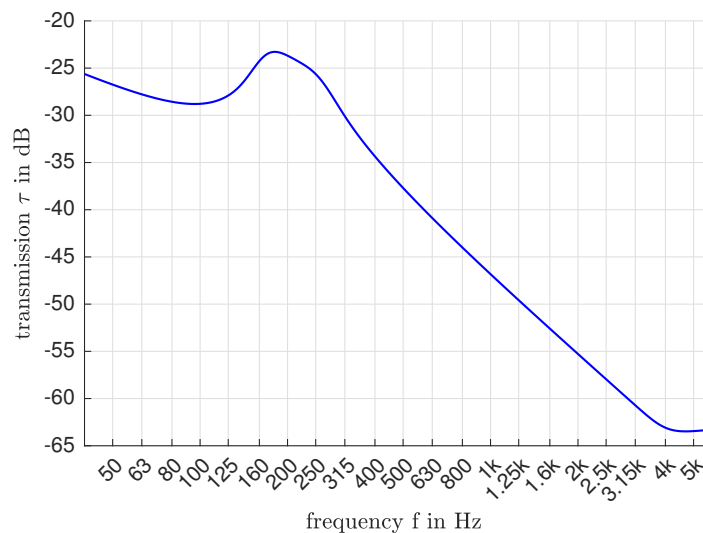


Abbildung 7 – Transmissionsgrad τ der 7 x 3 x 0.12 Meter Hochlochziegelwand

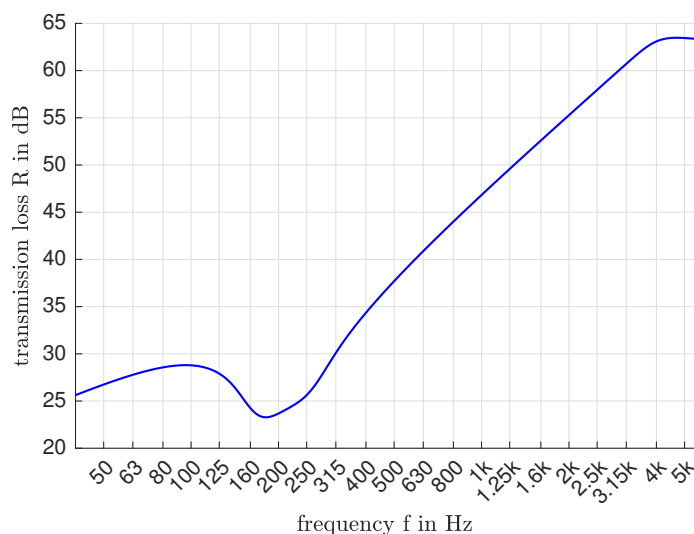


Abbildung 8 – Schalldämmmaß R der 7 x 3 x 0.12 MeterHochlochziegelwand

3.2.3 Beton

Ein erneuter Blick in die ÖNORM 12354-1 Tabelle B.3 zeigt, dass Beton eine Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Körperschallwellen von $c_L = 3800 \frac{m}{s}$ aufweist. Damit kann unter Verwendung der vorgegebenen Dicke der Wand, die Koinzidenzfrequenz zu $f_c = \frac{c_0^2}{1,8c_L h} \approx 141 \text{ Hz}$ berechnet werden.

Weiter gibt die Norm nicht nur $\eta_{int} = 0,005$, sondern auch eine Dichte von $\rho = 2200 \frac{kg}{m^3}$ vor, mit welcher die flächenbezogene Masse $m' = \rho \cdot h = 2200 \cdot 0,12 = 264 \frac{kg}{m^2}$ berechnet und die Konstante c auf $c = 0,5$ fixiert werden kann.

Für das weitere Verfahren muss die Plattenmode f_{11} noch bestimmt werden, da diese ausschlaggebend dafür ist, auf welche Art der Abstrahlgrad freier BiegeWellen berechnet wird.

$$f_{11} = \frac{c_0^2}{4f_c} \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} \right) \approx 27 \text{ Hz}$$

Da $f_{11} = 27 \text{ Hz}$ kleiner ist als die Hälfte der Koinzidenzfrequenz ($\frac{f_c}{2} = \frac{141}{2} \approx 71 \text{ Hz}$) ist, wird, wie unter 2.3.4 beschrieben, weiter gerechnet.

Der Transmissionsgrad bringt erneut 3 verschiedene Berechnungen mit sich, da der Frequenzbereich in 3 Teile aufgeteilt wird. Um den Bereich um die Koinzidenzfrequenz abschätzen zu können, wird erneut der Bereich als $\frac{f_c}{1,12} < f < 1,4f_c$ definiert. In diesem Bereich wird $\sigma^2 = \frac{1}{0,71}$ angenommen [7]. Für τ , mit Gleichungen (17) und (18) und R, mit Gleichung (19), ergeben sich die frequenzabhängigen Werte, die in Abbildung 9 und 10 dargestellt sind:

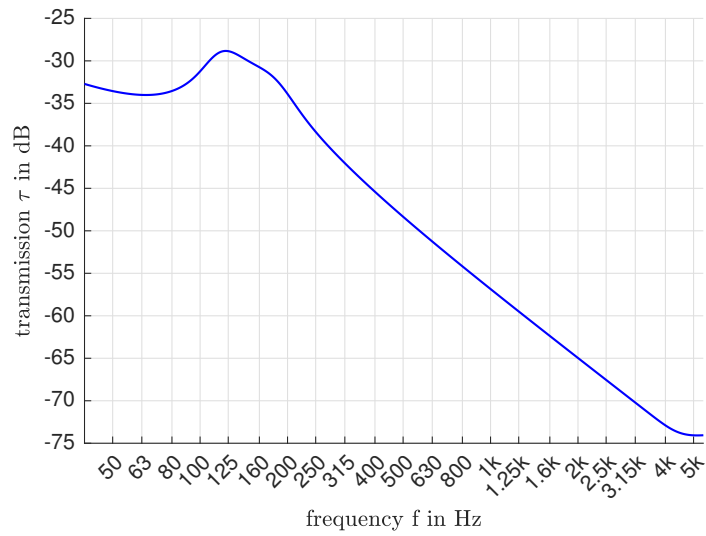


Abbildung 9 – Transmissionsgrad τ der 7 x 3 x 0.12 Meter Betonwand

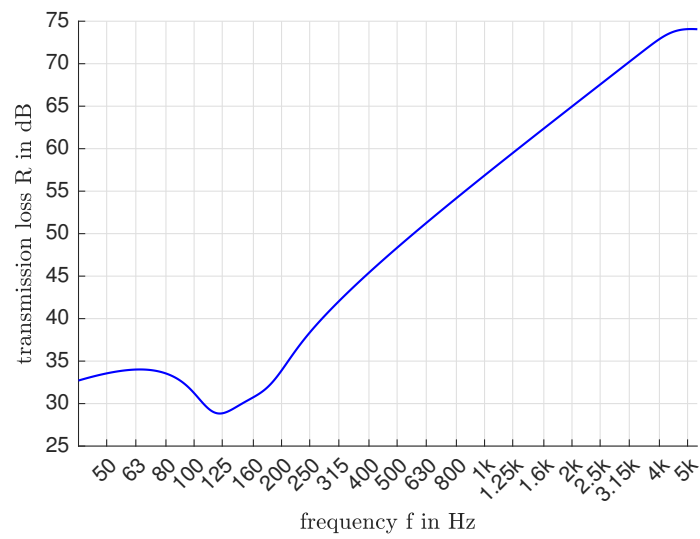


Abbildung 10 – Schalldämmmaß R der 7 x 3 x 0.12 Meter Betonwand

3.3 Diskussion

Aus den oben berechneten Beispielen und dem Transmissionsgrad τ über die Frequenzen aufgetragen, ist zu erkennen, dass bei gleicher Wandstärke die Wand aus Beton die beste Schalldämmung aufweist, zumindest oberhalb von 160 Hz (Abb. 11).

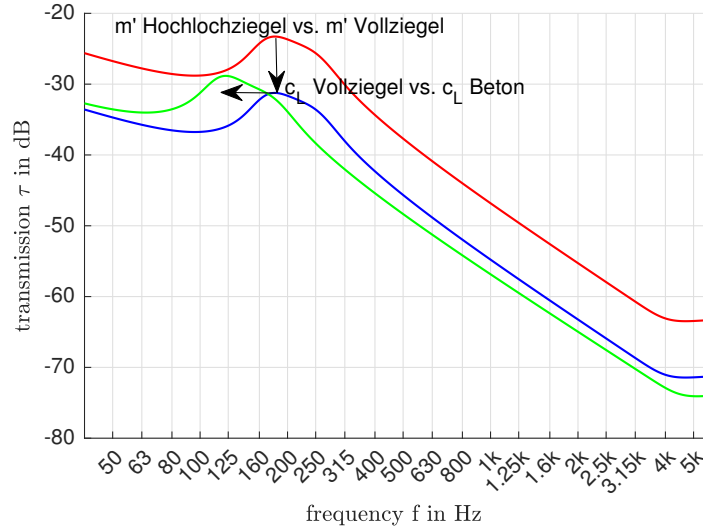


Abbildung 11 – Transmissionsgrad τ der 7 x 3 x 0.12 Meter - rot Hochlochziegel vs. blau Vollziegel vs. grün Beton

Ab 160 Hz bietet die Wand aus Vollziegeln eine bessere Dämmung als die Wand aus Beton. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit longitudinaler Körperschallwellen c_L ist für Beton mit $3800 \frac{m}{s}$ am höchsten, was zu einer sehr geringen Koinzidenzfrequenz von 141 Hz gegenüber der Koinzidenzfrequenz von 198 Hz bei den Ziegelsteinen führt. Da weiter, aufgrund der hohen Dichte des Materials Beton $\rho = 2200 \frac{kg}{m^3}$, die flächenbezogene Masse m' am größten ist und sich der Gesamtverlustfaktor η_{tot} aus der flächenbezogenen Masse m' und der Frequenz ableiten lässt (Unterabschnitt 2.2.2), ist zu erkennen, dass für Beton die Verluste am Größten sind. Auch ist die Frequenz der 1. Mode, verursacht durch die niedrige Koinzidenzfrequenz bei gleichbleibenden Wandabmessungen, bei Beton mit 27 Hz höher als die der Ziegelsteine mit 19 Hz. Um nun Aussagen über das Schalldämmmaß im Modell zu verorten, werden die folgenden Formeln herangezogen. Für $f < f_c$ gilt:

$$\tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left(2\sigma_f \left(\frac{f_c^2 - f^2}{f_c^2} \right)^{-2} + \frac{2\pi f_c \sigma^2}{4f \eta_{tot}} \right), \quad (20)$$

für $f \approx f_c$:

$$\tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi \sigma^2}{2\eta_{tot}} \quad (21)$$

für $f > f_c$:

$$\tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{2f \eta_{tot}} \quad (22)$$

Der Transmissionsgrad τ verschiedener Materialien ist also abhängig von gewissen Konstanten, die unabhängig vom Material gleich sind. Den Unterschied hierbei machen allerdings die Koinzidenzfrequenz f_c , die flächenbezogene Masse m' , der Gesamtverlustfaktor η_{tot} und der Abstrahlgrad der freien BiegeWellen σ . Diese Faktoren geben Auskunft darüber, ob ein Material, in diesem vereinfachten Fall, den Schall besser oder schlechter dämpfen kann. Um nun also eine gute Schalldämmung zu erhalten, muss der Faktor von τ , der Frequenz entsprechend, möglichst gering sein. Der geringe Faktor von τ wird für Beton mit seiner hohen flächenbezogenen Masse, seinen hohen Verlustfaktoren und seiner geringen Modenfrequenz weit unterhalb seiner Koinzidenzfrequenz erreicht, jedoch dämmt die Wand aus Vollziegeln im Bereich unterhalb der Koinzidenzfrequenz besser als die Wand aus Beton, weil die Koinzidenzfrequenz durch das kleinere c_L höher liegt. Dennoch kann allgemein gesagt werden, dass Beton die bestmögliche Schalldämmung bietet, da die Wand aus Vollziegelstein und die Wand aus Beton sich in Frequenzen ab 160 Hz nur wenig von einander unterscheiden.

Wie die Kurven verdeutlichen, dämpfen so dünne Wände, wie sie hier zur Vergleichbarkeit simuliert wurden, aus Hochlochziegelsteinen den Schall am schlechtesten. Die Gründe hierfür liegen darin, dass sowohl die geringe Dichte ρ der Hochlochziegelsteine mit $\rho = 800 \frac{kg}{m^3}$ und der daraus resultierenden geringen flächenbezogenen Masse ($m' = 96 \frac{kg}{m^2}$). Daher ist der Transmissionsgrad τ größer. Im direkten Vergleich von Vollziegeln und Hochlochziegeln ist sehr gut zu erkennen, dass die Dichte des Materials ausschlaggebend dafür sind, wie gut das Material dämpft. So weisen beide Materialien, bis auf die Dichte ρ , die exakt gleichen Werte auf und lediglich die $20 \lg \frac{2000}{800} = 8 \text{ dB}$ Verschiebung aufgrund des Dichteunterschieds wird deutlich (Abb. 12).

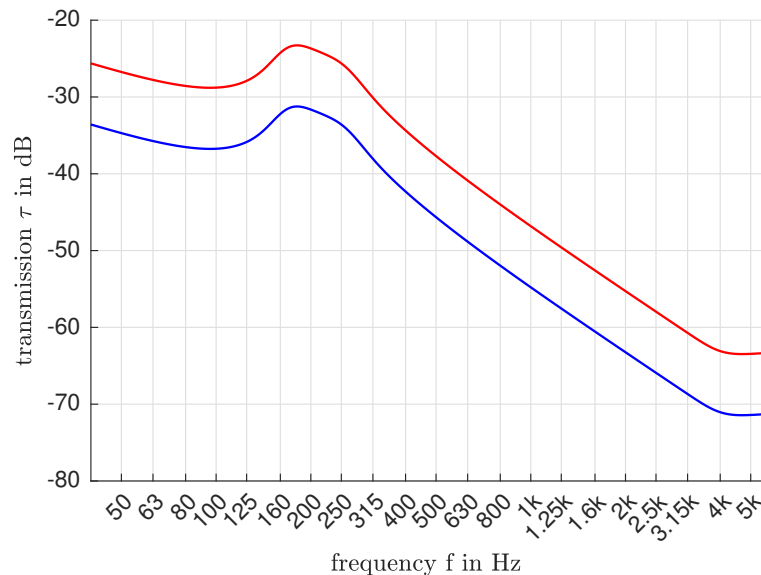


Abbildung 12 – τ der 7 x 3 x 0.12 Meter - blau Vollziegel vs. rot Hochlochziegel

3.4 Zusammenhänge und Beobachtungen

Es wurden im Matlab-Skript diverse Experimente durchgeführt, die für bestimmte Abmessungen und bestimmte Materialien Zusammenhänge ergaben. So wurde die Dicke für eine bestimmte Wand in 10 cm-Schritten gesteigert, wobei die Breite und Höhe konstant blieben. Wie sich bereits am Anfang herausstellte, war es unwichtig, ob die Wand breiter als höher oder umgekehrt war, daher wurde vereinfacht von der Oberfläche im Allgemeinen ausgegangen. Dabei gab es drei Szenarien: Zuerst wurde die Oberfläche der Wand mit 12.5 m^2 , dann mit 35 m^2 und zuletzt mit 150 m^2 angenommen. Diese extremen Werte verdeutlichten sehr gut die übergeordneten Zusammenhänge der Schalldämmung einer Wand in Abhängigkeit ihrer Geometrie.

Hierbei kam es bei der 12.5 m^2 großen Wand dazu, dass bei einer Dicke von 10 cm die Hochlochziegelsteine fast gar nicht dämpften. Die Beton- bzw. Vollziegelwand dagegen dämpften ungefähr gleich gut. Je dicker nun die Wand gewählt wurde, desto mehr dämpften die Hochlochziegel und desto größer wurde der Unterschied zwischen Beton und Vollziegel hinsichtlich ihrer Dämpfung deutlich. Es war zu beobachten, dass bei einer Dicke von 40 cm die Betonwand durchlässiger in Bezug auf hohe Frequenzen wurde als die Vollziegelsteinwand.

Bei der Wand mit der Oberfläche von 35 m^2 war zu beobachten, dass bei einer Dicke von 10 cm die Betonwand im tieffrequenten Bereich ein wenig boostet (3 db unterhalb von f_c). Bei einer Dicke von 20 cm dämpfen Beton und Vollziegel ungefähr gleich gut, weit dahinter die Hochlochziegel. Ab einer Wanddicke von 30 cm fangen die Hochlochziegel langsam an zu dämmen, wobei die Ziegelsteinwand dann schon wieder (bei einer Dicke von 40 cm) durchlässiger wird. So dämpft die Betonwand zwar sehr gut, allerdings gibt es hier einen Einbruch in der Schalldämmung bei der Hochloch- bzw. Vollziegelwand. Bei der Wand mit der größten Oberfläche (150 m^2) und einer Dicke von 10 cm ähneln sich Beton und Vollziegelstein hinsichtlich ihrer Dämmung schon sehr gut an. Die Hochlochziegel dämpfen hierbei kaum. Bei einer Dicke von 30 cm ist sogar zu beobachten, dass die Ziegelsteinwand besser dämpft als die Betonwand. Hier fängt die Betonwand an, durchlässiger zu werden. Bei einer Dicke von 40 cm ist zu erkennen, dass die Schalldämmung generell einbricht und neben Beton, auch die anderen Materialien in ihrer Dämmung zurückgehen.

Diese Beobachtungen bestätigen, dass Beton grundsätzlich das beste Ergebnis hinsichtlich der Schalldämmung liefert, es aber bei allen Materialien bei zunehmender Oberfläche zu einem stärkeren Einbruch der Schalldämmung kommt. Auch wurde noch einmal verdeutlicht, dass die Hochlochziegel, auf Grund ihrer geringen Dichte ein geringeres Schalldämmmaß hervorbringen als Beton und Vollziegel. Daher ist bei einer "dünnen" Wand von Hochlochziegeln abzuraten. Zwei Besonderheiten seien an dieser Stelle aber noch erwähnt: Zum Einen führte der Einbruch bei f_c zu einem Boost von bis zu 5 db (Abb. 13) und zum Anderen geht der Einbruch bei f_c immer mehr verloren, je dicker die Wand wird (Abb. 14).

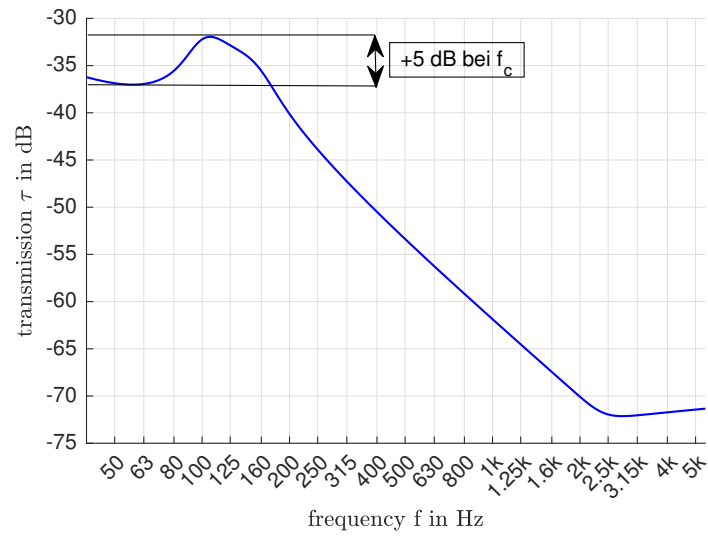


Abbildung 13 – (+5) dB - Boost bei f_c bei einer 4 x 23 x 0.2 Meter Vollziegelwand

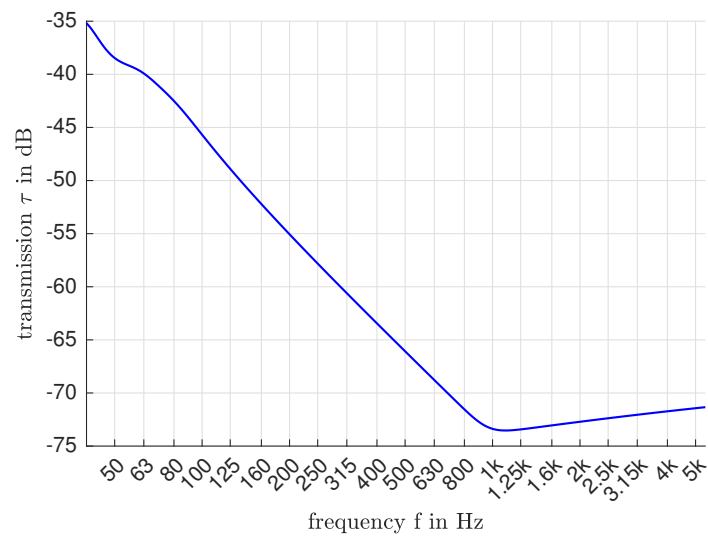


Abbildung 14 – geringe Auswirkung von f_c bei einer 4 x 23 x 0.5 Meter Vollziegelwand

4 Wall-E

4.1 Einleitung

Die oben angeführten Diagramme, Zusammenhänge und Beispiele wurden in JUCE, einem plattformübergreifenden Open-Source-C++-Anwendungsframework, das für die Entwicklung von Desktop- und Mobilanwendungen verwendet wird, zusammengeführt und unter Zuhilfenahme von Visual Studios ein Plug-In, in Form eines VST3s, geschrieben. Der Name dieses Plug-Ins lautet Wall-E. Im Folgenden werden die Oberfläche und der Kern des Plug-Ins vorgestellt und an Beispielen demonstriert.

4.2 Programmierung

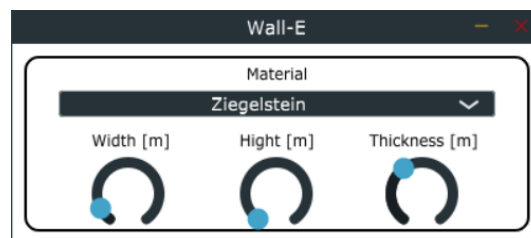


Abbildung 15 – Wall-E

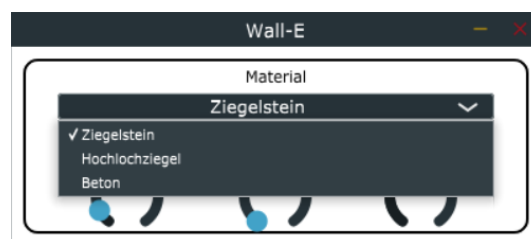


Abbildung 16 – Wall-E - Materialauswahl

In Wall-E können die Abmessungen einer Wand (Länge, Höhe und Dicke), sowie ihr Material eingestellt werden. Um hier eine Grenze zu ziehen, kann aus den Materialien (Voll-) Ziegelstein, Hochlochziegelstein und Beton gewählt werden. Außerdem beschränkt sich der Bereich der Breite der Wand auf 2,5 bis 30 Meter, die Höhe auf 2,5 bis 5 Meter und die Dicke der Wand auf 0,1 bis 0,5 Meter. So konnten der Transmissionsgrad τ (für die angeführten Bereiche) mittels Matlab-Skript simuliert und (durch Auslesen der Werte) die resultierenden Filterparameter in eine Lookup-Tabelle überführt werden (S. 40ff.). Anschließend konnten so die Filter-Kurven in JUCE, unter Verwendung der Daten aus den Tabellen, übertragen und erzeugt werden.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass auf das Programmieren der Oberfläche, das Aussehen des Plug-Ins, nicht weiter eingegangen wird, da dies für die Funktionalität des Plug-Ins nicht von Bedeutung ist.

Der typische Verlauf der Transmission (Abb. 14) weist drei Filtertypen auf: zum Einen zwei Low-Shelv-Filter und zum Anderen einen High-Shelv-Filter. Um weiter den Anstieg um f_c herum modellieren zu können (Abb. 13), benötigt es darüber hinaus jeweils den 2. Ordnungstyp dieser Filter. So kann mittels Güte und Resonanz der entsprechende Einbruch um f_c herum realisiert werden. Um die Transmission nun also auralisieren zu können, wurden die verschiedenen Filter den Lookup-Tabellen entsprechend gesetzt. Hierbei wird $\tau_{Plateau}$ durch den High-Shelv-Filter 2. Ordnung umgesetzt, der am Ende des Frequenzspektrums sitzt. So wird der Abfall der Transmission gebremst. Einer der zwei Low-Shelv-Filter liegt dagegen im mittleren Frequenzbereich und sorgt hier für den Anstieg, den die Kurve hin zu niedrigen Frequenzen tätigt. Bei f_c greift nun der andere Low-Shelv-Filter, der mit seiner Güte und Resonanz den Anstieg um f_c herum realisiert. Ein dritter optionaler Low-Shelv-Filter ist ebenfalls implementiert worden, da dieser, gerade bei dicken Betonwänden, dafür sorgt, dass die Kurve zu tiefen Frequenzen hin steil genug abflacht. Je nach Benutzereingabe durchläuft das Signal also eine bestimmte, vorgegebene Anordnung von Filtern. Welche Anordnung dabei aktiv wird, hängt davon ab, welche Dicke und welche Oberfläche die Wand aufweist und aus welchem Material sie besteht. Ein Code-Ausschnitt ist in Abbildung 17 zu sehen. Hier ist der "Zweig" zu sehen, den das Programm einschlägt, wenn der Benutzer "Vollziegel", eine Dicke $d \leq 0,13$ und eine Oberfläche zwischen $6,25 \text{ m}^2$ und 12 m^2 eingeben würde:

```

60 if (comb == 0) // Ziegelstein (default == 1)
61 {
62     if (0.13 >= thicc) // d < 0,13
63     {
64         double hi = *tree.getRawParameterValue("HEIGHT");
65         double wi = *tree.getRawParameterValue("WIDTH");
66         double a = hi * wi;
67         if ((6.25 <= a) && (a < 12))
68         {
69             *lowShelfFilter.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeLowShelf(lastSampleRate, 1100.0f, 0.57f, 250.0f);
70             *highShelfFilter2.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeHighShelf(lastSampleRate, 8000.0f, 0.5f, 2.0f);
71             *lowShelfFilter2.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeLowShelf(lastSampleRate, 160.0f, 1.3f, 0.45f);
72             *lowShelfFilter3.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeLowShelf(lastSampleRate, 40.0f, 0.5f, 2.0f);
73             gain = -76.0f;
74         }
75         if ((12 <= a) && (a < 80))
76         {
77             *lowShelfFilter.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeLowShelf(lastSampleRate, 1050.0f, 0.57f, 250.0f);
78             *highShelfFilter2.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeHighShelf(lastSampleRate, 8000.0f, 0.5f, 2.0f);
79             *lowShelfFilter2.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeLowShelf(lastSampleRate, 163.0f, 1.3f, 0.45f);
80             *lowShelfFilter3.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeLowShelf(lastSampleRate, 40.0f, 0.5f, 2.0f);
81             gain = -77.0f;
82         }
83         if ((80 <= a) && (a <= 150))
84         {
85             *lowShelfFilter.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeLowShelf(lastSampleRate, 1100.0f, 0.57f, 250.0f);
86             *highShelfFilter2.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeHighShelf(lastSampleRate, 8000.0f, 0.5f, 2.0f);
87             *lowShelfFilter2.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeLowShelf(lastSampleRate, 180.0f, 1.3f, 0.45f);
88             *lowShelfFilter3.state = *juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeLowShelf(lastSampleRate, 40.0f, 0.5f, 2.0f);
89             gain = -77.0f;
90         }
91     }
92     if ((0.13 < thicc) && (thicc <= 0.17)) // d ist zwischen 0,13 und 0,17

```

Abbildung 17 – Filterimplementierung - JUCE

4.3 Klangbeispiele für Hörstudie

Im Folgenden werden sechs Einstellungen überprüft, die verwendet wurden, um die Klangbeispiele (s. nächster Abschnitt) zu erstellen. Dabei soll hauptsächlich gezeigt werden, dass die Klangbeispiele der Theorie ziemlich genau entsprechen und maximal um 2 dB abweichen. In Matlab wurde daher ein Impuls generiert, welcher in eine DAW importiert und anschließend mittels "Wall-E" - den Beispielen entsprechend - bearbeitet wurde. Danach wurde dieser Impuls aus der DAW heraus gerendert und in Matlab erneut eingelesen. So konnte der generierte Impuls, und somit das Plug-In, mit den theoretischen Berechnungen durch Matlab in einer gemeinsamen Grafik verglichen werden. In allen Grafiken bezeichnet "Matlab" die berechnete- und "Wall-E" die mittels DAW und Plug-In erstellte Kurve.

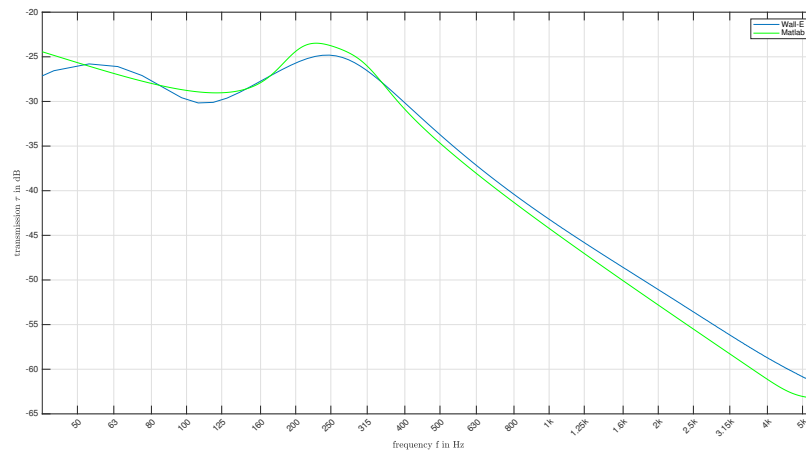


Abbildung 18 – Vergleich von τ für eine 10 x 3,5 x 0,1 in Meter - Hochlochziegelsteinwand

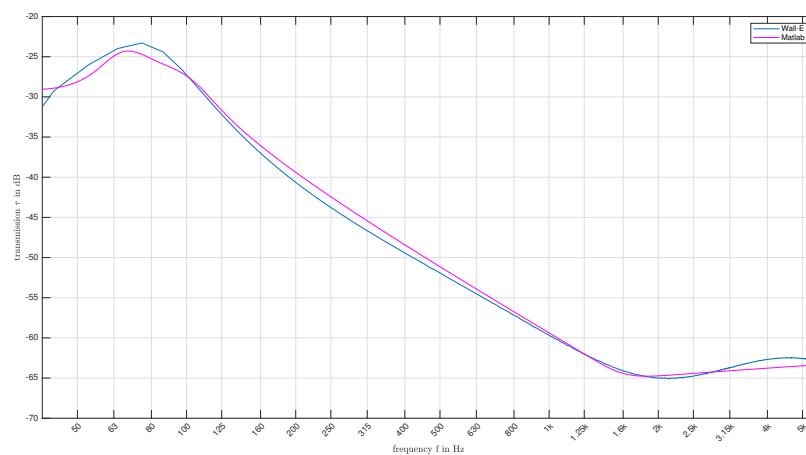


Abbildung 19 – Vergleich von τ für eine 30 x 5 x 0,3 in Meter - Hochlochziegelsteinwand

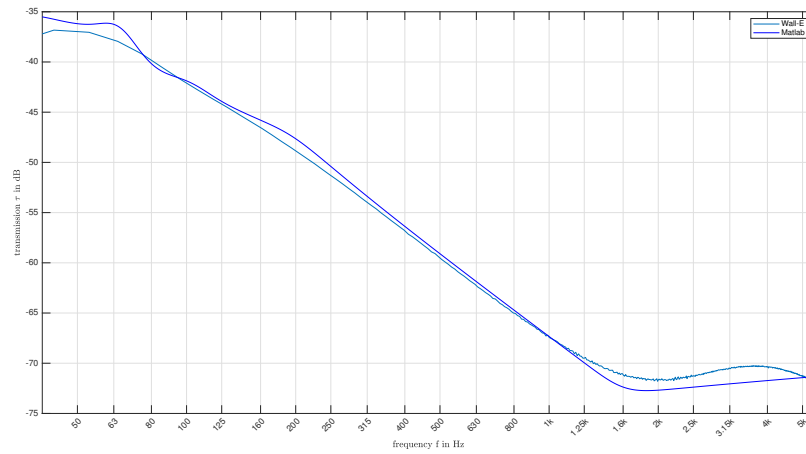


Abbildung 20 – Vergleich von τ für eine 5 x 2,5 x 0,3 in Meter - Ziegelsteinwand

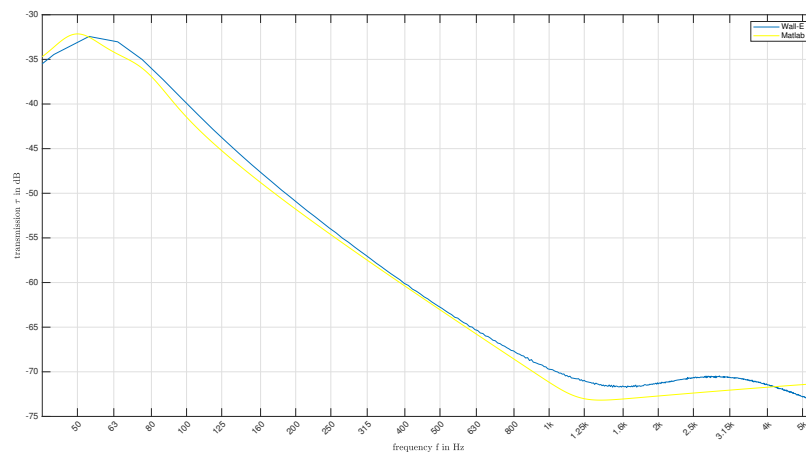


Abbildung 21 – Vergleich von τ für eine 30 x 5 x 0,4 in Meter - Ziegelsteinwand

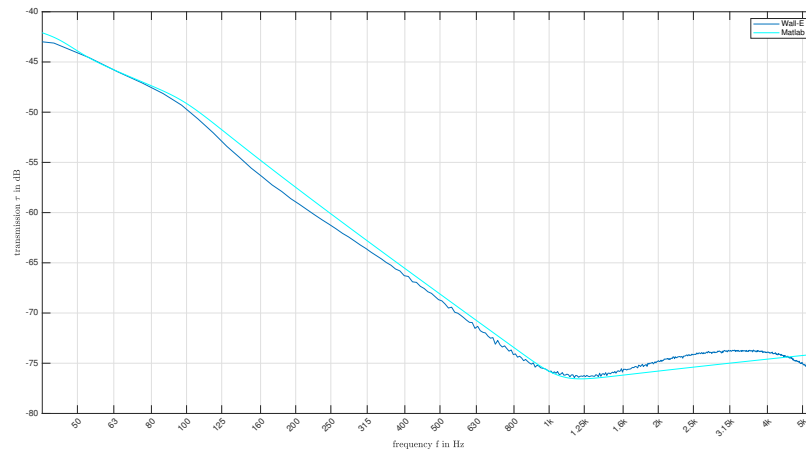


Abbildung 22 – Vergleich von τ für eine 10 x 3,5 x 0,5 in Meter - Betonwand

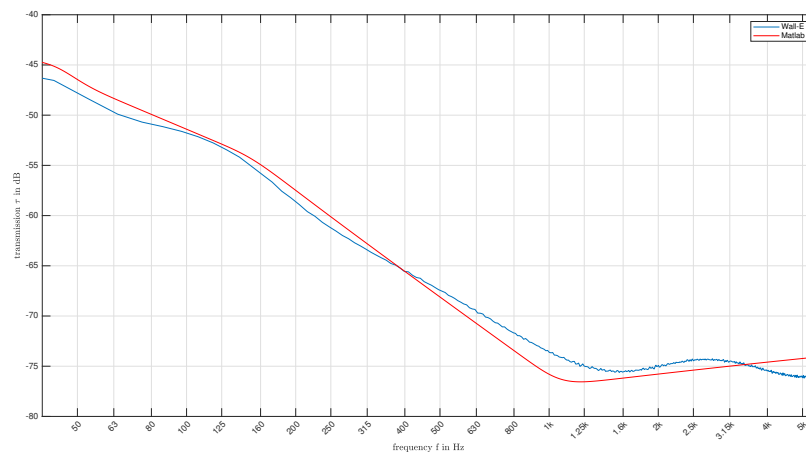


Abbildung 23 – Vergleich von τ für eine 5 x 2,5 x 0,5 in Meter - Betonwand

5 Hörstudie

5.1 Einleitung

Die Zuordnungsaufgaben unterlagen der Fragestellung: "Wie gut kann man sich vorstellen, mit welcher "Klangfarbe" der Schall durch die Wand kommt, wenn man Transmissionsgrad bzw. Schalldämmmaß R gegeben hat?" Insgesamt führten 12 Probanden, von denen alle Toningenieure sind, die 3 Aufgaben in ca. 15 bis 20 Minuten durch. Im Folgenden sind die Zuordnungsversuche und die statistische Auswertung aufgeführt. Die Klangbeispiele wurden mittels weißem Rauschen, modifiziert durch Wall-E, generiert. Alle Kurvenverläufe wurden zunächst in Matlab geplottet und dann in Pure Data übertragen.

5.2 Durchführung

Die Versuchsperson soll die Klangbeispiele ihren entsprechenden Kurvenverläufen zuordnen. Dies wird beispielhaft an der 1. Aufgabe demonstriert: Abbildung 24 zeigt die Oberfläche, die die Probanden während des Tests zu bedienen haben. Dargestellt ist zum Einen die implementierte Zusammenfassung aller Kurven in der Mitte des Hörversuchs und zum Anderen sowohl rechts, als auch unterhalb des Versuchs sechs rechteckige Boxen. Unter dem Kommando "select to play" können die Versuchsteilnehmer auf eine der Boxen klicken und somit das dahinter versteckte Klangbeispiel abspielen. Wenn die Versuchsperson dieses Klangbeispiel nun zuordnen möchte klickt sie, während das Beispiel läuft, auf eine der Boxen unter "select to assign curve". Nun wird die Box des Klangbeispiels die angeklickte Farbe übernehmen. In Abb. 24 ist veranschaulicht, wie so etwas aussehen könnte:

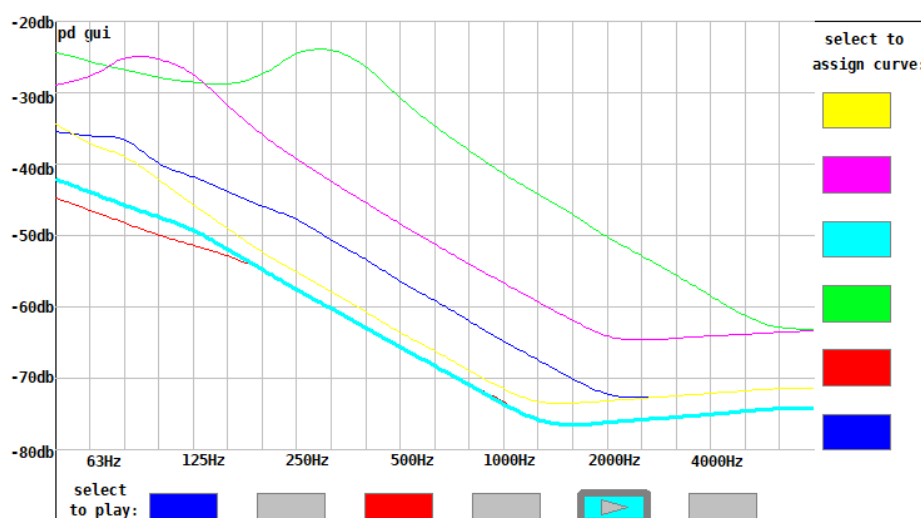


Abbildung 24 – Hörversuch - Oberfläche

5.3 1. Zuordnungsaufgaben

5.3.1 Konfiguration

Abb. 25 zeigt eine Zusammenfassung aller oben angeführten Kurvenverläufe (Abschnitt 4.3). Es ist der Transmissionsgrad grafisch dargestellt, der den entsprechenden Klangbeispielen zugeordnet werden soll.

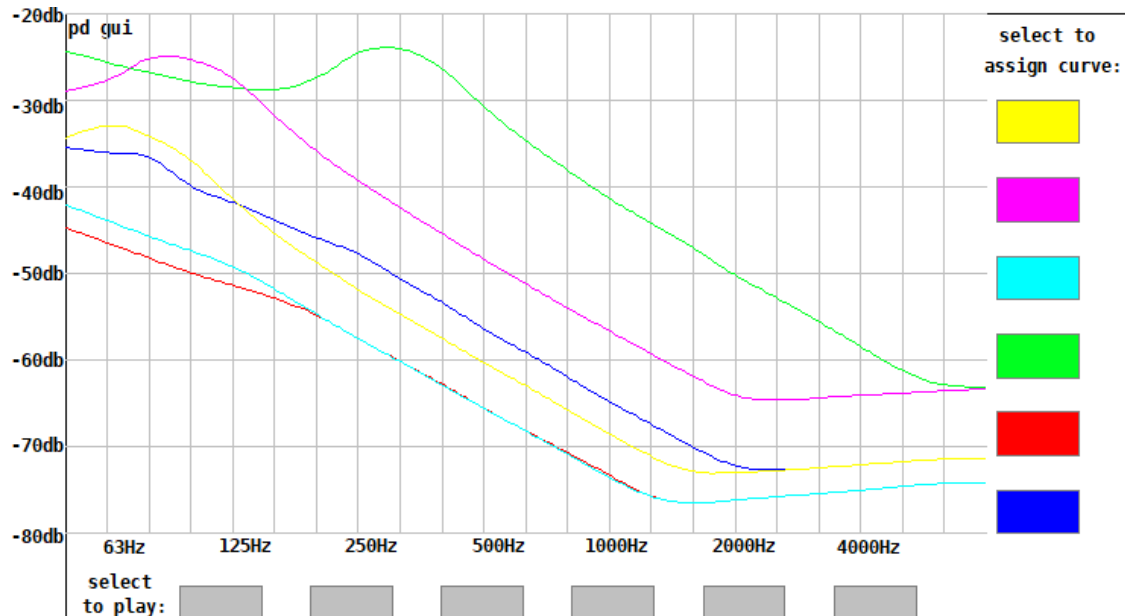


Abbildung 25 – Transmissionsgrad τ für verschiedene Abmessungen und Materialien

5.3.2 Auswertung

Zu erkennen ist, dass in diesem Versuch alle Probanden die richtigen Antworten gaben (Abb. 26). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Kurvenverläufe den Lautstärken der Klangbeispiele entsprechen. Simpel gesagt entspricht ein leises Klangbeispiel eher einer Kurve unterhalb der dunkelblauen Kurve ("Rot" mit -45 dB bei 50 Hz) und ein lautes Klangbeispiel ("grün" mit -25 dB bei 50 Hz) eher einer Kurve oberhalb der dunkelblauen Kurve. Auch wenn sich die beiden Kurven "rot" und "cyan" nur gering unterscheiden, haben 100 % der Befragten die richtige Antwort gegeben. Auch war für die Probanden die Lage der Resonanz von Bedeutung, hinsichtlich der Zuordenbarkeit.

Hörversuch 1						
Lösung	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
Proband						
1	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
2	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
3	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
4	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
5	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
6	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
7	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
8	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
9	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
10	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
11	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
12	cyan	magenta	blau	grün	gelb	rot
13						
	korrekt	vertauscht	falsch verstanden			

Abbildung 26 – Aufgabe 1 - Auswertung

5.4 2. Zuordnungsaufgaben

5.4.1 Konfiguration

Abb. 27 zeigt eine Zusammenfassung aller oben angeführten Kurvenverläufe (Abschnitt 4.3). Das Schalldämmmaß R ist der negative Wert der logarithmierten Transmission, daher ist es reziprok zum Transmissionsgrad, wodurch die Kurve invertiert zu oben dargestellt ist. Es soll nun das Schalldämmmaß R zu den entsprechenden Klangbeispielen zugeordnet werden.

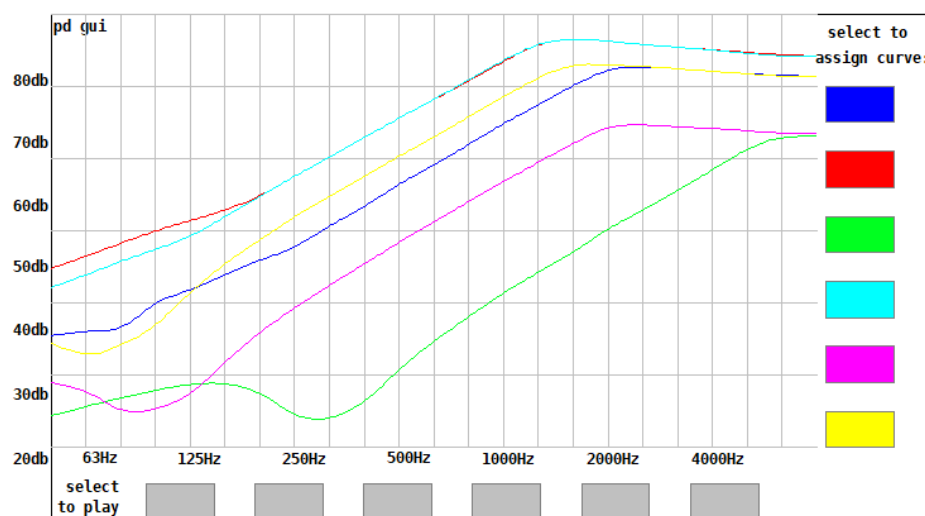


Abbildung 27 – Transmissionsgrad τ für verschiedene Abmessungen und Materialien

5.4.2 Auswertung

Konträr zur 1. Aufgabe wurde in der 2. Aufgabe das Schalldämmmaß R als Achsenbeschriftung benutzt. Somit mussten die Probanden dahingehend umdenken, dass nicht die Lautstärke des Signals bei einer bestimmten Frequenz, sondern seine Dämpfung in Dezibel angegeben wurde. Das bedeutet, dass ein lautes Signal, welches demnach weniger gedämpft wird, nicht mehr oben im Diagramm, sondern weiter unten anzufinden ist. Als Beispiele können hier wieder die Verläufe der grünen und der roten Kurve herangezogen werden. So ist das "grüne Signal" um etwa 25 dB bei 50 Hz gedämpft, wogegen das "rote Signal" schon um fast 50 dB bei 50 Hz gedämpft ist, was daher zu einem leiseren Signal führt.

	Hörversuch 2					
Lösung	blau	rot	gelb	cyan	grün	magenta
Proband						
1	blau	rot	gelb	cyan	grün	magenta
2	blau	rot	gelb	cyan	grün	magenta
3	blau	rot	gelb	cyan	grün	magenta
4	gelb	rot	blau	cyan	grün	magenta
5	blau	rot	gelb	cyan	grün	magenta
6	gelb	rot	blau	cyan	grün	magenta
7	blau	rot	gelb	cyan	grün	magenta
8	gelb	grün	blau	magenta	cyan	rot
9	blau	rot	gelb	cyan	grün	magenta
10	blau	rot	gelb	cyan	grün	magenta
11	blau	rot	gelb	cyan	grün	magenta
12	gelb	grün	blau	magenta	cyan	rot
	korrekt	vertauscht	falsch verstanden			

Abbildung 28 – Hörversuch 2 - Auswertung

Zu erkennen sind hier grundsätzlich 3 Dinge. Viele der Probanden haben es geschafft die Klangbeispiele zu den entsprechenden Kurven zuzuordnen (s. Abb. 28 - grüne Antworten). 2 Probanden dagegen haben lediglich den Verlauf der gelben Kurve und den Verlauf der blauen Kurve vertauscht (s. Abb. 28 - braune Antworten). Da hier jedoch die übrigen Beispiele richtig zugeordnet wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die Achsenbeschriftung generell richtig interpretiert worden ist und die beiden Beispiele schlicht vertauscht wurden. Anders dagegen bei den 2 Probanden, die die dunkelroten Antworten gaben. Hier ist ein Muster zu erkennen, nämlich dass die Achsenbeschriftung wieder als Lautstärke der Signale bei den einzelnen Frequenzen verstanden wurde (s. 1. Aufgabe). So betrachtet ergeben die Antworten der Probanden Sinn, da sie die Gegenteil der richtigen Antwortmöglichkeiten bilden (Rot wurde mit Grün- und Cyan wurde mit Magenta vertauscht). Hier kann davon ausgegangen werden, dass die Probanden die Aufgabe fehlinterpretiert oder missverstanden haben. Statistisch gesehen haben 17 % der Probanden gelb und blau vertauscht und wiederum 17 % die Aufgabe missverstanden. 67 % der Befragten konnten die Aufgabe vollständig lösen.

5.5 3. Zuordnungsaufgaben

5.5.1 Konfiguration

Zur Kontrolle der 1. Aufgabe wurde die 3. Aufgabe gestaltet. Es sollte erneut der Transmissionsgrad den Klangbeispielen zugeordnet werden. Nachdem jedoch alle Probanden den 1. Hörversuch erfolgreich absolviert haben war zu erwarten, dass dieser Versuch ebenfalls von allen Testpersonen erfolgreich durchgeführt wird.

5.5.2 Auswertung

	Hörversuch 3			
Lösung	grün	blau	rot	
Proband				
1	grün	blau	rot	
2	grün	blau	rot	
3	grün	blau	rot	
4	grün	blau	rot	
5	grün	blau	rot	
6	grün	blau	rot	
7	grün	blau	rot	
8	grün	blau	rot	
9	grün	blau	rot	
10	grün	blau	rot	
11	grün	blau	rot	
12	grün	blau	rot	
	korrekt	vertauscht	falsch verstanden	

Abbildung 29 – Hörversuch 3 - Auswertung

5.5.3 Diskussion

Im Nachhinein hat sich herausgestellt, dass sich die Probanden mit dem Umdenken in der 2. Aufgabe schwer getan haben, was sich in der deutlich längeren Versuchszeit (fast doppelt so lang, wie bei der 1. Aufgabe) abgezeichnet hat. Die Probanden verwiesen darauf, dass sie sich bei jedem Klangbeispiel erneut fragen mussten, was es bedeutet, dass ein Klangbeispiel leise oder laut ist und was sich daraus für ein Kurvenverlauf ergeben müsste. Daher wurde schnell klar, dass es ratsam ist den Transmissionsgrad heranzuziehen, um jemandem grafisch zu verdeutlichen, wie laut es auf der anderen Seite einer Wand wirklich ist.

Da die 2. Aufgabe für Komplikationen gesorgt hat, wäre es von Vorteil gewesen die 2. Aufgabe noch einmal in der 3. Aufgabe zu überprüfen. Da im Vorhinein jedoch nicht klar war, welcher Test schwieriger ist, wurde dieses Testverfahren nicht weiter verfolgt.

Bei den Aufgaben wurden immer 6 Klangbeispiele und die 6 zugehörigen Kurvenverläufe verwendet, daher konnten die Testpersonen bei dem letzten Klangbeispielen nach dem Ausschlussverfahren wählen. Stünden also mehr Klangbeispiele und eventuell noch ein paar falsche Kurven zur Auswahl, hätte das Ausschlussverfahren zur Gänze eliminiert werden können und das Ergebnis hätte vielleicht anders ausgesehen.

Die Testzeiten waren bei den Probanden sehr ähnlich. So dauerte der gesamte Test immer in etwa 15 Minuten, aufgeteilt in circa 40% (≈ 6 Minuten) für die 1. und die 3. Aufgabe und 60% (≈ 9 Minuten) für die 2. Aufgabe.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Wall-E stellt ein stark vereinfachtes Modell der Auralisation der Schalldämmung dar. Um das Plug-In der Realität so nah wie möglich zu bringen hätte man unter Anderem noch Vorsatzschalen, T-Stöße, L-Stöße, Verbindungen aus verschiedenen Materialien und vieles mehr berücksichtigen müssen. Diese Aspekte wurden in Wall-E nicht eingebettet, da die Komplexität dieser Beeinflussungen den Rahmen der Arbeit weit überschritten hätte. So gilt es beispielsweise bei Vorsatzschalen einen Variablen Abstand zwischen den Schalen und ein eventuelles Füllmaterial in dem daraus resultierenden Hohlraum zu berücksichtigen. Bei Verbindungsarten wie den T- bzw. L-Stößen hätte die Verbindung aus verschiedenen Materialien und deren Wechselwirkung aufeinander eingeführt werden müssen, um der Schalldämmung einer realen Wand in einem realen Gebäude gerecht zu werden. Es ist also zu erkennen, dass an dieser Stelle noch sehr viel ergänzt, vertieft und weiter ausgeführt werden kann.

Weiter ist dieses Plug-In eine Vereinfachung, da sich die ÖNORM 12354-1 teilweise Gebrauch von Vereinfachungen macht. Hier sei besonders Abschnitt 2.2.2 als Beispiel angeführt. Es wird hier davon ausgegangen, dass die inneren Verluste immer 0,01 sind und mit $\frac{c}{\sqrt{f}}$ die Verbindungen verschiedenster Materialien berücksichtigt werden. Dies verallgemeinert die Verbindungsmöglichkeiten verschiedenster Materialien stark. Da bei Wall-E alle Materialien einen Wert von $c = 1$ aufweisen, ergibt sich für den Gesamtverlust $\eta_{tot,situ}$ ein Wert, der für die drei oben angeführten Materialien nicht variiert. Um eine Variation herbeizuführen, müssten z.B. leichtere, porösere Materialien implementiert werden.

Die Werte des Plug-Ins (Abbildungen 18-23) weichen von der in Matlab simulierten Kurve leicht ab (vgl. Abb. 18: Hoch- und Tiefpunkte bei und vor f_c). Dies hat damit zu tun, dass die Filter in JUCE zwar theoretisch genau gesetzt werden können, die Attribute wie z.B. die Güte, aber manuell bestimmt und eingegeben werden müssen. Das bedeutet, dass die Kurven genauer werden, je mehr Aufwand mit den exakten Bestimmungen der Güten-Faktoren und der Anzahl der platzierten Filter betrieben wird. Generell ist jedoch zu erkennen, dass sich die durch Wall-E erzeugten Kurven und die in Matlab generierten Kurven ziemlich gut annähern und maximal 2 dB abweichen. Dies hat damit zu tun, dass die gewählten Materialien Eigenschaften mit sich bringen, die durch wenige Filter implementier- und realisierbar sind.

So sei abschließend zu sagen, dass Wall-E ein Tool ist, welches die Schalldämmung für die implementierten Fälle, nämlich die einer Wand aus Beton, Voll- und Hochlochziegeln, sehr gut annähert, diese jedoch nicht zur Gänze realistisch darstellen kann, da die Einbausituation für die Schalldämmung von großer Bedeutung ist. Um diese zu berücksichtigen müssten die oben angeführten Aspekte implementiert werden und ein weitaus umfangreicheres Plug-In geschrieben werden.

7 Anhang A

7.1 Vereinfachungen der Kirchhoff'schen Plattentheorie

Um die Kirchhoff'sche Plattengleichung herzuleiten werden zuvor vereinfachende Annahmen getroffen. Für die Gültigkeit dieser vereinfachenden Annahmen muss davon ausgegangen werden, dass die Dicke der Platte gegenüber den übrigen Abmessungen der Platte und auch im Verhältnis zur Wellenlänge der Biegewelle klein ist. Dann kann angenommen werden, dass ebene Querschnitte vor- und nach der Verformung der Platte eben bleiben (a), Senkrechte zur Plattenmittelfläche auch bei verformter Mittelfläche senkrecht zu dieser bleiben (b), Querkraftschubdeformationen (c) und Rotationsträgheiten (d) vernachlässigt werden können, Spannungen senkrecht zur Plattenmittelebene unberücksichtigt bleiben (e) und Spannungen infolge der Querausbiegung nicht erfasst werden (f). Je nach Problemstellung werden verschiedene Modelle verwendet. Das wesentliche Unterscheidungskriterium ist das Verhältnis der Plattendicke zu den Abmessungen der Plattenmittelfläche. Dabei können die 2 klassischen Lösungen der Festigkeitslehre für Platten folgendermaßen zugeordnet werden:

- (1) Die Merkmale der dünnen Platte liegen der Kirchhoff'schen Theorie zugrunde und
- (2) die Merkmale der mitteldicken Platten der Theorie von Mindlin.

In der Plattentheorie von Mindlin werden gegenüber der Kirchhoff-Theorie die Querkraftschubdeformation und die Rotationsträgheit näherungsweise erfasst.

7.2 Schematische Herleitung der Plattengleichung

Mittels differentiellen Schnitt am Plattenelement werden die Spannungen σ hergeleitet. Da zuvor angenommen wurde, dass Querschnitte eben (a) und senkrecht (b) bleiben, was eine Verallgemeinerung der Balkentheorie nach Bernoulli darstellt, wird von einer linearen Spannungsverteilung in z-Richtung ausgegangen. Durch das Anwenden des Elastizitätsgesetzes, welches das eigentliche Materialverhalten beschreibt, können nun die linearisierten Beziehungen zwischen den Verzerrungen ϵ und der Verschiebung ζ und zwischen den Spannungen σ und den Verzerrungen ϵ ($E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ s.u.) dargestellt werden. Durch Gleichsetzen dieser beiden Beziehungen wird die Verzerrung ϵ eliminiert und es kann eine direkte Verbindung zwischen den Spannungen σ und der Verschiebung ζ hergestellt werden. Nun werden die Spannungen σ durch Integration über die Dicke der Platte zu Schnittgrößen (Kräfte F und Momente M) pro Längeneinheit überführt, wodurch eine Beziehung zwischen den Schnittgrößen pro Längeneinheit und der Verschiebung hergestellt wird. Durch die linearisierte Elastizitätslehre kann nun (aus F und M) eine Beziehung zwischen der Verschiebung ζ in z-Richtung und den längenbezogenen Biege- bzw. Torsionsmomenten der Platte hergestellt werden. Die Proportionalitätsfaktoren nennt man hierbei Biegemodul B und Torsionsmodul T der Platte (s.u.). Bei der Kirchhoff-Platte treten in den Schnittflächen nur vertikale Querkräfte bzw. Biege- und Torsionsmomente um horizontale Ebenen auf. Zusätzlich wirkt als äußere Belastung auf das Plattenelement die

Flächenlast p . Die Trägheit wird als Trägheitskraft eingeführt. Mit diesen Größen werden nun die Kräfte- und Momentengleichgewichte in z -Richtung aufgestellt, deren Summe $\sum F_z$ und $\sum M$ immer gleich 0 ist. In diese Gleichgewichte werden die zuvor angeführten Beziehungen (Verschiebung ζ zu Biege- bzw. Torsionsmomente) eingesetzt und durch sukzessives Eliminieren aller anderen Feldgrößen eine Differentialgleichung hergeleitet, die die Verschiebung ζ in z -Richtung beschreibt. Verknüpft man nun noch die Ergebnisse der Elastizitätsgesetze mit der Differentialgleichung (B und m'), so erhält man eine Differentialgleichung, die ausschließlich die Belastung p und die Verschiebung ζ in z -Richtung beschreibt (Gl. (28)) [8][9].

7.2.1 Formeln

Biegemodul B :

$$B = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (23)$$

Dabei entspricht E dem Elastizitätsmodul $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$, dem Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers, wobei $\sigma = \frac{F}{A}$, also die mechanische Spannung, das Verhalten von Kraft pro Fläche, und $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ die Dehnung beschreibt. h beschreibt dabei die Plattendicke und μ die Querkontraktionszahl, eine elastische Konstante des Materials, auch Poissonschen Zahl genannt, die das Verhalten eines Festkörpers unter dem Einfluss von Druck- oder Zugkräften, wodurch eine Längenänderung Δl entsteht, beschreibt.

Torsionsmodul T :

$$T = \frac{G \cdot h^3}{12} \quad (24)$$

Wobei $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}$ das Schubmodul beschreibt, eine Materialkonstante, die Auskunft über die linear-elastische Verformung eines Bauteils infolge einer Scherkraft oder Schubspannung gibt - wir erinnern uns: $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$.

Wellengleichung der Biegewellenausbreitung auf einer dünnen Platte - Kirchhoff'sche Plattengleichung:

$$\Delta \Delta \zeta + \frac{m'}{B} \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = \frac{p}{B} \quad (25)$$

Um nun einen allgemeinen Überblick über die Wellenbewegung auf der Kirchhoff-Platte zu gewinnen, geht man von der zu Gl. (25) gehörigen homogenen Differentialgleichung aus und fragt zunächst nur nach Lösungen, die harmonisch ebene Wellen, die sich in x -Richtung ausbreiten, entsprechen:

$$\Delta \Delta \zeta + \frac{m'}{B} \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = 0 \quad (26)$$

In Gl. (23) wird nun für $E = \bar{E} \cdot (1 - \mu^2)$ und $h^3 = I \cdot 12$ eingesetzt, wodurch sich die Gleichung zu

$$B = \frac{\bar{E} \cdot (1 - \mu^2) \cdot I \cdot 12}{12 \cdot (1 - \mu)} = \bar{E} \cdot I, \quad (27)$$

ergibt. Dadurch, und unter Berücksichtigung, dass $m' = \rho \cdot h$ ist, ergibt sich Gl. (26) zu:

$$\Delta\Delta\zeta + \frac{\rho \cdot h}{\bar{E} \cdot I} \cdot \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = 0. \quad (28)$$

Diese Gleichung wird als Grundgleichung für weitere Berechnungen in Abschnitt 2 verwendet.

8 Anhang B

8.1 Herleitung der 1. Modenfrequenz f_{11}

Ein typischer Ansatz ist $\zeta = \sin(k_x x) \sin(k_y y)$, für den Fall, dass die Ränder gelenkig eingespannt sind und die Auslenkung an den Plattenrändern $x = 0, L_x$ und $y = 0, L_y$ verschwinden muss, wofür nur die Wellenzahlen $k_x = \frac{\pi l}{L_x}$ und $k_y = \frac{\pi m}{L_y}$ mit den Indizes $l, m = 1, 2, \dots$ in Frage kommen. Obwohl freie und eingespannte Ränder durchaus eine knifflige Angelegenheit sind, interessiert hier zur Abschätzung auch die Lage der erwartbaren tiefsten Biegeschwingungen, und dafür reicht die Betrachtung der Platte mit gelenkig gelagerten Rändern völlig aus. Setzt man den Ansatz $\zeta = \sin(k_x x) \sin(k_y y)$, ein, erhält man durch $\frac{\partial^2}{\partial x^2} \sin(ax) = -a^2 \sin(ax)$:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} - \frac{\rho h}{EI} \right] \zeta &= \left[k_x^4 + 2(-k_x^2)(-k_y^2) + k_y^4 - \frac{\rho h}{EI} \omega^2 \right] \zeta \\ &= \left[(k_x^2 + k_y^2)^2 - \frac{\rho h}{EI} \omega^2 \right] \zeta = 0. \end{aligned} \quad (29)$$

Mit den Wellenzahlen $k_x = \frac{\pi l}{L_x}$ und $k_y = \frac{\pi m}{L_y}$, die die Randbedingungen erfüllen, verschwindet der Wert der Klammer bei den Eigenfrequenzen $k_x^2 + k_y^2 = \sqrt{\frac{\rho h}{EI}} \omega$. Daraus folgt, dass sich $\omega_{l,m}$ und $f_{l,m} = \frac{\omega}{2\pi}$ berechnen lassen, zu:

$$\omega_{l,m} = \frac{\bar{EI}}{\rho h} \left[\left(\frac{\pi l}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{\pi m}{L_y} \right)^2 \right], \quad (30)$$

$$f_{l,m} = \frac{\pi c_L h}{2\sqrt{10.5}} \left[\left(\frac{l}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{m}{L_y} \right)^2 \right]. \quad (31)$$

Da aus Unterabschnitt 2.1 bekannt ist, dass $f_c = \frac{\sqrt{10.5}c^2}{2\pi c_L h}$ und somit $c_L = \frac{\sqrt{10.5}c^2}{2\pi f_c h}$ ist, kann c_L in Gl. (31) eingesetzt werden und es ergibt sich, mit Kürzungen, für die 1. Modenfrequenz einer allseitig momentfreien aufgelagerten Wand/Platte:

$$f_{11} = \frac{c_0^2}{4f_c} \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} \right). \quad (32)$$

Diese Formel wird in Unterabschnitt 2.3.3. weiter verwendet.

Vollziegel							
d <= 0,13				0,13 < d <= 0,17			
a < 12	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 12	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	1100	0,57	250	LSF1	650	0,5	289
HSF1	8000	0,5	2	HSF1	7000	0,5	3
LSF2	160	1,3	0,45	LSF2	100	1,5	0,55
LSF3	40	0,5	2	LSF3	40	0,4	1,5
gain	-76			gain	-76		
12 <= a < 80				12 <= a < 80			
LSF1	1500	0,57	250	LSF1	650	0,5	250
HSF1	8000	0,5	2	HSF1	7000	0,5	3
LSF2	163	1,3	0,45	LSF2	110	1,55	0,52
LSF3	40	0,5	2	LSF3	40	0,5	1,25
gain	-77			gain	-76		
a >= 80				a >= 80			
LSF1	1100	0,57	250	LSF1	650	0,5	250
HSF1	8000	0,5	2	HSF1	7000	0,5	3
LSF2	180	1,3	0,45	LSF2	110	1,5	0,45
LSF3	40	0,5	2	LSF3	40	0,6	1,5
gain	-77			gain	-76		
0,17 < d <= 0,25				0,25 < d <= 0,3			
a < 12	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 14	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	500	0,32	900	LSF1	800	0,35	1100
HSF1	6000	0,45	6	HSF1	3200	0,5	12
LSF2	85	0,5	0,5	LSF2	100	0,5	0,8
LSF3	40	0,5	1	LSF3	90	1,8	1,2
gain	-84			gain	-95		
12 <= a < 80				14 <= a < 50			
LSF1	375	0,5	400	LSF1	240	0,4	700
HSF1	6000	0,5	3	HSF1	6000	0,5	3
LSF2	85	1,5	0,52	LSF2	55	1,5	0,5
LSF3	40	0,5	0,5	LSF3	20	0,5	0,5
gain	-76			gain	-76		
a >= 80				a >= 50			
LSF1	350	0,5	450	LSF1	240	0,4	600
HSF1	6000	0,5	3	HSF1	6000	0,5	3
LSF2	85	1,5	0,45	LSF2	60	1,5	0,45
LSF3	40	0,5	0,5	LSF3	20	0,5	0,5
gain	-76			gain	-76		

0,3 < d ≤ 0,35				0,35 < d ≤ 0,4			
a < 25	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 12,5	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	650	0,35	1100	LSF1	1100	0,57	250
HSF1	3000	0,5	13,5	HSF1	8000	0,5	2
LSF2	85	0,5	0,65	LSF2	160	1,35	0,45
LSF3	70	2,2	1,22	LSF3	40	0,5	2
gain	-95			gain	-96,5		
25 ≤ a < 100				12,5 ≤ a < 25			
LSF1	210	0,4	650	LSF1	1100	0,57	250
HSF1	5000	0,5	3	HSF1	8000	0,5	2
LSF2	45	1,5	0,45	LSF2	160	1,35	0,45
LSF3	20	0,5	0,5	LSF3	40	0,5	2
gain	-77			gain	-97		
a ≥ 100				25 ≤ a < 30			
LSF1	220	0,4	600	LSF1	1100	0,57	250
HSF1	5000	0,5	3	HSF1	8000	0,5	2
LSF2	50	1,5	0,45	LSF2	160	1,35	0,45
LSF3	20	0,5	0,5	LSF3	40	0,5	2
gain	-77			gain	-97		
				a ≥ 30			
				LSF1	200	0,4	500
				HSF1	3500	0,5	2,5
				LSF2	40	1,5	0,45
				LSF3	15	0,5	0,5
				gain	-77		
0,4 < d ≤ 0,45				0,45 < d ≤ 0,5			
a < 12,5	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 50	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	650	0,35	700	LSF1	540	0,35	750
HSF1	2250	0,5	16	HSF1	2000	0,5	16
LSF2	60	0,8	1	LSF2	53	0,8	1
LSF3	55	2,2	1,2	LSF3	48	2,2	1,2
gain	-97,5			gain	-96,5		
12,5 ≤ a < 30				50 ≤ a < 85			
LSF1	550	0,35	900	LSF1	450	0,35	1300
HSF1	2250	0,5	15	HSF1	2000	0,5	16
LSF2	60	0,8	1	LSF2	53	0,8	1
LSF3	55	2,2	1,2	LSF3	48	2,2	1,2
gain	-96,5			gain	-96,5		

30 <= a < 45				a >= 85			
LSF1	550	0,35	1100	LSF1	400	0,35	1100
HSF1	2250	0,5	15	HSF1	1700	0,5	16
LSF2	60	0,8	1	LSF2	70	0,5	4
LSF3	55	2,2	1,2	LSF3	5	2,2	1,2
gain	-96,5			gain	-96,5		
a >= 45							
LSF1	160	0,4	550				
HSF1	2500	0,5	2				
LSF2	30	1,5	0,45				
LSF3	15	0,5	0,5				
gain	-77						

Hochlochziegel							
d <= 0,13				0,13 < d <= 0,17			
a < 12	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 12	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	1100	0,57	250	LSF1	650	0,5	289
HSF1	8000	0,5	2	HSF1	7000	0,5	3
LSF2	160	1,3	0,45	LSF2	100	1,5	0,55
LSF3	40	0,5	2	LSF3	40	0,4	1,5
gain	-68,5			gain	-68,5		
12 <= a < 80				12 <= a < 80			
LSF1	1050	0,57	250	LSF1	650	0,5	250
HSF1	8000	0,5	2	HSF1	7000	0,5	3
LSF2	163	1,3	0,45	LSF2	110	1,55	0,52
LSF3	40	0,5	2	LSF3	40	0,5	1,25
gain	-68,5			gain	68		
a >= 80				a >= 80			
LSF1	1100	0,57	250	LSF1	650	0,5	250
HSF1	8000	0,5	2	HSF1	7000	0,5	3
LSF2	180	1,3	0,45	LSF2	110	1,5	0,5
LSF3	40	0,5	2	LSF3	40	0,6	1,5
gain	-68,5			gain	68		
0,17 < d <= 0,25				0,25 < d <= 0,3			
a < 12	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 14	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	500	0,32	900	LSF1	800	0,35	1100
HSF1	6000	0,45	6	HSF1	3200	0,5	12
LSF2	85	0,5	0,5	LSF2	100	0,5	0,8
LSF3	40	0,5	1	LSF3	90	1,8	1,2
gain	-76,5			gain	-87,5		
12 <= a < 80				14 <= a < 50			
LSF1	350	0,5	475	LSF1	240	0,4	700
HSF1	6000	0,5	3	HSF1	6000	0,5	3
LSF2	73	1,5	0,52	LSF2	55	1,5	0,5
LSF3	40	0,5	0,5	LSF3	20	0,5	0,5
gain	-68			gain	-68		
a >= 80				a >= 50			
LSF1	350	0,5	450	LSF1	240	0,4	600
HSF1	6000	0,5	3	HSF1	6000	0,5	3
LSF2	85	1,5	0,45	LSF2	60	1,5	0,45
LSF3	40	0,5	0,5	LSF3	20	0,5	0,5
gain	-68			gain	-68		

0,3 < d ≤ 0,35				0,35 < d ≤ 0,4			
a < 20	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 12,5	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	650	0,35	1100	LSF1	650	0,35	900
HSF1	3000	0,5	13,5	HSF1	2450	0,5	15
LSF2	85	0,5	0,65	LSF2	70	0,45	0,8
LSF3	70	2,2	1,22	LSF3	65	2,2	1,2
gain	-87,5			gain	-89		
20 ≤ a < 80				12,5 ≤ a < 27			
LSF1	210	0,4	650	LSF1	650	0,35	1100
HSF1	5000	0,5	3	HSF1	2450	0,5	15
LSF2	45	1,5	0,45	LSF2	66	0,45	0,9
LSF3	20	0,5	0,5	LSF3	65	2,2	1,25
gain	-69,5			gain	-89,5		
a ≥ 80				25 ≤ a < 50			
LSF1	220	0,4	600	LSF1	600	0,35	1300
HSF1	5000	0,5	3	HSF1	2350	0,5	15
LSF2	50	1,5	0,45	LSF2	62	1	0,9
LSF3	20	0,5	0,5	LSF3	60	2,2	1,25
gain	-69,5			gain	-88,5		
				a ≥ 50			
				LSF1	200	0,4	500
				HSF1	3500	0,5	2,5
				LSF2	40	1,5	0,45
				LSF3	15	0,5	0,5
				gain	-69,5		
0,4 < d ≤ 0,45				0,45 < d ≤ 0,5			
a < 12,5	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 12,5	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	650	0,35	700	LSF1	540	0,35	750
HSF1	2250	0,5	16	HSF1	2000	0,5	16
LSF2	60	0,8	1	LSF2	53	0,8	1
LSF3	55	2,2	1,2	LSF3	48	2,2	1,2
gain	-89			gain	-89		
12,5 ≤ a < 20				12,5 ≤ a < 80			
LSF1	550	0,35	900	LSF1	450	0,35	1300
HSF1	2250	0,5	15	HSF1	2000	0,5	16
LSF2	60	0,8	1	LSF2	53	0,8	1
LSF3	55	2,2	1,2	LSF3	48	2,2	1,2
gain	-87,5			gain	-89		

30 <= a < 43				a >= 80			
LSF1	550	0,35	1450	LSF1	400	0,35	1100
HSF1	2250	0,5	15	HSF1	1700	0,5	16
LSF2	60	0,8	1	LSF2	70	0,5	4
LSF3	55	2,2	1,2	LSF3	5	2,2	1,2
gain	-89,5			gain	-88,5		
a >= 43							
LSF1	160	0,4	550				
HSF1	2500	0,5	2				
LSF2	30	1,5	0,45				
LSF3	15	0,5	0,5				
gain	-69,5						

Beton							
d <= 0,13				0,13 < d <= 0,17			
a < 12	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 9	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	800	0,4	650	LSF1	400	0,3	650
HSF1	10000	0,5	2	HSF1	3000	0,5	0,9
LSF2	126	1,5	0,45	LSF2	100	1,7	1,2
LSF3	50	0,5	0,75	LSF3	96	0,5	0,45
gain	-79			gain	-79		
12 <= a < 50				9 <= a < 50			
LSF1	800	0,4	650	LSF1	500	0,4	750
HSF1	10000	0,5	2	HSF1	10000	0,5	2
LSF2	116	1,5	0,5	LSF2	75	1,5	0,5
LSF3	50	0,5	0,75	LSF3	40	0,5	0,6
gain	-79			gain	-79		
a >= 50				a >= 50			
LSF1	800	0,4	850	LSF1	500	0,4	650
HSF1	8000	0,5	2	HSF1	10000	0,5	2
LSF2	110	1,5	0,55	LSF2	80	1,5	0,5
LSF3	50	0,5	0,75	LSF3	40	0,5	0,6
gain	-80			gain	-79		
0,17 < d <= 0,25				0,25 < d <= 0,3			
a < 16	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 12	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	320	0,3	650	LSF1	230	0,33	600
HSF1	3300	1,5	1,2	HSF1	3000	0,5	1,5
LSF2	78	1,7	1,2	LSF2	56	2,3	1,3
LSF3	60	0,5	0,35	LSF3	46	0,5	0,2
gain	-79			gain	-79		
16 <= a < 50				12 <= a < 27			
LSF1	300	0,35	1000	LSF1	230	0,37	650
HSF1	3500	0,5	1,5	HSF1	3000	0,5	1,5
LSF2	50	1,5	0,5	LSF2	58	2,7	1,2
LSF3	20	0,5	0,6	LSF3	47	0,5	0,3
gain	-79			gain	-79		
a >= 50				a >= 27			
LSF1	300	0,35	1000	LSF1	175	0,3	2100
HSF1	3500	0,5	1,5	HSF1	4500	1,2	1,5
LSF2	55	1,5	0,5	LSF2	45	1,8	0,6
LSF3	30	0,5	0,6	LSF3	30	0,5	0,6
gain	-79			gain	-79		

0,3 < d ≤ 0,35				0,35 < d ≤ 0,4			
a < 20	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 15,5	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	275	0,35	220	LSF1	275	0,35	210
HSF1	2600	0,5	1,6	HSF1	3200	0,5	2,5
LSF2	50	2,3	1,2	LSF2	42	2,3	1,3
LSF3	20	0,5	0,2	LSF3	10	0,5	0,2
gain	-79			gain	-80,5		
20 ≤ a < 60				15,5 ≤ a < 50			
LSF1	220	0,32	400	LSF1	275	0,35	250
HSF1	2600	0,5	1,6	HSF1	3200	0,5	2,5
LSF2	49	2,3	1,3	LSF2	45	2,3	1,3
LSF3	20	0,5	0,2	LSF3	10	0,5	0,2
gain	-79			gain	-80,5		
a ≥ 60				a ≥ 50			
LSF1	145	0,25	2600	LSF1	110	0,25	2600
HSF1	4500	1,2	1,5	HSF1	3500	0,5	1,8
LSF2	20	1,8	0,6	LSF2	20	1,8	0,6
LSF3	10	0,5	0,6	LSF3	10	0,5	0,5
gain	-80,5			gain	-80,5		
0,4 < d ≤ 0,45				0,45 < d ≤ 0,5			
a < 12,5	FQ	Resonanz	Q-Faktor	a < 12,5	FQ	Resonanz	Q-Faktor
LSF1	270	0,45	250	LSF1	255	0,55	260
HSF1	3200	0,5	2,5	HSF1	3200	0,5	2,5
LSF2	185	0,5	0,4	LSF2	180	0,75	0,3
LSF3	10	0,5	0,2	LSF3	10	0,5	0,2
gain	-80,5			gain	-80,5		
12,5 ≤ a < 50				12,5 ≤ a < 50			
LSF1	250	0,45	250	LSF1	255	0,55	280
HSF1	3200	0,5	2,5	HSF1	3200	0,5	2,5
LSF2	185	0,5	0,6	LSF2	185	0,45	0,32
LSF3	10	0,5	0,2	LSF3	10	0,5	0,2
gain	-80,5			gain	-80,5		
a ≥ 50				a ≥ 50			
LSF1	210	0,35	250	LSF1	180	0,35	260
HSF1	3200	0,5	2,5	HSF1	3200	0,5	2,5
LSF2	156	0,5	1,5	LSF2	165	0,5	1,4
LSF3	10	0,5	0,2	LSF3	10	0,5	0,2
gain	-80,5			gain	-80,5		

9 Literaturverzeichnis

- [1] BLAUERT J., XIANG N. "Acoustics for Engineers", 3rd Edition
- [2] LASCHCZOK S. A. "Schallabstrahlung biegeweicher Platten", Diplomarbeit Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart, Abteilung Akustik
- [3] ZOTTER F. "Bauphysik und Lärm", 14.09.2019
- [4] MÖSER M. "Technische Akustik", 27.09.2012
- [5] RINDEL J.H. "Sound Insulation in Buildings"
- [6] MEIER A. "Die Bedeutung des Verlustfaktors bei der Bestimmung der Schalldämmung im Prüfstand", Dissertation von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 20.06.2000
- [7] ÖNORM EN ISO 12354-1 Ausgabe: 2018-03-01, "Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen"
- [8] WESELAK W. "Technische Akustik", SS 2020
- [9] DIERINGER R. "Erweiterung der Rand-Finite-Elemente-Methode zur Analyse von Platten und Laminaten mit besonderem Fokus auf der Ermittlung von Singularitätsordnung an Rissen und Kerben", Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt, 02.12.2014
- [10] ROBERT J.M. Craik "Sound transmission through Buildings using Statistical Energy Analysis", Gower Publishing Ltd, Hampshire, Vermont, 1996
- [11] LENTZEN, S.S.K. e.a. "Prediction methods for sound and vibration for lightweight junctions of building elements" (in Niederländisch), TNO-Report 2010
- [12] SEWELL E.C. "Transmission of reverberant sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle", J. Sound Vibrat. 1970, 12 pp. 21–32
- [13] MAIDANIK G. "Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields" JASA. 1962, 34 pp. 809–826
- [14] NOVAK R.A. "Radiation from partially excited plates". Acta Acustica (Les Ulis). 1995, 3 pp. 561–567
- [15] DAVY J.L. "Predicting the sound insulation of single leaf walls – extension of Cremer's model". J. Acoust. Soc. Am. 2009, 126 (4) pp. 1871–1877
- [16] HOPKINS C. "Sound insulation". Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2007
- [17] JOSSE R., LAMURE J. "Transmission du son par une paroi simple", Acustica. 1964, 14 pp. 266–2807
- [18] HECKL M. "Schallabstrahlung von Platten bei punktförmiger Anregung", Acustica

9, S. 371-380, S. Hirzel-Verlag, Stuttgart, 1959

[19] CREMER L., KECKL M. "Körperschall", Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1967

[20] <https://de.wikipedia.org/wiki/Gütefaktor>