

Schalldämmung strukturierter Bleche

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und
Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen
Universität Cottbus-Senftenberg zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Carsten Langhof

geboren am 09. Dezember 1982 in Finsterwalde

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Heiko Schmidt

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ennes Sarradj

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sabine Langer

Tag der mündlichen Prüfung: 15. September 2014

Copyright / Rechtliche Bedingungen

Schalldämmung strukturierter Bleche von Carsten Langhof steht unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International. Um eine Kopie dieser Lizenz zu sehen, besuchen Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Sämtliche Rechte am Inhalt dieser Arbeit verbleiben beim Autor. Der Autor überträgt der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg das einfache Verbreitungsrecht, also das Recht, im Rahmen der gesetzlichen Aufgaben der Hochschulbibliotheken weitere Kopien dieser Dissertation herzustellen und zu verbreiten bzw. in Datennetzen zur Verfügung zu stellen.

Diese Arbeit darf heruntergeladen und frei verwendet werden, wenn sie entsprechend zitiert wird. Eine Bearbeitung von Inhalten jeglicher Art dieser Arbeit (Abbildungen, Tabellen, Text usw.) bedarf der schriftlichen Erlaubnis des Autors. Die Vervielfältigung und/oder Verbreitung der Dissertation aus kommerziellen Zwecken ist untersagt.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	iii
Formelzeichen	iii
Indizes	v
Spezielle Darstellungen	v
Abkürzungen	vi
Danksagung	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	3
3 Material und Methoden	9
3.1 Strukturierte Bleche	9
3.1.1 Definition und Eigenschaften	9
3.1.2 Fertigung	11
3.1.3 Parametrisierung	13
3.2 Analytische Methoden	13
3.2.1 Isotrope Einfachwand	13
3.2.2 Orthotrope Einfachwand	18
3.2.3 Isotrope Doppelwand	20
3.2.4 Orthotrope Doppelwand	22
3.3 Numerische Rechenmethoden	23
3.3.1 Finite-Elemente-Methode	23
3.3.2 Simulation der Anregung	30
3.3.3 Simulation der Abstrahlung	34
3.4 Messung der Luftschalldämmung	36
3.4.1 Messmethode	36

3.4.2	Fensterprüfstand	37
3.4.3	Einbau der Messproben	38
3.4.4	Durchführung der Messungen	39
3.4.5	Fehlerbetrachtung und Fehlerdiskussion	43
4	Ergebnisse	51
4.1	Schalldämmung einschaliger Wände	51
4.1.1	Glatte Wände	51
4.1.2	Strukturierte Wände	56
4.1.3	Einfluss verschiedener Parameter	63
4.2	Schalldämmung doppelschaliger Wände	72
4.2.1	Doppelwand aus glatten Schalen	72
4.2.2	Doppelwand aus strukturierten Schalen	75
4.2.3	Einfluss verschiedener Parameter	77
5	Zusammenfassung	89
	Literaturverzeichnis	93
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis	107
A	Vollständige Messergebnisse	109
B	Eingabedatei FEM	113

Nomenklatur

Formelzeichen

A	[m ²]	äquivalente Schallabsorptionsfläche
B'	[Nmm ²]	Biegesteifigkeit einer Platte
c	[m/s]	Schallgeschwindigkeit der Luft
c_p	[kJ/kg/K]	spezifische Wärmekapazität, isobar
c_v	[kJ/kg/K]	spezifische Wärmekapazität, isochor
\mathbf{C}		Koppelmatrix
d	[mm]	Blech-/Wanddicke
e		Exponent
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul eines Werkstoffes
f	[Hz]	Frequenz
f_g	[Hz]	Grenzfrequenz
f_k	[Hz]	Koinzidenzfrequenz
f_n	[Hz]	Resonanzfrequenzen des Zwischenraumes einer Doppelwand
f_r	[Hz]	erste Resonanzfrequenz einer Doppelwand
F	[N]	Kraft
\mathbf{F}		Kraftvektor
G	[N/mm ²]	Schubmodul eines Werkstoffes
$G(r)$		Greensche Funktion
$\tilde{G}(r)$		lokale Greensche Funktion
h	[mm]	Wabenhöhe
I	[W/m ²]	Schallintensität
I_z	[mm ⁴]	Flächenträgheitsmoment
j		imaginäre Einheit
k	[m ⁻¹]	Wellenzahl
k_B	[m ⁻¹]	Biegewellenzahl
\mathbf{K}		Steifigkeitsmatrix
L_p	[dB]	Terz-Schalldruckpegel
m''	[kg/m ²]	flächenbezogene Masse
\mathbf{M}		Massenmatrix
n		fortlaufende Zahl (1,2,3, ...)
o		Orthotropiegrad
p	[Pa]	Schalldruck
P	[W]	Schalleistung
q	[m ³ /s]	Schallenergiefluss

r		Reflexionsfaktor
R	[dB]	Schalldämmmaß
R_θ	[dB]	Schalldämmmaß für unter einem Winkel θ einfallende ebene Wellen
s	[mm]	Stegbreite strukturierter Bleche
S	[m ²]	Oberfläche Wand/Prüfgegenstand
t	[s]	Zeit
T	[s]	Nachhallzeit
u	[m]	Verschiebung
v	[m/s]	Schallschnelle
V	[m ³]	Volumen
w	[Ws/m ³]	Schallenergiedichte
Y	[m ³ /N/s]	Admittanz
Z	[Ns/m ³]	Impedanz
Z_0	[Ns/m ³]	Schallkennimpedanz Luft
Z_w	[Ns/m ³]	Wandimpedanz
Γ	[m ²]	Rayleigh-Oberfläche
η	[%]	Dämpfungsverlustfaktor
η_L	[μ Pa s]	dynamische Viskosität
θ	[°]	Einfallswinkel
λ	[m]	Luftschallwellenlänge
λ_B	[m]	Biegewellenlänge
λ_w	[W/m/K]	Wärmeleitfähigkeit
ν		Querkontraktionszahl
π		Kreiszahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte eines Werkstoffes
ρ_0	[kg/m ³]	Dichte der Luft
τ		Transmissionsgrad
ϕ	[°]	Winkel in der Plattenebene einer orthotropen Platte
Φ	[m ² /s]	Potenzial der Schallschnelle
ω	[rad/s]	Kreisfrequenz

Indizes

1, 2	Parameter der ersten oder zweiten Schale bei einer Doppelwand, oder: Sende- bzw. Empfangsraum
12	von Senderraum 1 nach Empfangsraum 2
diff	für diffusen Schalleinfall
DW	Doppelwand
e	einfallend
eff	effektiv
EW	Einfachwand
f	Fluid
ges	gesamt
i	isotrop
kin	kinetisch
max	maximal
min	minimal
n	Größe normal zur Oberfläche wirkend
o	orthotrop
pot	potenziell
s	Struktur
t	transmittiert
x, y	Parameter in x- oder y-Richtung innerhalb der Plattenebene bei Orthotropie
w	auf der Wandoberfläche

Spezielle Darstellungen

\bar{p}	zeitlicher Mittelwert
\tilde{p}	Effektivwert
\hat{p}	Amplitudenwert
\underline{p}	komplexe Größe
$\overline{p^*}$	konjugiert komplexe Größe
\boldsymbol{p}	Vektor
\boldsymbol{P}	Matrix

Abkürzungen

BEM	Randelemente-Methode (Boundary Element Method)
CAD	Computergestütztes Konstruieren (Computer Aided Design)
FEM	Finite-Elemente-Methode
MDF	Mitteldichte Holzfaserverplatte
PSD	Spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density)
SEA	Statistische Energieanalyse
SW	Schlüsselweite der Strukturierungen
WPS	Widerstands-Punktschweißen

Danksagung

Ich möchte Herrn Prof. Dr.-Ing. Ennes Sarradj sehr herzlich danken für die hervorragende fachliche Betreuung, für viele ergiebige Diskussionen, für zahlreiche Anregungen, für sehr viel Geduld und Ermutigungen und für die Möglichkeit, im Rahmen meiner Tätigkeit als Stipendiat und akademischer Mitarbeiter an der Professur Technische Akustik diese Arbeit anfertigen zu können.

Frau Prof. Dr.-Ing. Sabine Langer danke ich, dass sie sich dazu bereit erklärt hat, das Zweitgutachten für diese Dissertation anzufertigen.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Heiko Schmidt für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission im Rahmen des Promotionsverfahrens.

Bei meinen ehemaligen Kollegen Anna-Sophia Henke, Dr. Thomas Geyer, Gert Herold, Dr. Jens Giesler, Christoph Fritzsche und Marcus Hobracht möchte ich mich für die tolle Zusammenarbeit, die vielen fachlichen Diskussionen, die das eine oder andere Problem besser zu verstehen und zu lösen halfen, und die immer sehr nette Gesellschaft herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Falko Krüger, der in seiner damaligen Tätigkeit als studentische Hilfskraft in zwei Messkampagnen mit Rat und Tat maßgeblich zur Gewinnung von wichtigen Messergebnissen beitrug.

Für die Gewährung eines mehrjährigen Stipendiums im Rahmen der Fachklasse „DESTRUKT“ der International Graduate School möchte ich der BTU Cottbus-Senftenberg danken, ebenso danke ich allen ehemaligen Kommilitonen dieser Fachklasse sowie den Mitarbeitern der Nachwuchsforschergruppe „Innostructure“ für die sehr gute fachliche Zusammenarbeit und den Austausch von Daten und Ideen.

Für die Hilfe und Unterstützung bei der Korrektur der Arbeit danke ich Herrn Wilfried Sagrodnik.

Besonders danke ich meinen lieben Eltern Roswitha und Uwe und meiner lieben Schwester Sandra, die mich während des langen Ausbildungsweges stets unterstützten, und meiner lieben Freundin Laura für sehr viel Geduld und mentaler Unterstützung.

Kapitel 1

Einleitung

Im Fahrzeug- und Flugzeugbau finden nach wie vor Bleche und daraus zusammengesetzte Konstruktionen eine breite Anwendung. Häufig ist Gewichtsersparnis durch Leichtbau eines der Kriterien im Entwurfsprozess, die den Aufbau des zu konstruierenden Produktes bestimmen. Die mechanischen Eigenschaften ebener Platten, die, aus metallischen Werkstoffen bestehend, als Bleche ausgeführt sind oder auch aus verschiedenen anderen Werkstoffen bestehen können, werden durch Einbringen einer regelmäßigen Strukturierung gezielt verändert. Durch dieses periodische Einprägen von dreidimensionalen Geometrieelementen in Blechbauteilen lassen sich die Biegesteifigkeiten in unterschiedlichen Bauteilachsen in gewünschter Art beeinflussen und erhöhen. So entsteht ein flächiges Leichtbauhalbzeug, wie es beispielhaft in Abbildung 1.1 gezeigt wird.

Solche strukturierten Bleche bieten großes Potenzial für den Leichtbaueinsatz, da durch eine geringere Blechdicke und damit durch einen reduzierten Materialeinsatz ähnliche Biegesteifigkeiten wie mit unstrukturierten Blechen erzielt werden können. Ebenso bieten Konstruktionen aus strukturierten Blechen eine höhere Biegesteifigkeit in verschiedenen Achsen bei gleicher Blechdicke und damit dem gleichen Masseinsatz gegenüber Bauteilen aus glattem Blech.

Die Schalldämmungseigenschaften von einzelnen Blechen und zur Doppelwand zusammengesetzter Bleche mit wabenförmiger Strukturierung ist von besonderem Interesse. Einerseits ist zur Verwendung innerhalb der industriellen Entwicklung und Auslegung eines Produktes in der Verkehrstechnik die Möglichkeit einer Vorhersage des akustischen Verhaltens sehr wünschenswert. Während glatte Bleche als isotrop angesehen werden können, weisen die strukturierten Bleche orthotrope Eigenschaften auf. Auch wenn die Biegesteifigkeit gegenüber glatten Blechen gleicher Dicke erhöht sein kann, so ist sie nicht bezüglich aller Richtungen in der Bauteilebene gleich. So wird andererseits eine mögliche Verringerung der Luftschalldämmung gegenüber glatten Blechen erwartet.

Ein trivialer Grund dafür ist die reduzierte flächenbezogene Masse bei möglichst gleich bleibender Steifigkeit, wenn das Halbzeug als Leichtbaustruktur eingesetzt wird. Jedoch besitzen orthotrope Platten einen weiteren Nachteil, wenn man sie im Vergleich zu gleich schweren isotropen Platten betrachtet. Eine isotrope Platte besitzt einen Frequenzbereich mit einer sogenannten Grenzfrequenz. Die Lage dieses Bereichs hängt unter anderem von der Biegesteifigkeit ab und in diesem ist die Schalldämmung verringert. In einem Bereich unterhalb dieser Frequenz ist die Schalldämmung weitestgehend massebestimmt und steigt mit der Frequenz an, oberhalb ist sie durch Dämpfung bestimmt und steigt weiterhin mit zu-

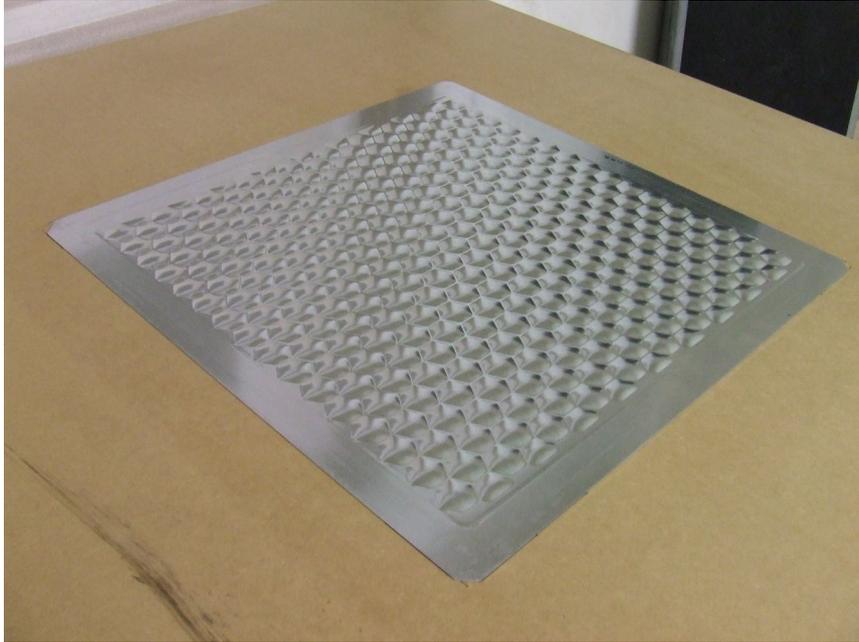


Abbildung 1.1: Mit einer hexagonalen Wabenstruktur versehenes, strukturiertes Blech in einem Hilfsrahmen

nehmender Frequenz an. Da eine orthotrope Platte unterschiedliche ausrichtungsabhängige Biegesteifigkeiten besitzt, weist sie auch verschiedene Grenzfrequenzen auf. Dadurch vergrößert sich der Bereich mit verringerter Schalldämmung und verlagert sich zusätzlich mit einem Ansteigen der Biegesteifigkeit in tiefere Frequenzbereiche. Somit wird insgesamt der Frequenzbereich verringerter Schalldämmung größer und in tiefere Frequenzen verlagert.

In dieser Arbeit wird die Luftschalldämmung der strukturierten Bleche untersucht und Möglichkeiten zur Vorhersage dieser klassifiziert. Dazu werden Ergebnisse von Untersuchungen an Einfachwänden aus glatten und strukturierten Blechen miteinander verglichen und die akustischen Unterschiede näher betrachtet. Als eine Erweiterung dessen werden die Betrachtungen auf die komplexere Konstruktion einer Doppelwand, bestehend aus diesen Blechen, ausgedehnt. Es werden wichtige Einflussfaktoren auf die Schalldämmung der strukturierten Bleche untersucht und diskutiert. Der betrachtete Frequenzbereich erstreckt sich von tiefen über mittlere Frequenzen bis auf etwa 10 kHz und teils darüber hinaus, da mögliche Effekte aufgrund der Orthotropie im höherfrequenten Bereich ebenso ermittelt und untersucht werden sollen.

Für diese Untersuchungen und ebenso in einer möglichen industriellen Anwendung ist die schnelle und kostengünstige rechnerische Modellierung und Simulation ein wichtiges Werkzeug, um in kurzer Zeit verschiedene Werkstoff- und Geometrieparameter untersuchen zu können. So wurde mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) die numerische Berechnung der Schalldämmung durchgeführt. Solch eine Quantifizierung und Berechenbarkeit der Unterschiede in der Schalldämmung ermöglichen erst den Einsatz in Produktentwicklungsprozessen.

Schließlich werden zum Vergleich Ergebnisse aus Messungen der Schalldämmung an Blechen mit wabenförmiger Struktur und glatten Referenzblechen vorgestellt, und die erzielten Berechnungsergebnisse werden durch diese bestätigt und validiert.

Kapitel 2

Stand der Forschung

Die Problematik der Schalldämmungsbestimmung von Einfach- und Doppelwänden aus isotropen und orthotropen Blechen ist nicht gerade neu, sondern in vielen Mechanismen sehr gut untersucht. Vor allem die Schalldämmung glatter Einfach- und Mehrfachwände ist im Allgemeinen sehr gut berechenbar und somit vorhersagbar. Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Untersuchung des Verhaltens der Schalldämmung von strukturierten Blechen mit den speziellen Geometrien, die aus wabenförmigen Strukturen bestehen.

Das Schalldämmmaß eines Bauteils kann auf verschiedenen Wegen und mit verschiedenen Werkzeugen und Methoden bestimmt werden. Durch Messungen ist es möglich, eine gute Vergleichsbasis zu anderen Methoden zu erhalten. Auf analytischen Formeln basierende Methoden bieten eine weitere Möglichkeit der Berechnung des Schalldämmmaßes von Bauteilen. Zu diesen sind ebenfalls statistische Methoden wie die statistische Energieanalyse (SEA) hinzuzurechnen. Weitere, oft rechenleistungsintensive Verfahren sind die numerischen Verfahren wie die Finite-Elemente-Methode und die Randelemente-Methode (BEM).

Der einfachste Fall der Ermittlung des Schalldämmmaßes einer Einfachwand, die aus einem glatten, isotropen Material besteht, wurde von Rayleigh et al. [63] analytisch untersucht, unter der Berücksichtigung von Wellen des Luftschalls und von auf der Wand entstehenden Wellen.

Der Verlauf des Schalldämmmaßes eines ebenen, isotropen Bauteils über der Frequenz dargestellt gliedert sich in mehrere Teile. Das Schalldämmmaß von Wänden und Platten hängt in einem großen Frequenzbereich, beginnend im sehr tiefen Bereich oberhalb der ersten Eigenfrequenz, von der flächenbezogenen Masse und damit von der Dichte und der Dicke der Konstruktion ab. Mit steigender Frequenz steigt das Schalldämmmaß an, und zwar um theoretisch 6 dB mit jeder Oktave. Ebenso steigt das Schalldämmmaß um 6 dB bei Verdoppelung der flächenbezogenen Masse an. Dies wird als Massegesetz nach Berger bezeichnet [57].

Da bei Anregung jede Wand freie BiegeWellen auf ihrer Oberfläche mit einer bestimmten Wellenlänge ausbilden kann, abhängig unter anderem von der Biegesteifigkeit und der Dicke der Wand, gibt es eine bestimmte Frequenz und damit Wellenlänge einer unter einem bestimmten Winkel einfallenden Luftschallwelle, bei der die auf die Wandoberfläche projizierte Luftschallwellenlänge mit der BiegeWellenlänge übereinstimmt. Dies sind die Koinzidenzfrequenzen. Für streifenden Schalleinfall ist die Koinzidenzfrequenz am klein-

sten, dies ist die Grenzfrequenz. Mit weiter ansteigender Frequenz im Bereich der Gültigkeit des Bergerschen Massegesetzes nähert man sich diesem Bereich der Koinzidenzfrequenzen. Dort verringert sich das Schalldämmmaß aufgrund der nahezu widerstandsfreien Schallenergieübertragung. Cremer hat sich mit dem Begriff der Koinzidenz zwischen Luftschallwellenlänge und Biegewellenlänge und die damit einhergehenden Effekte ausführlich beschäftigt. Das Schalldämmmaß der Einfachwand ist abhängig vom Einfallswinkel der ebenen Wellen. Ebenso untersuchte Cremer [12] das Schalldämmungsverhalten von Wänden unter schrägem Schalleinfall und leistete entscheidende Grundlagenarbeit in Bezug auf die analytische Berechnung der Luftschalldämmung mit Einfallswinkelabhängigkeit.

Schoch [66] erweitert Cremers Betrachtungen auf Platten mit Balkenbegrenzung, diskutiert Ausnahmen und überprüft die Ergebnisse experimentell. Es wurde bereits früh versucht, ein möglichst großes Schalldämmmaß bei gegebenen Parametern zu erzielen [45].

Heckl [36] stellte analytische Beziehungen zur Berechnung des Schalldämmmaßes von endlichen Platten auf, deren Größe berücksichtigt wird und die in senkrecht zu ihnen angeordneten Seitenwänden eingebaut und so mit ihnen verbunden sind.

Auch die Schallabstrahlung wurde bereits früh von Gösele betrachtet [27].

Die analytisch ermittelten Werte der Schalldämmung müssen stets durch Messungen überprüft werden. So findet man bereits frühzeitig den Vergleich von beispielsweise den Ergebnissen von Schalldämmungsmessungen von Wänden aus drei verschiedenen Materialien mit einer modifizierten Version der theoretischen Behandlung von Cremer [49].

Literatur zu Messungen der Luftschalldämmung in Prüfständen mit besonderer Berücksichtigung von Fehlereinflüssen und Korrekturen wurde ebenfalls veröffentlicht. Gösele [29] untersucht bauakustisch den Einfluss der Flankenübertragung und die Eckverbindungen von gesamten Wänden und Decken.

In einer Anzahl von 24 verschiedenen Laboratorien wurden von Fausti [24] das Schalldämmmaß von Einfach- und Doppelwänden aus Gipskarton ermittelt und die Abweichungen miteinander verglichen.

Meier [55] untersucht sehr grundlegend die messtechnische Ermittlung des Schalldämmmaßes von Bauteilen und diverse Einflüsse darauf mit Fokus auf dem Bauteilverlustfaktor.

Wittstock beschäftigt sich mit Unsicherheiten im Messaufbau, Messverfahren und Messtechnik und statistischen Einflüssen auf die Ergebnisse von Schalldämmungsmessungen [80, 81, 82, 83].

Simmons [71] misst die Luftschalldämmung von Bauteilen in acht verschiedenen Testeinrichtungen und vergleicht diese nach Abweichungen.

Die analytischen Methoden sind häufig auf bestimmte Frequenzbereiche beschränkt oder ungenau in sehr tiefen oder sehr hohen Frequenzbereichen. Ergänzend zu den analytischen Verfahren kann man in einem genügend hohen Frequenzbereich die Statistische Energieanalyse als geeignete Methode anwenden. Mit Hilfe dieser betrachtet man die Übertragung der Schallenergie zwischen einzelnen Subsystemen der zu untersuchenden Konstruktion im Mittel und berechnet so das Schalldämmungsverhalten. Sewell [67] untersucht freie und erzwungene Übertragung von Schallenergie und vergleicht die Ergebnisse mit denen, die mit der SEA ermittelt wurden. Crocker [15] vergleicht Ergebnisse aus Berechnungen mit

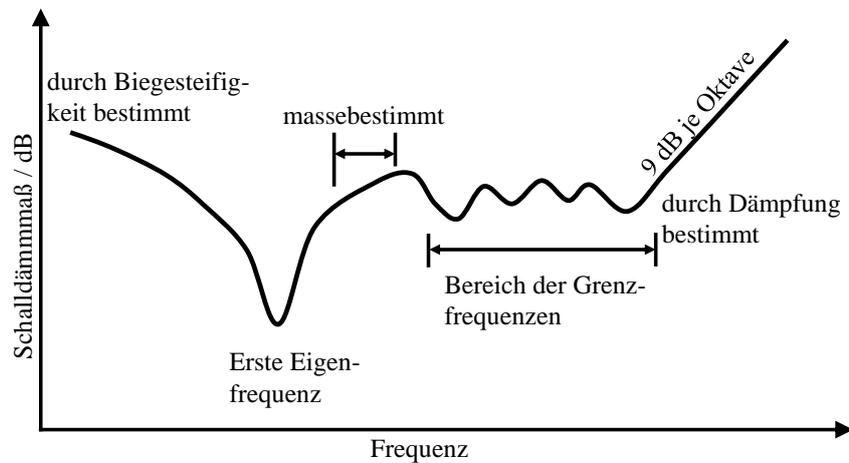


Abbildung 2.1: Verlauf des Schalldämmmaßes für orthotrope Platten [5]

dieser Methode mit der Theorie und Messergebnissen. Die SEA findet weite Anwendung auch in der Bauakustik [10].

Neben den analytischen Verfahren existiert eine Reihe von numerischen Verfahren zur Berechnung der Schalldämmung. Freedman [25] führte numerische Berechnungen des Schalldämmmaßes mit einer Resonanzmethode durch. Ebenso werden iterative Verfahren angewendet [62].

Ein wichtiges Werkzeug in den ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen allgemein und ebenso in der Berechnung des akustischen Verhaltens von Bauteilen ist die Finite-Elemente-Methode. Diese ist aufgrund der nötigen Zerlegung und Diskretisierung des Rechengebietes in einzelne Elemente entsprechend der Luftschallwellenlänge oder der Körperschall-Biegewellenlänge in ihrer Anwendbarkeit durch die Frequenz nach oben hin beschränkt und vor allem für niedere und mittlere Frequenzbereiche geeignet. Mit der FEM führt Ackermann [1] umfangreiche Berechnungen der Schalltransmission durch Einfach- und Doppelwände durch. Die FEM ergänzt in der Anwendung auch häufig die SEA [73].

Abbildung 2.1 zeigt den allgemeinen Verlauf des Schalldämmmaßes einer orthotropen Platte [5]. Die Luftschalldämmung einer orthotropen Platte ist ähnlich der einer isotropen Platte, es gibt jedoch folgende Unterschiede: Die orthotrope Platte besitzt global eine höhere und in verschiedenen Plattenachsen, also den orthotropen Richtungen, variierende Biegesteifigkeit und somit auch in einer bestimmten Achse eine maximale und in einer anderen eine minimale Biegesteifigkeit. Somit ergeben sich im höheren Frequenzbereich unterschiedliche Grenzfrequenzen in diesen Richtungen. Für den Verlauf des Schalldämmmaßes bedeutet dies, dass sich der Bereich mit verringerter Schalldämmung verbreitert und über einen größeren Frequenzbereich, nämlich zwischen diesen Grenzfrequenzen, erstreckt. Zusätzlich verlagert sich dieser Bereich in tiefere Frequenzbereiche aufgrund der erhöhten Steifigkeit. Somit stellt sich insgesamt eine verringerte Schalldämmung gegenüber einer gleich schweren glatten Wand ein.

Heckl [35] untersuchte das Schalldämmmaß von orthotropen Platten und gibt Ergebnisbeispiele für gewellte Geometrien.

Der Einfluss der Randbedingungen auf die Schalldämmung von orthotropen Platten im unteren Frequenzbereich wurde ebenfalls untersucht, teils unter Wahl eines semianalytischen Ansatzes [84]. Die FEM wurde ebenfalls zur Studie des Schalldämmungsverhaltens von orthotropen Platten eingesetzt [9].

Bosmans [7] stellt analytische Lösungen bereit zur Studie von dünnen, orthotropen Platten. Maysenhölder untersucht orthotrope Platten ebenfalls analytisch [52, 53, 54].

Eine orthotrope Platte kann als isotrop behandelt werden, wenn die Grenzfrequenzen weniger als eine Oktave auseinander liegen, indem man die effektive Biegesteifigkeit benutzt und so die Berechnung vereinfacht [13].

Zur Verbesserung und Erhöhung der Schalldämmung bei gleicher flächenbezogener Masse ist gegenüber einer Einfachwand eine Doppelwand aus zwei Schalen geringerer Dicke als die Schale der Einzelwand geeignet. Die Schalldämmung der isotropen Doppelwand wurde bereits sehr früh untersucht. Die ersten Veröffentlichungen dazu findet man bei Faggiani [21] und Beranek [4]. London [50] betrachtet theoretisch und im Experiment eine Doppelwand aus zwei identischen Schalen mit guter Übereinstimmung der Ergebnisse. Der Einfluss der Biegesteifigkeit auf die Ergebnisse der Luftschalldämmung von Doppelwänden wurde ebenfalls untersucht [28]. Daneben gibt es eine große Anzahl an weiteren Veröffentlichungen zum Schalldämmungsverhalten der isotropen Doppelwand [79, 58, 16, 69, 30]. 1981 wurden erweiterte Beispiele zu ermittelten Schalldämmmaßen von Einfach- und Doppelwänden gegeben [37]. Neuere Betrachtungen bieten ebenfalls eine gute Übersicht über den aktuellen Erkenntnisstand [31, 76, 17, 18, 47, 64, 59, 6, 42, 43, 44, 3, 78].

Einen guten Überblick über viele bekannte Methoden zur analytischen Berechnung des Schalldämmmaßes von Doppelwänden bietet Hongisto [38, 39]. Er listet nicht weniger als 17 Berechnungsmethoden aus Veröffentlichungen anderer Autoren auf, berechnet diese erneut und vergleicht diese miteinander nach verschiedenen Kriterien und nach ihren Abweichungen. Dabei sind teilweise flexible oder steife Verstreben in regelmäßigen Abständen der einzelnen Schalen in den Modellierungen vorgesehen und fast immer die Möglichkeit einer Absorption im Zwischenraum. Auch in sehr vielen Buchveröffentlichungen wird eine entsprechende Auseinandersetzung mit dem Schalldämmungsverhalten der Doppelwand durchgeführt [22, 40].

Die aktive Kontrolle der Schallübertragung von Doppelwänden zur Vergrößerung der Schalldämmung war ebenfalls von Interesse [61].

Der Gebrauch von numerischen Methoden ist auch für die Bestimmung des Schalldämmmaßes von Doppelwänden von Bedeutung. Panneton [60] untersucht mit Hilfe der FEM die Schalldämmung von Doppelwänden und modelliert neben einer Füllung des Zwischenraumes mit Luft auch ein poroelastisches Absorbermaterial zwischen die Einzelschalen. Sgard [68] untersucht mit ähnlichen Methoden einen ähnlichen Aufbau und Anordnung der Doppelwand in einem tiefen Frequenzbereich. Langer [46] modelliert mehrschichtige Verbundglasscheiben und die daraus hervorgehende Berechnung der Schalldämmung mit einer Kombination aus Finite-Elemente-Methode und Randelemente-Methode, wobei die Strukturen und das sie umgebende Fluid diskretisiert werden. Legault [48] berechnet mittels FEM das Schalldämmmaß von Leichtbauwänden und untersucht den Einfluss

von Zwischenverbindungen der einzelnen Schalen untereinander auf die Ergebnisse. Diese vergleicht er mit Messergebnissen.

Die Ergänzung der FEM durch die SEA wird bei der Doppelwand ebenso angewandt [70]. Über die reine SEA zur Anwendung auf Doppelwände wurde umfangreich veröffentlicht [11]. Die SEA wurde ebenfalls erweitert um die SmEdA (Statistische modale Energieverteilungs-Analyse) zu einem hybriden Verfahren [74].

Eine Doppelwand aus zwei orthotropen Schalen wurde dagegen bisher weniger häufig untersucht. Guyader berechnet die Schalldämmung durch eine Kombination von statistischen und analytischen Verfahren in Ergänzung der Schwingmoden [33, 32, 34].

Es zeigt sich, dass das Verhalten der Schalldämmung von glatten Einfach- und Doppelwänden durch die drei Methoden der Messung, der numerischen Berechnung mit der FEM und BEM und durch analytische Formulierungen sehr gut erschlossen und erforscht ist. Ebenfalls sind die orthotropen Platten in ihrem Verhalten hinlänglich bekannt und gut zu beschreiben. Jedoch gibt es wenige Erkenntnisse über die Eigenheiten im Schalldämmungsverhalten einer regelmäßigen periodischen Struktur, die in eine Platte eingebracht ist. Weiterhin ist das mögliche Verhalten einer Doppelwand, die aus solchen Platten gefertigt ist, kaum bekannt. In dieser Arbeit sollen Erkenntnisse zu strukturierten Einfachwänden durch Messungen und Berechnungen gewonnen werden. Weiterhin soll das Verhalten der Schalldämmung einer orthotropen Doppelwand, aufgebaut aus strukturierten Platten, beschrieben werden. Eine weitere offene Frage ist, wie gut die Möglichkeiten der FEM sind, strukturierte Platten hinsichtlich ihrer Schalldämmung bis in höhere Frequenzbereiche richtig zu berechnen.

Kapitel 3

Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die untersuchten strukturierten Bleche und Konstruktionen aus strukturierten Blechen beschrieben und ihre Herstellung erläutert. Weiterhin werden die verwendeten Ansätze und Methoden vorgestellt.

3.1 Strukturierte Bleche

In diesem Abschnitt werden die strukturierten Bleche, wie sie in den Untersuchungen verwendet werden, beschrieben. Es werden ihre besonderen Eigenschaften vorgestellt und alle untersuchten Typen mit ihren spezifischen Parametrisierungen und zugehörigen Parametern aufgelistet.

3.1.1 Definition und Eigenschaften

Strukturierte Halbzeuge sollen hier als solche definiert werden, die verschiedenste lokale Geometriemerkmale aufweisen können. Diese Merkmale verändern die mechanischen Eigenschaften gegenüber unstrukturierten Halbzeugen. Im Folgenden sind diese Halbzeuge strukturierte Bleche jeder Art, die sich durch diese lokalen Merkmale von glatten Blechen unterscheiden.

Zuerst wird eine Systematisierung vorgenommen. Die lokalen Geometriemerkmale oder Strukturen können sehr unterschiedlich geformt und angeordnet sein, aber stets so, dass die Bleche keinen glatten Blechen entsprechen.

Die Strukturen sind einerseits nach zweidimensionaler und dreidimensionaler Ausprägung zu unterscheiden. Bei einer zweidimensionalen Strukturierung verändert sich somit die globale Blechgeometrie nur in einer Richtung, normal dazu bleibt sie konstant. Dagegen beeinflussen dreidimensionale Strukturen die globale Blechgeometrie in jeder betrachteten Richtung.

Ebenso kann eine Differenzierung zwischen einer Anordnung nach einer Regelmäßigkeit und einer willkürlichen oder stochastischen Verteilung über die Blechoberfläche erfolgen. Eine periodische Anordnung folgt dabei einem Muster, wohingegen eine willkürliche Anordnung die gezielte Veränderung lokaler Regionen des Bleches durch eine bestimmte Strukturierung ermöglicht.

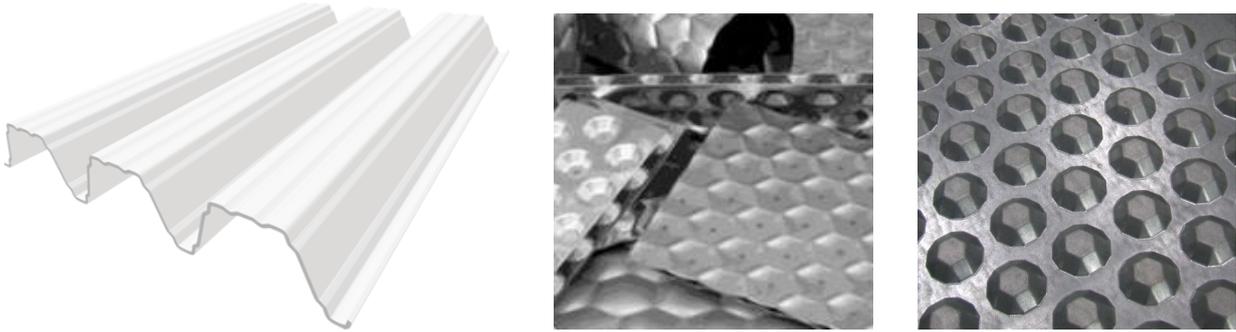


Abbildung 3.1: Trapezblechgeometrie als Beispiel einer orthotropen Platte (links) und Geometrien von wabenförmig strukturierten Blechen (mittig) sowie als Pyramidenstumpf ausgeführte, strukturierte Bleche (rechts)

Eine weitere Variation kann die Art und das Verfahren der Implementierung der Struktur sein. So kann die Struktur aus dem Blech selbst bestehen und aus einem vorher glatten Blechrohling umgeformt sein und somit die Blechdicke innerhalb der Geometrie konstant sein. Es können aber auch mittels diverser Fügeverfahren Strukturen und Geometrien lokal und global auf einem glatten Blech befestigt werden. Somit ist auch die Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe zwischen Trägerblech und Strukturierung möglich. Weiterhin kann auch durch Wegnahme von Material eine Struktur in einem Blech erzeugt werden. Dies alles stellt nur eine sehr grobe Systematisierung nach verschiedenen Unterscheidungsmerkmalen dar.

Es sind generell viele weitere mögliche Geometrien und Anordnungen von Halbzeugen als Arten von strukturierten Blechen interpretierbar. Prinzipiell kann man jede Konstruktion mit Elementen, die zur Versteifung von Platten beitragen, als strukturierte Bleche betrachten. Als eine weniger flächenhafte Geometrie kann man diverse Strangpressprofile ansehen, die ebenfalls sehr komplexe Querschnittsgeometrien besitzen können. Weiterhin sind versteifte Glattbleche, Trapezbleche, Strukturen in Form eines Pyramidenstumpfes oder auch Sickenbleche mögliche Varianten. In Abbildung 3.1 sind einige Beispiele dargestellt. Eine Weiterführung der flächenhaften Bauteile, die vergleichsweise leicht und steif sein sollen, sind sandwichartige Konstruktionen. Da diese jedoch eine feste, oft flächige und nicht nur punktuelle Verbindung der Schalen, hier Häute genannt, mit dem Kern besitzen, stellen sie eine eigene Kategorie dar und sollen hier nicht weiterführend betrachtet werden.

Strukturierte Bleche unterscheiden sich von glatten Blechen durch bestimmte Eigenschaften und Kriterien. Ein Hauptmerkmal ist die Veränderung der Biegesteifigkeit B' des Bleches bezogen auf verschiedene Achsen innerhalb der Blechebene. Die Biegesteifigkeit ist direkt proportional zum Elastizitätsmodul E , welcher nur vom Material abhängt, und dem Flächenträgheitsmoment I_z :

$$B' \sim EI_z. \quad (3.1)$$

Somit bestimmt die Geometrie des Querschnitts senkrecht zur betrachteten Richtung der Blechebene die Biegesteifigkeit in dieser Richtung. In den meisten Fällen resultiert dies in einer Erhöhung der Biegesteifigkeit, was sehr häufig der gewünschte Effekt für Anwendungen ist. Ist die flächenbezogene Masse des strukturierten Bleches gleich der des glatten Bleches, so kann es eine höhere Biegesteifigkeit bei gleicher Masse aufweisen und besitzt damit gute Eigenschaften für den Leichtbaueinsatz.



Abbildung 3.2: Blick auf einen Teil der Presse zur Fertigung strukturierter Bleche durch Hydroumformung, mit sichtbarer Matrize mit Wabenstruktur und gummierter, entleerter Membran

Ebenso kann die Biegesteifigkeit in bestimmten Richtungen auch geringer sein. Dies ist der Fall, wenn eine Blechdickenreduzierung entlang einer Geraden erfolgt. Infolgedessen ist die Biegesteifigkeit in der Richtung rechtwinklig zu dieser Geraden geringer.

Der mögliche Anwendungsbereich der strukturierten Bleche und Halbzeuge erstreckt sich über ein weites Feld. Als eine Hauptanwendung ist die Verwendung in Bereichen des Leichtbaus anzusehen. Moderne Leichtbauanwendungen finden sich in der Automobilindustrie und in der Luftfahrt wieder, da dort eine hohe Energie- und Ressourceneffizienz eine große Bedeutung hat. Auch in der Bauindustrie lassen sich Strukturbleche applizieren, nicht zuletzt wegen einer speziellen optischen Wahrnehmung. Da erste Untersuchungen eine Reduzierung des Umströmungswiderstandes für bestimmte Strukturgeometrien und -größen zeigten [8], gibt es ebenfalls Potenzial, Gebäudefassaden und turmartige Konstruktionen wie Windkraftanlagen so auszuführen und herzustellen, dass sie eine verringerte Windlastaufnahme aufweisen. Auch in Anwendungen, in denen eine Wärmeübertragung durch das strukturierte Bauteil hindurch gewünscht ist, bieten sich aufgrund der vergrößerten Oberfläche Möglichkeiten der Einbindung.

3.1.2 Fertigung

Um strukturierte Bleche herzustellen, existieren je nach applizierter Struktur verschiedenste Verfahren. Vorgefertigte Strukturen, die auf ein glattes Blech aufgebracht werden sollen, können mittels Schweiß- oder Klebverfahren befestigt werden. Profilierte Walzen erzeugen Trapez- und Wellbleche aus Bandstahl.

Weitere Verfahren zur Blechstrukturierung sind die Tiefziehverfahren. Dabei werden mittels Stempel und Matrize, die je die gewünschte Struktur auf ihrer Oberfläche nachbilden, in glatten Rohlingen die Strukturierungen eingeprägt.

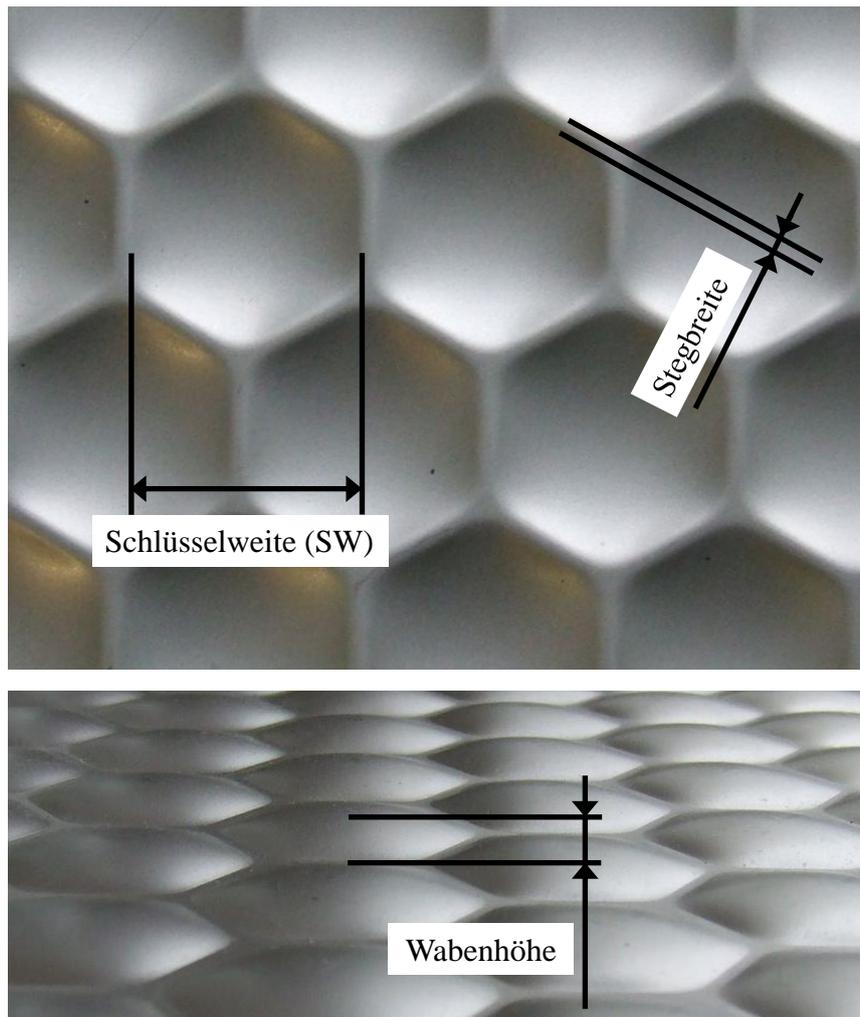


Abbildung 3.3: Geometriedefinitionen bei der verwendeten Strukturart

Die Fertigung der in diesen Untersuchungen verwendeten strukturierten Bleche geschieht an einem Institut der BTU Cottbus-Senftenberg durch ein wirkmedienbasiertes Umformen, genauer Hydroumformung, indem ein glattes Blech als Rohling in eine Matrize eingelegt wird. Diese Matrize befindet sich auf der Unterseite einer Presse. An deren Oberseite ist ein gummiertes Membrankissen befestigt, das beim Fertigungsverfahren mit einem Wirkmedium, in diesem Fall Wasser, bis zu einem bestimmten Druck gefüllt wird [41, 26]. Die Tiefe der Struktur hängt dabei vom eingestellten Maximaldruck im Membrankissen ab. Das Membrankissen ist ebenso wie die Matrize und die zu fertigenden Bleche quadratisch, die strukturierte Fläche besitzt nach Fertigungsverfahren eine Seitenlänge von 587 mm. Die Matrize besitzt Aussparungen in Form der zu fertigenden Struktur, im vorliegenden Falle die sechseckige Wabenstruktur. Durch den innerhalb der Gummimembran erzeugten Druck und der festen Einspannung der Membran zwischen Stempel und Matrize weichen die Teile des glatten Bleches, die über einer den Aussparungen der Matrize liegen, in diese Öffnung aus und formen so die Struktur. In Abbildung 3.2 ist die Fertigungsverfahren zur Herstellung der strukturierten Bleche dargestellt.

3.1.3 Parametrisierung

Die untersuchten strukturierten Bleche besitzen eine Ausbeulung in Form einer hexagonalen Wabenstruktur in einer regelmäßigen Anordnung. Zwischen den Waben befindet sich ein Steg der Breite 2 mm. Der Abstand zweier paralleler Seiten des Sechsecks wird als Schlüsselweite (SW) definiert, siehe Abbildung 3.3. Ebenso wird zwischen verschiedenen Wabenbeulungen oder Wabenhöhen unterschieden.

Den Verlauf des Wabenquerschnittes kann man mit einer mathematischen Rollkurve, genauer einer Zykloide, beschreiben. Es liegen nach Fertigung die Schlüsselweiten 33 mm, 43 mm und 51 mm vor, im Folgenden abgekürzt mit SW 33, SW 43 und SW 51, die aus glatten Blechen der Dicke 0,5 mm, 0,7 mm und 1 mm hergestellt werden. In Tabelle 3.1 sind die strukturierten Bleche in ihrer Gesamtheit aufgeführt, wie sie für die erfolgten Messungen oder die numerischen Simulationen vorlagen und verwendet wurden.

Diese Konfigurationen mit SW 33 hat eine etwa dreifach höhere Biegesteifigkeit als ein Glattblech gleicher Dicke [26, 51].

Die betrachteten Bleche sind aus dem Werkstoff DC04, einem Baustahl, gefertigt. Für diesen wurden die Kennwerte in Tabelle 3.2 angenommen, die auch in der später folgenden Simulation verwendet wurden [72, 20].

Da ein Hexagon bei jeder Rotation um 60° symmetrisch ist, gibt es verschiedene Arten der Wabenausrichtung für ein rechteckiges oder quadratisches Blech mit dieser Strukturierung. Im Folgenden wurden keine Unterschiede bei der Wabenorientierung gemacht und somit nicht differenziert, ob zum Beispiel eine Wabenecke oder Wabenkante nach oben zeigt. Bei den Untersuchungen an Doppelwänden jedoch wurden die Waben der beiden Einzelwände immer in gleicher Orientierung angeordnet, bis auf eine Untersuchung des Einflusses der Wabenorientierung zueinander.

3.2 Analytische Methoden

In diesem Abschnitt werden analytische Methoden, die zur Berechnung des Schalldämmmaßes von Einfach- und Doppelwänden verwendet werden, vorgestellt und diskutiert. Mit Hilfe einiger Gleichungen kann man Werte direkt berechnen, andere setzen eine numerische Integration voraus. Nach erfolgter Berechnung werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Da es Unterschiede zwischen den Gleichungen für isotrope und orthotrope Einfach- und Doppelwände gibt und diese teils aufeinander aufbauen, wird der Abschnitt in vier Unterabschnitte unterteilt.

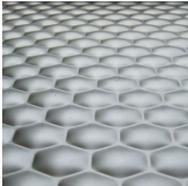
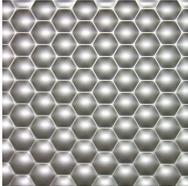
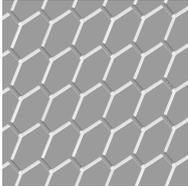
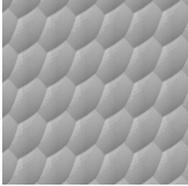
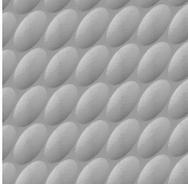
3.2.1 Isotrope Einfachwand

Hier sollen die Grundlagen der Schalldämmung einer unendlich ausgedehnten Einfachwand betrachtet werden.

Das Schalldämmmaß R ist eine Form einer Pegeldarstellung des Transmissionsgrades τ und wird aus diesem errechnet:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} \text{ dB.} \quad (3.2)$$

Tabelle 3.1: Übersicht der strukturierten Bleche, die für Messungen oder numerischer Simulation vorlagen und verwendet wurden (alle Zahlenwerte in Millimeter)

Strukturform	Schlüsselweite SW	Stegbreite s	Struktur-/Wabenhöhe h	Blechdicke d	Abbildung
Hexagonale Wabe	33	2	2,7	0,5 / 0,7 / 1,0	
Hexagonale Wabe	43	2	2,7 / 3,3	0,5	
Hexagonale Wabe	51	2	2,7 / 3,3	0,5	
Hexagonaler Pyramidenstumpf	31	1,2	2,7	0,7 / 1,0	
Hexagonale Wabe ohne Steg	32	0	2,7	0,5 / 0,7 / 1,0	
Halbkugelförmige Struktur	33	≥ 2	2,7	0,5 / 1,0	

Material	Stahl	Alu	Luft
ρ (Dichte)	7850 kg/m ³	2700 kg/m ³	1,225 kg/m ³
E (Elastizitätsmodul)	$2,1 \times 10^5$ N/mm ²	7×10^4 N/mm ²	—
ν (Querkontraktionszahl)	0,31	0,34	—
η (Dämpfungsverlustfaktor)	1 %	1 %	0,1 %
c (Schallgeschwindigkeit)	—	—	340 m/s
c_p (spez. Wärmekapazität, isobar)	—	—	1,004 kJ/kg/K
c_v (spez. Wärmekapazität, isochor)	—	—	0,716 kJ/kg/K
λ_w (Wärmeleitfähigkeit)	—	—	0,02561 W/m/K
η_L (Dynamische Viskosität)	—	—	18,21 μ Pa s

Tabelle 3.2: Angenommene Materialparameter

Zur Berechnung des Transmissionsgrades wird zunächst eine Impedanz Z allgemein als das Verhältnis aus Schalldruck \bar{p} zu Schallschnelle \bar{v} eingeführt:

$$Z = \frac{\bar{p}}{\bar{v}}. \quad (3.3)$$

Nach [14] ist die komplexe Wandimpedanz einer Platte

$$\underline{Z}_w = j\omega m'' \left(1 - \frac{k^4 \sin^4 \theta}{k_B^4} \right) + \frac{Z_0}{\cos \theta}. \quad (3.4)$$

Dabei ist m'' die flächenbezogene Masse der Wand und k_B^4 mit

$$k_B^4 = \omega^2 \frac{m''}{B'} \quad (3.5)$$

die vierte Potenz der Biegewellenzahl der Wand, wobei $Z_0 = \rho_0 c$ die Schallkennimpedanz und $k = \omega/c$ die Kreiswellenzahl der Luft ist. B' ist die Biegesteifigkeit der Wand. Diese lautet für eine große, ebene, homogene Wand

$$B' = \frac{Ed^3}{12(1 - \nu^2)}. \quad (3.6)$$

Um Materialdämpfung zu berücksichtigen, kann der Elastizitätsmodul komplex dargestellt werden in der Form

$$\underline{E} = E(1 + j\eta), \quad (3.7)$$

wobei η der Dämpfungsverlustfaktor ist. Dieser wird im Folgenden als $\eta = 0,01$ angenommen, was einer Dämpfung von 1 % entspricht und einer durchschnittlichen Materialdämpfung für Stahl und vielen anderen metallischen Werkstoffe nahe kommt und somit einen realistischen Wert darstellt. Eine genauere Kenntnis des Dämpfungsfaktors ist an dieser Stelle unnötig und die Ermittlung sehr komplex, nur das Vorhandensein einer Dämpfung soll nicht vernachlässigt werden.

Die Wandimpedanz beschreibt das Verhältnis des Schallübergangs zwischen Luft und Wand. Es ist ein Ausdruck dafür, wie gut sich die Biegewellen der Wand an die Luftschallwellen anpassen und ist vom Einfallswinkel anhängig. Die unter einem bestimmten

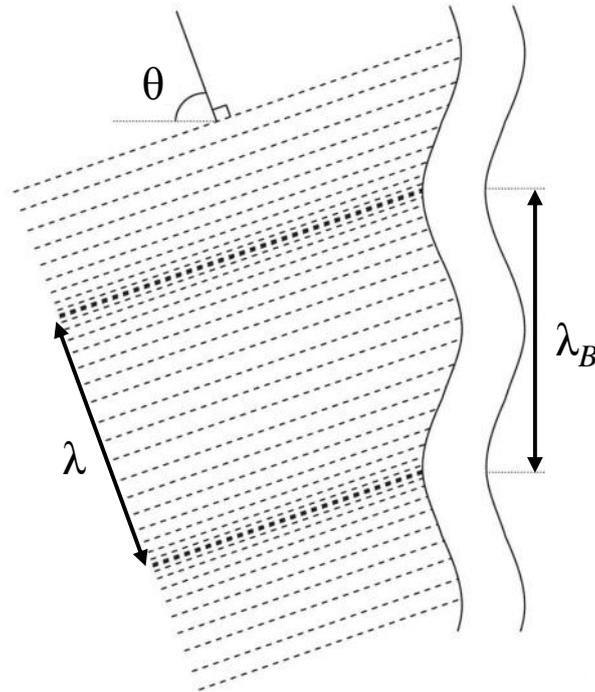


Abbildung 3.4: Spuranpassung

Winkel einfallende Luftschallwelle hat in ihrer Projektion auf die Ebene der Wand eine weitere charakteristische Wellenlänge, die Spurwellenlänge. Diese besitzt also für genau eine Frequenz unter genau einem Einfallswinkel einen festen Wert. Ist diese nun genau so groß wie die freie Biegewellenlänge λ_B der Platte, so gilt $k = k_B$ und die Wandimpedanz wird laut Gleichung 3.4 minimal. Dies ist die Spuranpassung des Luftschalls an einer Wand, auch Koinzidenz genannt. Ebenfalls wird durch Gleichung 3.4 deutlich, dass der letzte Klammerausdruck im Nenner für den Koinzidenzfall $k = k_B$ minimal wird und somit der Transmissionsgrad sehr groß. Daran wird gut sichtbar, dass bei Koinzidenz die Schalldämmung sehr gering ist.

Trifft eine Luftschallwelle auf eine Einfachwand, so regt sie diese zu Schwingungen an. Dabei kann die Wand verschiedene Wellenarten ausbilden. Die für die Schalltransmission maßgebende Art ist die Biegewelle. Diese ist charakterisiert durch die Wellenlänge

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{2\pi}{f}} \sqrt[4]{\frac{B'}{m''}}. \quad (3.8)$$

Die Koinzidenzfrequenz f_k einer Platte, bei der die Biegewellenlänge λ_B der Platte und die Wellenlänge der unter einem bestimmten Winkel einfallenden Luftschallwelle zusammenfallen, lautet

$$f_k = \frac{c^2}{2\pi \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{m''}{B'}} \quad (3.9)$$

und somit ergibt sich für senkrechten Schalleinfall die erste (tiefste) Frequenz, bei der dieser Effekt auftritt, die sogenannte Grenzfrequenz f_g , mit

$$f_g = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B'}}. \quad (3.10)$$

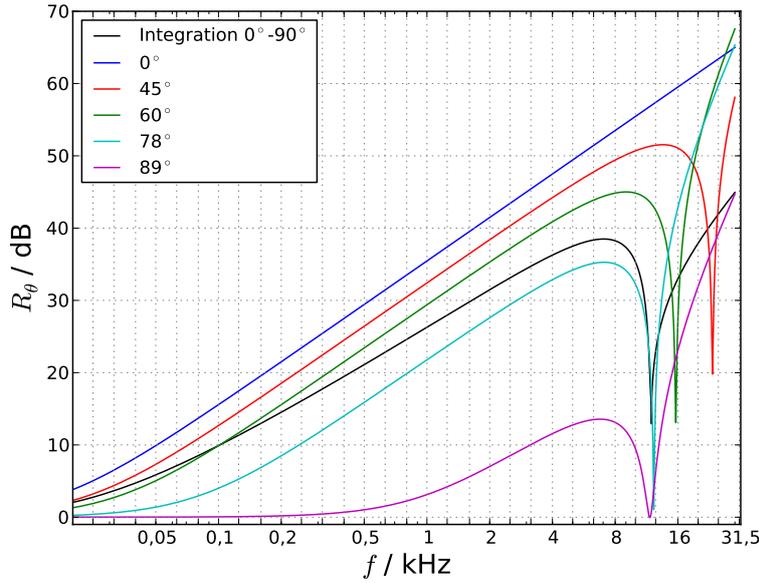


Abbildung 3.5: Schalldämmmaß einer 1 mm starken Einfachwand aus Stahl mit 1% Materialdämpfung für aus verschiedenen Winkeln einfallende ebene Wellen und für diffusen Schalleinfall und Integration von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 90^\circ$

Dieser Effekt ist in Abbildung 3.4 skizziert, die einen Koinzidenzeinfall darstellt. Diese Grenzfrequenz teilt den theoretischen Verlauf des Schalldämmmaßes in verschiedene Bereiche, für die andere analytische Zusammenhänge gelten.

Fällt eine Luftschallwellenlänge auf eine Wand unter einem beliebigen Winkel θ ein, so kann der davon abhängige Transmissionsgrad analytisch mit

$$\tau_{\text{EW},i}(\theta) = \frac{1}{\left|1 + \frac{Z_w \cos \theta}{2Z_0}\right|^2} \quad (3.11)$$

beschrieben werden. Setzt man die Wandimpedanz in diese Gleichung ein, so ergibt sich

$$\tau_{\text{EW},i}(\theta) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega m'' \cos \theta}{2Z_0}\right)^2 \left(1 - \frac{k^4 \sin^4 \theta}{k_B^4}\right)^2}. \quad (3.12)$$

Unterhalb der Grenzfrequenz sinkt der Transmissionsgrad mit steigender flächenbezogener Masse und Frequenz, die Schalldämmung steigt damit. In Abbildung 3.5 ist dieser Verlauf für aus verschiedenen Winkeln einfallende ebene Wellen dargestellt. Das größte Schalldämmmaß wird für senkrechten Schalleinfall, also $\theta = 0^\circ$, erreicht, mit zunehmendem Winkel bis hin zu streifendem Schalleinfall nimmt das Schalldämmmaß ab. In der Theorie sinkt für Schalleinfall aus $\theta = 90^\circ$ die Schalldämmung gegen null, jedoch ist dieser Einfallswinkel nur theoretisch denkbar. Für streifenden Schalleinfall bis hin zu $\theta = 89^\circ$ ist die Schalldämmung schließlich sehr gering. Das Schalldämmmaß oberhalb der Grenzfrequenz wird vorwiegend von der Materialdämpfung und der flächenbezogenen Masse bestimmt.

Da die Schalldämmung für diffusen Schalleinfall und somit der diffuse Transmissionsgrad für die isotrope Einfachwand, $\tau_{\text{diffEW},i}$, von Interesse ist, wird über den Winkelbereich, der bei senkrechtem Schalleinfall beginnend bei $\theta = 0^\circ$ anfängt bis hin zu einem maximalen

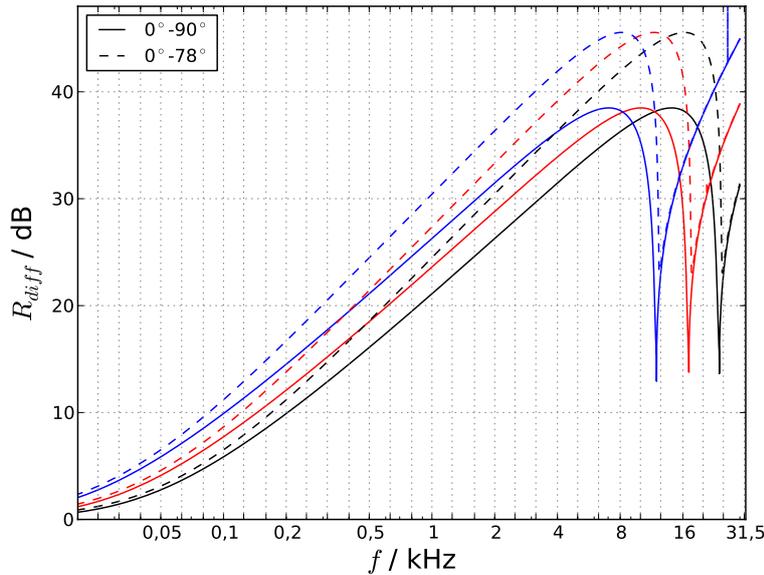


Abbildung 3.6: Schalldämmmaß einer Einfachwand aus Stahl mit 1% Dämpfung und diffusen Schalleinfall und Integration von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 78^\circ$ und von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 90^\circ$ für drei verschiedene Blechdicken: \blacksquare 0,5 mm, \blacksquare 0,7 mm und \blacksquare 1,0 mm

Einfallswinkel θ_{\max} , der für streifenden Schalleinfall bei 90° liegt, integriert:

$$\tau_{\text{diffEW},i} = \int_0^{\theta_{\max}} 2 \tau_{\text{EW},i}(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \quad (3.13)$$

Diese Integration ist numerisch durchzuführen, wenn der gesamte Frequenzbereich von Interesse ist. Es gibt verschiedene Verallgemeinerungen für die Praxis, so ist der streifende Schalleinfall statistisch in geringerem Maße vorhanden und man begrenzt den Maximalwinkel der Integration θ_{\max} auf 78° . In Abbildung 3.6 sind Schalldämmmaße für drei unterschiedlich dicke Bleche und jeweils für die Integration bis zu einem maximalen Einfallswinkel von 78° und 90° gezeigt. Die Schalldämmmaße für die Integration bis 90° sind erwartungsgemäß geringer als jene, die nicht über den gesamten Bereich integriert werden, da die Anteile für streifenden Schalleinfall, also für Winkel oberhalb von 78° , sehr geringe Werte gegenüber dem restlichen Bereich besitzen. Sehr gut zu sehen sind die drei verschiedenen Grenzfrequenzen für die jeweilige Blechdicke. Oberhalb dieser Grenzfrequenzen ist die Materialdämpfung der bestimmende Parameter des Schalldämmmaßes und der Bereich der Integrationswinkel hat nur einen geringen Einfluss darauf.

3.2.2 Orthotrope Einfachwand

Zur Aufstellung einer analytischen Gleichung für den Transmissionsgrad von orthotropen Wänden und Platten müssen die unterschiedlichen Biegesteifigkeiten in verschiedenen Achsen der Plattenebene berücksichtigt und mehrere Biegesteifigkeiten für verschiedene Richtungen in Abhängigkeit vom jeweiligen Elastizitätsmodul in diesen Richtungen ermittelt werden:

$$B'_{x,y} = \frac{E_{x,y} d^3}{12(1 - \nu_{x,y}^2)} \quad (3.14)$$

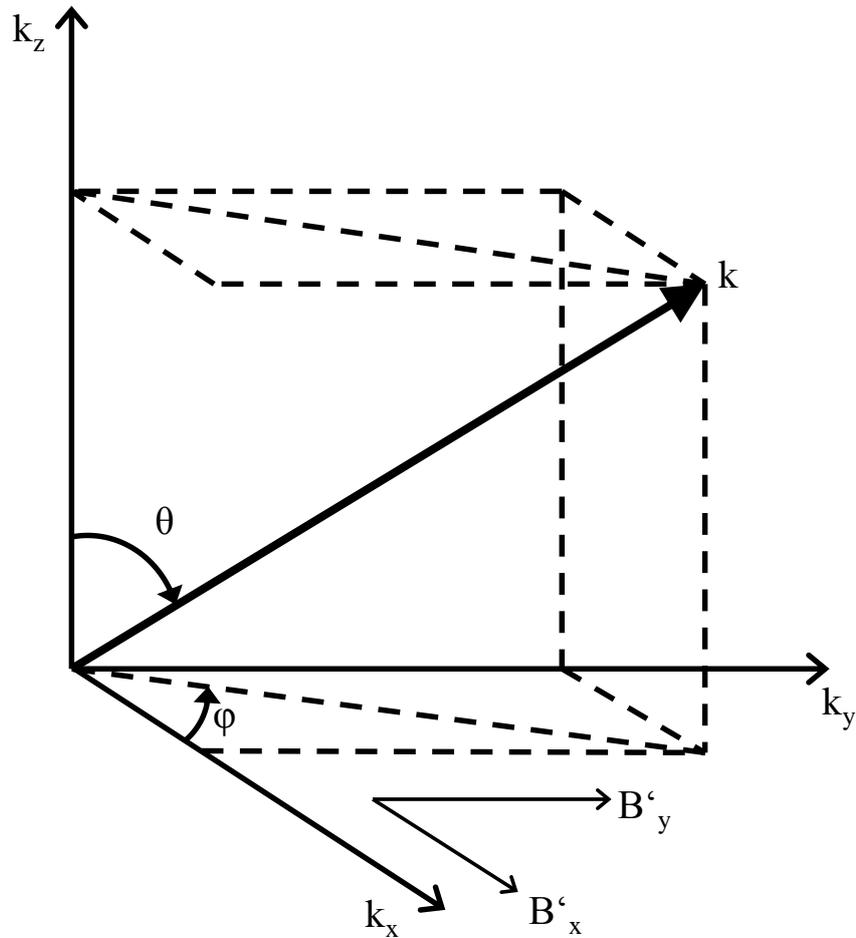


Abbildung 3.7: Winkel- und Richtungsdefinitionen an der orthotropen Platte

Der Grad der Orthotropie o kann dabei als Verhältnis der unterschiedlichen Biegesteifigkeiten in verschiedenen Richtungen der Plattenebene dargestellt werden:

$$B'_y = o B'_x. \quad (3.15)$$

Diese Richtungsdefinitionen für die orthotrope Platte sind in Abbildung 3.7 eingezeichnet. Aus den verschiedenen Biegesteifigkeiten lässt sich näherungsweise eine effektive Biegesteifigkeit bilden, die eine Art der Mittelung darstellt und in den Gleichungen Berücksichtigung findet [13]. Diese stellt keine exakte Lösung dar:

$$B'_{\text{eff}} = \sqrt{B'_x B'_y}. \quad (3.16)$$

Die Wellenzahl k wird abhängig vom Einfallswinkel und der Einfallrichtung in die Plattenebene projiziert:

$$k_x = k \sin \theta \cos \phi \quad (3.17)$$

und

$$k_y = k \sin \theta \sin \phi. \quad (3.18)$$

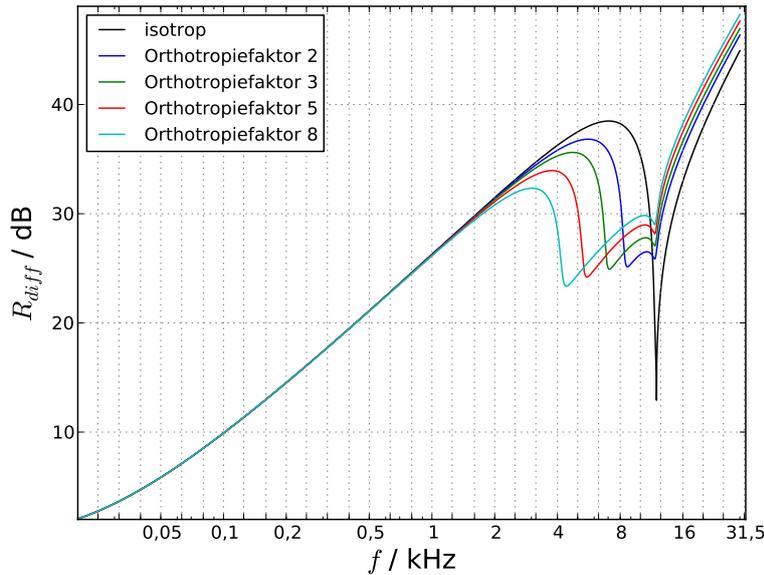


Abbildung 3.8: Schalldämmmaß von 1 mm starken isotropen und orthotropen Einfachwänden aus Stahl mit 1% Materialdämpfung und mit verschiedenen Verhältnissen der Biegesteifigkeiten in den orthotropen Richtungen für diffusen Schalleinfall und Integration von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 90^\circ$

Der eingeführte Winkel ϕ liegt dabei in der Plattenebene zwischen der x-Achse oder der Achse einer Biegesteifigkeit und der Projektion der einfallenden Schallwelle. Die Wandimpedanz Z_w für die orthotrope Wand enthält dabei die Biegesteifigkeiten in x- und y-Richtung und die effektive Biegesteifigkeit:

$$\underline{Z}_w = j\omega m'' \left(1 - \frac{B'_x k_x^4}{\omega^2 m''} - 2 \frac{B'_{\text{eff}} k_x^2 k_y^2}{\omega^2 m''} - \frac{B'_y k_y^4}{\omega^2 m''} \right). \quad (3.19)$$

Nun wird zur Ermittlung des Transmissionsgrades für die orthotrope Einfachwand für diffusen Schalleinfall, $\tau_{\text{diffEW},o}$, über alle Einfallsrichtungen und bis zu einem maximalen Einfallswinkel θ_{max} integriert:

$$\tau_{\text{diffEW},o} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\theta_{\text{max}}} 2 \tau_{\text{EW},o}(\theta) \sin \theta \cos \theta \, d\theta \, d\phi. \quad (3.20)$$

In Abbildung 3.8 ist das Schalldämmmaß einer orthotropen Einfachwand mit verschiedenen Graden der Orthotropie dargestellt. Dies liegt im Frequenzbereich, beginnend mit der niedrigsten Koinzidenzfrequenz im Bereich der Richtung mit der geringsten Biegesteifigkeit, unter dem der gleich schweren isotropen Wand. Gut sichtbar ist der sich in tiefere Frequenzen verlagernde Bereich mit geringerer Schalldämmung für sich vergrößernde Orthotropie aufgrund des breiter werdenden Bereiches der verschiedenen Grenzfrequenzen.

3.2.3 Isotrope Doppelwand

Bei dem Verhalten der Schalldämmung der isotropen Doppelwand gelten einige besondere Regeln gegenüber der Einfachwand. Für die Berechnung der Schalldämmung einer

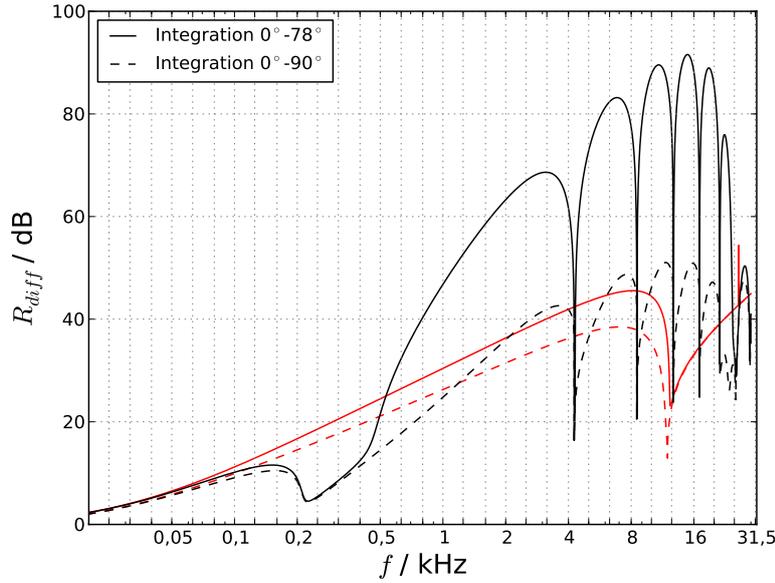


Abbildung 3.9: Schalldämmmaß von — einer isotropen Doppelwand aus Stahl mit Blechdicken von je 0,5 mm und einen Wandabstand von 40 mm und - - einer gleich schweren isotropen Einfachwand aus Stahl mit einer Blechdicke von 1 mm mit 1 % Materialdämpfung und diffusen Schalleinfall und Integration von je $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 78^\circ$ und von je $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 90^\circ$

Doppelwand werden 2 getrennte Wände mit gleichen oder unterschiedlichen Eigenschaften angenommen, zwischen denen sich ein Fluid befindet. Dies kann als ein Masse-Feder-Masse-System betrachtet werden. Es gibt eine erste Resonanzfrequenz f_r für senkrechten Schalleinfall, bei der beide Schalen und das dazwischen eingeschlossene Fluid in Phase schwingen, also als eine Einheit. Diese wird ermittelt durch

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{(m_1'' + m_2'')\rho}{m_1''m_2''d}}. \quad (3.21)$$

Die Wandimpedanz jeder Schale wird wie diese der Einfachwand einzeln ermittelt und ausgedrückt. Nach [14] ergibt sich unter Einbeziehung der komplexen Wandimpedanzen $Z_{w,1}$ und $Z_{w,2}$ der beiden Einzelschalen und des Wandabstandes d folgender winkelabhängiger Transmissionsgrad $\tau_{DW,i}$ für die isotrope Doppelwand:

$$\tau_{DW,i}(\theta) = \frac{1}{\left| 1 + \frac{(Z_{w,1} + Z_{w,2}) \cos \theta}{2Z_0} + \frac{Z_{w,1}Z_{w,2} \cos^2 \theta}{4Z_0^2} (1 - e^{-2j\frac{\omega}{c}d}) \right|^2}. \quad (3.22)$$

Dabei enthält der Faktor in Klammern im letzten Summanden in Nenner eine Vereinfachung im Exponenten der Eulerschen Funktion, indem man keinen schrägen Schalleinfall im Zwischenraum der Doppelwand zulässt und somit vernachlässigt. Falls nötig, wird dies in der Praxis durch Bedämpfung des Zwischenraumes oder der Ränder des Zwischenraumes realisiert. Meist ist eine Unterdrückung von schräger Schallausbreitung im Zwischenraum von vornherein durch die Konstruktion gegeben, wenn beispielsweise eine Unterteilung durch Stringer und Spanten, also Längs- und Querversteifungen, eingefügt ist.

Zur Berechnung des Transmissionsgrades für den diffusen Schalleinfall erfolgt die numerische Integration analog zu Gleichung 3.13 im vorhergehenden Unterabschnitt zur isotropen Einfachwand.

Treten innerhalb des Zwischenraumes der Doppelwand Schallwellen auf, die durch streifenden Schalleinfall verursacht werden und sich nahezu in Richtung der Plattenebenen ausbreiten, also Quermoden darstellen, so sinkt das Schalldämmmaß stark. Ebenso ist die Ausdehnung der Doppelwand für die analytischen Gleichungen als unendlich angenommen. Dies ist in der Praxis natürlich ebenfalls nicht der Fall und es treten Querreflexionen auf, wenn die Zwischenraumbegrenzungen unbedämpft sind.

Ein weiteres Merkmal im Verlauf des Schalldämmmaßes für die Doppelwand ist das regelmäßige Auftreten von Resonanzen bei Frequenzen, bei denen eine halbe Luftschallwellenlänge oder ein Vielfaches davon dem Wandabstand, also der Zwischenraumbreite, entspricht:

$$f_n = n \frac{c}{2d}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.23)$$

Dabei stellen sich Resonanzen im unbedämpften Zwischenraum der Doppelwand ein. Im Bereich dieser Frequenzen ist die Schalldämmung stark verringert, siehe Abbildung 3.9. Generell sieht man, dass es Bereiche gibt, in denen die Doppelwand ein schlechteres Schalldämmmaß als die gleich schwere Einfachwand besitzt. Ebenso hat der maximale Winkel, bis zu dem integriert wird, einen großen Einfluss.

3.2.4 Orthotrope Doppelwand

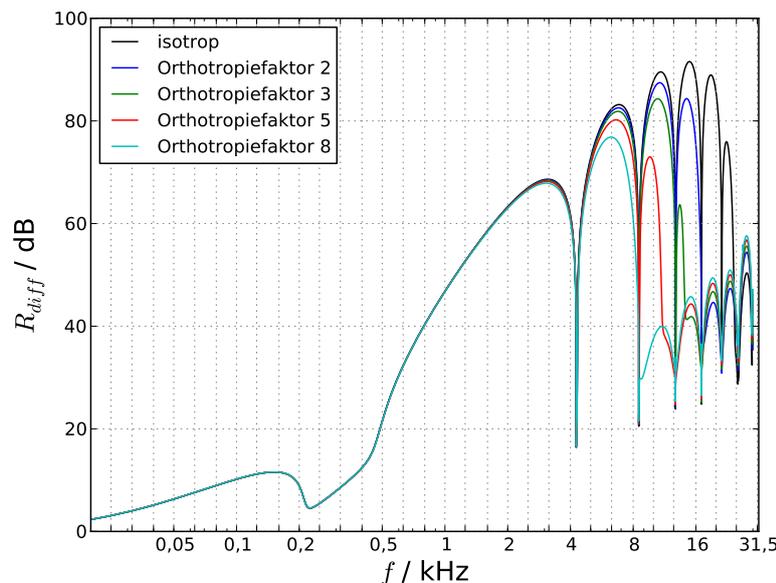


Abbildung 3.10: Schalldämmmaß isotroper und orthotroper Doppelwände aus Stahl mit Blechdicken von je 0,5 mm, einem Wandabstand von 40 mm und 1 % Materialdämpfung und mit verschiedenen Verhältnissen der Biegesteifigkeiten in den orthotropen Richtungen für diffusen Schalleinfall und Integration von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 78^\circ$

Eine Herleitung einer analytischen Gleichung für eine Doppelwand, die aus orthotropen Platten besteht, stellt eine Kombination aus den Gleichungen 3.20 und 3.22 für die orthotrope Einzelwand und die isotrope Doppelwand dar. Die einzelnen Wandimpedanzen werden durch diese für orthotrope Wände ermittelt. Die Gleichung zur Berechnung des Transmissionsgrades $\tau_{\text{diff DW},o}$ für orthotrope Doppelwände für diffusen Schalleinfall lautet mit Integration über alle Einfallsrichtungen und -winkel analog zu den vorherigen Unterabschnitten insgesamt:

$$\tau_{\text{diff DW},o} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\theta_{\text{max}}} \frac{2 \sin \theta \cos \theta}{\left| 1 + \frac{(Z_{w,1} + Z_{w,2}) \cos \theta}{2Z_0} + \frac{Z_{w,1} Z_{w,2} \cos^2 \theta}{4Z_0^2} (1 - e^{-2j\frac{\omega}{c}d}) \right|^2} d\theta d\phi. \quad (3.24)$$

In Abbildung 3.10 lässt sich gut erkennen, dass die Verbreiterung des Bereiches mit verringerter Schalldämmung in den Bereichen der unterschiedlichen Grenzfrequenzen aufgrund der verschiedenen Biegesteifigkeiten ähnlich wie bei der orthotropen Einfachwand auch bei der orthotropen Doppelwand auftritt. Mit zunehmender Orthotropie vergrößert sich der Bereich mit verringerter Schalldämmung und der Frequenzbereich, in dem dies auftritt, sinkt. Die Frequenzen der Zwischenraumresonanzen bleiben dagegen erwartungsgemäß gleich.

3.3 Numerische Rechenmethoden

Zu einer weiteren rechnerischen Ermittlung des Schalldämmmaßes für verschiedene Wandkonfigurationen werden numerische Simulationsmethoden verwendet. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode wurde die auf die Bleche einfallende Schalleistung P_e simuliert. Die durch die Bleche transmittierte Leistung P_t wurde so ebenfalls berechnet. Daraus lässt sich direkt das Schalldämmmaß ableiten:

$$R = 10 \lg \frac{P_e}{P_t} \text{ dB}. \quad (3.25)$$

3.3.1 Finite-Elemente-Methode

Innerhalb dieser Arbeit wurde zur Ergebniserzielung das Berechnungsprogramm *Actran* benutzt [2]. Dieses basiert auf der Finite-Elemente-Methode und ist spezialisiert auf Anwendungen bei akustischen Problemstellungen und wird daher als geeignet zur Unterstützung für diese Untersuchungen angesehen. Im Folgenden soll daher auf einige Grundlagen der FEM näher eingegangen werden.

Für die gewünschte Berechnung des Schalldämmmaßes ist die Unterteilung des gesamten betrachteten Gebietes in mehrere verschiedene Rechengebiete nötig, in denen bestimmte, zu ermittelnde Feldgrößen herrschen. Es gibt zwei verschiedene Arten von Gebieten, in diesen beschreiben unterschiedliche Differentialgleichungen die Feldgrößen. Einerseits beschrieben werden Gebiete, die ein Fluid in Form von Gasen oder Gasgemischen wie Luft beinhalten. Davon unterschieden werden andererseits Strukturen und Strukturelemente, die aus Festkörpern bestehen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Unterteilung ebenfalls vorgenommen, und zwar in drei Gebiete für die Simulationen einer Einzelwand und fünf einzelne Gebiete für die Simulationen der Doppelwandkonfigurationen. In Abbildung 3.11 ist die Aufteilung in die

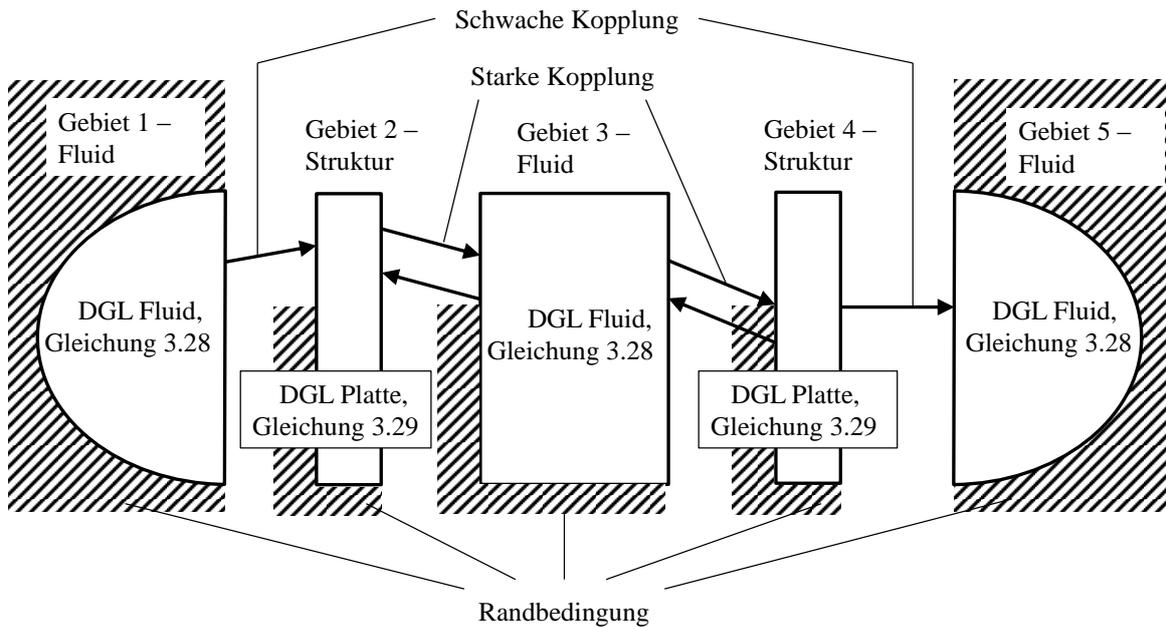


Abbildung 3.11: Unterteilung der Geometrien in Gebiete für eine Doppelwandkonfiguration mit geltenden Differentialgleichungen, Randbedingungen und Kopplungen

verschiedenen Rechengebiete am Beispiel einer Doppelwandkonstruktion dargestellt. Es existieren außerhalb der Doppelwand zwei Halbräume und die Doppelwand selbst besteht aus zwei Einzelwänden mit einem Hohlraum dazwischen. Die einzelnen Wandelemente werden jeweils als Strukturen modelliert, der Doppelwand-Zwischenraum und die Halbräume vor und hinter den Wänden sind mit einem Fluid gefüllt.

Die allgemeine Differentialgleichung zur Beschreibung der Schallausbreitung in Fluiden ist die akustische Wellengleichung. Um jedoch spätere Rechenoperationen mit dieser Gleichung zu vereinfachen, wird das akustische Schnellepotenzial Φ eingeführt, das folgendermaßen mit dem Schalldruck, der Schallschnelle und der Fluiddichte zusammenhängt:

$$\underline{p} = -\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -j\omega\rho_0 \Phi, \quad (3.26)$$

$$\underline{v} = \nabla \Phi. \quad (3.27)$$

Somit lautet die Wellengleichung, die hier in der Helmholtz-Form ausgedrückt ist:

$$\Delta \Phi + k^2 \Phi = 0. \quad (3.28)$$

Die Kreiswellenzahl k ergibt sich darin aus dem bekannten Zusammenhang aus Schallgeschwindigkeit und Kreisfrequenz: $k = \omega/c$. Diese Differentialgleichung ist linear, partiell und homogen und beschreibt die räumliche und zeitliche Veränderung des Schalldrucks p im Fluid und abhängig von dessen Eigenschaften wie Fluidtemperatur und allgemeiner Gaskonstante. Die Schallenergieausbreitung in Fluiden erfolgt in Longitudinalwellen, bei denen die Auslenkung einzelner physikalischer Fluidteilchen in Ausbreitungsrichtung der Welle erfolgt.

Zur Gültigkeit von Gleichung 3.28 sind verschiedene Annahmen zur Vereinfachung der herrschenden Zustände getroffen. So werden keine Schallquellen einbezogen, andernfalls würde die rechte Gleichungsseite anstatt dem Wert null eine anregende Schallquelle beinhalten. Somit wird hier nur die Schallausbreitung berücksichtigt. Das Fluid wird als ein unbewegtes angenommen. Viskose Effekte des Fluides werden vernachlässigt, was für Luft und viele andere Gase und Gasgemische hinreichend ist. Ebenso wird ein Wärmeaustausch mit der Umgebung nicht zugelassen. Weiterhin werden die Schwankungsanteile der Größen Schalldruck und Schalldichte als sehr viel kleiner vorausgesetzt als ihre entsprechenden Ruhegrößen.

Um Kenntnis zu erlangen über das Schallfeld im Gebiet, in dem die Gleichung 3.28 gilt, wird also der Schalldruck p berechnet. Dies gilt in Abbildung 3.11 für Gebiet 1, 3 und 5.

Bei der Schallausbreitung in Strukturen, welche im betrachteten Fall durch Platten dargestellt werden und in Abbildung 3.11 die Gebiete 2 und 4 sind, herrschen andere Zusammenhänge. Die allgemeine Wellengleichung zur Schallausbreitung in Festkörpern hat die Form folgender Differentialgleichung:

$$G \left(\Delta \mathbf{v} + \frac{1}{1-2\nu} \nabla \nabla \mathbf{v} \right) - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.29)$$

Diese beschreibt den räumlichen und zeitlichen Zusammenhang der vektoriellen Schallschnelle \mathbf{v} , abhängig von den elastischen Parametern des Materials wie Schubmodul G und Querkontraktionszahl ν . Wie auch in Fluiden tritt hier die Longitudinalwelle auf und wird analog zum Luftschall so beschrieben, wenn ihre Ausbreitungsrichtung die x-Richtung ist:

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} - \frac{\rho}{G \left(1 + \frac{1}{1-2\nu} \right)} \frac{\partial^2 v_x}{\partial t^2} = 0. \quad (3.30)$$

Da in Festkörpern zusätzlich Scherkräfte übertragen werden, bilden sich weitere Wellenarten aus. Schallenergie breitet sich in Strukturen demnach auch in Transversal- oder Schubwellen aus, deren Auslenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stattfindet. Äquivalent zu Gleichung 3.30 sind diese Wellen in Gleichungen für die anderen beiden Raumrichtungen y und z beschrieben:

$$\frac{\partial^2 v_{y,z}}{\partial x^2} - \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 v_{y,z}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.31)$$

Speziell in Platten bilden sich noch zwei weitere Wellenarten aus. Da eine Platte eine geringe Dicke in Bezug auf ihre ebenen Abmessungen besitzt, sind bei Auftreten der Longitudinalwelle auch geringe Querkontraktionen an den Oberflächen der Plattenebene möglich. Diese Quasilongitudinalwelle ist dennoch vorwiegend durch Auslenkungen in Ausbreitungsrichtung gekennzeichnet:

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} - \frac{\rho(1-\nu^2)}{E} \frac{\partial^2 v_x}{\partial t^2} = 0. \quad (3.32)$$

Schließlich tritt weiterhin eine Biegewelle auf, die auch Verdrehungen der Platte verursacht und so auch in das die Platte umgebende Fluid hineinwirken kann. Sie wird durch eine Differentialgleichung vierter Ordnung beschrieben:

$$\frac{\partial^4 v_y}{\partial x^4} + \frac{m''}{B'} \frac{\partial^2 v_y}{\partial t^2} = 0. \quad (3.33)$$

Um das Schallfeld in oder auf Festkörpern zu beschreiben, ist also die Berechnung der Schallschnelle \mathbf{v} nötig. Alternativ kann auch die Verschiebung u der charakterisierende Parameter sein, zwischen beiden besteht folgender Zusammenhang:

$$\mathbf{v} = \frac{\partial u}{\partial t} = j\omega u. \quad (3.34)$$

Die Gebiete werden im Inneren durch die Differentialgleichungen beschrieben und besitzen einen Rand, auf dem bestimmte Randbedingungen herrschen. In Abbildung 3.11 umgeben diese Randbedingungen beispielhaft die jeweiligen Gebiete. Bei Gebieten, die Fluide darstellen, sind diese Randbedingungen durch die Impedanz beschrieben. Fluide Gebiete können beispielsweise unendlich oder halbumendlich ausgedehnt sein, wobei diese Ränder dann mittels einer Randbedingung modelliert werden, die Unendlichkeit simuliert und Reflexionen verhindert. Dies kann durch die Schallkennimpedanz Z_0 beschrieben werden. Sie können ebenso schallhart sein, etwa wenn abgeschlossene Räume dargestellt und Reflexionen berücksichtigt werden sollen. Für die Gebiete mit Strukturen stellt die Admittanz \underline{Y} als Kehrwert der Impedanz die Randbedingungen dar. Dies ist eine geeignetere Darstellung, da so vermieden wird, dass vektorielle Größen im Nenner auftreten:

$$\underline{\mathbf{v}} = \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{F}}. \quad (3.35)$$

Weiterhin können feste Körper als typische Randbedingung eine Lagerandbedingung besitzen, nämlich um eine feste oder gelenkige Einspannung zu simulieren und somit Translationen und Rotationen in bestimmte Richtungen und Achsen zu ermöglichen, zu verhindern oder vorzugeben.

Die beiden Wellengleichungen gelten in den jeweiligen Gebieten, an gemeinsamen Grenzen der Gebiete wechselwirken die verschiedenen Größen miteinander und beeinflussen sich gegenseitig, wie auch in Abbildung 3.11 dargestellt ist. Dies ist in der Praxis ein komplexer Sachverhalt, die physikalischen Reaktionen erfolgen immer wechselseitig. Diese werden vereinfacht mit Hilfe von dafür aufgestellten Modellen beschrieben, die Kopplungsbedingungen zwischen den Gebieten definieren. Wird ein Fluid mit einer Struktur gekoppelt, so wird der Schalldruck, der im Fluid an den Punkten herrscht, wo das Fluid auf die Oberfläche der Struktur trifft, über eine Wandimpedanz auf die Wand als Randbedingung aufgeprägt und die Struktur so belastet. Dieser Kraftvektor wirkt immer normal zur Wandoberfläche und diese Kraft ist ein Ausgangsparameter, der die Schallenergieübertragung in die Struktur bedingt, indem sich ein Schallschnellefeld ausbildet. Das Feld der Struktur wirkt ebenfalls zurück in das Fluid. Dies ist die starke Kopplung, die in beide Richtungen wirkt und am Beispiel des Doppelwandmodells jeweils zwischen den Strukturen der Einzelwände und dem Fluid im Zwischenraum herrscht.

Liegen nun große Dichteunterschiede zwischen den Medien vor und es gibt keine eingeschlossenen Medien, so kann man davon ausgehen, dass die bewegte Masse der Struktur viel größer ist als die des Fluids, also bei einer Kopplung vom Fluid zur Struktur die vom Schalldruck im Fluid verursachten Kräfte klein gegenüber den Trägheitskräften und den elastischen Kräften der Struktur sind, und diese Kopplung unberücksichtigt lassen. Wirkt damit die Kopplung nur in eine Richtung, so nennt man das schwache Kopplung. Diese besteht in Abbildung 3.11 zwischen den Strukturen der Einzelwände und dem jeweiligen Halbraum.

Die Kopplung der Struktur mit einem weiteren fluiden Gebiet erfolgt, indem die sich durch das Schallfeld in der Struktur an seiner Oberfläche einstellende Schallschnelle, die senkrecht

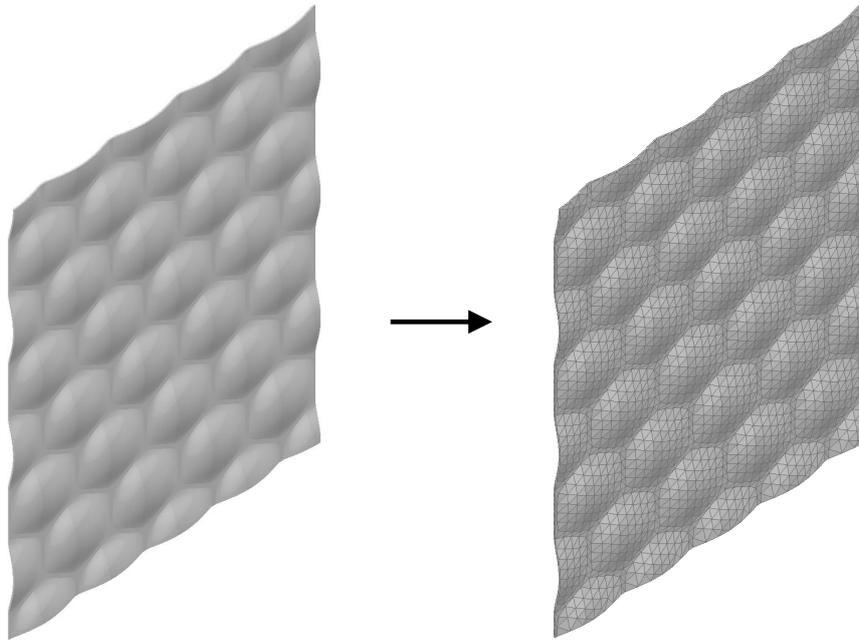


Abbildung 3.12: Diskretisierung eines CAD-Modells durch Dreieck-Schalenelemente

zur Wandnormalen wirkt, als Randbedingung dem Gebiet des Fluids aufgeprägt wird und in diesem Gebiet ein weiteres Schallfeld erzeugt oder beeinflusst.

Mathematisch bedeutet dies, dass zuerst Lösungen einer Differentialgleichung, beispielsweise die für das Fluid geltende, unter den bestehenden Randbedingungen gefunden werden. Dann werden die Ergebnisse am gemeinsamen Rand mit der Struktur als Randbedingung zur Lösung der Differentialgleichung der Struktur benutzt. Dies ist eine Vereinfachung der realen Verhältnisse und repräsentiert die schwache Kopplung.

Da in den Gebieten die jeweilige Wellengleichung gilt, ist es theoretisch möglich, die Kenngrößen des Schallfeldes an jedem beliebigen Punkt des Gebietes zu beschreiben. Dies stellt ein Randwertproblem dar und es werden geeignete Funktionen gesucht, die die Differentialgleichungen im gesamten Gebiet befriedigen. Jedoch lassen sich analytisch nur exakte Lösungen finden, wenn die Geometrien einige bestimmte, sehr einfache sind und somit der Typ der Funktion, die Lösung der Differentialgleichung ist, bekannt ist. Dies ist für beliebige Geometrien praktisch nicht möglich.

Numerisch lässt sich näherungsweise mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode eine Lösung des Randwertproblems finden, wenn die Geometrien nicht als kontinuierliche Gebiete dargestellt werden, sondern in kleinere Einzelgebiete zerlegt und Lösungen nur an einzelnen Punkten gesucht werden. Diese Diskretisierung erfolgt, indem die Geometrie durch einzelne zweidimensionale oder dreidimensionale Elemente wiedergegeben wird. Die Elemente sind die kleinsten Einzelgebiete der Gesamtgeometrie und werden von mehreren Knoten aufgespannt, die diskrete Stützstellen bilden. In Abbildung 3.12 ist die Diskretisierung eines Ausschnittes von einem CAD-Modell eines strukturierten Bleches mit Dreieck-Schalenelementen dargestellt. Für die Durchführung der Diskretisierung selbst existieren verschiedene Theorien und Ansätze, die sich nach Kriterien wie Vernetzungsgeschwindigkeit, Vernetzungsalgorithmus und Genauigkeit der Geometriewiedergabe sowie Konstanz des Volumens von Originalgeometrie und Netz unterscheiden. Für die Berechnungen in dieser Arbeit werden Dreieck- und Viereck-Schalenelemente verwendet. Dabei wird stets

gewährleistet, dass die Geometrie für die maximale Frequenz, die berechnet wird, mit einer Anzahl von 6 Elementen je Luftschall- bzw. Biegewellenlänge diskretisiert wird. Dies ist ein notwendiges Kriterium für die Verwendung dieser Art von Elementen.

Wenn die kontinuierlichen Feldgrößen in Einzelwerte an diskreten Punkten überführt werden, so werden die Differentialgleichungen zu Matrixgleichungen, die für Fluide in der Form

$$(\mathbf{K}_f - \omega^2 \mathbf{M}_f) \Phi = \mathbf{F}_f \quad (3.36)$$

dargestellt werden können. Für Gebiete, in denen Strukturelemente diskretisiert werden, gilt:

$$(\mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s) \mathbf{v} = \mathbf{F}_s. \quad (3.37)$$

Diese Beziehung gilt lokal und kann je einem Element zugeordnet sein und auch global für das gesamte Gebiet und somit alle Elemente der Geometrie, die sich so in dieser Matrixdarstellung zusammenfassen lassen. Die Matrix $\mathbf{K}_{f,s}$ ist dabei die Steifigkeitsmatrix und ihre Elemente legen den Zusammenhang zwischen Kraft- und Weggrößen fest. Diese beschreiben beispielsweise die Größe der Verschiebung bei einer vorgegeben anliegenden Kraft. Sie ist symmetrisch und schwach besetzt, was erhebliche Vorteile im Speicherplatzbedarf und in der Geschwindigkeit der numerischen Berechnung bietet. Die Matrix $\mathbf{M}_{f,s}$ ist die Massenmatrix und ebenfalls symmetrisch und schwach besetzt. Ihre Elemente beschreiben die im Gebiet herrschenden Trägheitskräfte. Die Vektoren Φ und \mathbf{v} sind die Vektoren der Zustandsgrößen Schnelledichte und Schallschnelle. Der Vektor $\mathbf{F}_{f,s}$ ist der Anregungsvektor, der eine mögliche Größe zur Anregung des Systems enthält.

Um die Kopplungen zwischen zwei einzelnen Rechengebieten, bestehend aus Fluid und Struktur, mathematisch zu beschreiben, können nun Koppelmatrizen \mathbf{C} eingeführt werden und durch diese die Gleichungen 3.36 und 3.37 zu Gesamtmatrixgleichungen verknüpft werden. Die Gleichung

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s & \mathbf{C}_{12} \\ \omega^2 \mathbf{C}_{21}^T & \mathbf{K}_f - \omega^2 \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \Phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_f \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

beschreibt dabei eine starke Fluid-Struktur-Kopplung. Nach Auflösung und Umformulierung der ersten Zeile der Gleichung entsteht

$$(\mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s) \mathbf{v} = \mathbf{F}_s - \mathbf{C}_{12} \Phi \quad (3.39)$$

und anhand des Terms $\mathbf{F}_s - \mathbf{C}_{12} \Phi$ auf der rechten Seite kann gut die Rückwirkung des Schnellepotenzials des Fluids auf die Struktur gesehen werden. Dabei enthält die Matrix \mathbf{C}_{12} Parameter in Form von Druckkräften. Ebenso wirkt nach Ausformulierung der zweiten Zeile der Gleichung mit

$$(\mathbf{K}_f - \omega^2 \mathbf{M}_f) \Phi = \mathbf{F}_f - (\omega^2 \mathbf{C}_{21}^T) \mathbf{v} \quad (3.40)$$

die Normale der Schallschnelle an der Oberfläche der Struktur auf das sie umgebende Fluid. Die Matrix \mathbf{C}_{12} beinhaltet dabei Parameter in Form von Verschiebungen. Bei dieser starken Kopplung beeinflussen sich also die Parameter beider Gebiete stets gegenseitig. Nimmt man nun eine schwache Kopplung und eine ausschließlich strukturelle Anregung

des Systems an, vereinfacht sich Gleichung 3.38, denn die Untermatrix \mathbf{C}_{12} wird zu null und es gilt $\mathbf{F}_f = 0$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s & 0 \\ \omega^2 \mathbf{C}_{21}^T & \mathbf{K}_f - \omega^2 \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \Phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_s \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3.41)$$

Es wurde gezeigt, wie die analytische Beschreibung der Zustandsgrößen in den Rechengebieten in algebraische übergehen. Nun lassen sich näherungsweise die Funktionswerte in den einzelnen Knoten für die gegebenen Randbedingungen unter Verwendung numerischer Lösungsverfahren berechnen und somit wird sich den gesuchten Lösungsfunktionen der Differentialgleichungen angenähert, bis ein Gleichgewicht gefunden ist. Damit sind nun verschiedene rechnerische Ermittlungen der gesuchten physikalischen Größen möglich.

Eine Möglichkeit ist die rechnerische Modalanalyse. Setzt man

$$\mathbf{F}_{f,s} = 0, \quad (3.42)$$

so ist keine äußere Anregung des Systems vorhanden und die Gleichungen 3.36 und 3.37 werden homogen. Es entsteht das Eigenwertproblem

$$(\mathbf{K}_f - \omega^2 \mathbf{M}_f) \Phi = 0 \quad (3.43)$$

oder

$$(\mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s) \mathbf{v} = 0. \quad (3.44)$$

Für dieses kann nun die nichttriviale Lösung gefunden werden, für die Φ oder $\mathbf{v} \neq 0$ ist. Diese Lösung sind die Eigenvektoren Φ beziehungsweise \mathbf{v} , aus denen die zugehörigen Eigenfrequenzen ω ermittelt werden können und die die dazugehörigen Eigenformen an jeder dieser Eigenfrequenzen beinhalten. Auf diesem Wege können mit der rechnerischen Modalanalyse die Eigenmoden ermittelt werden, die für das jeweilige System ohne äußere Anregung und Dämpfung gelten. Der Umfang der Berechnung wird beschränkt durch die Anzahl der Eigenfrequenzen, für die die Eigenvektoren ermittelt werden sollen oder durch den Frequenzbereich, in dem sie berechnet werden sollen. Dies wird vor der Berechnung festgelegt. Mit einem geeigneten numerischen Lösungsverfahren geht die Berechnung des Eigenwertproblems vergleichsweise schnell, da das System aus Matrixgleichungen nur einmalig aufgestellt werden muss.

Eine weitere Möglichkeit der Berechnung ist die harmonische Analyse. Wenn mit $\mathbf{F}_{f,s}$ eine äußere Anregung wirkt und in diesem Fall der Strukturanalyse beispielsweise

$$\mathbf{F}_s = -j\omega\rho\mathbf{v}_n \quad (3.45)$$

gesetzt wird, wobei \mathbf{v}_n ein Vektor ist, der Schallschnellen normal zur Strukturoberfläche als Anregung enthält, so wird Gleichung 3.37 inhomogen. Im Gegensatz zur Modalanalyse ist das numerische Berechnungsverfahren zur Lösungsfindung ein anderes. Es wird vor Beginn genau festgelegt, für welche Frequenzen die Lösung aus dem Gleichgewicht der bekannten Parameter und der Anregung gefunden werden soll. Diese Lösung ist für den Beispielfall in Gleichung 3.37 der Lösungsvektor \mathbf{v} , der die globale und lokale Schnelleverteilung im betrachteten Gebiet enthält. Die Gleichungssysteme in Matrizenform müssen hier für jede vorgegebene Frequenz neu aufgestellt werden. Trotz geeigneter numerischer

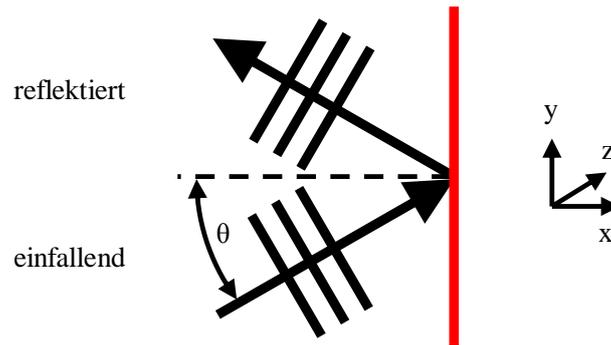


Abbildung 3.13: Auf eine Wand unter dem Winkel θ einfallende ebene Welle und von der Wand reflektierte ebene Welle

Lösungsverfahren kann diese Berechnung einen großen Zeit- und Rechenspeicherbedarf fordern, abhängig unter anderem von der Anzahl der Frequenzen und der Netzaufösung der finiten Elemente und damit der Elementanzahl. Die harmonische Analyse ist theoretisch für eine beliebige Anzahl von Gebieten, die entsprechend gekoppelt sind, möglich. Der Berechnungsaufwand vergrößert sich dabei noch einmal enorm, da je nachdem ob starke oder schwache Kopplung die einfache oder gegenseitige Beeinflussung der physikalischen Größen in den Gebieten die Matrizengröße und -anzahl noch einmal stark vergrößert.

Eine weitere Idee der Finite-Elemente-Methode ist die Interpolation der Werte der Feldgrößen an den einzelnen, zugehörigen Knoten über die jeweiligen Elemente, um so die Verteilung der Feldgrößen auch zwischen den Knoten und innerhalb der Elemente zu berechnen. Dabei werden die betrachteten Feldgrößen an den Knoten mit Interpolationsfunktionen, den Formfunktionen, multipliziert und so wird die Feldgröße an beliebigen Positionen innerhalb der Elemente angenähert. Diese Formfunktionen sind einfache Polynome, sie sind meist linear oder quadratisch. Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur lineare Formfunktionen verwendet.

3.3.2 Simulation der Anregung

Die Beschreibung einer oder mehrerer Quellen, die eine akustische Anregung in Form eines Schallfeldes erzeugen, ist eine wichtige Funktion einer akustischen Simulation. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden einzelne Schallquellen, von denen ebene Wellen ausgehen, modelliert. Diese ebenen Wellen fallen aus verschiedenen Raumrichtungen auf eine Struktur ein. Als Erweiterung dieser Einzelquellen wurden durch Überlagerung von mehreren dieser ebenen Schallwellen Bedingungen geschaffen, die ein diffuses Schallfeld simulieren können.

Angenommen wird zunächst eine ebene Welle, die auf eine schallharte Wand, die in der y - z -Ebene liegt, einfällt, wie in Abbildung 3.13 dargestellt ist. Der Schalldruck \underline{p}_e wird räumlich beschrieben durch

$$\underline{p}_e(x, y, z) = \hat{p} e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} e^{-jk_z z} \quad (3.46)$$

mit der Amplitude \hat{p} und den Wellenzahlen $k_{x,y,z}$ in den jeweiligen Raumrichtungen.

Eine Schallquelle, die ebene Wellen in einem dreidimensionalen Raum aussendet, ist ein theoretisches Konstrukt. Sie ist zweidimensional und in ihrer Ebene unendlich ausgedehnt.

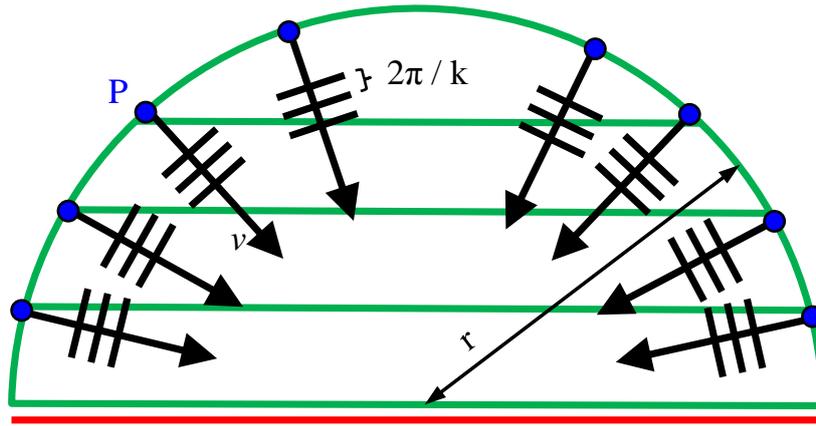


Abbildung 3.14: Erzeugung eines diffusen Schallfeldes aus ebenen Wellen, die von einer Halbkugeloberfläche über einer Wand auf diese einfallen

Sie ist beschrieben durch einen Ursprungspunkt und einen Vektor der Ausbreitungsrichtung. Der gemittelte Schalldruck der einfallenden Schallwellen ist in dieser Theorie unabhängig von der Entfernung zur Quelle, da die Hüllfläche, die durchdrungen wird, gleich bleibt und theoretisch unendlich ist. Somit ist die Position der Schallquelle im Raum als irrelevant anzunehmen, nur die Ausbreitungsrichtung der ebenen Welle und ihre Phasenlage ist relevant.

Die einfallende Welle wird an der Wand reflektiert, dies ist ebenfalls in Abbildung 3.13 dargestellt. Der Schalldruck der reflektierten Welle ist

$$\underline{p}_r(x, y, z) = \underline{r} \hat{p} e^{+jk_x x} e^{-jk_y y} e^{-jk_z z}, \quad (3.47)$$

wobei für die schallharte Wand der Reflexionsfaktor $\underline{r} = 1$ lautet. Die gesamte Schalldruckverteilung, die im Feld herrscht, kann als Summe aus dem Schalldruck der einfallenden und der reflektierten Welle dargestellt werden. Somit kann man nun durch Addition der Gleichungen 3.46 und 3.47 eine Gleichung zur Beschreibung des Gesamtschalldrucks $\underline{p}_{\text{ges}}$ von einfallender und reflektierter ebener Welle erhalten:

$$\underline{p}_{\text{ges}}(x, y, z) = 2 \cos k_x x \hat{p} e^{-jk_y y} e^{-jk_z z}. \quad (3.48)$$

Um den auf der Oberfläche der Wand an der Stelle $x = 0$ herrschenden Schalldruck \underline{p}_w zu ermitteln, betrachtet man Gleichung 3.48 an dieser Stelle:

$$\underline{p}_w = \underline{p}_{\text{ges}}(0, y, z) = 2 \hat{p} e^{-jk_y y} e^{-jk_z z}. \quad (3.49)$$

Die Amplitude des Schalldrucks an der Wand ergibt sich nun folgendermaßen:

$$|\hat{p}_w| = 2|\hat{p}_e|, \quad (3.50)$$

womit ersichtlich wird, dass sich an der Oberfläche der Wand ein maximaler Schalldruck einstellt, der exakt dem Doppelten der Schalldruckamplitude der einfallenden ebenen Welle entspricht. Betrachtet man die Quadrate der Schalldruckeffektivwerte von der einfallenden Welle und an der Wand, so entsteht folgender Zusammenhang:

$$\tilde{p}_w^2 = 4\tilde{p}_e^2. \quad (3.51)$$

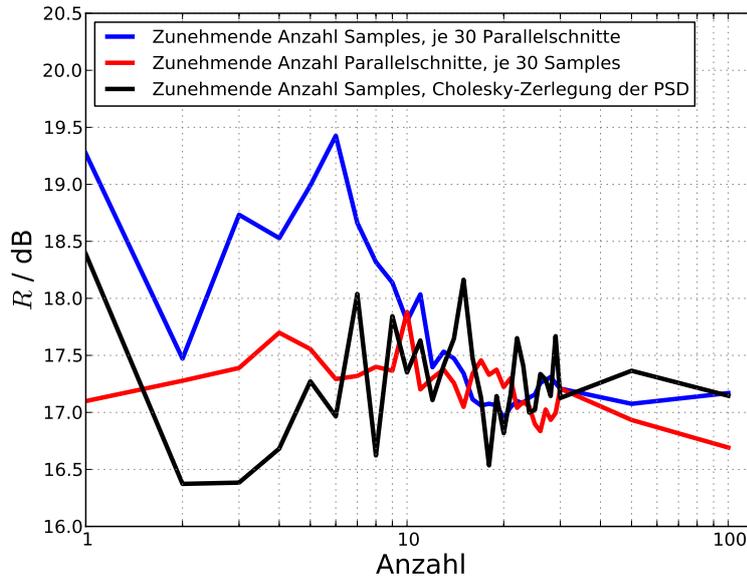


Abbildung 3.15: Veränderung des Schalldämmmaßes bei 500 Hz, abhängig von der Anzahl der Wiederholungen der Ebene-Wellen-Überlagerung und der Anzahl der Parallelschnitte durch die Halbkugel sowie Vergleich mit Cholesky-Zerlegung

Dieser Größenunterschied um den Faktor 4 wird später bei der Ermittlung der auf die Oberfläche einfallenden Schallleistung berücksichtigt.

Die auf die Oberfläche einfallende Schallleistung P_e kann aus der Schallintensität und der Fläche berechnet werden:

$$P_e = I_e S. \quad (3.52)$$

Dabei erfolgt die Ermittlung der Schallintensität I_e durch folgenden Zusammenhang zwischen Schalldruck \underline{p} und dem konjugiert komplexem Wert der Schallschnelle \underline{v}^* beziehungsweise mit den Effektivwerten des Schalldrucks \tilde{p} und der Schallschnelle \tilde{v} :

$$I_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\underline{p} \underline{v}^*) = \tilde{p} \tilde{v}. \quad (3.53)$$

Durch Ersetzen von \tilde{p} und \tilde{v} ergibt sich folgender Zusammenhang für die Schallintensität der einfallenden Welle:

$$I_e = \frac{\tilde{p}_w^2}{4\rho_0 c}. \quad (3.54)$$

Fällt nun die ebene Welle unter einem Winkel θ auf die Oberfläche zu ihrer Normalen ein, wie es in Abbildung 3.13 skizziert ist, so wird in Gleichung 3.52 zur Berechnung der einfallenden Schallleistung die normale Schallintensität I_n verwendet:

$$I_n = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\underline{p}_e \underline{v}_{ne}^*). \quad (3.55)$$

In diese geht die Schallschnelle \underline{v}_{ne} ein, die normal zur Strukturoberfläche wirkt:

$$\underline{v}_{ne} = \frac{1}{\rho c} \underline{p}_e \cos \theta. \quad (3.56)$$

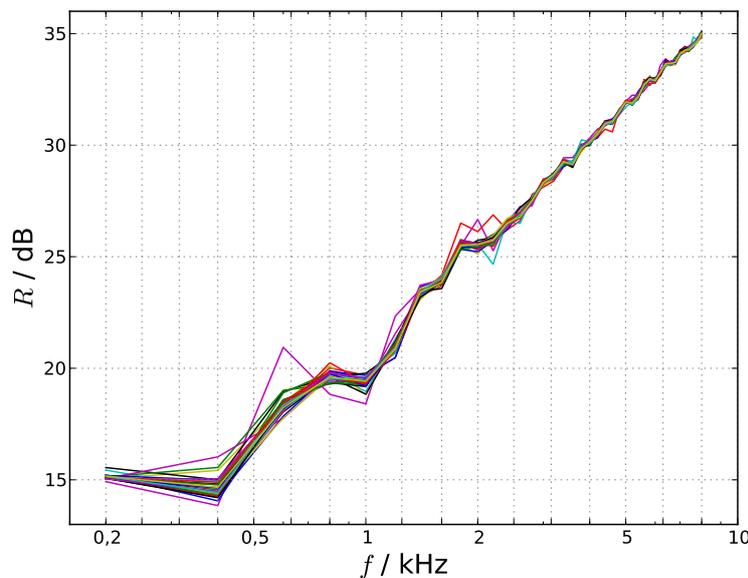


Abbildung 3.16: Streuung des Schalldämmmaßes zwischen 200 Hz und 8 kHz für Anregung durch Cholesky-Zerlegung für eine Anzahl von Wiederholungen dieses Vorganges, die zwischen 1 und 30 liegt sowie 50 und 100

Als Erweiterung der Anregung aus ebenen Wellen soll nun ein diffuses Schallfeld auf der anregenden Seite simuliert werden. Ein diffuses Schallfeld ist definiert als ein Zustand, bei dem Schallenergie aus allen Richtungen mit gleicher Intensität und Wahrscheinlichkeit einfällt, es also eine Gleichverteilung der Schallenergie gibt. Dies wird in den Berechnungen modelliert, indem eine zufällige Auswahl von mehreren, aus verschiedenen Raumwinkeln auf das Blechmodell einfallende ebene Wellen generiert werden. Dabei erfolgt eine Überlagerung dieser Wellen. Dieser Vorgang wird zusätzlich mehrfach wiederholt und aus den berechneten Schalleistungen der einzelnen Vorgänge wird danach eine gemittelte Gesamtschalleistung berechnet. In Abbildung 3.14 ist dies für den Fall mehrerer vorhandener Schallquellen ebener Wellen skizziert.

In Abbildung 3.15 ist eine Übersicht und ein Vergleich der Methoden Ebene-Wellen-Zerlegung und Cholesky-Zerlegung der spektralen Leistungsdichte (PSD) und die Abhängigkeit von der Anzahl der Wiederholungen und der Anzahl der Parallelschnitte, die wiederum die absolute Anzahl der ebenen Wellen festlegt, gegeben. Es ist gut zu erkennen, dass sich ab einer Anzahl von etwa 10 Wiederholungen nur noch geringe Abweichungen im ermittelten Schalldämmmaß ergeben und sich so eine hinreichende Genauigkeit einstellt, die auch von einer sehr viel größeren Anzahl von Wiederholungen nicht wesentlich übertroffen wird. Die Streuung des Schalldämmmaßes für den Frequenzbereich von 200 Hz bis 8 kHz für diese drei Fälle ist in den Abbildungen 3.16 bis 3.18 dargestellt.

In den folgenden Untersuchungen wurde das diffuse Schallfeld mit Hilfe der Cholesky-Zerlegung der PSD simuliert und jeweils eine Mittelung aus 30 Wiederholungen verwendet.

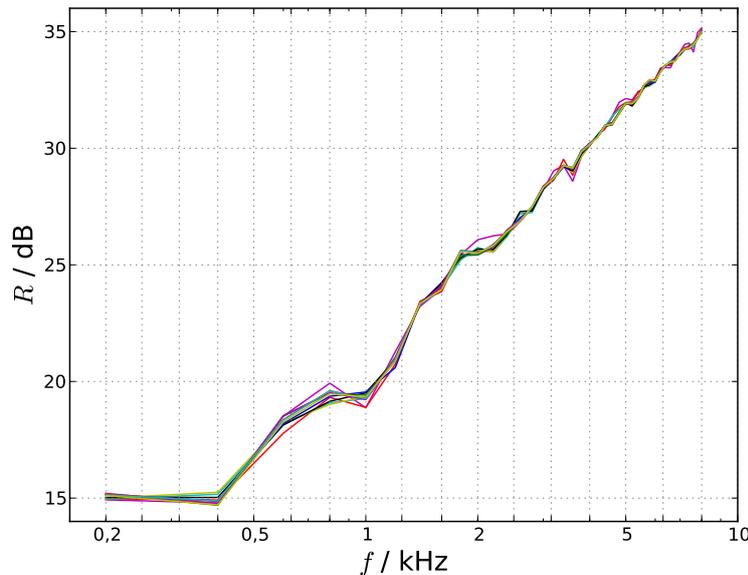


Abbildung 3.17: Streuung des Schalldämmmaßes zwischen 200 Hz und 8 kHz für Anregung durch überlagerte ebene Wellen aus 30 Parallelschnitten für eine verschiedene Anzahl von Wiederholungen dieses Vorganges, die zwischen 1 und 30 liegt sowie 50 und 100

3.3.3 Simulation der Abstrahlung

Die von Oberflächen vibrierender Strukturen abgestrahlte oder gekoppelter Flächen abgegebene Schalleistung kann auf verschiedenen Wegen ermittelt werden. In dieser Arbeit wurde die abgestrahlte Schalleistung durch die Berechnung von Rayleigh-Integralen numerisch ermittelt. Eine Rayleigh-Oberfläche wird als Schnittstelle zwischen einer ebenen oder fast ebenen Struktur Oberfläche und einem halbumendlichen akustischen Fluid verwendet. Das Fluid auf der Abstrahlseite wird als homogen angenommen. Das Schallfeld in diesem Fluid wird dann mit Hilfe des Rayleigh-Integrals modelliert. Typischerweise wird dies zur Berechnung der Schalleistung benutzt, die in einen unendlichen Halbraum abgestrahlt wird, aber auch um die Effekte des halbumendlichen Fluids auf die Struktur zu modellieren oder um akustische Größen an Punkten im Fernfeld zu berechnen. Der Vorteil dieser Methode, auch bei Anwendung in Verbindung mit der Finite-Elemente-Methode, liegt darin, dass innerhalb des Halbraums diese Größen berechnet werden können, ohne den Raum selbst zu diskretisieren.

In Abbildung 3.19 ist solch eine ebene Struktur mit einer Rayleigh-Oberfläche Γ skizziert. Diese Rayleigh-Oberfläche wird in der Theorie eingesetzt in eine unendlich ausgedehnte, schallharte, ebene Wand mit der Fläche Γ_B , somit ist dieses Verfahren innerhalb dieser Arbeit gut geeignet zur Ermittlung der abgestrahlten Schalleistung, da die theoretische Anordnung der Untersuchungsgegenstände und der Messaufbau in der Praxis ebenfalls eine in einer als schallhart angenommen Wand eingebettete Struktur beinhalten.

Die physikalische Größe an der Struktur Oberfläche zur Berechnung des Rayleigh-Integrals ist die Schallschnelle v_n der Oberflächenelemente in Normalenrichtung. Daraus lässt sich

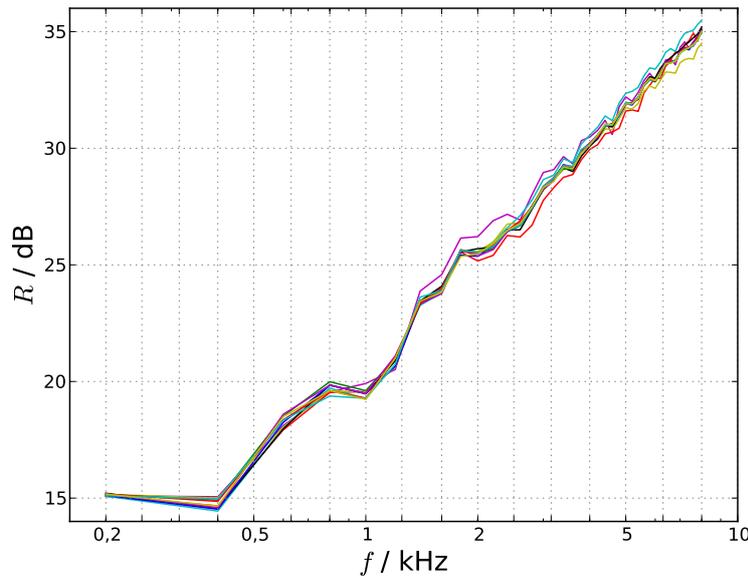


Abbildung 3.18: Streuung des Schalldämmmaßes zwischen 200 Hz und 8 kHz für Anregung durch überlagerte ebene Wellen und 30 Wiederholungen dieses Vorganges für eine verschiedene Anzahl von Parallelschnitten, die zwischen 1 und 30 liegt sowie 50 und 100

der Schalldruck $p(y)$ an jedem Ort berechnen:

$$p(y) = \int_{\Gamma} G(r) j\omega \rho_0 v_n(x) d\Gamma. \quad (3.57)$$

Die gesamte abgestrahlte Schalleistung, die in den vorliegenden Fällen der transmittierten Schalleistung P_t entspricht, wird nun aus diesem Schalldruck und der Schallschnelle auf der Oberfläche des Gebietes Γ berechnet:

$$P_e = \frac{1}{2} \int_{\Gamma} \operatorname{Re} (p(y) \underline{v}_n^*(x)) d\Gamma. \quad (3.58)$$

In Gleichung 3.57 stellen dabei die Greenschen Funktionen $G(r)$ in diesem Fall spezielle Fundamentallösungen dar, die die Umgebungsbedingungen wie die unendlich ausgedehnte, schallharte Ebene abbilden. So kann mit Kenntnis der Schnelleverteilung auf der Oberfläche das Schallfeld direkt numerisch berechnet werden. Die Greensche Funktion lautet hier

$$G(r) = \frac{1}{2\pi r} e^{-jkr}, \quad (3.59)$$

wobei diese für eine Quelle, die auf der Ebene der Rayleigh-Oberfläche liegt, gilt.

Das Rayleigh-Oberflächenintegral ist die exakte Beschreibung des Schalldruckfeldes, das von einer ebenen Fläche, die in einer ebenen Wand eingesetzt ist, abgestrahlt wird. Seine Gültigkeit kann auf Anwendungsfälle mit nur fast ebenen Strukturflächen erweitert werden. Die Lösung wäre ebenfalls exakt, falls die entsprechende Greensche Funktion G bekannt ist. Diese muss die folgende Randbedingung auf der nichtebenen Oberfläche Γ erfüllen:

$$\frac{\partial G(r)}{\partial \mathbf{n}} = 0. \quad (3.60)$$

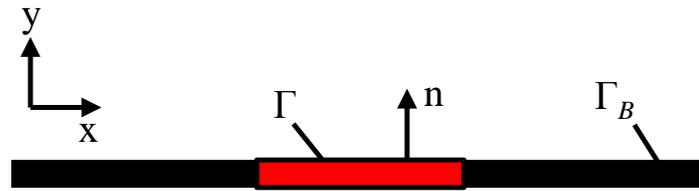


Abbildung 3.19: In eine schallharte, ebene Wand mit der Fläche Γ_B eingesetzte ebene Struktur mit der Fläche Γ und dem Normalenvektor \mathbf{n}

Die Ermittlung einer solchen Greenschen Funktion ist nicht für jede beliebig geformte Oberfläche möglich. Stattdessen kann man jedoch lokal eine Funktion \tilde{G} einführen und erhält so die angenäherte Rayleigh-Formulierung

$$p(y) = \int_{\Gamma} \tilde{G}(r) j\omega \rho_0 v_n(x) d\Gamma, \quad (3.61)$$

die keine zusätzlichen unbekanntenen Größen enthält und die nur für nahezu ebene Oberflächen verwendet werden sollte, wie sie in den vorliegenden Fällen für die Berechnungen bezogen auf strukturierte Bleche benutzt wird. Für ebene Oberflächen vereinfacht sich Gleichung 3.61 wieder zu Gleichung 3.57.

In Abbildung 3.20 ist noch einmal dargestellt, wie die einfallende und abgestrahlte Schallleistung am Modell eines strukturierten Bleches wirken. Gemäß Gleichung 3.25 wird dann das Schalldämmmaß R berechnet.

Die Wellenlänge der freien BiegeWellen, die auf den Blechbauteilen auftreten, entsprechen der halben Bauteilgröße, also 293 mm, für eine Frequenz von 114 Hz für das 1 mm dicke Glatblech. Die Überschreitung dieser Frequenz bei der sinnvollen Betrachtung der Ergebnisse wird als Mindestkriterium für die Gültigkeit der FEM-Berechnungen gewertet.

3.4 Messung der Luftschalldämmung

In diesem Abschnitt wird das verwendete Verfahren zur Messung des Schalldämmmaßes verschiedener Blechkonfigurationen vorgestellt, der Ablauf erläutert und diskutiert und es werden auftretende Fehler bewertet.

3.4.1 Messmethode

Die Messungen der Luftschalldämmung erfolgten nach der Zweiraummethode, diese wird üblicherweise in einem Fensterprüfstand durchgeführt. Solch ein Prüfstand besteht aus 2 nebeneinander liegenden, geschlossenen Räumen, die durch eine Wand mit einem Fensterausschnitt voneinander getrennt sind. In den Fensterausschnitt wird das Bauteil, für welches das Schalldämmmaß zu ermitteln ist, eingesetzt. Der Einbau erfolgt so, dass sich

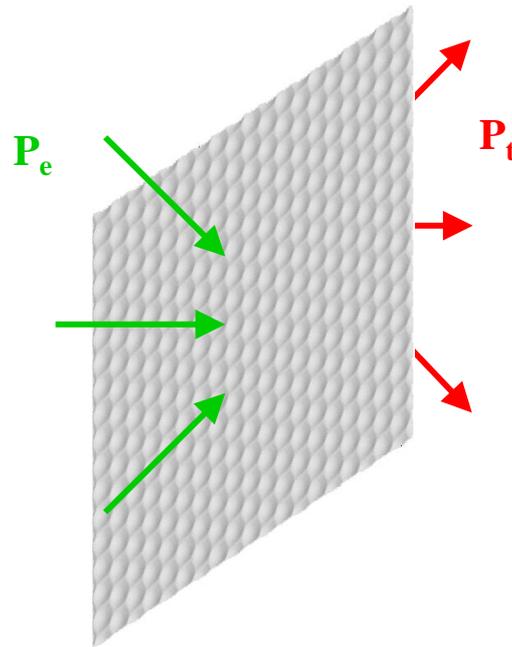


Abbildung 3.20: Vernetztes CAD-Modell eines strukturierten Blechs mit skizzierter einfallender und abgestrahlter Schalleistung

Schalltransmission nur durch dieses Bauteil einstellen kann. Einer der Räume wird als Senderraum genutzt, in diesem wird ein diffuses Schallfeld durch breitbandige Anregung erzeugt. In dem anderen Raum, der als Empfangsraum genutzt wird, stellt sich nach Übertragung von Schallenergie durch das zu prüfende Bauteil ebenfalls ein diffuses Schallfeld ein. Nach Erfassen der mittleren Schalldruckpegel in beiden Räumen errechnet man das Schalldämmmaß R des Prüfgegenstandes. Dazu wird die Gleichung

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \lg \frac{S}{A} \text{ dB} \quad (3.62)$$

benutzt, wobei L_{p1} der mittlere Schalldruckpegel im Senderraum und L_{p2} der im Empfangsraum ist, S ist die Fläche des Prüfgegenstandes und A die äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum, für die Flächenangaben werden jeweils gleiche Einheiten benutzt [19]. In Abbildung 3.21 sind der Aufbau eines Fensterprüfstandes und die Unterteilung in Sende- und Empfangsraum sowie die Trennwand mit Fenster dazwischen skizzenhaft dargestellt. Weiterhin sind die Schallquelle im Senderraum und die Mikrofone im Sende- und im Empfangsraum zur statistischen Ermittlung der vorhandenen Schalldruckpegel eingezeichnet.

3.4.2 Fensterprüfstand

Zur Realisierung der Messungen in einer vorhandenen geeigneten Einrichtung wurde ein Fensterprüfstand genutzt. Dieser besitzt eine unterdrückte Flankenübertragung, so dass die Übertragung von Schalleistung auf diesem Weg sehr gering ist, die Wände bestehen aus unverkleidetem Beton und sind somit schallhart mit einem hohen Reflexionsfaktor. Somit lässt sich leicht ein annähernd diffuses Schallfeld erzeugen. Die beiden Räume sind innerhalb eines größeren Gebäudekomplexes eingeschlossen und somit sind gute Voraussetzungen für einen geringen Ruheschallpegel gegeben. Dies ist gewünscht, um störende

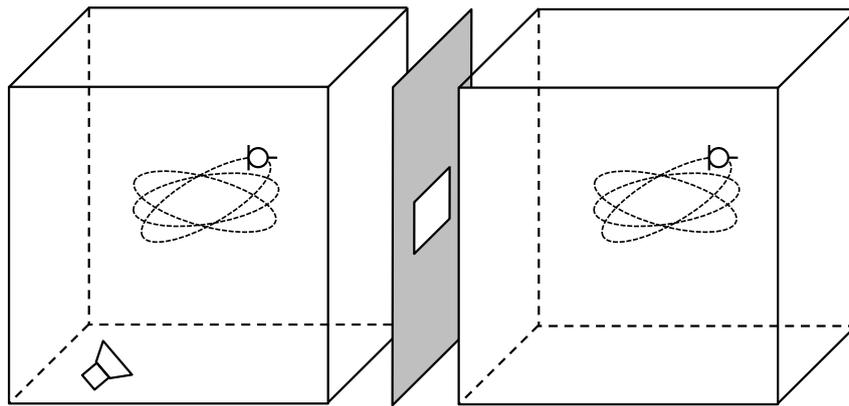


Abbildung 3.21: Fensterprüfstand mit Messausrüstung und skizzierten Bahnverlauf des Mikrofons am Schwenkgalgen

Umgebungsgeräusche während den Messungen weitestgehend auszuschließen. Die beiden Räume besitzen unterschiedliche Volumina, der Senderraum hat ein Volumen von $74,5 \text{ m}^3$, der Empfangsraum eines von $52,75 \text{ m}^3$. Die Wand zwischen den beiden Räumen ist 430 mm stark. Die Öffnung des Fensterausschnittes ist im Senderraum 1350 mm breit und 1550 mm hoch, im Empfangsraum sind die Abmaße an den Seiten und der Oberkante je 50 mm geringer, so dass sich dort Anschlussflansche zum Gegenrichten und Einpassen der Prüfbauteile befinden. Diese werden über eine Konstruktion aus Ankern, die in Nuten verlaufen, fest verklemt. Mittels gedämmter Kabeldurchführungen wird die Ansteuerung der sich innerhalb der Räume befindenden Messtechnik gewährleistet. Das höchste, die Messung limitierende bewertete Schalldämmmaß $R_{W_{\max}}$ dieses Prüfstandes beträgt 71 dB [77].

3.4.3 Einbau der Messproben

Die zu messenden Bauteile werden in dieses Fenster eingebaut. Zur Adaption und Befestigung der Blechproben wurde ein mehrschaliger Hilfsrahmen aus dem Material einer miteldichten Faserplatte, auch MDF-Platte genannt, angefertigt. Die einzelnen MDF-Platten besitzen Außenabmaße von $1339 \times 1547 \text{ mm}$ und somit geringere als die oben genannten der Prüfstandsöffnung, und einen inneren quadratischen Ausschnitt in der Größe der effektiven Fläche der Blechproben von $587 \times 587 \text{ mm}$. Zur Messung der einschaligen Blechkonstruktionen wurden die Bleche zwischen zwei MDF-Platten mit einer Dicke von je 38 mm befestigt und verspannt. Dazu wurden die Bleche an ihren glatten Rändern, wie sie auch bei den strukturierten Blechen vorhanden sind, zusätzlich durch doppelseitiges Klebeband an die Innenseiten der MDF-Platten fixiert. Zwischen den MDF-Platten wurde Trittschall-Dämmmaterial bestehend aus Polyethylenschaum mit einer Dicke von etwa 2 mm an den Stellen installiert, wo das Holz der Platten aufeinander liegt, um diese so akustisch zu entkoppeln. Beim Messen der doppelwandigen Bauteile bildeten die 38 mm dicken MDF-Platten die äußerste Schicht des Rahmens, auf deren Innenseiten je die Blechproben geklebt waren. Zwischen diesen wiederum bildeten mehrere innere MDF-Platten den definierten Abstand der Bleche von 40 mm und 60 mm und ermöglichten so die Einstellung der Hohlraumdicke der Doppelwand. Abbildung 3.22 zeigt den Einbau der Konstruktion in das Prüfstandsfenster. Diese mehrschichtigen Konstruktionen aus Blechen und Holzrahmenadapter wurden an den Rändern mit Hilfe von Bolzen mit Nutensteinen an ihren Enden, die

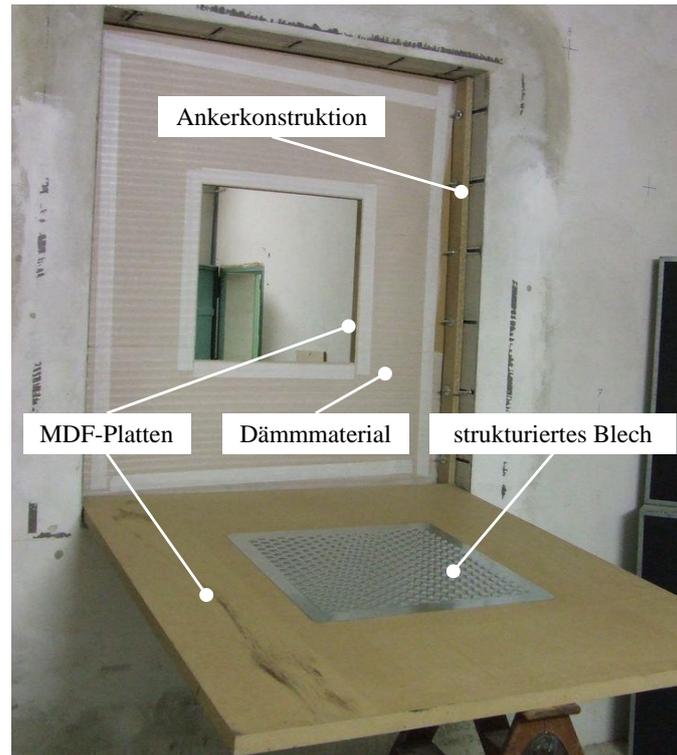


Abbildung 3.22: Fixierung und Einbau eines strukturierten Blechs in Hilfsrahmen und Fensterprüfstand

durch Holzbohlen geführt werden, und in der Wand verlaufenden Nutenschienen fest eingespannt. Mögliche vorhandene Undichtigkeiten im Übergangsbereich vom Rahmen zum Mauerwerk wurden auf der Seite des Empfangsraumes komplett mit einer dauerviskosen Fugenmasse abgedichtet.

3.4.4 Durchführung der Messungen

Es erfolgten zwei Messkampagnen zur Gewinnung von Daten und Aussagen über Schalldämmmaße glatter und strukturierter Bleche und zur Überprüfung und zum Vergleich mit den numerisch ermittelten Werten. Die Messkampagnen unterschieden sich in der Verwendung von einschaligen Konstruktionen und doppelschaligen Konstruktionen. Eine Gesamtübersicht aller erfolgter Messungen mit den entsprechenden Parametern ist in den Tabellen 3.3 und 3.4 gegeben. Die Durchführung der Messungen orientierte sich an der Norm DIN 140-3 [19]. Dabei wird im Senderraum mit Hilfe einer Schallquelle, die eine bestimmte Schalleistung abgibt, ein diffuses Schallfeld erzeugt. Dafür wurde eine Anordnung von zwölf Lautsprechern in Dodekaederform verwendet. Dies wird nach heutigem Stand der Technik als hinreichend betrachtet, um so eine kugelförmige Abstrahlcharakteristik und dadurch ein diffuses Schallfeld im Senderraum zu erzeugen. Zusätzlich wurde innerhalb der zweiten Messkampagne ein 2-Wege-Lautsprecher in Bauform einer typischen Studiomonitorbox installiert, um den Frequenzbereich des abgestrahlten Schallfeldes zu hohen Frequenzen hin zu vergrößern. Durch einen angeschlossenen und verstärkten Signalgenerator wurde Weißes Rauschen erzeugt.

Tabelle 3.3: Übersicht aller Konfigurationen der in zwei Messkampagnen erfolgten Schalldämmungsmessungen (alle Zahlenwerte in Millimeter), Teil 1

Schale 1 (Art, SW, Blechdicke)	Schale 2 (Art, SW, Blechdicke)	Wandabstand	Zwischenraumfüllung	Schalenverbindung
Erste Messkampagne				
glatt, 0,5, DC04 (Stahl)	—	—	—	—
glatt, 0,7, DC04	—	—	—	—
glatt, 1,0, DC01 (Stahl)	—	—	—	—
strukturiert, 33, 0,5, DC04	—	—	—	—
strukturiert, 33, 0,7, DC04	—	—	—	—
strukturiert, 33, 0,5, DC04, negativ	—	—	—	—
strukturiert, 33, 0,7, DC04, negativ	—	—	—	—
strukturiert, 33, 1,0, DC01	—	—	—	—
strukturiert, 33, 0,5, DX56D+Z (Edelstahl)	—	—	—	—
strukturiert, 33, 0,5, X5CrNi18-10 (Edelstahl)	—	—	—	—
Zweite Messkampagne (Material Stahl DC04)				
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 33, 0,5	40	Luft	—
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 33, 0,5	40	Absorbermaterial	—
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 33, 0,5	60	Luft	—
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 33, 0,5	60	Absorbermaterial	—
strukturiert, 33, 0,5	glatt, 0,5	40	Luft	—
strukturiert, 33, 0,5	glatt, 0,5	40	Absorbermaterial	—
strukturiert, 33, 0,5	glatt, 0,5	60	Luft	—
strukturiert, 33, 0,5	glatt, 0,5	60	Absorbermaterial	—
glatt, 0,5	glatt, 0,5	40	Luft	—
glatt, 0,5	glatt, 0,5	40	Absorbermaterial	—
glatt, 0,5	glatt, 0,5	60	Luft	—
glatt, 0,5	glatt, 0,5	60	Absorbermaterial	—
strukturiert, 51, 0,5	strukturiert, 51, 0,5	40	Absorbermaterial	—
strukturiert, 51, 0,5	strukturiert, 51, 0,5	60	Absorbermaterial	—
strukturiert, 33, 0,5	—	—	—	—
strukturiert, 51, 0,5	—	—	—	—

Tabelle 3.4: Übersicht aller Konfigurationen der in zwei Messkampagnen erfolgten Schalldämmungsmessungen (alle Zahlenwerte in Millimeter), Teil 2

Schale 1 (Art, SW, Blechdicke)	Schale 2 (Art, SW, Blechdicke)	Wandabstand	Zwischenraumfüllung	Schalenverbindung
Zweite Messkampagne				
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 51, 0,5	60	Luft	—
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 51, 0,5	60	Absorbermaterial	—
strukturiert, 33, 0,5	glatt, 1,0	60	Absorbermaterial	—
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 33, 0,7	60	Absorbermaterial	—
strukturiert, 43, 0,5	strukturiert, 43, 0,5	60	Absorbermaterial	—
strukturiert, 43, 0,5	—	—	—	—
glatt, 0,5	—	—	—	—
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 33, 0,5	—	—	Klebstoff 1, jede 2. Wabe
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 33, 0,5	—	—	Klebstoff 2, jede 2. Wabe
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 33, 0,5	—	—	Klebstoff 2, jede Wabe
strukturiert, 33, 0,5	strukturiert, 33, 0,5	—	—	Widerstands-Punktschweißen, jede Wabe

Der sich einstellende Schalldruckpegel im Diffusfeld des Senderaumes wird in seinem eingeschwungenen Zustand statistisch erfasst. Die Norm sieht mehrere Arten der Mittelung der Schalldruckpegel in den beiden Räumen vor. Es kann eine Mindestanzahl an festen Mikrofonpositionen, an die bestimmte Anforderungen bezüglich der Abstände von Wänden, Fußboden und Decke besteht, innerhalb der Räume gemessen und miteinander gemittelt werden. Die hier benutzte Methode ist die eines bewegten Mikrofons, das auf bestimmten Bahnen durch die Raum bewegt wird. Ermöglicht wurde dies durch den Einsatz eines Schwenkgalgens, der durch seine Bewegung eine Kreisbahn beschreibt. Die Kreisbahn verlief dabei so geneigt, dass sie nie parallel zu einer die Räume begrenzenden Ebene fällt. Der Mindestabstand von einem Meter zwischen Mikrofon und Wänden, Fußboden und Raumdecke wurde eingehalten. Es wurde jede Messung für drei verschiedene Kreisbahnen durchgeführt, und zwar so, dass die Schwenkachse des Galgens in der Horizontalebene für jede Messung um 120° weitergedreht wird. Der Schwenkgalgen selbst beginnt seine Drehbewegung an einer Nullposition und stoppt nach einem Umlauf, um dann in entgegengesetzter Richtung einen weiteren vollen Kreis zu beschreiben und erneut die Richtung zu ändern. Eine Drehung um 360° benötigt eine Zeit von 17 Sekunden, somit wurde die Mittelungszeit auf 35 Sekunden festgelegt, um unabhängig von der aktuellen Drehrichtung jeden Bereich einmal in jede Drehrichtung zu durchfahren. Zur Erfassung der Daten wurde ein Schallpegelmessgerät NTI XL2 verwendet. Es wurde damit der unbewertete, äquivalente Dauerschalldruckpegel in Terzen mit einer Messzeit von 35 Sekunden gemessen. Anschließend wurden die Terz-Schalldruckpegel aller 3 Schwenkgalgenebenen gemittelt.

Der sich im Sende- und im Empfangsraum einstellende Schalldruckpegel wurde so für jedes zu messende Blech ermittelt. Es wurden Blechproben in glatter und strukturierter Form verwendet. Ebenso wurde das Schalldämmmaß der Konstruktion ermittelt, die komplett aus zwei MDF-Platten der Dicke von je 38 mm, ohne einen quadratischen Ausschnitt zur Blechaufnahme, besteht. Die strukturierten Bleche wurden sowohl für die Messungen der Einzelwandkonfigurationen als auch der Doppelwandkonfigurationen so orientiert in das Fenster eingebaut, dass die konvexe, positive Wölbung in den Senderaum hineinragt. Dies wird im Folgenden als Orientierung „positiv“ bezeichnet. Zum Vergleich wurden zwei strukturierte Bleche unterschiedlicher Dicke als Einzelwand zusätzlich in entgegengesetzter Orientierungsrichtung der Wabenwölbung eingebaut, so dass die konvexe Wölbung in Richtung Empfangsraum und die konkave, negative Wölbung in Richtung Senderaum zeigt. Dies wird als Orientierung „negativ“ bezeichnet.

Weiterhin wurde die Nachhallzeit des Empfangsraumes bestimmt. Dies ist die Zeitspanne, die in einem Raum nach Ausschalten einer Schallquelle vergeht, bis der Schalldruckpegel um 60 dB abfällt. Das Schallpegelmessgerät bietet bei Anregung mit einem geeigneten Signal eine Möglichkeit dazu, indem es eine vorgegebene Anzahl von Messungen des Pegelabfalls statistisch mittelt. Mit der Sabineschen Formel, einer zugeschnittenen Größengleichung, kann aus dieser die äquivalente Schallabsorptionsfläche des Raumes in der Einheit Quadratmeter bestimmt werden, die in Gleichung 3.62 zur Berechnung des Schalldämmmaßes benötigt wird:

$$A = 0,161 \frac{V}{T}. \quad (3.63)$$

Dabei ist T die Nachhallzeit in Sekunden und V das Raumvolumen in Kubikmeter.

3.4.5 Fehlerbetrachtung und Fehlerdiskussion

Um die erzielten Messergebnisse zu verifizieren und die Grenzen der Gültigkeit zu ermitteln, sollen hier mögliche Fehlerquellen eingeschätzt und diskutiert werden. Diese Messergebnisse sind eine Grundlage und Referenz, um die numerisch berechneten Daten zu validieren und zu überprüfen. Weiterhin sind für viele Wertebereiche und Arten von Bauteilen analytisch ermittelte Größen für eine weitere Gegenüberstellung der Ergebnisse verfügbar. Auch wenn die Messwerte eine Basis bilden, können sie von den anderen Daten abweichen und es muss kritisch betrachtet werden, was genau gemessen und daraus berechnet wurde und aus welchen Annahmen und Fehlern sich diese Abweichungen ergeben.

Wittstock [80] nennt eine Vielzahl möglicher Fehlereinflüsse bei Messungen der Luftschalldämmung in einem Fensterprüfstand. Diese werden in Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe sind Einflüsse auf die Wiederholbarkeit der Messung. Diese Beiträge treten bei Messungen des gleichen Prüflings im gleichen Prüfstand auf:

- Hintergrundschallpegel im Empfangsraum,
- räumliche und zeitliche Mittelung in beiden Räumen,
- Absorption im Empfangsraum,
- Position der Schallquelle,
- meteorologische Bedingungen (Luftdruck, Lufttemperatur).

Die zweite Gruppe sind die Abweichungen in den Durchschnittswerten von verschiedenen Prüfständen:

- Messgeräte,
- ideal diffuses Schallfeld,
- Abmessungsverhältnis der Prüflinge,
- Schallenergieübertragung aus dem Prüfstand heraus,
- Randbedingungen der Bauteileinspannung,
- maximal erreichbares Schalldämmmaß der Prüfstandswand,
- meteorologische Bedingungen (Luftdruck, Lufttemperatur).

Daraus abgeleitet sind mögliche Fehlereinflüsse, die im Folgenden einzeln betrachtet werden:

- Erzeugung des diffusen Schallfeldes,
- Spektrum der Anregung,
- Nebenwege der Schallübertragung,
- Schalldämmung des Adapterrahmens,

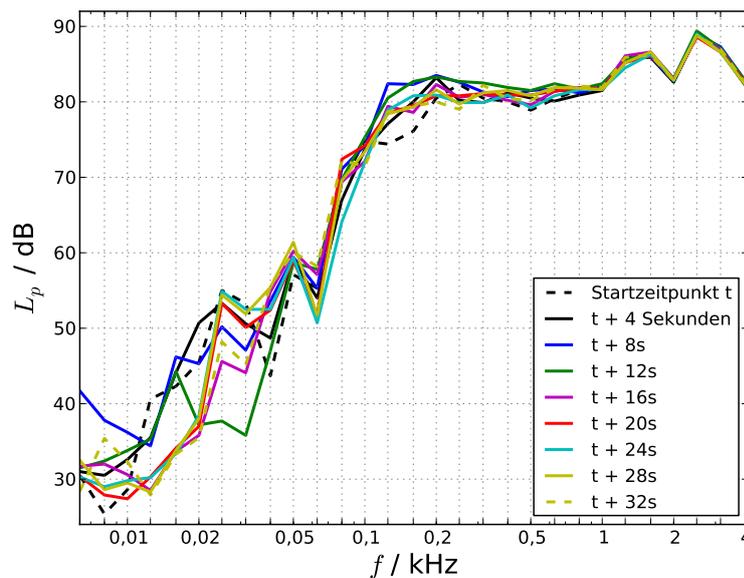


Abbildung 3.23: Momentanwert des Terzband-Schalldruckpegels vom Mikrofon am Schwenkgalgen zu verschiedenen Zeitpunkten an räumlichen Punkten auf der Kreisbahn im Empfangsraum

- Berechnung des Schalldämmmaßes,
- Einfluss der Temperatur.

Zusammen bilden diese möglichen Unsicherheiten und Einflüsse eine Gesamtabweichung, die im bauakustischen Frequenzbereich einen Betrag von bis zu 5 dB für tiefe Frequenzen und abfallend auf 2 dB für hohe Frequenzen (ab etwa 2 kHz) erreichen kann [82].

Diffuses Schallfeld Es wird angenommen, dass im Senderraum ein diffuses Schallfeld an jedem Punkt des Raumes herrscht und die Schallenergie gleichmäßig im Raum verteilt ist. Die Gleichung 3.62 gilt für ein ideal diffuses Schallfeld. Der verwendete Dodekaeder-Lautsprecher strahlt nach allen Seiten sehr gut ab und die schallharten Wände verleihen dem Raum einen hohen Reflexionsgrad. Das sich einstellende Schallfeld kommt einem solchen Idealfall nahe, ohne natürlich ein ideal diffuses Feld zu sein. In Wandnähe nehmen die Reflexionen stark zu. Dies ist auch in Nähe der Trennwand und damit an den Blechbauteilen der Fall. Ebenso fallen in Wandnähe die Schallwellen nicht aus allen Richtungen gleichmäßig stark ein, es gibt einen statistischen Anstieg für einen steigenden Einfallswinkel von 0° bis 90° . In der Gleichung 3.13 ist deutlich die Winkelabhängigkeit des Schalldämmmaßes erkennbar. Somit wird das diffuse Schalldämmmaß gemessen bei nicht ideal diffusem Schalleinfall. Zusätzlich sind die Randbereiche der Bleche durch die geometrische Anordnung der Bleche vom MDF-Rahmen der Dicke 38 mm für schräg einfallende Schallwellen verdeckt. Dies ist auf der abstrahlenden Seite im Empfangsraum ebenso. Allerdings kann angenommen werden, dass durch den rechteckigen Ausschnitt der MDF-Platten ebenso Reflexionen schräg einfallender Schallwellen zu den Blechen hin auftreten, die ohne den hervorstehenden Rahmen nicht auf das Blech einfallen und sich somit eine Schallzuführung wie in rechteckigen Kanälen einstellt.

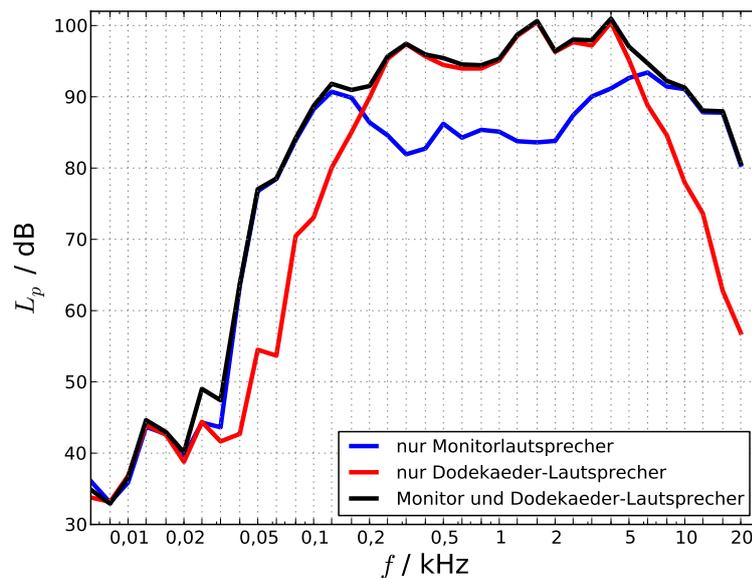


Abbildung 3.24: Schalldruckpegel des Anregungssignals im Senderaum

Durch die begrenzte Größe des Raumes gibt es für die gleichmäßige Verteilung der Schallenergie im Senderaum Einschränkungen zu tiefen Frequenzen hin. Mit zunehmender Wellenlänge sind die Mikrofonpositionen im Raum für die Mittelung nicht mehr ideal verteilt. Da ein bewegtes Mikrofon verwendet wird und 3 verschiedene Bewegungsebenen gemittelt werden, ist der so ermittelte mittlere Schalldruckpegel im Raum hinreichend. In Abbildung 3.23 ist der zeitliche Verlauf des gemessenen Schalldruckpegels zu verschiedenen Zeiten eines Mikrofonumlaufs dargestellt. In tieferen Frequenzen ist der Schwankungsanteil aufgrund der großen Wellenlängen höher als zu hohen Frequenzen hin. Jedoch ist der mittlere Schalldruckpegel immer gleich.

Weiterhin ist die effektive Größe der Bleche selbst im Verhältnis zur Schallwellenlänge zu betrachten. Die Seitenabmessungen von 587 mm entsprechen einer Luftschallwellenlänge, die bei Raumtemperatur bei einer Frequenz von etwa 580 Hz erreicht wird. Somit sind messbare Effekte erst in höheren Frequenzen als dieser zu erwarten.

Anregungsspektrum Das Abstrahlen des anregenden Signals Weißes Rauschen wird durch den Verstärker und die Lautsprecher in seiner Gleichmäßigkeit beeinflusst und begrenzt. Dabei werden nicht alle Frequenzbereiche gleichmäßig abgestrahlt. Dies ist im Empfangsraum durch den Signal-Rauschabstand begrenzt. Abbildung 3.24 zeigt den mittleren Schalldruckpegel im Senderaum für die Anregung durch den Dodekaeder-Lautsprecher, den Monitorlautsprecher sowie durch beide gleichzeitig. Gut ist der Abfall des Schalldruckpegels bereits ab etwa 4 kHz für den Dodekaederlautsprecher zu erkennen. Dieser war die Schallquelle innerhalb der ersten Messkampagne. Ein inakzeptabler Signal-Rauschabstand stellte sich allerdings erst ab einer Frequenz von etwa 10 kHz ein. Durch die Ergänzung um einen Monitorlautsprecher innerhalb der zweiten Messkampagne konnte der nutzbare Frequenzbereich auf bis zu 16 kHz erweitert werden. Im unteren Frequenzbereich beginnen die nutzbaren Terzbänder bei 110 Hz, da aufgrund der Raumabmessungen und den großen Wellenlängen des Luftschalls die Messungen für tiefere Frequenzbereiche ungültig sind.

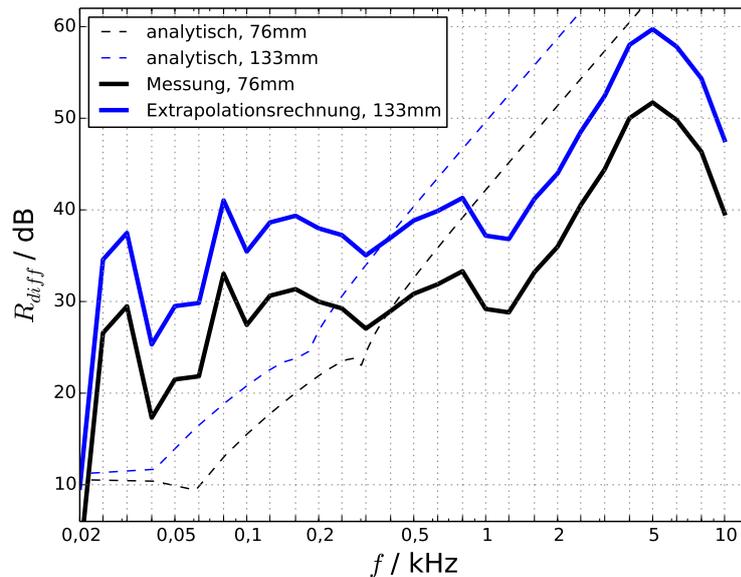


Abbildung 3.25: Gemessenes und analytisch berechnetes Schalldämmmaß der MDF-Platten in der Dicke 38 mm, die als Adaptionrahmen für die Blechaufnahme verwendet wurden, sowie aus den analytischen Ergebnissen eine Abschätzung des Schalldämmmaßes für MDF-Platten der Gesamtdicke von 107 mm, wie sie bei den Messungen der Doppelwände verwendet werden

Nebenwege der Schallübertragung Eine weitere Ungenauigkeit ist die Art der Übertragung der Schallenergie vom Sendezum Empfangsraum. Die im Senderaum eingespeiste Schalleistung des Diffusfeldes gelangt über verschiedene Wege in den Empfangsraum, wo sich ebenfalls ein daraus resultierender Schalldruckpegel innerhalb des Raumes einstellt. Grundsätzlich sind 3 Arten der Schalleistungsübertragung zwischen den Räumen in Betracht zu ziehen. Einerseits regt der Luftschall die Wand zwischen den Räumen und damit das zu messende Bauteil zu erzwungenen Biegeschwingungen an, die im Empfangsraum wiederum ein Luftschallfeld erzeugen. Dies ist der direkte Übertragungspfad. Weiterhin werden die trennenden Bauteile durch das Schallfeld im Senderaum auch zu freien Schwingungen angeregt, wodurch sie Luftschall in den Empfangsraum abstrahlen. Diese zwei Arten sind die für die Messung und Berechnung des Schalldämmmaßes die ausschließlich gewünschten. Ein ungewünschter, aber stets vorhandener Übertragungspfad ist der indirekte Weg über Flanken, die die Räume nicht direkt miteinander verbinden, sondern über Nebenwege Körperschall übertragen. In einem Fensterprüfstand ist die Flankenübertragung weitestgehend minimiert. Der Übertragungsweg durch die Zwischenwand ist stark vermindert, da diese ein sehr hohes Schalldämmmaß besitzt.

Schalldämmung des Adaptionrahmens Die wesentliche Anforderung an die Rahmenkonstruktion, bestehend aus MDF-Platten, und auch an die übrige Zwischenwand des Prüfstandes ist, dass das zu messende Schalldämmmaß des Bauteils vom maximal erreichbaren Schalldämmmaß des Prüfstandes, also der Zwischenwand zusammen mit dem Rahmen aus MDF-Platten, um mindestens 10 bis 15 dB übertroffen wird.

In Abbildung 3.25 ist das Schalldämmmaß einer Wand dargestellt, die komplett aus zwei eingebauten MDF-Platten mit einer Dicke von je 38 mm besteht, in der Art wie sie zur Adaption der einwandigen Bleche verwendet werden. Einerseits werden gemessene Wer-

te gezeigt, als Ergänzung sind analytische Ergebnisse nach Gleichung 3.13 dargestellt. Es zeigt sich, dass ab etwa 500 Hz das analytische Ergebnis das Schalldämmmaß überschätzt und der gemessene Wert etwa 15 dB geringer ist. Dennoch wird hier aus den Differenzen der analytischen Ergebnisse eine Abschätzung auf das Schalldämmmaß des Rahmens, der für die Messungen der Doppelwandkonstruktionen verwendet wird, durchgeführt. Diese Werte sind ebenfalls im Diagramm dargestellt. Legt man nun das größte messbare bewertete Schalldämmmaß $R_{W_{\max}}$ des Fensterprüfstandes von 71 dB zugrunde [77], so zeigt sich, dass der Rahmen aus MDF-Platten das Bauteil ist, welches das größte sinnvoll messbare Schalldämmmaß begrenzt.

Berechnung des Schalldämmmaßes In der Gleichung 3.62 wird das Schalldämmmaß R bestimmt, welches folgendermaßen aus dem Transmissionsgrad τ als Pegel gebildet wird:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} \text{ dB.} \quad (3.64)$$

Der Transmissionsgrad eines Bauteils ist dabei das Verhältnis aus transmittierter Schallleistung $P_{t,12}$, die durch den Gegenstand von Raum 1 zu Raum 2 transportiert wird, zu der auf ihn einfallenden Schallleistung $P_{e,1}$:

$$\tau = \frac{P_{t,12}}{P_{e,1}}. \quad (3.65)$$

Diese beiden Größen gilt es nun zu ermitteln. Die Schallenergiedichte w allgemein in einem Raum wird nach [56] aus der Schallgeschwindigkeit c , der Schallleistung P und einer Bezugsfläche S , in diesem Fall die gesamte Raumboberfläche, so bestimmt:

$$w = \frac{4P}{cS}. \quad (3.66)$$

Angewandt wird die auf den zu messenden Gegenstand einfallende Schallleistung aus der Schallenergiedichte w_1 im Senderraum und seiner Fläche S_{12} bestimmt:

$$P_{e,1} = w_1 c \frac{S_{12}}{4}. \quad (3.67)$$

Sie ist somit direkt proportional zur Schallenergiedichte, Schallgeschwindigkeit und zur einfallenden Fläche. Es wird weiterhin angenommen, dass die in den Empfangsraum transmittierte Schallleistung $P_{t,12}$ gleich der Schallleistung ist, die im Senderraum auf den Prüfgegenstand einfällt, multipliziert mit dem (gesuchten) Transmissionsgrad des Gegenstandes. Ebenso ist die transmittierte Schallleistung gleich der im Empfangsraum absorbierten Schallleistung $P_{a,2}$, da sich nach einem angenommenem kurzen Einschwingvorgang nach Einschalten der Schallquelle ein Gleichgewicht in beiden Räumen einstellt. Somit gilt

$$\tau P_{e,1} = P_{t,12} = P_{a,2}. \quad (3.68)$$

Die im Empfangsraum absorbierte Schallleistung ist

$$P_{a,2} = w_2 c \frac{S_{2,\text{ges}}}{4} \bar{\alpha} \quad (3.69)$$

und man kann folgende Zusammenfassung vornehmen:

$$A = S_{2,\text{ges}} \bar{\alpha}. \quad (3.70)$$

Dabei ist $S_{2,\text{ges}}$ die Gesamtoberfläche und $\bar{\alpha}$ der durchschnittliche Absorptionsgrad der Begrenzungsflächen des Empfangsraumes, woraus sich mit A die äquivalente Schallabsorptionsfläche des Empfangsraumes ergibt. Diese wird wie in Gleichung 3.63 angegeben durch Messung der Nachhallzeit ermittelt. Dabei ist eine gewisse Unsicherheit, abhängig von den Umgebungsbedingungen, zu beachten. Die Nachhallzeit hängt direkt von der Schallgeschwindigkeit c und mit

$$c = \sqrt{\kappa RT_{\text{amb}}} \quad (3.71)$$

von den Parametern der Umgebungsluft ab. Dabei ist die Umgebungstemperatur T_{amb} gegenüber dem Adiabatenkoeffizienten κ und der allgemeinen Gaskonstante R als Anteil mit der größten Variabilität anzusehen. Nach [22] ist Gleichung 3.63 für eine Umgebungstemperatur von 20° zugeschnitten, jedoch mit dem Faktor 0,16. Weiterhin wird eine gleichmäßige Verteilung des Absorptionsgrades innerhalb der Raumbofläche angenommen.

Eine weitere wichtige Annahme ist, dass keine Schalleistung durch den Gegenstand vom Empfangs- zum Senderraum zurücktransmittiert wird. Die Grundlage dafür ist ein genügend hohes Mindestschalldämmmaß des Gegenstandes sowie vor allem eine vergleichsweise geringe Schalleistungsdichte im Empfangsraum gegenüber dem Senderraum. Somit gilt

$$P_{t,21} = 0. \quad (3.72)$$

Nun wird eine Energiebilanz für den Senderraum aufgestellt:

$$P_1 = w_1 c \frac{A_1}{4} + w_1 c \frac{S_{12}}{4} \tau - w_2 c \frac{S_{12}}{4} \tau. \quad (3.73)$$

Dabei wird auf der rechten Seite der Gleichung der letzte Summand unter der Annahme, dass w_2 viel kleiner gegenüber w_1 ist und durch Multiplikation mit dem ebenfalls sehr kleinen Transmissionsgrad weiter verkleinert wird, null und fällt damit weg. P_1 ist die von der Schallquelle abgegebene Schalleistung. Die Energiebilanz für den Empfangsraum wird in folgender Gleichung aufgestellt:

$$0 = w_2 c \frac{A_2}{4} + w_2 c \frac{S_{12}}{4} \tau - w_1 c \frac{S_{12}}{4} \tau. \quad (3.74)$$

Auch hier wird angenommen, dass der zweite Summand auf der rechten Gleichungsseite gegen null geht, aber zum besseren Verständnis wird dieser Term in der folgenden Gleichung berücksichtigt. Da man nun τ isolieren und ermitteln möchte, erkennt man, dass die Umformung der Gleichung 3.74 nach τ genügt und die Kenntnis der Schalleistung P_1 im Senderraum unnötig ist. Es ergibt sich nach Umformen und Kürzen folgender Zusammenhang:

$$\tau = \frac{w_2}{w_1 - w_2} \frac{A_2}{S_{12}}. \quad (3.75)$$

Die sehr kleine Schallenergiedichte w_2 wird nun im Nenner als null angenommen, im Zähler jedoch unverändert belassen. Dies darf man an dieser Stelle so durchführen, denn die Differenz aus zwei sehr unterschiedlich großen Zahlen sind sehr ähnlich der größeren Zahl, ein Verhältnis aus zwei solchen Zahlen kann dagegen jederzeit mit unterschiedlichstem Ergebnis gebildet werden und darf nicht ohne weiteres vereinfacht werden. Nun drückt man das Reziproke des Transmissionsgrades folgendermaßen aus:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{w_1}{w_2} \frac{S_{12}}{A_2}. \quad (3.76)$$

Die Schallenergiedichte w allgemein ist die Summe aus kinetischer und potenzieller Energiedichte:

$$w = w_{\text{kin}} + w_{\text{pot}}. \quad (3.77)$$

In einem Gleichgewichtszustand sind in zeitlicher Mittelung beide Größen gegenseitig durcheinander ersetzbar, da gleich groß. Somit gilt

$$w_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \rho_0 \tilde{v}^2 = \frac{1}{2} \rho_0 \left(\frac{\tilde{p}}{\rho_0 c} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{\tilde{p}^2}{\rho_0 c^2} = w_{\text{pot}}. \quad (3.78)$$

Somit sind die Schallenergiedichten in Sende- und Empfangsraum allein durch die Kenntnis der mittleren Schalldrücke sowie der Mediendichte ρ_0 und der Schallgeschwindigkeit c , in diesem Fall jeweils für Luft, ermittelbar. Damit lässt sich das Schalldämmmaß aus den Schalldruckpegeln der Messungen berechnen, denn nach Logarithmierung von Gleichung 3.76 ergibt das Verhältnis der Schallleistungsdichten die Differenz der Schalldruckpegel:

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \lg \frac{S_{12}}{A_2} \text{ dB}. \quad (3.79)$$

Temperatureinfluss Weiterhin ist der Schallübergang zwischen Luft und Wand aufgrund der Impedanzen immer auch von der Umgebungstemperatur abhängig, ebenso wie die Berechnung der Nachhallzeit. Für die Messungen und Berechnungen wurde immer von einer Temperatur von 15 °C ausgegangen. Jedoch muss für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse auch eine mögliche Abweichung in Betracht gezogen werden. Die Größe der Fehler ist jedoch als sehr gering einzuschätzen.

Kapitel 4

Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den verschiedenen Untersuchungen an strukturierten Blechen dargestellt, verglichen und diskutiert. Dazu werden Berechnungsergebnisse präsentiert, die aus analytischen Formulierungen und aus numerischen Lösungen, wie sie jeweils in Kapitel 3 vorgestellt sind, gewonnen wurden, und mit Ergebnissen aus Messungen verglichen. Die experimentelle Bestimmung des Schalldämmmaßes der Einzelschalen aus glatten und strukturierten Blechen gemäß der Beschreibung des Messverfahrens in Abschnitt 3.4 erfolgte innerhalb einer Messkampagne. In einer zweiten Messkampagne wurde das Schalldämmmaß der Doppelwandkonstruktionen und zum Vergleich erneut das einiger weniger Einzelwandkonfigurationen bestimmt.

Die Bleche besitzen verschiedene Parameter, die variiert werden. Im ersten Abschnitt werden ausschließlich Ergebnisse von Einzelwandkonstruktionen betrachtet, in einem weiteren Abschnitt werden diese ergänzt und erweitert durch Ergebnisse aus Untersuchungen an Doppelwandkonstruktionen. Jeder Abschnitt beinhaltet eine Parameterstudie, deren Ergebnisse Vergleiche der verschiedenen Konstruktionen aus glatten und strukturierten Blechen nach mehreren unterschiedlichen Kriterien zulassen.

4.1 Schalldämmung einschaliger Wände

Zuerst wird das Schalldämmungsverhalten von Einzelwänden aus glatten und aus strukturierten Blechen betrachtet. Dazu ist eine nähere Erläuterung des Schalldämmmaßes von Einzelwänden nötig. Die auf verschiedenen Wegen, also durch numerische und analytische Berechnung und durch Messungen erzielten Werte werden miteinander verglichen und diskutiert.

4.1.1 Glatte Wände

Hier soll der Verlauf des Schalldämmmaßes von glatten Wänden dargestellt werden. Das verwendete analytische Modell für diffusen Schalleinfall gilt grundsätzlich für unendlich ausgedehnte Platten. Die innerhalb dieser Arbeit betrachteten Wände hatten stets endliche, immer ähnliche und generell eher kleine Abmessungen, dies gilt es beim Vergleich der Ergebnisse und Erklärung von Unterschieden zu berücksichtigen.

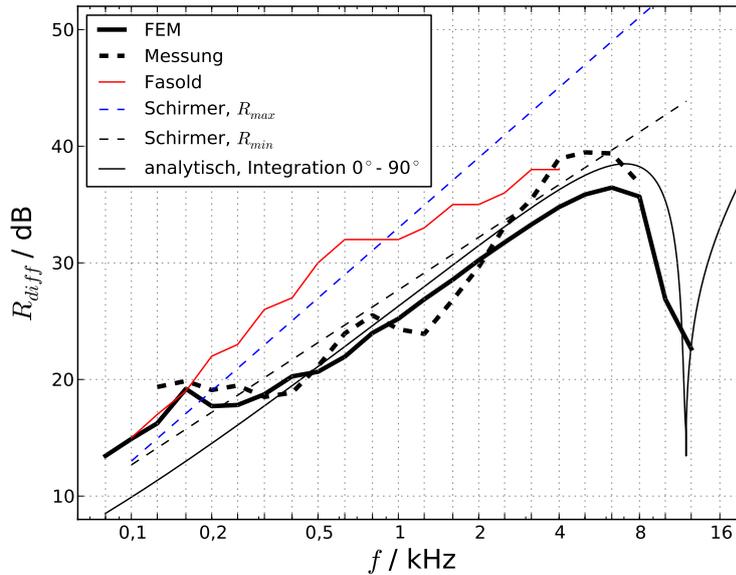


Abbildung 4.1: Vergleich zwischen analytisch und mittels FEM berechnetem und gemessenem Schalldämmmaß R_{diff} sowie mit aus der Literatur [65, 23] bekannten Werten von einer 1,0 mm starken, einschaligen Wand aus glattem Blech der Größe 587×587 mm beziehungsweise unendlicher Ausdehnung ([23])

Das Schalldämmmaß von Platten ist frequenzabhängig. In Abbildung 4.1 ist der Verlauf des Schalldämmmaßes für eine 1 mm dicke Wand aus Stahl dargestellt. Darin werden die Ergebnisse aus Messung, FEM-Simulation und analytischer Berechnung miteinander verglichen. Den gemessenen und FE-simulierten Werten liegt die reale Probengröße von 587×587 mm zugrunde, die analytische Berechnung gilt für eine unendlich ausgedehnte Wand. Zusätzlich sind theoretische Verläufe aus bauakustischer Literatur [23] für eine unendliche Ausdehnung, aber hier für eine angenommene flächenbezogene Masse von 8 kg/m^3 , und einer weiteren Literaturstelle [65], ebenfalls für eine unendliche Ausdehnung und für kleine Platten mit Annahme der realen Abmessungen, eingezeichnet. Die Darstellung der durch FEM ermittelten Werte erfolgt zusammengefasst in Terzbändern und in einem Frequenzbereich ab 80 Hz, ab dieser Frequenz sind ebenso die analytischen Werte eingezeichnet. Die Messwerte sind ab 125 Hz ebenfalls in Terzbändern dargestellt, da die Messungen für tiefere Frequenzen ungültig sind, siehe Unterabschnitt 3.4.5. Die Messwerte sind bis 8 kHz, die FEM-Ergebnisse bis 12,5 kHz und die analytischen Ergebnisse bis 20 kHz dargestellt.

Für den theoretischen Verlauf der Kurve kann eine erste grundsätzliche Unterteilung in drei verschiedene Frequenzbereiche vorgenommen werden. Diese drei Bereiche sind durch Abschnitte, die eine Verringerung des Schalldämmmaßes aufweisen, voneinander getrennt. Im tiefen Frequenzbereich stellt die erste Platten-Eigenfrequenz den Übergang zwischen dem ersten und zweiten Bereich dar. Unterhalb dieser Eigenfrequenz nimmt das in diesem Bereich vergleichsweise geringe Schalldämmmaß zur Eigenfrequenz hin ab. Die Lage der Eigenfrequenzen ist stark von der endlichen Größe der Platten und ihrer Einspannung und damit von ihrer Steifigkeit abhängig. Für die untersuchten Bleche liegt die erste Eigenfrequenz mit etwa 7 Hz für das dünnste Blech und mit etwa 14 Hz für das dickste Blech in einem sehr tiefen Frequenzbereich. Die Eigenfrequenzen wurden simulatorisch und analy-

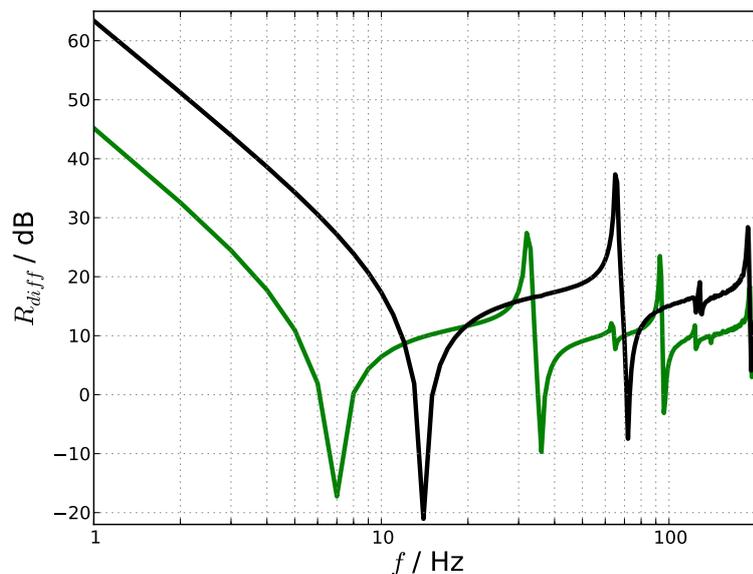


Abbildung 4.2: Mittels FEM berechnetes Schalldämmmaß R_{diff} einschaliger Wände aus glattem Blech der Dicken ■ 0,5 mm und ■ 1,0 mm im Frequenzbereich von 1 Hz bis 200 Hz mit sichtbarer Lage der Platten-Eigenfrequenzen

tisch [65] ermittelt und stimmen sehr genau überein. Ihre Lage ist in Abbildung 4.2, in der das Schalldämmmaß aus Ergebnissen der FE-Berechnung für sehr tiefe Frequenzen dargestellt ist, gut zu erkennen. Aufgrund dieser niedrigen Frequenzen ist die messtechnische Ermittlung dieses Verhaltens mit dem verwendeten Messverfahren nicht möglich.

Der Betrag des Schalldämmmaßes wird in diesem Bereich durch die Steifigkeit des Bleches bestimmt. Unterhalb von 315 Hz gibt es starke Abweichungen der analytisch ermittelten Kurve von der FE-simulierten und der gemessenen Kurve. Dies ist auf die endlichen Abmessungen der Wände bei den letzten beiden Verfahren zurückzuführen. Da die analytische Formel die Abmessungen in Plattenebene gar nicht berücksichtigt, wird die erste Eigenfrequenz auch nicht erfasst und berücksichtigt, so dass das Schalldämmmaß von Beginn an kontinuierlich mit zunehmender Frequenz ansteigt.

Für die FE-Simulation wurde eine gelenkige Lagerung an den Plattenrändern als Randbedingung vorgegeben. Ab der ersten dargestellten Frequenz von 80 Hz stellt sich bis 315 Hz ein schwankendes Schalldämmmaß ein, das leicht ansteigt.

Ab 125 Hz mit ansteigender Frequenz bis hin zu 315 Hz ist das gemessene Schalldämmmaß sehr ähnlich dem mittels FEM berechneten.

Ab den Platteneigenfrequenzen steigt das Schalldämmmaß über einen größeren Frequenzbereich in der Theorie konstant mit etwa 6 dB mit jeder weiteren Oktave an. Innerhalb dieses Bereiches hängt nach dem Bergerschen Massegesetz der Betrag des Schalldämmmaßes nur von der flächenbezogenen Masse ab. Somit gilt für Werkstoffe homogener Dichte, dass die Dicke der Wand das Schalldämmmaß in diesem Bereich bestimmt. In Abbildung 4.1 ist dieser Bereich komplett dargestellt.

Die Ergebnisse der Berechnungen mit FEM steigen in diesem Maße beginnend ab etwa 200 Hz an. In tieferen Frequenzen ist der Einfluss der Eigenfrequenzen in Form von star-

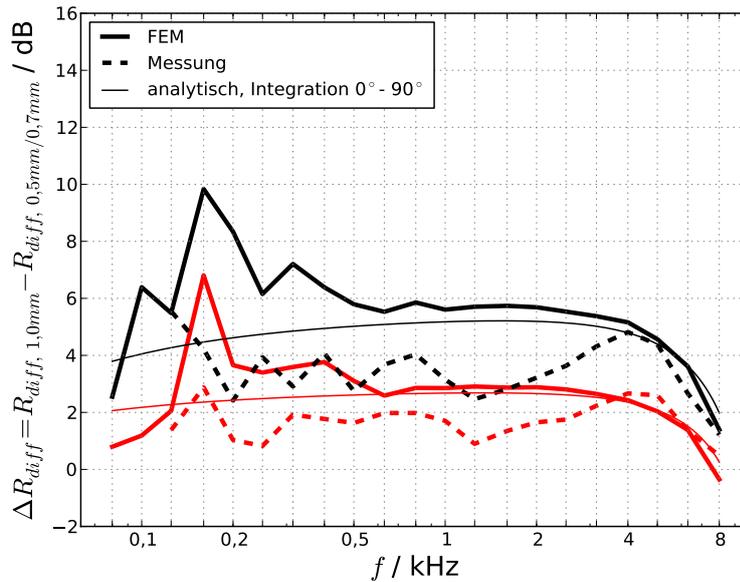


Abbildung 4.3: Unterschiede in den Abweichungen der analytisch und mittels FEM berechneten und gemessenen Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus glattem Blech der Dicke 1,0 mm von den Dicken: \blacksquare 0,5 mm und \blacksquare 0,7 mm

ken Schwankungen erkennbar. Das Messergebnis zeigt tendenziell leicht höhere Werte für das Schalldämmmaß und einen weniger geradlinigen Verlauf. Dies ist auf Einflüsse des Prüfstandes, des Holzrahmens und Messunsicherheiten zurückzuführen. Zwischen 1 kHz und 2 kHz sieht man eine Veränderung im Anstieg des Schalldämmmaßes. Dies weist auch der Verlauf des Schalldämmmaßes für den reinen Holzrahmen auf. Es ist zu vermuten, dass der Einfluss vom Rahmen selbst oder aber vom Fensterprüfstand allgemein erzeugt wird. Zusätzlich sind in die Abbildung Werte für den bauakustisch interessierenden Frequenzbereich von 125 Hz bis 4 kHz von Fasold, Winkler und Sonntag [23] für Wände aus Stahlblech mit der Dicke 1 mm und einer flächenbezogenen Masse von 8 kg/m^2 eingefügt. Diese liegen beginnend ab 200 Hz bis 3150 Hz bis zu 7 dB über den Messwerten und den mittels FEM und analytisch berechneten Werten und überschätzen diese somit. Für tiefere Frequenzen stimmt sie gut mit dem Messwerten und dem Ergebnis der FEM-Simulation überein. Bei 4 kHz entspricht das gemessene Schalldämmmaß dem Wert aus der Literatur. In diesem Bereich liegt der gemessene Wert über den mittels FEM und analytisch ermittelten Werten, was auf die kleinen Abmessungen der Blechproben und Effekten der Einspannung, die nicht exakt in der FE-Simulation abgebildet werden können, zurückzuführen ist.

Schirmer [65] hat eine analytische Formel zur Berechnung des maximal erzielbaren Schalldämmmaßes von unendlichen Platten und eine zur Berechnung der Schalldämmung von kleinen Platten aufgestellt. Die Ergebnisse von Berechnungen dieser Formel angewandt auf die realen Abmessungen des glatten Stahlblechs sind ebenfalls in Abbildung 4.1 skizziert. Die Ergebnisse daraus für die unendliche Platte (Schirmer, R_{max}) liegen im Bereich der Ergebnisse von Fasold, Winkler und Sonntag und überschätzen die ermittelten Werte etwas. Die Ergebnisse für kleine Platten (Schirmer, R_{min}) stimmen sehr gut mit den Messergebnissen, den FEM-Ergebnissen und auch den für die unendliche Platte geltenden analytischen Ergebnissen bis etwa 5 kHz überein.

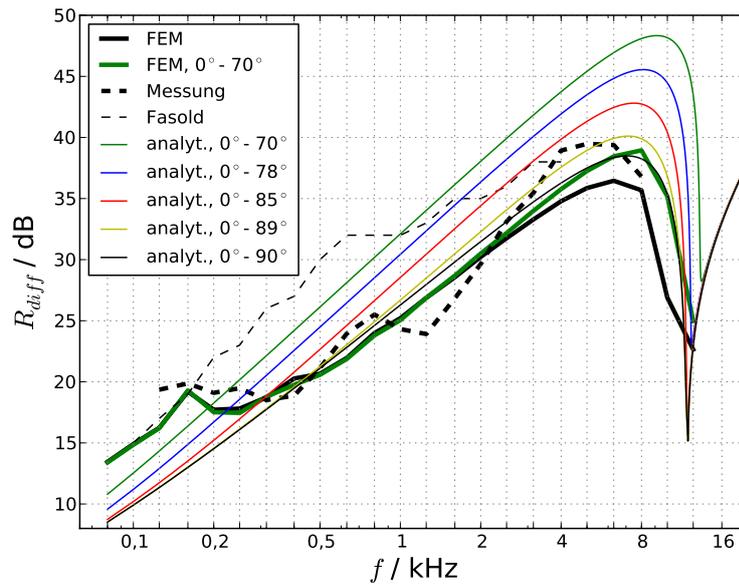


Abbildung 4.4: Abhängigkeit der analytisch und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus glattem Blech der Dicke 1,0 mm vom Bereich der Einfallswinkel, über den integriert wird

Mit zunehmender Frequenz verringert sich dieser Anstieg des Schalldämmmaßes zum Bereich der Koinzidenzfrequenz hin. Wie in Unterabschnitt 3.2.1 erklärt, ist in deren Bereich die Schalldämmung aufgrund der Spuranpassung zwischen den Luftschallwellen und den Biegewellen der Platte verringert. Die Koinzidenzfrequenz stellt den Übergang zwischen zweitem und dritten Bereich im Verlauf des Schalldämmmaßes für Einfachwände dar. Für die Blechdicke von 1,0 mm ist nach Gleichung 3.10 die entsprechende Grenzfrequenz 12 kHz. Anhand aller drei Kurven für das Schalldämmmaß aus den verschiedenen Verfahren ist die Abnahme des Schalldämmmaßes zur Koinzidenzfrequenz hin gut erkennbar.

In Abbildung 4.3 sind Schalldämmmaße für zwei weitere Blechdicken von 0,5 mm und 0,7 mm, die mit allen 3 Verfahren ermittelt wurden, als Differenz zu den 1 mm starken Blechen dargestellt. Theoretisch steigt das Schalldämmmaß um 6 dB bei einer Verdoppelung der flächenbezogenen Masse im Bereich unterhalb der Grenzfrequenz. Diese liegen für 0,5 mm und 0,7 mm bei 17 kHz und 24 kHz. Es ist gut zu erkennen, dass diese Differenz von 6 dB in FE-Simulation und analytischer Berechnung sichtbar wird. Die Messergebnisse besitzen eine etwas geringere Differenz zwischen den Schalldämmmaßen der verschiedenen Blechdicken, beginnend ab etwa 200 Hz bis etwa 3 kHz. Somit wird in diesem Bereich tendenziell eine höhere Schalldämmung gemessen als berechnet, da die Werte für das 1 mm dicke Glattblech dort in etwa übereinstimmen.

Da in der Realität nie ein theoretisch ideal diffuses Schallfeld, bei dem der Einfall der Schallwellen aus allen Richtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit geschieht, existiert, wird eine Einschränkung des maximalen Einfallswinkel untersucht. Dies ist realitätsnäher, da ein Einfall mit zunehmendem Einfallswinkel bis hin zu streifendem Schalleinfall immer unwahrscheinlicher wird. So wird sowohl in der FEM-Berechnung als auch in der analytischen Berechnung der Bereich der Einfallswinkel von 0° bis mindestens 70° und größer begrenzt. Dies ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Es wird gut sichtbar, dass die Einschränkung des Integrationsbereiches der Einfallswinkel einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse der ana-

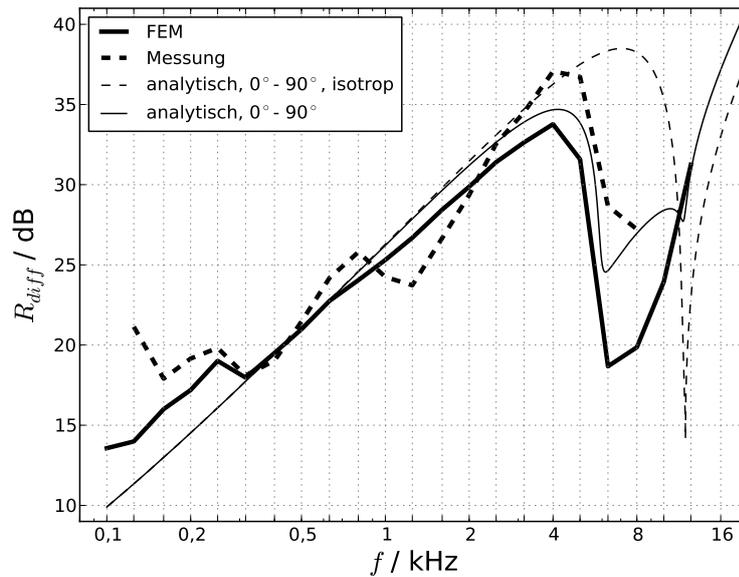


Abbildung 4.5: Vergleich zwischen analytisch (Orthotropiefaktor $o = 4$) und mittels FEM berechnetem und gemessenem Schalldämmmaß R_{diff} von einer 1,0 mm starken, einschaligen Wand aus strukturiertem Blech der Schlüsselweite 33

lytischen Berechnung hat als auf die Ergebnisse der FEM-Berechnung. Erwartungsgemäß steigt das Schalldämmmaß mit einem kleineren Winkelbereich an, da beim Übergang von streifendem zu senkrechtem Schalleinfall das Schalldämmmaß zunimmt.

4.1.2 Strukturierte Wände

In Abbildung 4.5 ist äquivalent zum vorhergehenden Unterabschnitt das analytisch und mit FEM berechnete und gemessene Schalldämmmaß für ein Blech der Dicke 1,0 mm, aber mit einer Wabenstruktur der Schlüsselweite 33, dargestellt. Eine numerische Ermittlung der Eigenfrequenzen erzielte eine unterste Frequenz von 13 Hz für 0,5 mm und 20 Hz für 1,0 mm Blechdicke und ist analog zu den glatten Blechen im vorhergehenden Unterabschnitt in Abbildung 4.6 dargestellt. Dies lässt wie erwartet auf eine höhere Steifigkeit der strukturierten Bleche schließen, bis nahezu hin zu einer Verdopplung. In der Literatur geht man von einer Steifigkeitserhöhung im Dreipunkt-Biegeversuch um den Faktor 4 aus [41, 75]. Darauf beziehend wurde der Orthotropiefaktor o in den analytischen Berechnungen auf 4 festgelegt. Der Faktor dieser Erhöhung der Steifigkeit der strukturierten Bleche gegenüber den glatten Blechen nimmt bei gleicher Wabengeometrie und ähnlicher Wabenhöhe mit zunehmender Blechdicke ab. Dies lässt sich gut an dem Verhältnis der ersten Eigenfrequenzen von 7 / 13 Hz und 14 / 20 Hz zwischen 0,5 mm und 1,0 mm dickem glatten und mit SW 33 strukturiertem Blech erkennen, das mit zunehmender Blechdicke steigt und somit einen geringer werdenden Einfluss der Strukturierung auf die Steifigkeit zeigt. Die Simulation berücksichtigt die höhere Steifigkeit in diesem Bereich sehr gut. Weiterhin sind die Schalldämmmaße für ein strukturiertes Blech mit der größeren Schlüsselweite 51 eingetragen, die nur eine unwesentliche Steifigkeitserhöhung gegenüber der Schlüsselweite 33 aufzeigen.

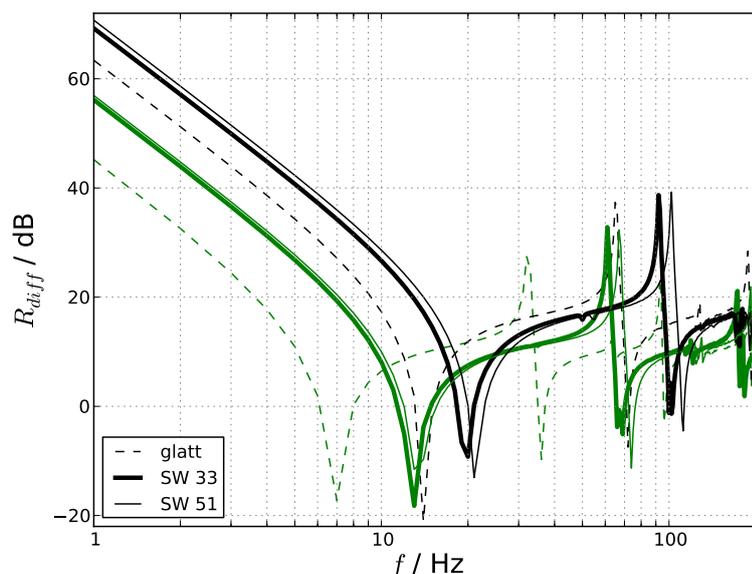


Abbildung 4.6: Mittels FEM berechnetes Schalldämmmaß R_{diff} einschaliger Wände aus glatten und strukturierten Blechen mit Schlüsselweite 33 und 51 der Dicke $\color{green}\blacksquare$ 0,5 mm und \blacksquare 1,0 mm im Frequenzbereich von 1 Hz bis 200 Hz mit sichtbarer Lage der Platten-Eigenfrequenzen

Unterhalb von 200 Hz ist die Größe und der schwankende Verlauf des Schalldämmmaßes sehr ähnlich dem der glatten Bleche, sowohl sichtbar in den Messergebnissen als auch in den Berechnungsergebnissen. Im weiteren Frequenzverlauf steigt das Schalldämmmaß weiter sehr ähnlich den glatten Blechen nach dem Massegesetz an. Ab etwa 4 kHz ist der Anstieg des Schalldämmmaßes weniger stark und ab 5 kHz erfolgt ein Abfall. Damit liegt das Schalldämmmaß in diesem Frequenzbereich unter dem für die glatten Bleche. In Abbildung 4.7 ist ein Vergleich zwischen einem glatten und einem strukturierten Blech der Schlüsselweite 33 mit der jeweiligen Blechdicke 0,5 mm eingetragen. Wieder sind alle Werte mit allen 3 Methoden ermittelt worden. Es ist sehr gut zu sehen, dass die Schalldämmung der glatten und strukturierten Bleche bis etwa 3 kHz nahezu identisch ist, mit weiter ansteigender Frequenz steigt das Schalldämmmaß der glatten Bleche gegenüber dem der strukturierten Bleche in mehreren Stufen bis auf eine Differenz von bis zu 14 dB an. Dies stellt im Umkehrschluss einen Einbruch der Schalldämmung der strukturierten Bleche gegenüber den glatten Blechen gleicher Dicke dar. Die Berechnung des Schalldämmmaßes mit der analytischen Formel für orthotrope, unendliche Platten mit dem Orthotropiefaktor 4 zeigt eine gute Näherung an die gemessenen und berechneten Werte des Schalldämmmaßes. Die Erhöhung der Biegesteifigkeit in bestimmten Plattenachsen bewirkt eine Verbreiterung des Bereiches der Koinzidenzfrequenzen und eine Verlagerung in tiefere Frequenzbereiche, in diesem Fall weit unterhalb von 12 kHz.

In Abbildung 4.8 ist wie im vorhergehenden Unterabschnitt über die glatten Bleche die Abweichung der 0,5 mm und 0,7 mm dicken strukturierten Blechen von den 1,0 mm dicken strukturierten Blechen SW 33 dargestellt. Erneut sind die Abweichungen der gemessenen Bleche geringer als die der berechneten Bleche. Weiterhin gibt es im Frequenzbereich, in dem die Schalldämmungsverringerung der strukturierten Bleche auftritt, Unterschiede zwischen den Blechdicken und den Methoden der Ermittlung. Die dickeren Bleche zeigen

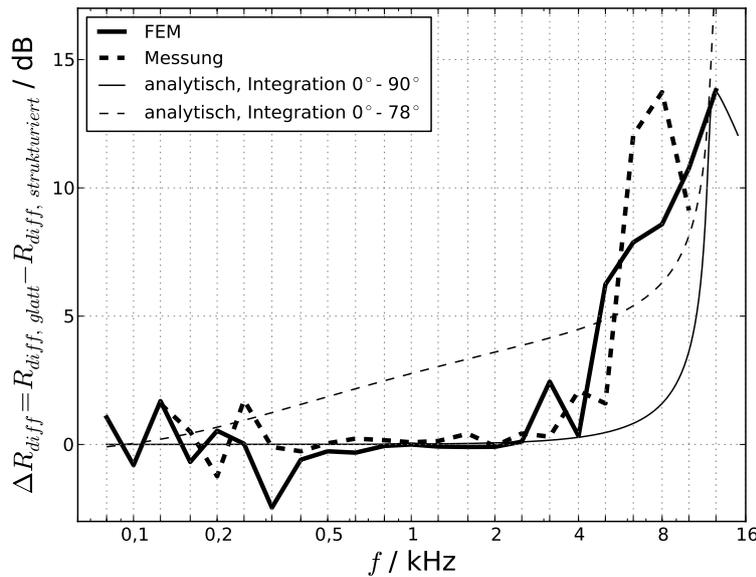


Abbildung 4.7: Differenz der Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus glattem und strukturiertem Blech der Dicke 0,5 mm, jeweils analytisch und mittels FEM berechnet und gemessenen

in einem etwas tieferen Frequenzbereich bereits eine Verringerung der Schalldämmung bei den Ergebnissen der FEM-Simulation, so dass bei 6,3 kHz ein Minimum in der Differenz auftritt. In den Messergebnissen sind die Abweichungen der einzelnen Blechdicken über den gesamten Frequenzbereich relativ konstant.

Anders als für die glatten Bleche ist die Abhängigkeit vom Einfallswinkelbereich anhand der analytisch berechneten Werte für die strukturierten Bleche weniger stark, siehe Abbildung 4.9.

Um ein besseres Verständnis über den Unterschied in der Schalldämmung zwischen glatten und strukturierten Bleche in Form von sich verändernder Biegesteifigkeit für verschiedene Strukturgeometrien zu erlangen, wird nun das modale Verhalten der Bleche betrachtet. Wie es in Unterabschnitt 3.3.1 beschrieben wird, werden Modalanalysen der glatten und strukturierten Bleche rechnerisch durchgeführt. Abbildung 4.10 zeigt die Eigenform eines strukturierten Blechs mit der Schlüsselweite 33 und mit der Dicke von 0,5 mm mit der Randbedingung einer Einspannung der Blechränder bei einer Frequenz von 5906 Hz, indem die Verschiebungen farblich dargestellt sind. Die Auslenkungen und Knoten der Nichtauslenkung bilden die Struktur der Waben nach. Es tritt demnach eine Art Resonanz der Waben auf und die Schwingknoten haben den Abstand etwa einer Wabe. Dies lässt vermuten, dass in diesem Frequenzbereich das strukturierte Blech gut in Resonanz anzuregen ist. Glatte Bleche können solche Waben-Eigenmoden nicht ausbilden.

Für Abbildung 4.11 ist die gleiche rechnerische Modalanalyse für ein vergleichbares 1 mm dickes strukturiertes Blech durchgeführt worden und es wird das Ergebnis für eine Frequenz von 7701 Hz gezeigt. Wieder bilden sich Waben-Eigenmoden aus, welche für ein dickeres, steiferes Blech entsprechend in einem höheren Frequenzbereich liegen. Somit lässt sich für solche wabenartigen Strukturen für jede Blechdicke und Schlüsselweite der Wabe ein vergleichbarer Frequenzbereich finden, in dem Blechresonanzen, bedingt durch die

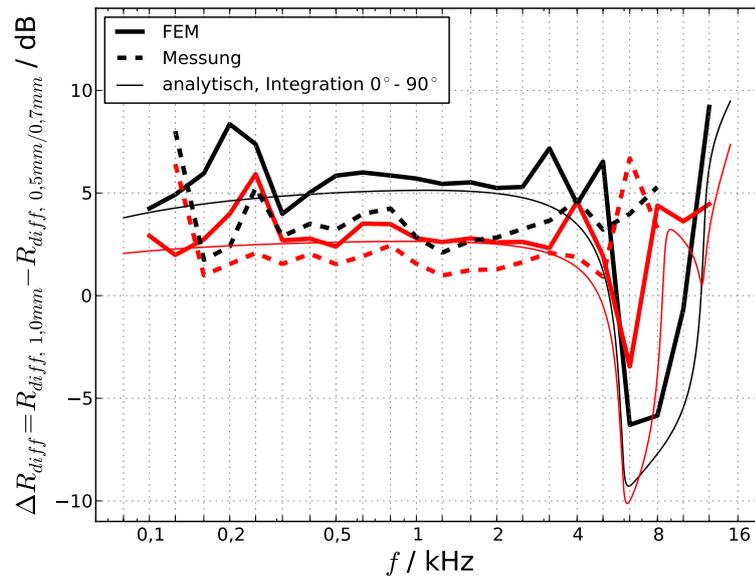


Abbildung 4.8: Unterschiede in den Abweichungen der analytisch und mittels FEM berechneten und gemessenen Schalldämmmaße R_{diff} ein-schaliger Wände aus strukturiertem Blech mit Schlüsselweite 33 und Dicke 1,0 mm von den Dicken: **—** 0,5 mm und **—** 0,7 mm

Strukturgeometrie, auftreten und wobei dies bei äquivalenten glatten Blechen im Vergleich nicht der Fall sein kann. Dies ist also eine Eigenart der wabenförmig strukturierten Bleche.

Bei Betrachtung von Blechen mit einer größeren Schlüsselweite wie dies in den Abbildungen 4.12 und 4.13 für ein 0,5 mm dickes Blech der Schlüsselweite 51 erfolgt, stellen sich erwartungsgemäß bereits bei tieferen Frequenzen wie 2155 Hz und 2357 Hz Waben-Eigenmoden ein. Weiterhin ist zu beachten, dass bei diesen dargestellten Moden in einer Richtung benachbarte Waben zugleich angeregt werden, dies also ein eher tieffrequentes Regime ist, während die beiden Abbildungen davor für die Schlüsselweite 33 höherfrequente Regime darstellen, wobei durch die höhere Anzahl an Schwingbäuchen und -knoten eine feinere Zergliederung des Blechgebietes vorliegt und somit nur jeweils jede zweite Wabe angeregt wird.

Nach Formel 4.1 kann man nun die Modendichte n ermitteln, die die Änderung der statistischen Anzahl von Eigenmoden N je Frequenz ermittelt und darstellt:

$$n = \frac{dN}{df}. \quad (4.1)$$

Abbildung 4.14 zeigt diese für glatte Bleche der Dicken 0,5 mm, 0,7 mm und 1,0 mm. Die Werte wurden aus den Ergebnissen der rechnerischen Modalanalyse mittels FEM errechnet und auch analytisch ermittelt, wie es für glatte Bleche möglich ist. In Abbildung 4.15 ist die Modendichte für die strukturierten Bleche der Schlüsselweite 33 und den drei Blechdicken 0,5 mm, 0,7 mm und 1,0 mm dargestellt. Deutlich zu sehen ist dabei die geringere Modendichte der strukturierten Bleche im Frequenzbereich bis 2 kHz gegenüber den glatten Blechen, was durch die höhere Steifigkeit verursacht wird. Dabei weisen die strukturierten Bleche der Dicke 0,5 mm in etwa die gleiche Modendichte wie glatte Bleche der Dicke 1,0 mm auf. Ab 2 kHz zeigen die strukturierten Bleche eine weitere Reduzierung der Modendichte und mit steigender Frequenz einen plötzlichen Anstieg und weiterhin ein diffuses

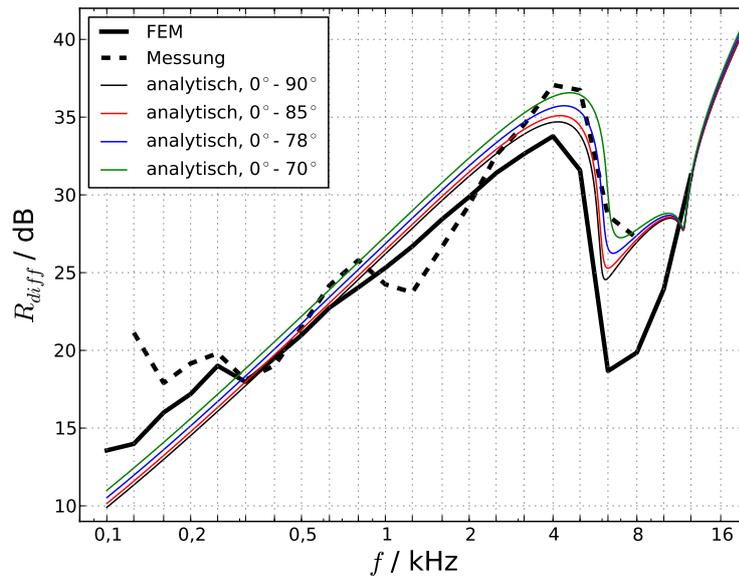


Abbildung 4.9: Abhängigkeit der analytisch (Orthotropiefaktor $o = 4$) und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus strukturiertem Blech SW 33 der Dicke 1,0 mm vom Bereich der Einfallswinkel, über den integriert wird

Verhalten der Modendichte, was auf eine frequenzabhängig stark schwankende Verteilung der Moden schließen lässt. Dieses Verhalten spiegelt den mit steigender Frequenz beginnenden Einfluss der Wabenmoden und der Biegewellen des Blechs wider, die in ihrer Wellenlänge den Abmessungen der periodischen Struktur zu ähneln beginnen. Eine vergrößerte Blechdicke verschiebt dabei den Bereich der stark variierenden Modendichte hin zu etwas höheren Frequenzen. Der umgekehrte Fall bezüglich einer Verschiebung des charakteristischen Verhaltens der Modendichte im Frequenzbereich tritt bei einer Vergrößerung der Schlüsselweite, wie in Abbildung 4.16 dargestellt, ein. Mit zunehmender Schlüsselweite beginnt die Verringerung der Modendichte bereits ab etwa 1 kHz für die Schlüsselweite 51 und entsprechend bei tieferen Frequenzen setzt der diffuse Verlauf ein. Dies wurde erwartet, da die Waben-Eigenmoden in entsprechend tieferen Frequenzen für eine größere Schlüsselweite auftreten.

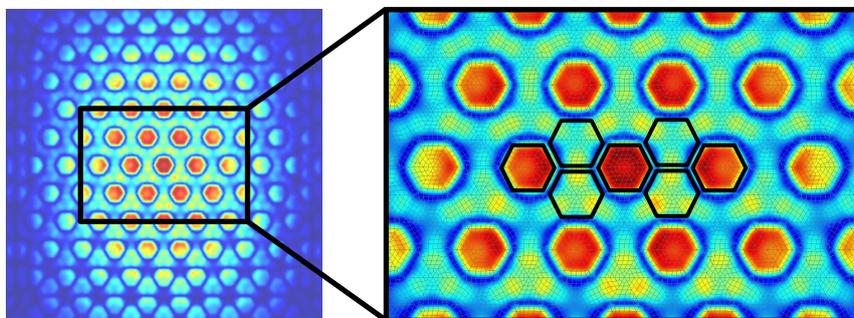


Abbildung 4.10: Eigenform eines 0,5 mm dicken, strukturierten Blechs der Schlüsselweite 33 bei einer Frequenz von 5906 Hz mit auftretenden Waben-Eigenmoden

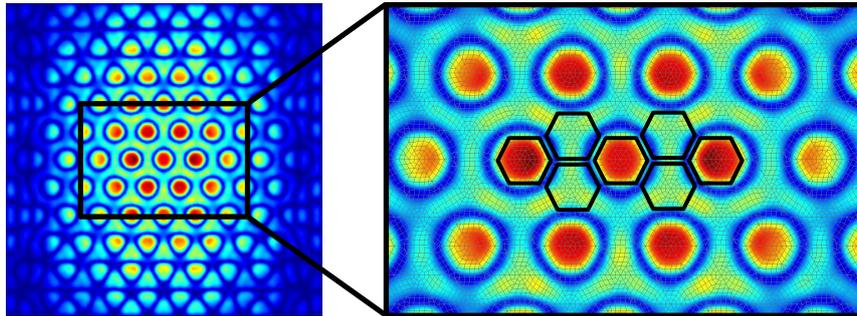


Abbildung 4.11: Eigenform eines 1,0 mm dicken, strukturierten Blechs der Schlüsselweite 33 bei einer Frequenz von 7701 Hz mit auftretenden Waben-Eigenmoden

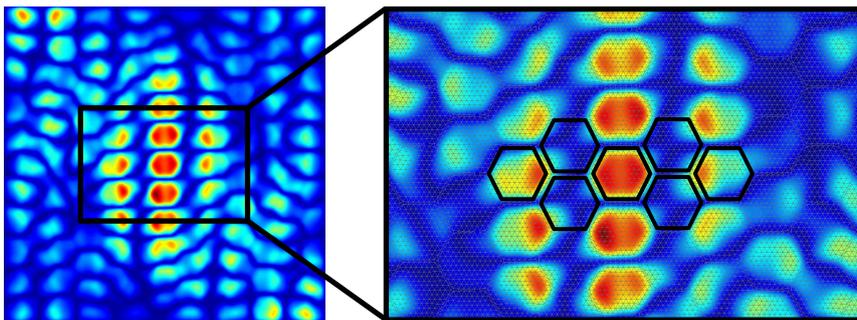


Abbildung 4.12: Eigenform eines 0,5 mm dicken, strukturierten Blechs der Schlüsselweite 51 bei einer Frequenz von 2155 Hz mit auftretenden Waben-Eigenmoden

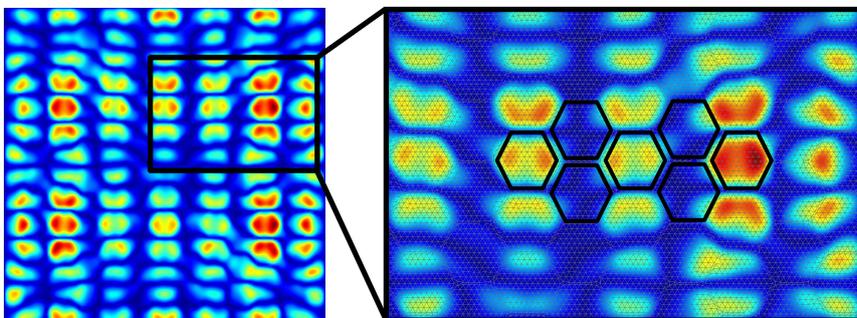


Abbildung 4.13: Eigenform eines 0,5 mm dicken, strukturierten Blechs der Schlüsselweite 51 bei einer Frequenz von 2357 Hz mit auftretenden Waben-Eigenmoden

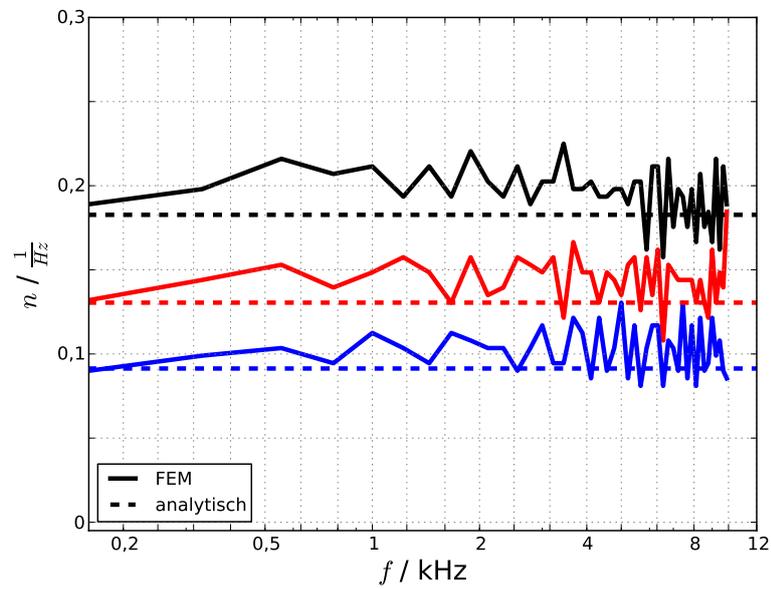


Abbildung 4.14: Modendichte für glatte Bleche der Dicke — 0,5 mm, — 0,7 mm und — 1,0 mm

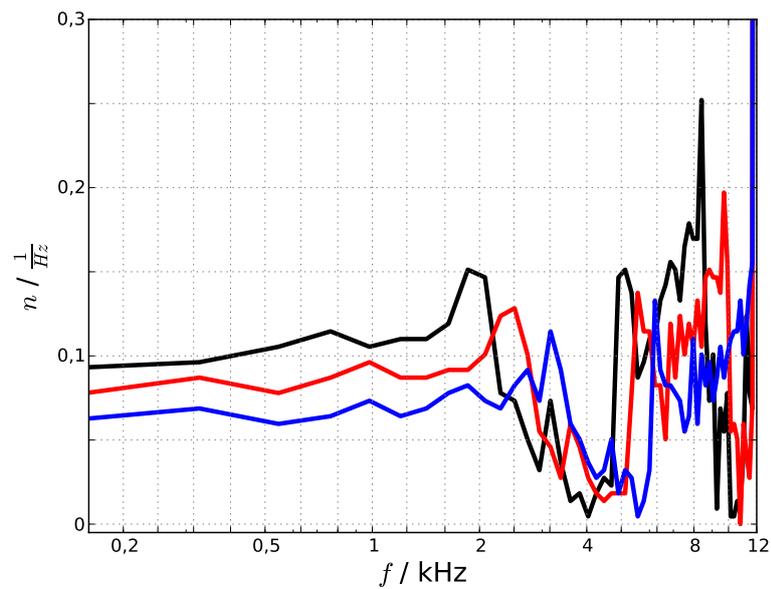


Abbildung 4.15: Modendichte für strukturierte Bleche der Dicke — 0,5 mm, — 0,7 mm und — 1,0 mm und der Schlüsselweite 33

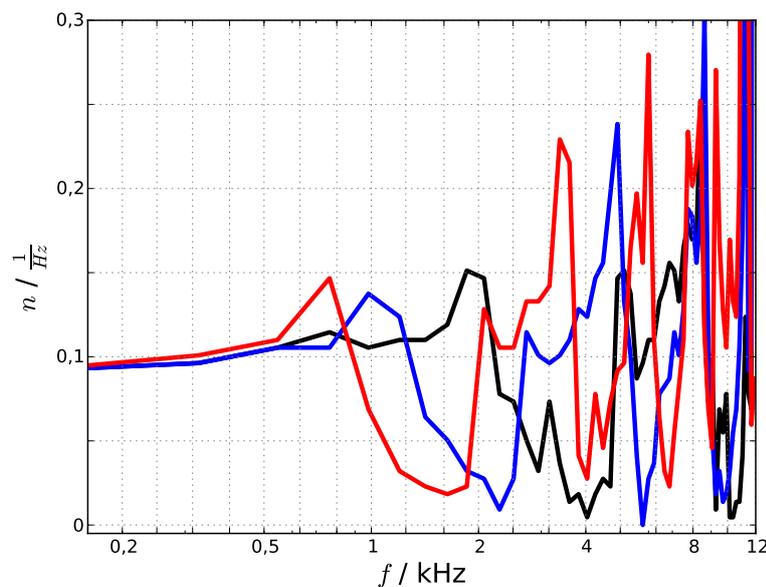


Abbildung 4.16: Modendichte für strukturierte Bleche der Schlüsselweiten **—** 33, **—** 43 und **—** 51 und der Dicke 0,5 mm

4.1.3 Einfluss verschiedener Parameter

Nun werden nach erfolgreicher Simulation des Schalldämmmaßes und erkennbarer Wiedergabe der gemessenen Effekte, die die Schalldämmung strukturierter Bleche von der glatter Bleche unterscheidet, verschiedene Parameter der Bleche variiert, um weitere Aussagen über die Schalldämmung von strukturierten Blechen und Unterschiede zwischen glatten und strukturierten Blechen treffen zu können. Es werden einerseits die Schlüsselweiten der Waben als Indikator für Zusammenhänge zwischen den Abmessungen von periodisch wiederkehrenden Versteifungen und der Schalldämmung betrachtet. Weiterhin werden Vergleiche zu etwas abgewandelten Geometrien der hexagonalen Wabenstruktur hergestellt, indem drei andere Formen die Bleche periodisch versteifen. Anschließend werden die Bleche nach flächenbezogener Masse eingeteilt und ihre Schalldämmung wird verglichen, dies wird durch Variation der Blechdicke und des Werkstoffes realisiert. Schließlich werden die Bleche nach der Ausrichtung der konkaven und konvexen Form der Waben auf Unterschiede untersucht.

In Abbildung 4.17 ist eine Gegenüberstellung der Schalldämmmaße für 0,5 mm dicke, strukturierte Bleche mit drei verschiedenen Schlüsselweiten der Wabenstruktur in Terzbandauflösung eingetragen. Diese Werte wurden sowohl gemessen, diese sind als eine gestrichelte Linie dargestellt, als auch ausgehend von CAD-Modellen mit größerer Schlüsselweite mit der FEM rechnerisch ermittelt, diese sind mit einer durchgezogenen Linie dargestellt. In der Farbe schwarz sind die schon bekannten Mess- und Berechnungswerte der Schlüsselweite 33 als eine Referenz gezeigt, erweitert durch Kurven in blau und rot, die jeweils die Schalldämmmaße für die Schlüsselweiten 43 und 51 darstellen.

Die berechneten Schalldämmmaße der verschiedenen Schlüsselweiten verhalten sich bis zu einem Frequenzband von 2000 Hz und die gemessenen Schalldämmmaße bis zu einem Frequenzband von 3150 Hz nahezu gleich, mit steigender Frequenz treten erste Abweichungen bei der größten Schlüsselweite 51 auf, die eine etwas geringere Schalldämmung aufweist.

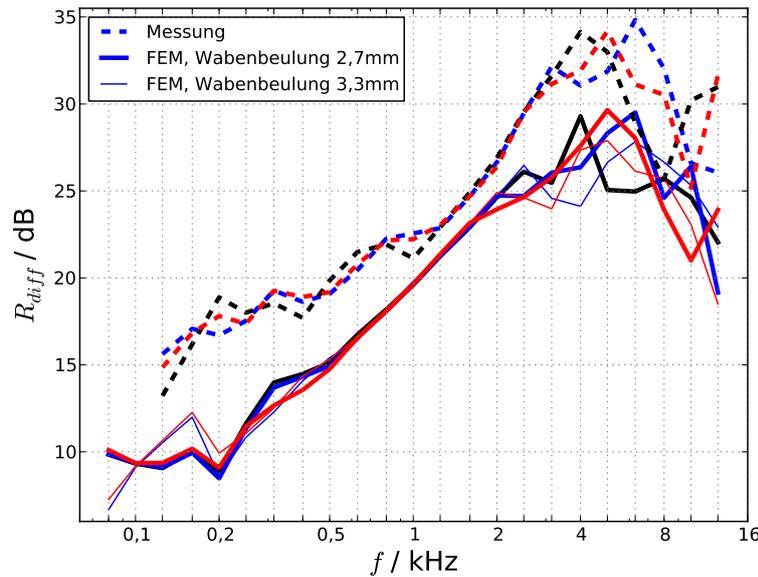


Abbildung 4.17: Abhängigkeit der gemessenen und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus strukturiertem Blech der Dicke 0,5 mm von der Schlüsselweite: — SW 33, — SW 43, — SW 51, und für SW 43 und SW 51 von der Wabenhöhe

Dies ist bei 2500 Hz für die Berechnungsergebnisse und bei 3150 Hz für die Messergebnisse zu beobachten. Mit weiter ansteigender Frequenz sinken nun ebenfalls die Schalldämmmaße der anderen beiden Schlüsselweiten, beginnend mit der mittleren Schlüsselweite 43. Die kleinste Schlüsselweite 33 weist ihre massivere Schalldämmungsverringering, neben einem kleineren Einbruch bei 3150 Hz in den Berechnungsergebnissen, erst bei 5000 Hz auf. Ab diesem Frequenzband liegt die Schalldämmung der kleinsten Schlüsselweite unter der der anderen Schlüsselweiten.

Weiterhin wurde die Wabenhöhe der beiden größeren Schlüsselweiten in der FEM-Berechnung variiert, diese ist 2,7 mm und 3,3 mm. Da eine größere Wabenbeulung einen größeren Umformgrad verglichen mit dem glatten Blech darstellt und somit eine anzunehmende größere Versteifung verursacht, ist in den Ergebnissen auch ein etwas stärkerer Einbruch des Schalldämmmaßes der Bleche mit den größeren Wabenhöhen sichtbar. Generell verlaufen die gemessenen und gerechneten Schalldämmmaße bis auf eine Verschiebung um 6 dB sehr ähnlich und die Effekte werden in den Berechnungen gut berücksichtigt.

Da die Messergebnisse zwar jeweils eine höhere Schalldämmung ermitteln als die berechneten Ergebnisse, sie jedoch im Verlauf und Unterschied der verschiedenen Schlüsselweiten zueinander übereinstimmen, wird in einer weiteren Abbildung 4.18 der höhere Frequenzbereich, in dem sich die Werte der einzelnen Schlüsselweiten unterschiedlich verhalten, in einer nach den Frequenzen feiner aufgelösten und mittels FEM berechneten Darstellung betrachtet. Der Frequenzbereich von 1,6 kHz bis 14 kHz und die Auflösung von 20 Hz zeigen erneut, dass die größte Schlüsselweite im tiefsten Frequenzbereich eine Schalldämmungsverringering aufweist, mit steigender Frequenz bei 3,15 kHz gefolgt von den kleineren Schlüsselweiten, die jeweils mit höherer Frequenz die verringerte Schalldämmung aufweisen, aber dieses Schalldämmmaß liegt teils unter dem der größeren Schlüsselweiten. Insgesamt weisen alle Schlüsselweiten in diesen höheren Frequenzbändern

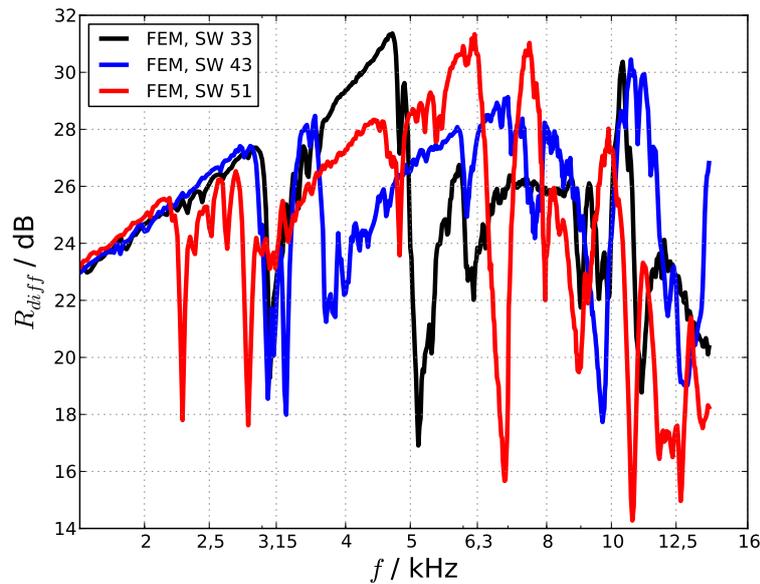


Abbildung 4.18: Abhängigkeit der mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus strukturiertem Blech der Dicke 0,5 mm von der Schlüsselweite: — SW 33, — SW 43, — SW 51 und einer Wabenhöhe von 3,3 mm, Abbildung mit verkleinertem Frequenzbereich und Darstellung als Schmalbandspektrum mit einer Frequenzauflösung von 20 Hz

ein gegenüber den glatten Blechen verringertes Schalldämmmaß mit stark schwankendem Verlauf auf, der mit der größten Schlüsselweite bei tieferen Frequenzbändern beginnt und sich mit kleinerer Schlüsselweite hin zu höheren Frequenzen verlagert.

Nun werden die Bleche nach ihrer flächenbezogenen Masse verglichen, die nach der Theorie im Frequenzbereich oberhalb der ersten Blech-Eigenfrequenzen und unterhalb der Einflussbereiche der sich einstellenden Koinzidenzfrequenzen die entscheidende Größe für den Betrag des Schalldämmmaßes darstellt. Dabei werden neben einer Variation der Blechdicken zur Erzielung der gewünschten Flächenmassen ebenfalls die Werkstoffe der Bleche variiert und es werden Stahl und Aluminium verwendet. Dabei ist zu beachten, dass die Bleche aus Aluminium nahezu die gleichen Koinzidenzfrequenz-Bereiche wie Stahlbleche aufweisen. Gleichung 3.10 zur Bestimmung der Koinzidenzfrequenz beinhaltet das Verhältnis Dichte ρ zu Elastizitätsmodul E , dies ist für beide Werkstoffe nahezu identisch.

Stellt man nun einen Vergleich des Schalldämmmaßes der glatten Bleche in Abbildung 4.19 und der strukturierten Bleche in Abbildung 4.20 nach flächenbezogener Masse her, so erkennt man anhand der Ergebnisse der FEM-Berechnungen, dass sich bei einer Verdopplung der Masse im Mittel eine Differenz von 6 dB in den Werten der Schalldämmmaße einstellt. Dies gilt für glatte und strukturierte Bleche für einen Frequenzbereich, der ab etwa 300 Hz für die Stahlbleche und ab etwa 500 Hz für den Werkstoff Aluminium beginnt. Im noch tieferen Frequenzbereich haben globale Eigenmoden der Bleche einen dominierenden Einfluss und lassen die Werte des Schalldämmmaßes stark schwanken. Die Lage dieser Eigenmoden hängt stark von der globalen Blechgröße und der Blechdicke und damit von seiner Steifigkeit ab, ihr Einfluss verschwindet jedoch mit steigender Frequenz und Zunahme lokaler Moden, die dann gegenüber den Abmessungen des Bleches klein sind. Somit unterscheiden sich die global steiferen strukturierten Bleche von den glatten Blechen in diesem sehr tiefen Fre-

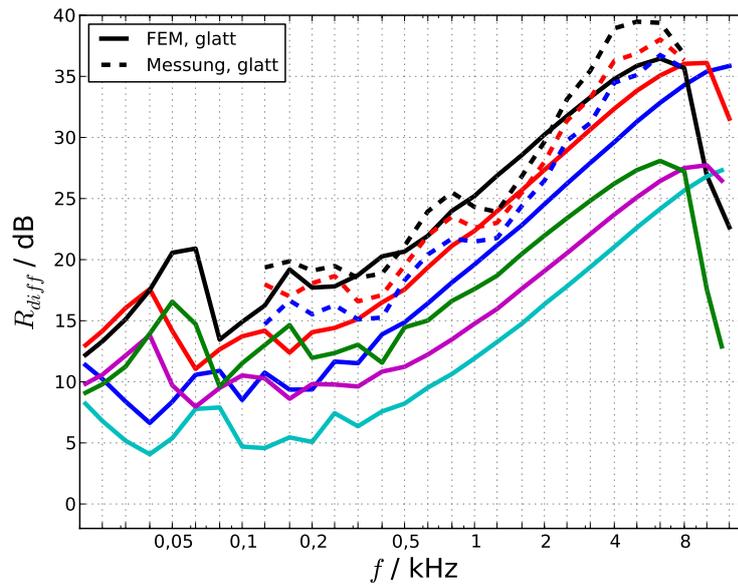


Abbildung 4.19: Abhängigkeit der gemessenen und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} glatter Bleche von der flächenbezogenen Masse: — 7,85 kg/m², — 5,495 kg/m², — 3,925 kg/m² (Werkstoff Stahl) und — 2,7 kg/m², — 1,89 kg/m², — 1,35 kg/m² (Werkstoff Aluminium)

quenzbereich, was sowohl in den berechneten Ergebnissen als auch in den Messergebnissen sichtbar wird. Die Lage der Eigenmoden in der Auflösung nach Terzbändern ist für Aluminium und Stahl sehr ähnlich bei gleicher betrachteter Blechdicke, aber unterschiedlicher Masse. Der Frequenzbereich mit einem Abstand von 6 dB der Schalldämmmaße bei einer Verdopplung der flächenbezogenen Masse erstreckt sich bis etwa 6,3 kHz für die glatten Bleche, darüber hinaus verringert sich bereits das Schalldämmmaß der jeweils schwersten Bleche aus Stahl und Aluminium mit jeweils 1 mm Blechdicke, um dann zum Bereich der Koinzidenzfrequenzen hin zu sinken. Die strukturierten Bleche weisen bis etwa 2,5 kHz diesen Abstand von 6 dB auf, ab dieser Frequenz beginnen die lokalen Wabenmoden und je nach Wabenausrichtung verschiedenen Biegesteifigkeiten innerhalb der Plattenebene die für die untersuchten strukturierten Bleche typische Verringerung des Schalldämmmaßes zu bewirken.

Sowohl für die glatten als auch für die strukturierten Bleche weisen im oben genannten mittleren Frequenzbereich die Messergebnisse einen Unterschied im Schalldämmmaß von nur etwa 3 bis 4 dB bei einem Unterschied der flächenbezogenen Massen um den Faktor 2 auf. Dabei liegen die Werte für die 1 mm starke Wand im Bereich der berechneten Ergebnisse und die für die dünneren und somit leichteren Bleche entsprechend höher als die berechneten und untereinander näher zusammen, wie es in den Unterabschnitten 4.1.1 und 4.1.2 bereits dargestellt ist.

An dieser Stelle soll der Einfluss der Strukturierungen auf die Bleche in Abhängigkeit von ihrer Dicke diskutiert werden. Grundsätzlich sinkt mit zunehmender Blechdicke der versteifende Einfluss der Wabenstruktur auf das Blech, wenn die Wabenhöhe gleich bleibt, wie es hier stets der Fall ist. Mit ansteigender flächenbezogener Masse und damit Blechdicke bei gleichem Werkstoff steigen die Blechmoden in höhere Frequenzbereiche und die Modendichte sinkt. Die Blechdicke geht wie in Gleichung 3.6 erläutert kubisch in den Be-

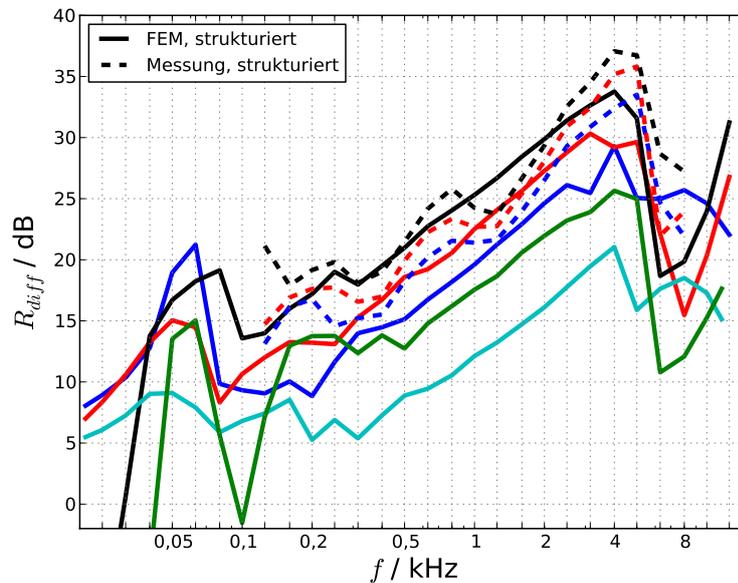


Abbildung 4.20: Abhängigkeit der gemessenen und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} strukturierter Bleche SW 33 von der flächenbezogenen Masse: — 7,85 kg/m², — 5,495 kg/m², — 3,925 kg/m² (Werkstoff Stahl) und — 2,7 kg/m², — 1,35 kg/m² (Werkstoff Aluminium)

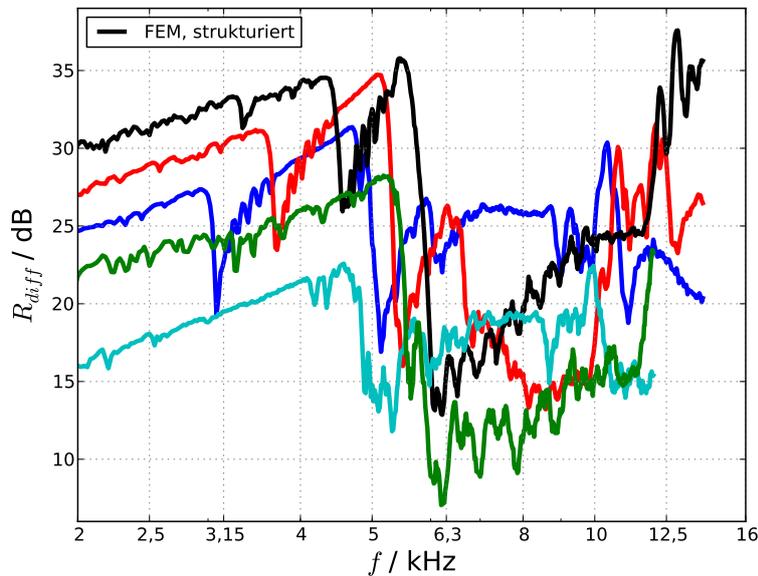


Abbildung 4.21: Abhängigkeit der mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} strukturierter Bleche SW 33 von der flächenbezogenen Masse: — 7,85 kg/m², — 5,495 kg/m², — 3,925 kg/m² (Werkstoff Stahl) und — 2,7 kg/m², — 1,35 kg/m² (Werkstoff Aluminium), Abbildung mit verkleinertem Frequenzbereich und Darstellung als Schmalbandspektrum mit einer Frequenzauflösung von 20 Hz

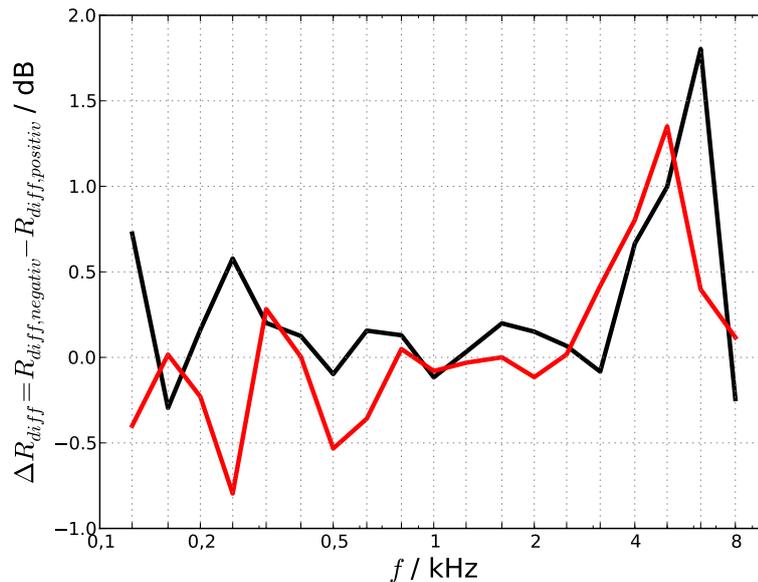


Abbildung 4.22: Differenz des gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} strukturierter Bleche SW 33 der Dicken \blacksquare 0,5 mm und \blacksquare 0,7 mm zwischen negativer und positiver Orientierung der Waben

trag der Biegesteifigkeit ein und hat entsprechend auch einen größeren Einfluss als den einfachen des Elastizitätsmoduls. Die lokalen Moden der Bleche hängen wiederum von der Biegewellenlänge und diese nach Gleichung 3.8 vom Verhältnis der Biegesteifigkeit zur flächenbezogenen Masse ab. Nimmt man nun an, dass die lokalen Moden der strukturierten Bleche einen Einfluss auf ihre veränderte und verminderte Schalldämmung gegenüber den glatten Blechen haben, wie es in den Abbildungen 4.10ff. nachgewiesen wurde, so erhöhen Strukturierungen mit einer größeren Schlüsselweite die Biegesteifigkeit nur leicht. Größere Strukturierungen liegen bei tieferen Frequenzen mit ihren Abmessungen in Bereichen der Biegewellenlängen der Bleche, wie in Abbildung 4.18 deutlich wird. Ebenso sinken mit geringerer Blechdicke und damit bei gleichem Werkstoff mit geringerer flächenbezogener Masse die Frequenzen, in denen sich das Schalldämmmaß der strukturierten Bleche von dem der glatten Bleche unterscheidet, gut sichtbar in Abbildung 4.21. Es verlagern sich also die lokalen Moden der Bleche hin zu höheren Frequenzen trotz gleichzeitig steigender flächenbezogener Masse aufgrund des größeren Einflusses der Blechdicke auf die Biegesteifigkeit als auf die Masse.

Abbildung 4.22 zeigt einen Vergleich des gemessenen Schalldämmmaßes von strukturierten Blechen SW 33 und den Blechdicken von 0,5 mm und 0,7 mm, wobei die Bleche einmal so eingebaut wurden, dass die positiv genannte, konvexe Wölbung der Bleche in Richtung des Senderraumes ragen, und einmal entgegengesetzt. Der erste Fall beinhaltet die für alle anderen Messungen verwendete Orientierung und dieser Vergleich dient zur Ermittlung eines möglichen Einflusses der Wabenorientierung bei verbauten strukturierten Blechen auf die Schalldämmung. Es lässt sich gut erkennen dass es kaum Unterschiede im Verlauf der einzelnen Schalldämmmaße gibt, die nicht im Rahmen der Messtoleranzen liegen. Jedoch erzielen die negativ eingebauten Bleche stets eine leicht höhere Schalldämmung in dem Frequenzbereich, in dem die lokalen Wabenmoden einen Einfluss auf das Schalldämmmaß ausüben.

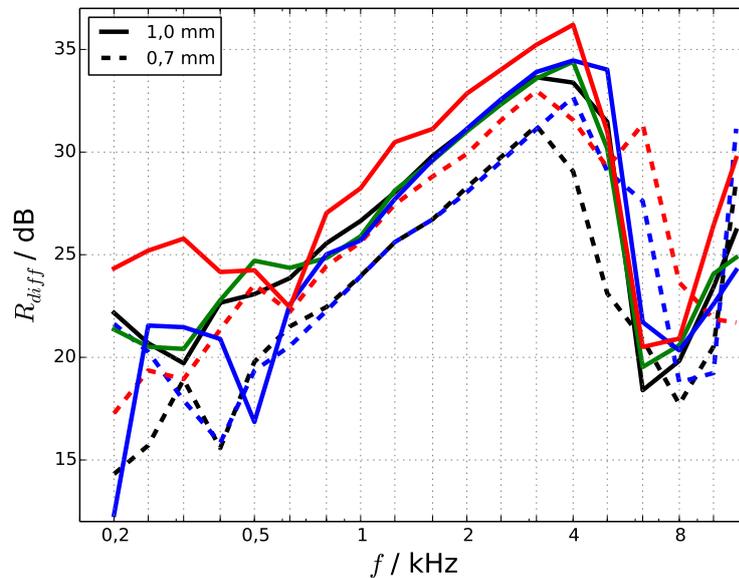


Abbildung 4.23: Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Einfachwänden, bestehend aus 1,0 mm und für einen Teil zusätzlich aus 0,7 mm starken Wänden aus strukturierten Blechen von der Strukturgeometrie: **—** wabenförmig SW 33, **—** halbkugelförmig, **—** wabenförmig ohne Stege, **—** hexagonaler Pyramidenstumpf

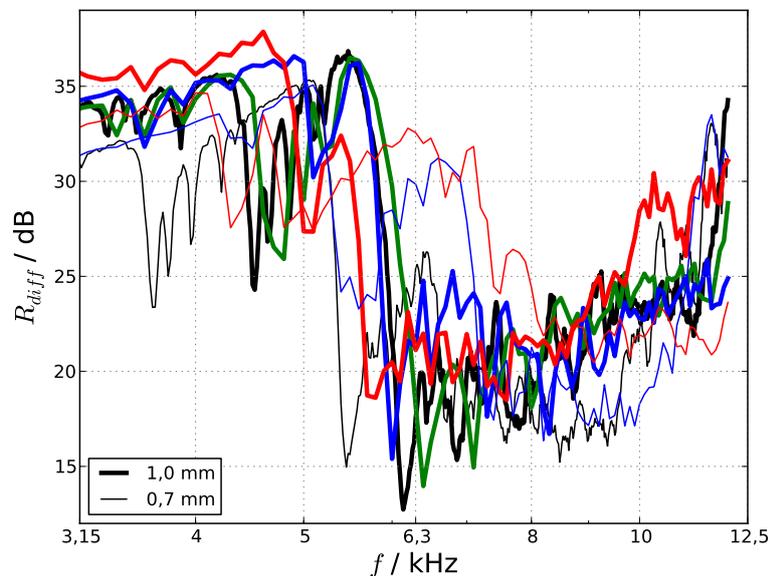


Abbildung 4.24: Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Einfachwänden, bestehend aus 1,0 mm und für einen Teil zusätzlich aus 0,7 mm starken Wänden aus strukturierten Blechen von der Strukturgeometrie: **—** wabenförmig SW 33, **—** halbkugelförmig, **—** wabenförmig ohne Stege, **—** hexagonaler Pyramidenstumpf, Abbildung mit verkleinertem Frequenzbereich und Darstellung als Schmalbandspektrum mit einer Frequenzauflösung von 20 Hz

Als eine Weiterführung und Ergänzung des Begriffes der strukturierten Bleche werden die Wabenstrukturen nun um die weiteren Geometrien einer Halbkugelstruktur, weitere hexagonale Waben ohne Stege zwischen ihnen und hexagonale Pyramidenstümpfe erweitert, mittels FEM berechnet und in Abbildung 4.23 dargestellt. Dabei sind die Abmessungen der einzelnen Strukturen vergleichbar mit denen der wabenförmig strukturierten Bleche mit der Schlüsselweite 33. Die erweiterten Geometrien sind bereits in Tabelle 3.1 aufgeführt. Die Dicke der Bleche ist je 1 mm und je 0,7 mm, dies jedoch nicht für die halbkugelförmige Geometrie. Deutlich sichtbar ist ein sehr ähnlicher Verlauf des Schalldämmmaßes für zwei der Geometrievariationen gegenüber den strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 im Frequenzbereich unterhalb der Grenzfrequenz, als einzige weist die Geometrie des hexagonalen Pyramidenstumpfes ein höheres Schalldämmmaß auf. Dies ist grundsätzlich damit zu erklären, dass diese Strukturierungen in ihrer Geometrie nahezu senkrechte Flanken an jedem einzelnen Pyramidenstumpf aufweisen, diese also nahezu ein Prisma bilden. In der FEM-Modellierung jedoch werden die 2D-Schalenelemente zur entsprechenden Blechdicke konstant über die Oberfläche, die damit größer als bei allen anderen vergleichbaren Modellen ist, aufgedickt, wodurch sich rechnerisch eine höhere flächenbezogene Masse einstellt. Somit ergibt sich im Frequenzbereich, in dem das Schalldämmmaß weitestgehend massebestimmt ist, eine konstante Verschiebung auf ein höheres Schalldämmmaß für diese Geometrievariation. Im weiteren Vergleich stellt sich die bekannte Verringerung des Schalldämmmaßes der strukturierten Bleche ab 4 kHz ein. Diese tritt im gleichen Frequenzbereich auf und ist in ihrem Betrag sehr ähnlich der Schalldämmungsverminderung der untersuchten strukturierten Bleche der Schlüsselweite 33. Dies ist auf die Ähnlichkeit der Geometrien der Strukturen im Betrag der Abmessungen und der Verhältnisse der periodischen Strukturen zueinander zurückzuführen. Die Erhöhung der Biegesteifigkeit in verschiedenen Achsen ist vergleichbar groß wie die der strukturierten Bleche der Schlüsselweite 33 und hat entsprechend einen vergleichbaren Einfluss auf die Lage der Grenzfrequenzen und das Schalldämmmaß. Weiterhin besitzen die wabenförmig strukturierten Bleche ohne Stege eine leichte Verschiebung des Bereiches der Schalldämmungseinbrüche in höhere Frequenzen und dieser Bereich ist etwas schmaler. Dies wird die sich etwas anders ausbildenden Wabenmoden aufgrund des fehlenden (biegeweichen) Steges zurückgeführt. Auch die Strukturen in Form des Pyramidenstumpfes zeigen im Frequenzbereich des Beginns der Verringerung ein höheres Schalldämmmaß verglichen mit der Schlüsselweite 33. In Abbildung 4.24 ist zur besseren Sichtbarkeit des Verhaltens im Verlauf des Schalldämmmaßes im Frequenzbereich um die Grenzfrequenzen ein Ausschnitt des Schmalbandspektrums dargestellt. Dort wird der sehr ähnliche Verlauf der Schalldämmmaße der Strukturen erneut sehr gut sichtbar, ebenso wie die teils geringere Verringerung des Schalldämmmaßes. Somit wird deutlich, dass Variationen der Strukturgeometrien mit der FEM sehr gut berechnet werden können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die strukturierten Bleche mit zunehmender Frequenz nur bis zu bestimmten Werten als „ideal orthotrop“ betrachtet werden können. Mit steigender Frequenz der Blechanregung nimmt die Wellenlänge der freien BiegeWellen, die sich auf der Blechoberfläche ausbilden, ab. So stellen sich lokale Effekte zusätzlich zur globalen Orthotropie ein, wenn die BiegeWellenlängen den Abmessungen der lokalen Periodizitäten ähneln, in diesem Fall der Wabenstruktur, charakterisiert durch die Schlüsselweite [14]. Die BiegeWellenlänge wird nach Gleichung 3.8 berechnet und in Tabelle 4.1 sind entsprechend die Frequenzen für die untersuchten Blechdicken und Werkstoffe aufgeführt, bei denen die BiegeWellenlängen etwa den Abmessungen der untersuchten Schlüsselweiten der Strukturierung für die Wabenstruktur und den vergleichbaren Abmessungen der weiteren

Blechdicke d	BiegeWellenlänge λ_B	33 mm	43 mm	51 mm
Stahl				
0,5 mm		4530 Hz	2668 Hz	1897 Hz
0,7 mm		6343 Hz	3736 Hz	2656 Hz
1,0 mm		9061 Hz	5337 Hz	3794 Hz
Aluminium				
0,5 mm		4509 Hz		
1,0 mm		9018 Hz		

Tabelle 4.1: Übersicht über Frequenzen, bei denen die BiegeWellenlänge der Wand mit den untersuchten Schlüsselweiten übereinstimmt

Geometrievariationen halbkugelförmig, wabenförmig ohne Stege und hexagonaler Pyramidenstumpf entsprechen.

So gibt der Vergleich des Schalldämmmaßes der verschiedenen Schlüsselweiten für die wabenförmige Strukturierung der 0,5 mm dicken Bleche in Abbildung 4.18 wieder, dass die lokalen Effekte einen vermindernenden Einfluss auf das Schalldämmmaß erst für Frequenzen größer als die in der Tabelle dargestellten ausüben. Mit steigender Frequenz und somit sinkender BiegeWellenlänge hält dieser Effekt an und wirkt sich immer stärker auf das Schalldämmmaß aus, die Schalldämmung ist in nahezu jeder Frequenz geringer als die isotroper Bleche.

Beim Vergleich der strukturierten Bleche gleicher Schlüsselweite 33 nach flächenbezogener Masse in Abbildung 4.21 unter Einbeziehung zweier verschiedener Werkstoffe zeigt sich ebenfalls der Einfluss lokaler Effekte, wenn die BiegeWellenlängen gleiche und kleinere Werte als die Strukturabmessungen annehmen. Hier jedoch ist diese Auswirkung bei den jeweils dünnsten Blechen der Werkstoffe Stahl und Aluminium mit den flächenbezogenen Massen von $3,925 \text{ kg/m}^2$ und $1,35 \text{ kg/m}^2$ erwartungsgemäß am ausgeprägtesten, denn bei geringerer Blechdicke und gleicher Wabenhöhe haben die lokalen Periodizitäten einen geringeren Einfluss auf die lokalen Steifigkeiten und somit eine geringere Wechselwirkung mit den BiegeWellen des Blechs. Stattdessen verursacht die globale Steifigkeitserhöhung und -variation in verschiedenen Achsen der Plattenebene, also die Orthotropie, die Verminderung der Schalldämmung. So ist beispielsweise der Einbruch in der Schalldämmung der Bleche mit der flächenbezogenen Masse von $7,85 \text{ kg/m}^2$ und $5,495 \text{ kg/m}^2$ schon beginnend für Frequenzen kleiner als 9061 Hz und 6343 Hz zu erklären. Jedoch findet beginnend ab diesen Frequenzen eine weitere Verhinderung des Anstieges (für $7,85 \text{ kg/m}^2$) beziehungsweise sogar eine Verringerung (für $5,495 \text{ kg/m}^2$) des Schalldämmmaßes statt.

Bei Betrachtung der Schalldämmmaße der weiteren Geometrievariationen in Abbildung 4.24 unter Berücksichtigung der BiegeWellenlängen zeigen sich die bisher erläuterten Effekte erneut. Besonders die stärker gezeichneten Kurven für die Bleche mit geringerer Dicke weisen für Frequenzen größer als die errechneten 6343 Hz eine weitere Verringerung des Schalldämmmaßes auf.

Insgesamt ist die offensichtliche Verminderung des Schalldämmmaßes der Bleche mit Strukturen gegenüber gleich schweren glatten Blechen ab einem bestimmten Frequenzbereich für hohe Frequenzen eine Überlagerung von lokalen Effekten, verursacht durch die Strukturgröße in Wechselwirkung mit der Wellenlänge der platteneigenen BiegeWellen sowie mo-

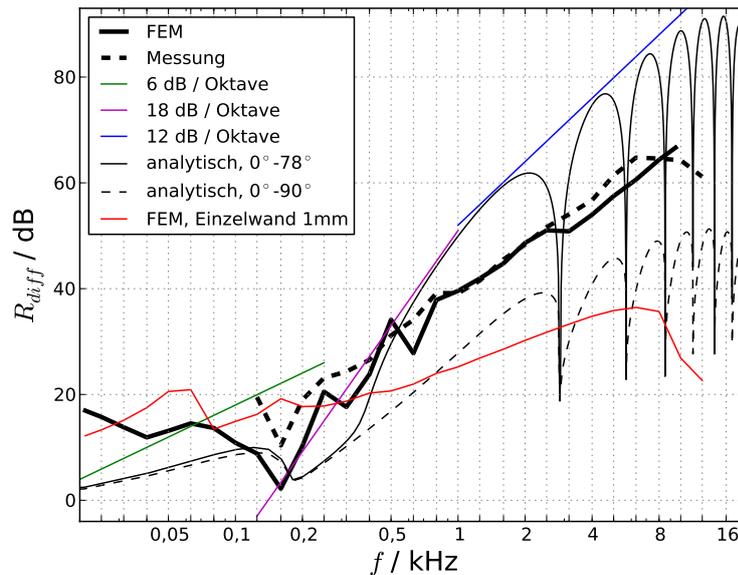


Abbildung 4.25: Vergleich zwischen analytisch und mittels FEM berechnetem und gemessenem Schalldämmmaß R_{diff} von einer Doppelwand, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus glattem Blech der Größe 587×587 mm und mit einem Wandabstand von 60 mm und Vergleich mit einer Einzelwand bestehend aus 1 mm dickem, glatten Blech

dalen Verhaltens der Waben, das sich lokal auswirkt, und des sich vergrößernden Frequenzbereiches der verschiedenen Koinzidenzfrequenzen in verschiedenen Richtungen in der Plattenebene aufgrund der global veränderten Biegesteifigkeit, verursacht durch die Orthotropie der Bleche.

4.2 Schalldämmung doppelschaliger Wände

An dieser Stelle wird nun nach Betrachtung der Schalldämmung von Einfachwänden als Erweiterung die Schalldämmung von Doppelwänden untersucht. Diese bestehen aus verschiedenen Kombinationen aus glatten und strukturierten Einzelwänden und sind durch einen mit Luft gefüllten Zwischenraum unterschiedlicher Dicke getrennt, der gedämpft und ungedämpft sein kann. Zu Beginn wird das Schalldämmungsverhalten von Doppelwänden und Unterschiede dabei im Vergleich zu dem von Einzelwänden betrachtet. Anschließend werden die berechneten und gemessenen Werte dazu in Bezug gesetzt, miteinander verglichen und diskutiert.

4.2.1 Doppelwand aus glatten Schalen

Das Schalldämmungsverhalten der Doppelwand unterscheidet sich in einigen Punkten von dem der Einfachwand. Mit Doppelwänden werden prinzipiell höhere Schalldämmmaße erzielt als mit gleich schweren Einfachwänden, jedoch liegen diese Werte nicht grundsätzlich in allen Frequenzbereichen über denen der Einzelwände. Abbildung 4.25 zeigt gemessene und mittels FEM sowie analytisch berechnete Schalldämmmaße für Doppelwände aus je

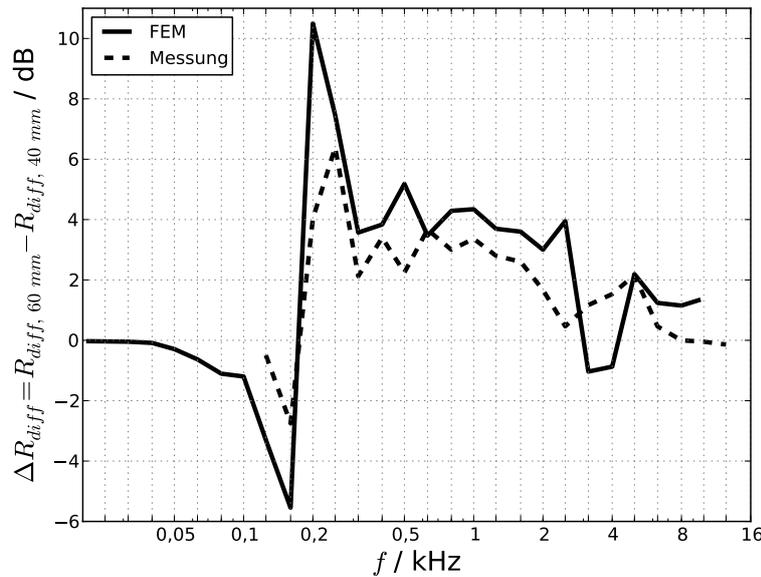


Abbildung 4.26: Differenz der mittels FEM berechneten und gemessenen Schalldämmmaße R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus glattem Blech der Größe 587×587 mm, davon einmal mit einem Wandabstand von 60 mm und einmal von 40 mm

0,5 mm starken Einzelschalen aus glattem Blech, die in einem Wandabstand von 60 mm angeordnet sind. Diese besitzen mit den Abmessungen von 587×587 mm die gleiche Größe wie die vorhergehend betrachteten Einzelwände. Der Werkstoff ist Stahl und der Zwischenraum ist hier mit Luft gefüllt. Zum besseren Vergleich ist ebenfalls das Schalldämmmaß einer mit 1 mm Dicke hinsichtlich der flächenbezogenen Masse gleich schweren Einfachwand dargestellt.

Ähnlich dem Verlauf des Schalldämmmaßes der Einfachwand gliedert sich dieser für die Doppelwand in mehrere Bereiche. Wie bereits in Unterabschnitt 3.2.3 gezeigt ist, existiert eine unterste Doppelwand-Resonanzfrequenz, bei der beide Einzelschalen gegenphasig schwingen und die Schallenergie dabei nahezu ungehindert durch die Doppelwand dringen kann. Mit steigendem Doppelwandabstand sinkt diese Resonanzfrequenz. Nach Gleichung 3.21 liegt diese Frequenz bei 175 Hz für einen Wandabstand von 60 mm. Diese Frequenz taucht in der Abbildung im 160 Hz-Terzband für die gemessenen Werte auf. Die FEM-Ergebnisse spiegeln die Resonanzfrequenz ebenfalls im 160 Hz-Terzband wider. Das analytisch berechnete Schalldämmmaß gibt die Resonanzfrequenz erwartungsgemäß und herleitungsbedingt sehr genau wieder. Für einen Wandabstand von 40 mm liegt die Resonanzfrequenz bei 214 Hz und würde im höheren Terzband von 200 Hz in Mess- und FEM-Ergebnissen sichtbar werden. In diesem Frequenzbereich, der tiefer als die Resonanzfrequenz ist, und um diese herum ist das Schalldämmmaß der Doppelwand geringer als das einer gleich schweren Wand aus einer einzelnen Schale.

Während das Schalldämmmaß einer Einfachwand im mittleren Frequenzbereich, beginnend oberhalb der ersten Resonanzfrequenzen, in dem es nahezu von der Masse der Wand bestimmt wird, theoretisch um 6 dB je Oktave ansteigt, stellt sich in diesem Bereich für die Doppelwand ein Anstieg von theoretisch 18 dB je Oktave ein. Somit wird mit steigender Fre-

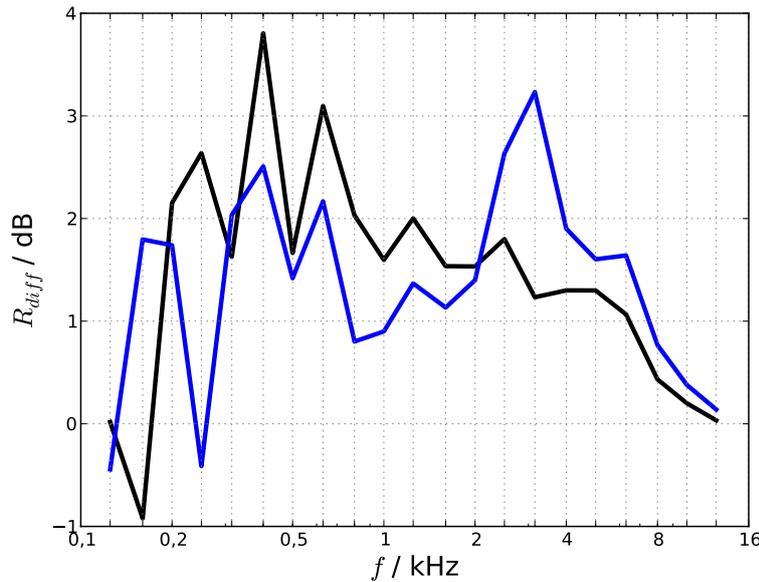


Abbildung 4.27: Differenz des gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus glattem Blech der Größe 587×587 mm und mit einem Wandabstand von ■ 40 mm und ■ 60 mm, davon einmal mit einem durch Dämmmaterial gedämpften und einmal einem ungedämpften Zwischenraum

quenz sehr schnell ein gegenüber der gleich schweren Einfachwand höheres Schalldämmmaß erreicht.

Mit weiter ansteigender Frequenz erreichen die Wellenlängen des Luftschalls Werte, die in Bereichen des Abstandes der Schalen der Doppelwand liegen. Das gegenüber der Einfachwand höhere Schalldämmmaß der Doppelwand wird dann durch Einbrüche in der Schalldämmung unterbrochen, die es für bestimmte Resonanzfrequenzen im Doppelwandzwischenraum tiefer als das Schalldämmmaß der gleich schweren Einfachwand fallen lassen. Diese Frequenzen werden nach Gleichung 3.23 berechnet und hängen entsprechend von der Breite des Zwischenraums ab. Mit steigendem Abstand sinken die Frequenzen, in denen die Resonanzen auftreten. Da die Messwerte und die mit der FEM berechneten Werte in Terzbändern zusammengefasst sind, erscheinen die Resonanzen nicht direkt sichtbar und fließen in die Beträge der Terzbänder ein.

Sehr gut sichtbar wird die starke Abhängigkeit des analytisch ermittelten Schalldämmmaßes vom Bereich der Einfallswinkel, über den integriert wird. Bei Verwendung des gesamten Winkelbereichs bis 90° scheint das Schalldämmmaß der Doppelwand kaum größer zu sein als das der gleich schweren Einfachwand, das zum besseren Vergleich in die Abbildung eingefügt wurde. Schränkt man den Winkelbereich bis zu einem maximalen Winkel von 78° ein, wie es in der Literatur häufig vorgenommen wird, so ist das Ergebnis eine deutliche Erhöhung des Schalldämmmaßes oberhalb der ersten Resonanzfrequenz und vor allem eine stärkere Zunahme mit steigender Frequenz.

Der Einfluss des Wandabstandes ist in Abbildung 4.26 als eine Differenz der Schalldämmmaße des Wandabstandes von 60 mm und des Wandabstandes von 40 mm dargestellt. Der größere Wandabstand erzielt in allen durch die drei verschiedenen Methoden Messung, Berechnung mittels FEM und mittels analytischen Formeln erzielten Werten fast

im gesamten betrachteten Frequenzbereich eine etwas höhere Schalldämmung. Dabei liegen die Unterschiede in den Wandabständen in Mess- und Berechnungsergebnissen nahezu gleich mit einem leicht größeren Abstand der FEM-Ergebnisse, dieser beträgt durchschnittlich 4 dB, die Differenz der Messergebnisse liegt bei etwa 3 dB.

Der Zwischenraum der Doppelwand kann evakuiert, mit einem Fluid oder mit einem Absorbermaterial gefüllt sein. Zur Begrenzung des Einflusses der Doppelwandresonanzen werden in Anwendungsfällen häufig schalldämmende Materialien als Zwischenraumfüllung benutzt. Somit können sich Schallwellen schlechter längs des Zwischenraums ausbreiten und die Schalldämmung steigt. Dies gilt insbesondere für streifenden Schalleinfall. Mit den zur Verfügung stehenden analytischen Mitteln kann die Zwischenraumbedämpfung nicht modelliert werden. Die abgeschwächten Einbrüche der Schalldämmung durch Bedämpfung fließt jedoch in die Terzbandbildung ein und lässt somit das Schalldämmmaß steigen. In Abbildung 4.27 sind die gemessenen Schalldämmmaße für Doppelwände aus glatten Blechen mit dem Wandabstand von 40 mm und 60 mm dargestellt. In einem Fall ist der Zwischenraum mit Luft gefüllt und in einem weiteren Fall ergänzt durch ein poröses Absorbermaterial. Über nahezu den gesamten Frequenzbereich oberhalb der ersten Doppelwandresonanz liegt die Schalldämmung der Doppelwand mit Zwischenraumbedämpfung zwischen 1 dB und 3 dB höher als die der Doppelwand ohne Bedämpfung.

Insgesamt zeigt sich, dass die analytischen Ergebnisse über den Abstand der Wände wenig Aussagekraft besitzen, es tritt lediglich eine Verschiebung der Resonanzfrequenzen in tiefere Bereiche mit zunehmendem Abstand auf. Ebenso gibt es mit dieser Methode sehr große Unterschiede in den Ergebnissen je nach betrachtetem Einfallswinkelbereich. Die mittels FEM errechneten Ergebnisse stimmen gut mit den gemessenen Werten überein und sind somit ein geeignetes Verfahren für die weitere Berechnung der Schalldämmung von Doppelwänden aus strukturierten Blechen über einen großen Frequenzbereich. Die Messergebnisse enden im höheren Frequenzbereich früher, die Berechnungsergebnisse sind für einen höheren Frequenzbereich verfügbar.

4.2.2 Doppelwand aus strukturierten Schalen

Hier werden nun die Schalldämmmaße von Doppelwänden betrachtet, bei denen mindestens eine Schale aus einem strukturierten Blech besteht. In Abbildung 4.28 sind die Messergebnisse und durch FEM berechnete Ergebnisse dargestellt, die für eine Doppelwand mit einem Wandabstand von 60 mm gelten, die einmal aus zwei glatten Blechen, einmal aus einem strukturierten Blech der Schlüsselweite 33 in der Wabenorientierung positiv, vergleichbar den Referenzfällen der Einzelwände, und einem glatten Blech und ein weiteres Mal aus zwei strukturierten Blechen derselben Schlüsselweite und Wabenorientierungen bestehen. Die Blechdicke ist jeweils 0,5 mm und der Zwischenraum ist mit Luft gefüllt und unbedämpft. Zusätzlich ist ein analytisches Ergebnis für eine orthotrope Doppelwand nach Gleichung 3.24 eingetragen. Diese Werte sind für den Winkelbereich von 0° bis 78° gültig, über den integriert wird.

Ähnlich wie im Fall der betrachteten Einzelwandkonfigurationen sind die Verläufe der gemessenen und durch FEM berechneten Schalldämmmaße bis zu einer Frequenz von etwa 2,5 kHz verglichen zwischen den drei Kombinationen aus glatten und strukturierten Einzelschalen nahezu gleich. Auch die Unterschiede zwischen Messungs- und Berechnungsergebnissen sind sehr gering. Der gemessene Unterschied des Schalldämmmaßes zwischen

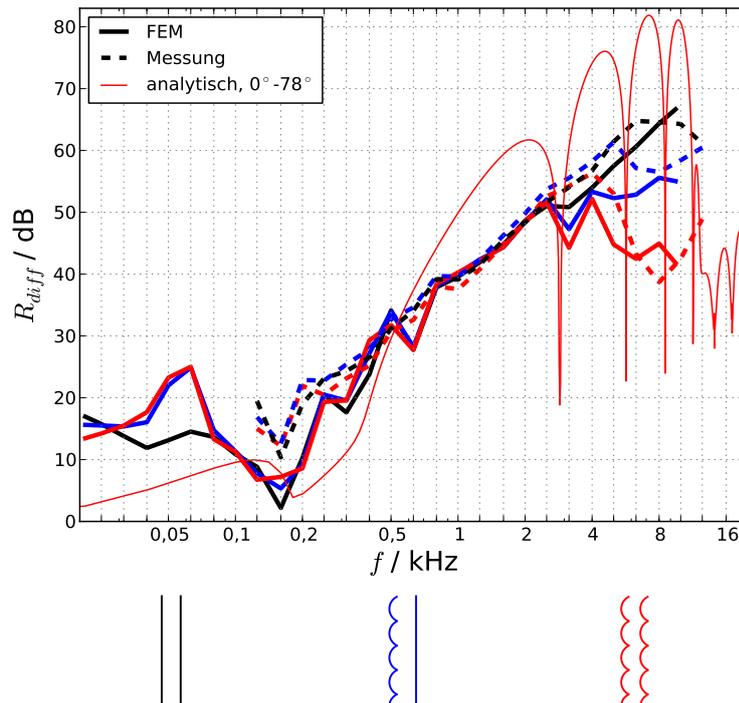


Abbildung 4.28: Vergleich zwischen analytisch und mittels FEM berechnetem und gemessenem Schalldämmmaß R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus **—** zwei glatten Blechen, aus **—** zuerst einem strukturierten Blech der Schlüsselweite 33 und zuletzt einem glatten Blech, und aus **—** zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33, der Größe 587×587 mm und mit einem Wandabstand von jeweils 60 mm

komplett glatten und strukturierten Doppelwänden liegt bei maximal 25 dB bei 8 kHz, die FEM errechnet diese Differenz ebenfalls.

Die Kombination aus einem strukturierten und einem glatten Blech weist dabei im höheren Frequenzbereich um etwa 8 kHz herum ein Schalldämmmaß auf, das zwischen dem der glatten und dem der strukturierten Doppelwandkombination liegt.

Betrachtet man nun die Ergebnisse von Messungen mit einer Hohlraumbedämpfung dieser Doppelwandkombinationen und zusätzlich Ergebnisse von nachträglichen Berechnungen mit der Modellierung einer stärkeren Hohlraumbedämpfung in Abbildung 4.29, so ist gut zu erkennen, dass die Messergebnisse für die glatte Doppelwand nur eine Erhöhung des Schalldämmmaßes von etwa 3 dB liefern, und dies eher abnehmend zu hohen Frequenzen hin. Die beiden Doppelwandkombinationen mit je einem oder zwei strukturierten Blechen jedoch zeigen eine deutliche Erhöhung der Schalldämmung im höheren Frequenzbereich, in dem die strukturierten Bleche eine Verminderung dieser verursachen, bis hin zu 13 dB bei 10 kHz. Der negative Einfluss der strukturierten Bleche auf die Schalldämmung einer Doppelwand kann also gut durch eine Bedämpfung des Zwischenraumes vermindert werden. Anders als bei den Messergebnissen bewirkt die Dämpfung in der FEM-Modellierung eine allgemeine Erhöhung des Schalldämmmaßes für alle drei Konfigurationen, die mit der Frequenz zunimmt.

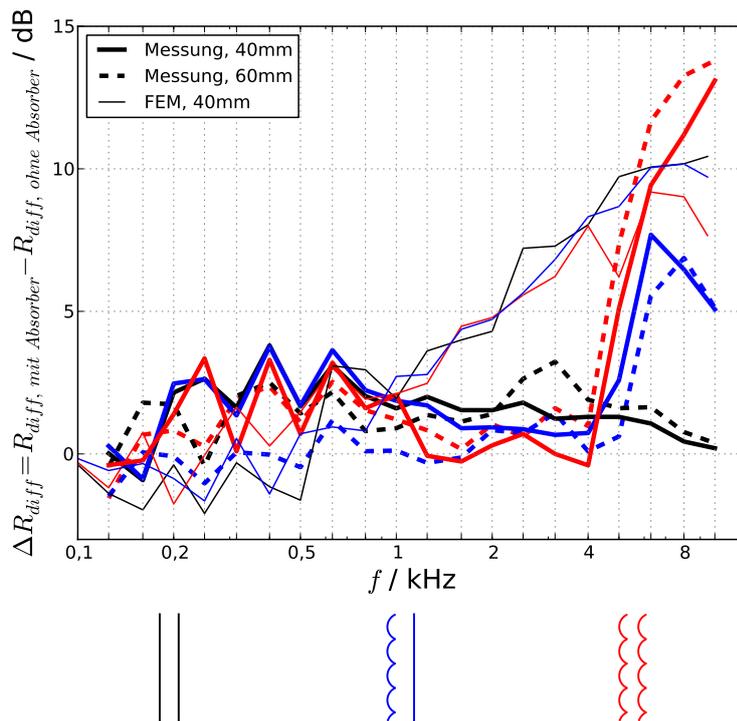


Abbildung 4.29: Differenz des gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus **—** zwei glatten Blechen, aus **—** zuerst einem strukturierten Blech der Schlüsselweite 33 und zuletzt einem glatten Blech, und aus **—** zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33, der Größe 587×587 mm und mit den Wandabständen 40 mm und 60 mm, davon einmal mit einem durch Dämmmaterial gedämpften und einmal einem ungedämpften Zwischenraum

4.2.3 Einfluss verschiedener Parameter

Analog zum vorhergehenden Unterabschnitt werden nun verschiedene Parameter, die das Schalldämmmaß einer Doppelwand charakterisieren und beeinflussen können, variiert. Dabei bietet die Doppelwand aufgrund des komplexeren Aufbaus einen ungleich größeren Parameterraum mit weiterhin mehr Kombinationsmöglichkeiten der Parameter untereinander gegenüber der Einfachwand. Es wird sich dennoch auf einige wesentliche Parameter beschränkt. Die FEM bietet hier eine mächtige Möglichkeit der Erweiterung des untersuchten Parameterraums hin zu nahezu beliebigen Werten und Kombinationen verschiedener, eine Doppelwand charakterisierender Parameter.

Abhängigkeit vom Einfallswinkel Zu Beginn wird die Abhängigkeit des Schalldämmmaßes vom Einfallswinkelbereich, über den integriert wird, erneut betrachtet. Da bei einer Doppelwand aufgrund ihres Zwischenraumes in diesem auftretende Quermoden einen großen Einfluss auf die Schalltransmission haben können, wird ein größerer Einfluss des Winkelbereichs auf die Ergebnisse vor allem der FEM-Berechnung erwartet, verglichen mit dem Einfluss auf die FEM für die Einzelwand. Abbildung 4.30 zeigt analytisch berechnete Schalldämmmaße für eine Doppelwand aus orthotropen Blechen, vergleichbar mit zwei strukturierten Blechen, für verschiedene maximale Einfallswinkel. Im Vergleich dazu sind mit FEM berechnete Schalldämmmaße für Doppelwände aus je

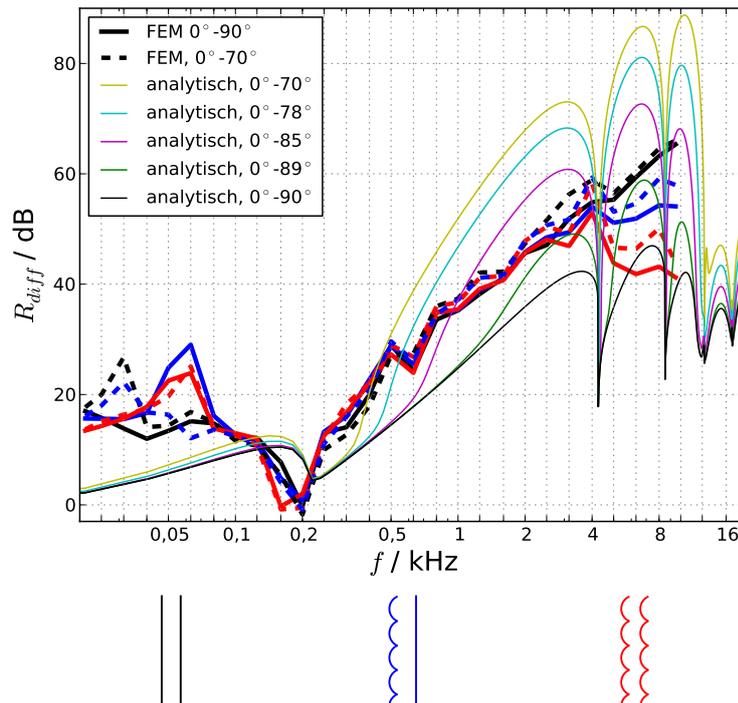


Abbildung 4.30: Abhängigkeit der analytisch und mittels FEM berechneten Schalldämmmaß R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus \blacksquare zwei glatten Blechen, aus \blacksquare zuerst einem strukturierten Blech der Schlüsselweite 33 und zuletzt einem glatten Blech, und aus \blacksquare zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm, vom Bereich der Einfallswinkel, über den integriert wird, zusätzlich analytische Ergebnisse für zwei orthotrope Bleche, $\sigma = 4$

zwei glatten und aus zwei strukturierten Blechen für einmal den vollen Winkelbereich und einmal bis zu einem maximalen Einfallswinkel von 70° dargestellt. Die analytischen Werte steigen wie gehabt mit sinkendem maximalen Einfallswinkel an und steigen mit größer werdender Frequenz stärker an, da die schwächeren Schalldämmmaß für streifenden Schalleinfall mehr und mehr vernachlässigt werden. Die Ergebnisse der FEM-Berechnung zeigen eine ähnliche Tendenz, aber viel schwächer ausgeprägt. Die im Winkelbereich beschränkten Werte liegen leicht höher als die des vollen Winkelbereichs. In der Modellierung des diffusen Schallfeldes, verglichen und bezogen auf die Größe der Bauteile, sind die Wellenlängen des betrachteten Frequenzbereiches groß. Daher sind die Anteile eines streifenden Schalleinfalls sehr gering und der Einfluss auf das diffuse Schalldämmmaß wird erst in sehr hohen Frequenzen stärker. Dies erkennt man in der Abbildung, wo die Schalldämmung des eingeschränkten Winkel-Integrationsbereichs erst ab etwa 1 kHz größer wird als die über alle Winkel.

Abhängigkeit von der Größe der Waben Nun wird die Wabengröße durch Variation der Schlüsselweite verändert. In Abbildung 4.31 sind die berechneten Schalldämmmaß für Doppelwandkombinationen aus je zwei strukturierten Blechen derselben Schlüsselweiten 33, 43 und 51 und sowie eine Kombination aus SW 33 und SW 51 dargestellt. Zusätzlich sind Messergebnisse für die erst- und letztgenannte Kombination eingetragen. Grundsätzlich gibt es nur vernachlässigbare Unterschiede im Betrag des Schalldämmmaßes bis zur Fre-

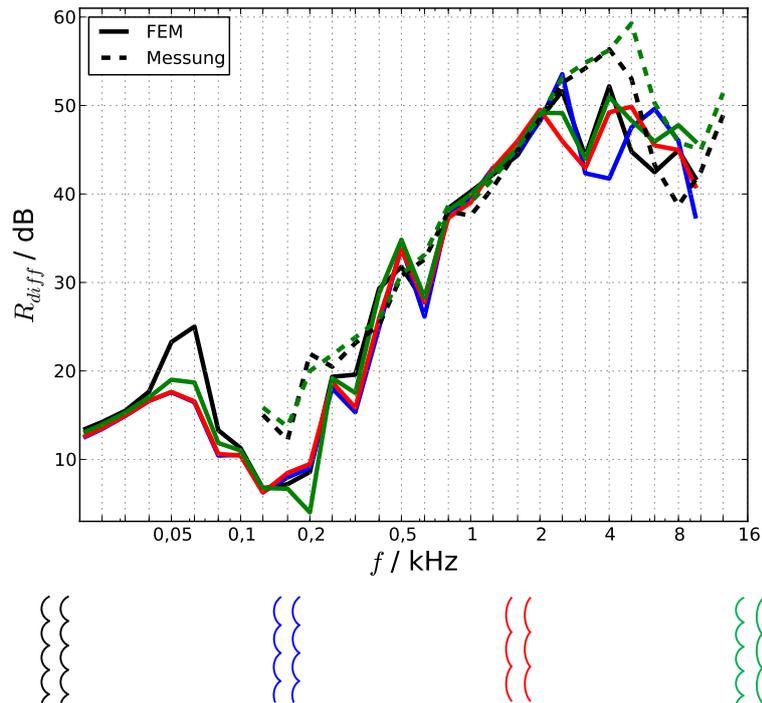


Abbildung 4.31: Abhängigkeit der gemessenen und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen und mit dem Wandabstand 60 mm, von der Schlüsselweite: — SW 33, — SW 43, — SW 51, — 1. Schale SW 33 und 2. Schale SW 51

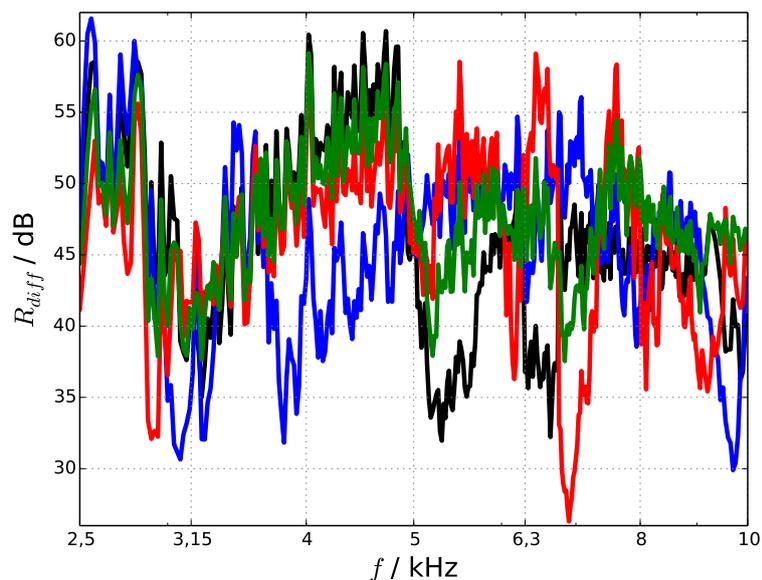


Abbildung 4.32: Abhängigkeit der mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen und mit dem Wandabstand 60 mm, von der Schlüsselweite: — SW 33, — SW 43, — SW 51, — 1. Schale SW 33 und 2. Schale SW 51, Abbildung mit verkleinertem Frequenzbereich und Darstellung als Schmalbandspektrum mit einer Frequenzauflösung von 20 Hz

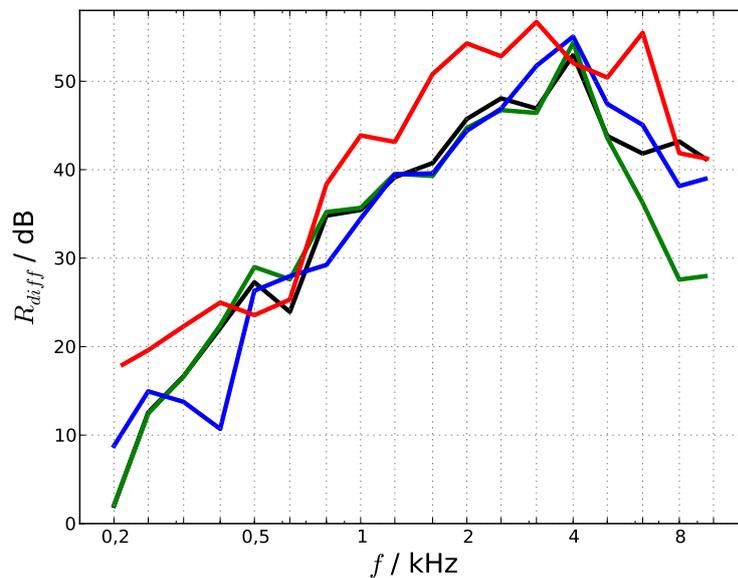


Abbildung 4.33: Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen und mit dem Wandabstand 40 mm, von der Strukturgeometrie: — wabenförmig SW 33, — halbkugelförmig, — wabenförmig ohne Stege, — hexagonaler Pyramidenstumpf

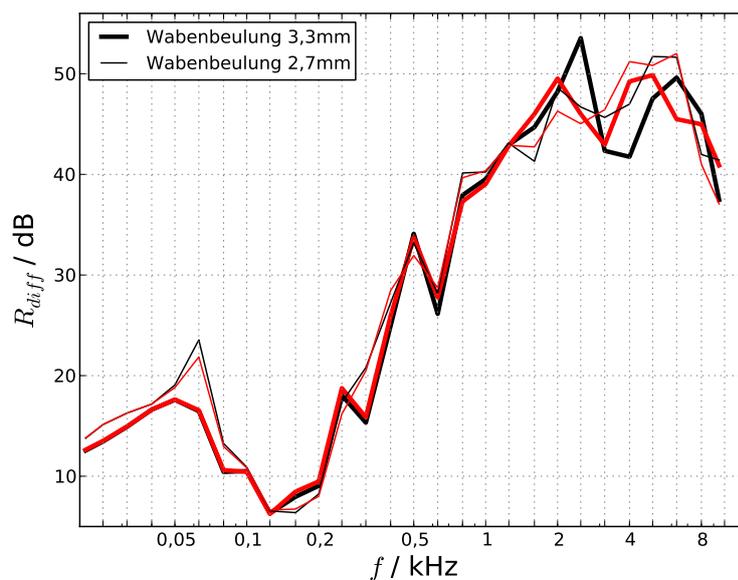


Abbildung 4.34: Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweiten: — 43 und — 51 und mit dem Wandabstand 60 mm, von der Wabenhöhe

quenz von 2 kHz im Vergleich der verschiedenen Schlüsselweiten. Die Doppelwand aus zwei Blechen mit der größten Schlüsselweite zeigt bei Betrachtung der FEM-Ergebnisse erwartungsgemäß bereits bei der kleinsten Frequenz eine Schalldämmungsverringerung verglichen mit den anderen Doppelwandkombinationen, gefolgt von der Kombination aus größter und kleinster Schlüsselweite und den beiden kleinsten Schlüsselweiten. Bei 4 kHz ist das Schalldämmmaß der Schlüsselweite 43 am geringsten aller Kombinationen, mit weiter ansteigender Frequenz liegen die Werte in einem ähnlichen Bereich mit einem schwankenden, diffusen Verlauf der Schalldämmungskurve. Zum besseren Vergleich sind in Abbildung 4.32 die Schalldämmmaße im schmalbandigen Verlauf für den interessierenden Frequenzbereich von 2,5 kHz bis 10 kHz dargestellt. Deutlich zeigt sich der allgemein sehr diffuse Verlauf der einzelnen Wertepaare mit einer Tendenz zur geringsten Schalldämmung für die Doppelwände aus je zwei strukturierten Blechen SW 43 und SW 51. Die Messergebnisse zeigen eine Schalldämmungsverringerung generell in höheren Frequenzbereichen, wobei die kleinste Schlüsselweite mit einem Einbruch bei 5 kHz an einer etwas tieferen Frequenz beginnt als die Kombination aus zwei Schlüsselweiten.

Variation der Strukturgeometrien In Abbildung 4.33 ist der Einfluss der bereits bekannten drei Variationen der Strukturgeometrie auf das Schalldämmmaß einer Doppelwand, die aus je zwei gleichen dieser Bleche zusammengesetzt ist, dargestellt. Deutlich sichtbar sind Ähnlichkeiten im Betrag und Verlauf des Schalldämmmaßes über der Frequenz. Erwartungsgemäß sind diese Strukturen den wabenförmig strukturierten Blechen sehr ähnlich, vor allem die beiden Blecharten mit der halbkugelförmigen Struktur und die steglose Wabenstruktur. Die sich einstellende Erhöhung der Biegesteifigkeit ist vergleichbar groß mit vergleichbarem Einfluss auf das Schalldämmmaß. Auch sind die periodischen Strukturgrößen in einem gleichen Bereich wie die der Schlüsselweite 33. Die halbkugelförmigen Strukturen scheinen dabei um 8 kHz herum eine besonders starke Verringerung des Schalldämmmaßes zu bewirken. Die Strukturform des hexagonalen Pyramidenstumpfes weist ab 800 Hz ein um bis zu 10 dB erhöhtes Schalldämmmaß gegenüber den anderen Formen auf. Auch die Verminderung der Schalldämmung ab 4 kHz ist nicht ganz so stark ausgeprägt. Dies weist erneut auf eine Überschätzung der flächenbezogenen Masse in der FEM-Berechnung aufgrund der nahezu senkrechten lokalen Strukturformen hin. So erfährt diese Geometrie eine Aufdickung des Schalenmodells zur konstanten Blechdicke von 0,5 mm bei absolut gesehener, größerer Gesamtoberfläche. Dennoch lässt sich mittels der FEM eine schnelle und genaue Ermittlung der Schalldämmmaße von verschiedenen Strukturformen durchführen.

Abhängigkeit von der Höhe der Waben Wie innerhalb der Einzelwanduntersuchungen werden für die beiden strukturierten Blecharten mit den Schlüsselweiten 43 und 51 zusätzlich CAD-Modelle mit verschiedenen Höhen der Wabenausbeulungen untersucht, einmal mit einer Höhe von 3,3 mm, wie sie auch bisher in den Berechnungen verwendet wurden und als den Messobjekten am ähnlichsten angenommen werden, sowie mit der reduzierten Höhe von 2,7 mm. In Abbildung 4.34 sind diese Ergebnisse für eine Doppelwand mit dem Wandabstand von 60 mm dargestellt. Es zeigt sich, dass die Wabenhöhe einen leichten Einfluss auf den Verlauf des Schalldämmmaßes hat und diesen über nahezu den gesamten betrachteten Frequenzbereich beeinflusst. Unterhalb von 1 kHz ist das Schalldämmmaß der geringeren Wabenhöhe gleich und teils etwas höher und in den höheren Frequenzen, in denen die für die strukturierten Bleche typische Schalldämmungsverringerung auftritt,

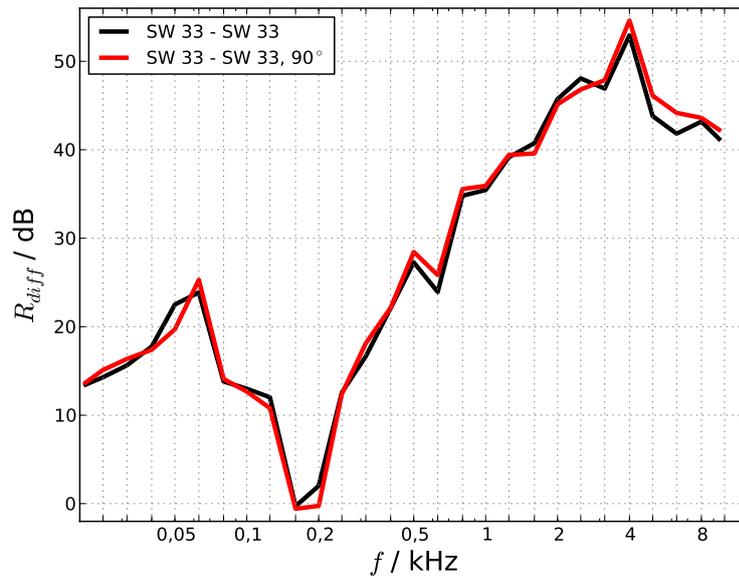


Abbildung 4.35: Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm von der Orientierung der Waben in den Blechebenen der einzelnen Schalen zueinander

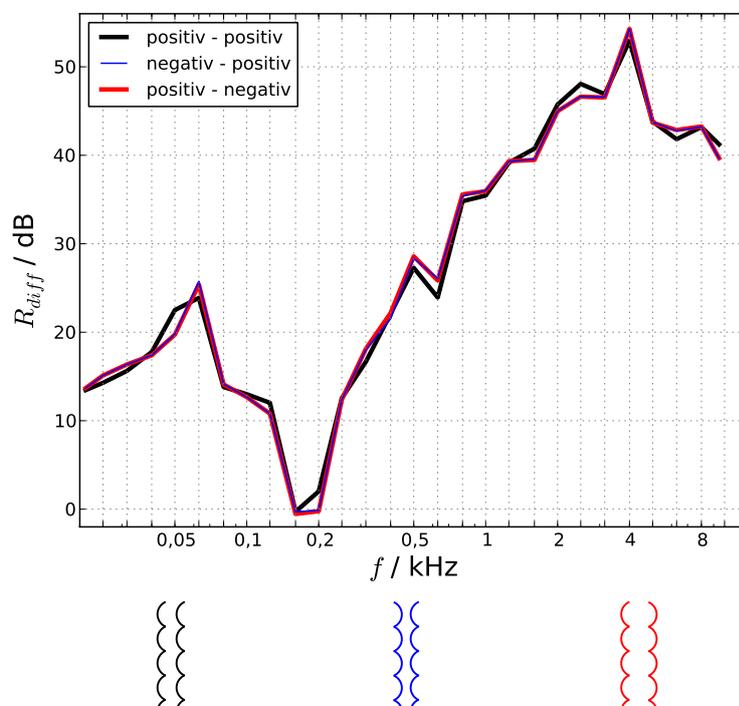


Abbildung 4.36: Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm von der positiven und negativen Orientierung der Ausbeulungen der Waben der einzelnen Schalen

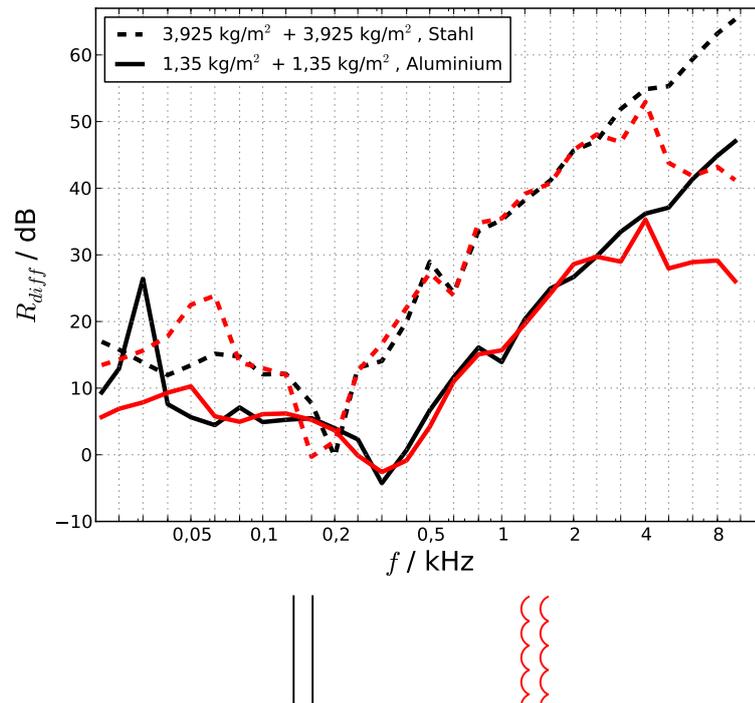


Abbildung 4.37: Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus **—** zwei glatten und **—** zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm, von der flächenbezogenen Masse

scheint diese Verringerung nicht ganz so groß zu sein wie für die tiefer ausgebeulten Waben. Der Einfluss der unterschiedlichen Höhen ist auf die geringere Schlüsselweite 43 etwas stärker, da das Verhältnis von Struktur-Schlüsselweite und Struktur-Wabenhöhe bei kleineren Schlüsselweiten eine größere Geometrieänderung darstellt als bei größeren Schlüsselweiten. Allgemein ist der Einfluss der beiden Strukturhöhen 2,7 mm und 3,3 mm auf das Schalldämmmaß sehr ähnlich, da diese Höhen nicht sehr stark voneinander abweichen.

Abhängigkeit von der Orientierung der Waben In Abbildung 4.35 ist eine Untersuchung des Einflusses von einer Verdrehung der Waben in ihren Blechebenen zueinander um 90° gezeigt. In allen anderen Fällen sind die Waben zueinander projektionskongruent angeordnet. Im Verlauf der Schalldämmmaße zeigt sich kein wesentlicher Unterschied, die Werte der verdrehten Wabenanordnung schwanken leicht um die herkömmlichen Werte herum. Um 500 Hz herum sind sie etwas größer, ebenso wie ab 5 kHz. Dies lässt darauf schließen, dass dies vom bei dieser Anordnung leicht asymmetrischen Aufbau der Doppelwand und der Waben zueinander verursacht wird. Durch diese Asymmetrie treten weniger Resonanzen der beiden Einzelschalen unter einem bestimmten Einfallswinkel gleichzeitig auf, die Wahrscheinlichkeit, dass der Transmissionsgrad für beide Schalen bei exakt der gleichen Frequenz gleich stark verringert wird, sinkt also.

Weiterhin ist in Abbildung 4.36 der Einfluss der positiven und negativen Orientierungen der Waben normal zur Schalenebene dargestellt. Die Kombination positiv-positiv ist die

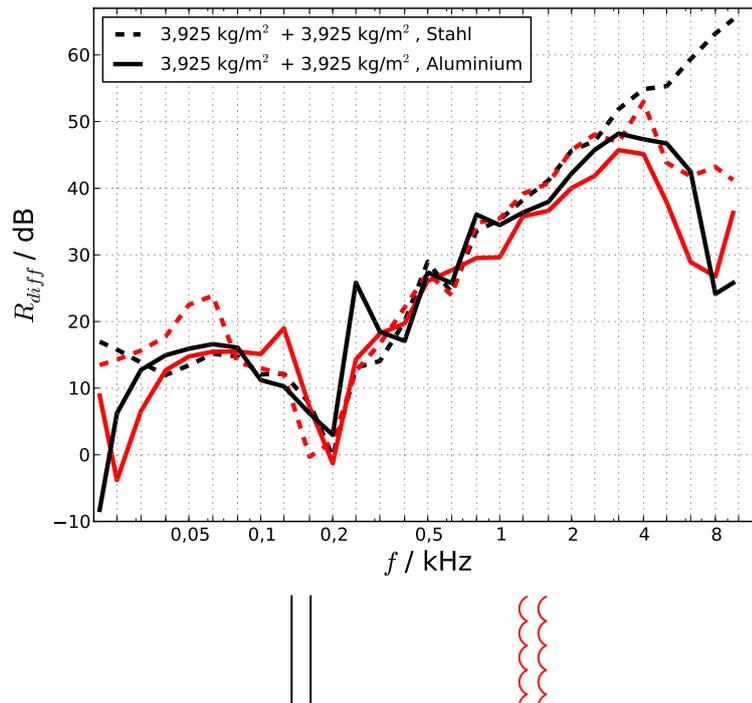


Abbildung 4.38: Verlauf des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus unterschiedlich starken Wänden aus **—** zwei glatten und **—** zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm, mit gleicher flächenbezogener Masse

Basis der Untersuchungen in dieser Arbeit und wird für alle anderen Untersuchungen so verwendet. Die beiden anderen Anordnungen mit je einer anderen Orientierung der Waben der beiden Einzelschalen sind nahezu wertegleich. Diese unterscheiden sich jedoch ebenfalls geringfügig vom Verlauf des Schalldämmmaßes der Kombination positiv-positiv, indem sie sowohl etwas höhere Werte bei bestimmten Frequenzen als auch etwas tiefere Werte bei anderen Frequenzen aufweisen. Dafür ist erneut der Symmetrieunterschied, diesmal im Zwischenraum der Doppelwand, die Ursache. Somit lässt sich abschließend sagen, dass eine Veränderung der Symmetrie der beiden Einzelschalen eine leichte Veränderung des Verlaufes der Schalldämmung verursacht.

Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse Ein Vergleich der strukturierten Doppelwände nach verschiedenen flächenbezogenen Massen ist insbesondere in Anwendungsfällen dieser Bauteile von Interesse, da häufig der Werkstoff aus Leichtbau- oder Festigkeitsgründen fest vorgegeben ist oder wählbar ist und optimiert werden soll. In Abbildung 4.37 ist eine Doppelwand aus zwei Schalen aus Stahl mit einer Doppelwand aus zwei Aluminiumschalen verglichen. Die einzelnen Wanddicken sind jeweils gleich und somit ist die Doppelwand aus Stahl um etwa den Faktor 2,9 schwerer. Erwartungsgemäß sinkt das Schalldämmmaß der Bleche aus Aluminium und liegt im Durchschnitt und über einen großen Frequenzbereich etwa 12 dB unter dem der Stahlbleche. Auch liegt der Bereich der Koinzidenzfrequenzen in einem etwas niedrigeren Frequenzbereich.

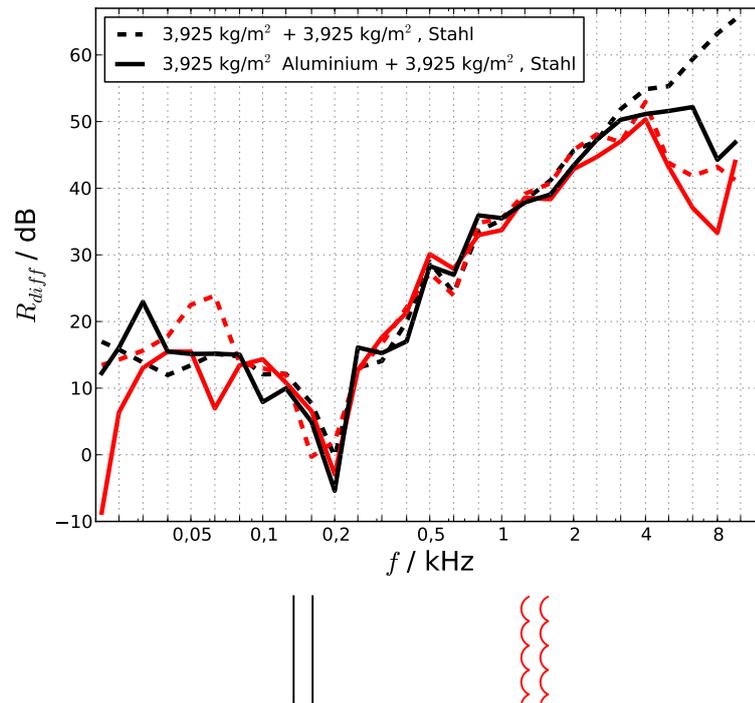


Abbildung 4.39: Verlauf des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus unterschiedlich starken Wänden aus **—** zwei glatten und **—** zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm, mit gleicher flächenbezogener Masse und einer Kombination aus den Werkstoffen Stahl und Aluminium

Zur besseren Vergleichbarkeit ist in Abbildung 4.38 eine Doppelwand aus Aluminiumblech mit einer Doppelwand aus Stahlblech miteinander verglichen, die die gleiche flächenbezogene Masse besitzen. Das Schalldämmmaß liegt nun unterhalb der Grenzfrequenzen, die für das Aluminiumblech in einem etwas tieferen Frequenzbereich beginnen, auf dem gleichen Niveau.

Da es in der Anwendung auch nötig oder zweckmäßig sein kann, verschiedene Werkstoffe zu kombinieren, ist in Abbildung 4.39 der Vergleich zwischen einer Doppelwand aus Stahlblechen und einer Doppelwand aus einer Schalenkombination dargestellt, wobei die erste Schale aus Aluminium und die zweite Schale aus Stahl besteht, mit immer der gleichen flächenbezogenen Masse. Entsprechend verläuft das Schalldämmmaß wieder sehr ähnlich und der Effekt der Koinzidenzfrequenzen beginnt in einem etwas höheren Frequenzbereich als für die Doppelwand, die komplett aus Aluminiumschalen besteht.

Abhängigkeit vom Wandabstand In Abbildung 4.40 ist das Schalldämmmaß für verschiedene Wandabstände einer Doppelwand aus glatten Blechen dargestellt. Dies wurde für die Abstände 40 mm und 60 mm gemessen und für diese und die weiteren Abstände von 10 mm und 50 mm berechnet. In der Abbildung 4.41 ist die erste Schale ein strukturiertes Blech der Schlüsselweite 33 und die zweite ein glattes Blech und in Abbildung 4.42 sind die Schalen der Doppelwand schließlich zwei strukturierte Bleche der Schlüsselweite 33.

Mit steigendem Wandabstand stellt sich eine tiefere Resonanzfrequenz ein und das Schalldämmmaß sinkt über den gesamten Frequenzbereich. Dieser Zusammenhang tritt

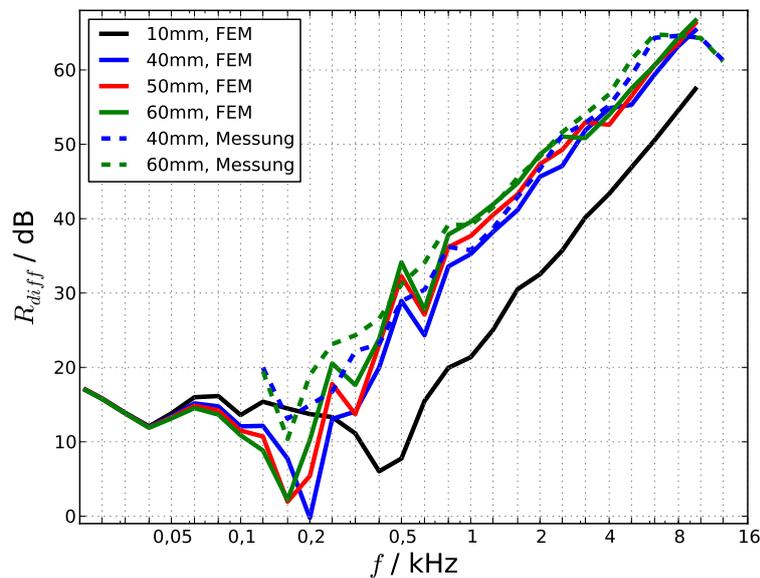


Abbildung 4.40: Verlauf des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus zwei glatten Blechen der Dicke 0,5 mm und mit den Wandabständen 10 mm, 40 mm, 50 mm und 60 mm und Vergleich mit Messergebnissen für die Wandabstände 40 mm und 60 mm

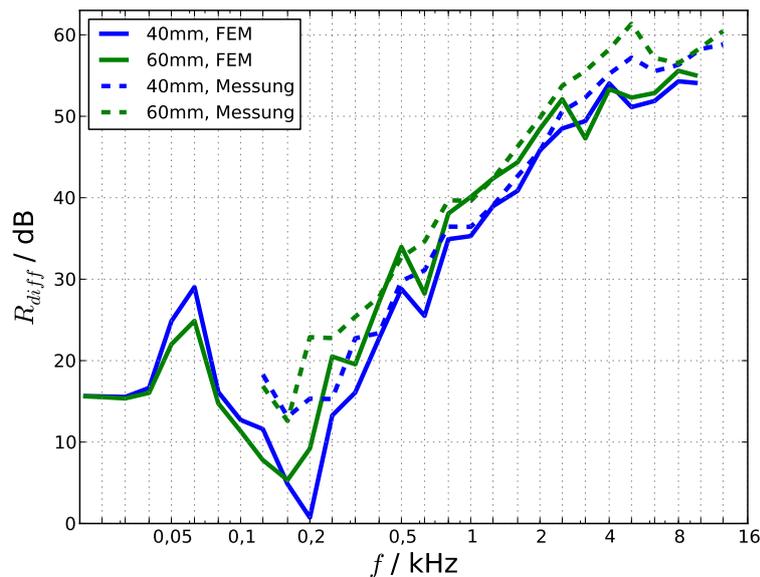


Abbildung 4.41: Verlauf des mittels FEM berechneten und gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je einem glatten und einem strukturierten Blech der Schlüsselweite 33 und je der Dicke 0,5 mm und mit den Wandabständen 40 mm und 60 mm

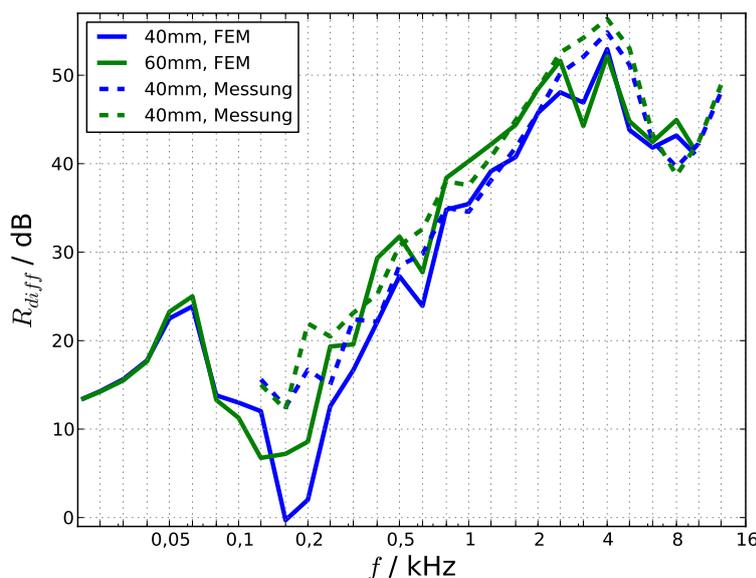


Abbildung 4.42: Verlauf des mittels FEM berechneten und gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und je der Dicke 0,5 mm und mit den Wandabständen 40 mm und 60 mm

bei allen Kombinationen von glatten und strukturierten Blechen und die Variation des Wandabstandes auf. Dies wird sowohl in den Messergebnissen als auch in den Ergebnissen der FEM-Berechnungen deutlich. Die Mess- und Berechnungsergebnisse stimmen dabei in fast allen Frequenzbereichen sehr gut überein.

Schalldämmung von zwei gefügten strukturierten Blechen In Abbildung 4.43 sind die Schalldämmmaße von vier verschiedenen Verbunden aus strukturierten Blechen untersucht worden. Dabei wurden die Bleche an den positiven Wabenmitten zusammengefügt. Es wurden zwei verschiedene Industrieklebstoffe verwendet, wobei jede zweite Wabe verklebt wurde. Ein weiteres Mal wurde mit einem der Klebstoffe jede Wabe gefügt. Schließlich wurde mittels des Verfahrens des Widerstands-Punktschweißens jede Wabe gefügt. Diese Verbunde sind sehr steif bei relativ geringem Gewicht. Entsprechend ist die Schalldämmung viel geringer als von Doppelwänden gleicher flächenbezogener Masse. Daher ist in der Abbildung zusätzlich das Schalldämmmaß einer glatten und strukturierten Einfachwand gleicher Masse eingetragen. Die Verbunde weisen nur in einem kleinen Frequenzbereich eine etwas größere Schalldämmung auf als eine Einfachwand aus strukturiertem Blech der Schlüsselweite 33, sie ist sogar zwischen 2 kHz und 6,3 kHz geringer, ebenso wie gegenüber dem gleich schweren, glatten Blech. Dabei verhält sich das geschweißte Blech als das mit der größten Biegesteifigkeit sehr ähnlich einem sehr steifen Einzelblech mit einer Koinzidenzfrequenz von etwa 5 kHz. Dieses zeigt auch verglichen mit den drei geklebten Varianten ein abweichendes Verhalten von diesen. Bei 4 kHz weisen die Schalldämmmaße einer Doppelwand aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und einer an den Wabenmitten verschweißten Verbundkonstruktion dieser Bleche, die um ein Vielfaches biegesteifer ist, die maximale Differenz von über 25 dB auf. Für diese Verbundart des Widerstands-Punktschweißens erfolgte eine Berechnung des Schalldämmmaßes mit der FEM, deren Ergebnis zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf des Schalldämmmaßes mit einem Einbruch der

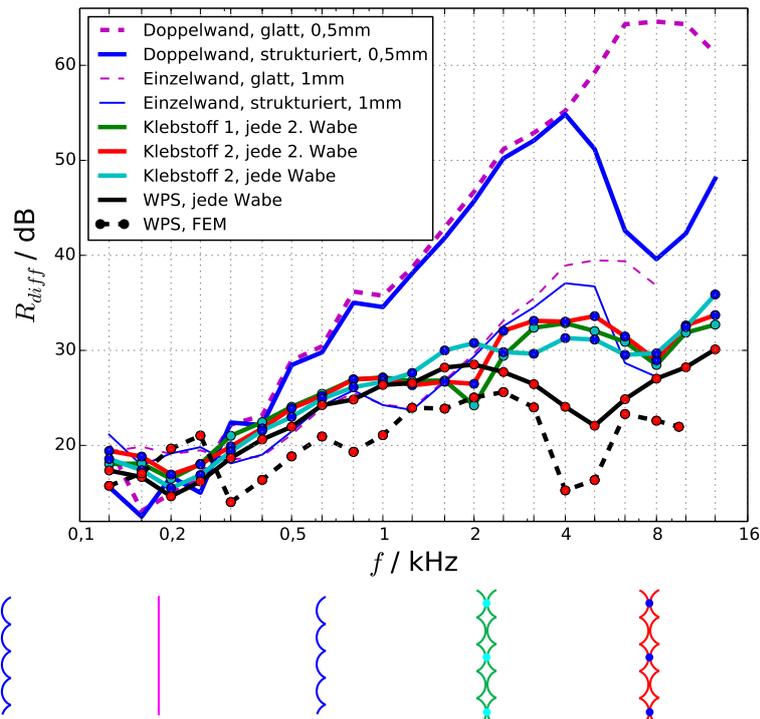


Abbildung 4.43: Verlauf des gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} von zwei mittels verschiedener Fügeverfahren in den Wabenmitten verbundenen strukturierten Blechen mit einer Dicke von je 0,5 mm und der Schlüsselweite 33 und Vergleich mit den Messergebnissen von glatten und strukturierten Einfach- und Doppelwänden mit gleicher flächenbezogener Masse mit Vernachlässigung der Masse der Klebstoffe; zusätzlich für den durch Widerstands-Punktschweißen erzeugten Verbund mittels FEM berechnetes Schalldämmmaß

Schalldämmung bei etwa 4 bis 5 kHz, jedoch insgesamt mit noch geringeren Werten als das Ergebnis der Messung. Somit ist die sehr steife Punktverbindung zweier Bleche gut mit Hilfe der FEM zu modellieren und zu berechnen und das Verhalten dieses Verbundes hinsichtlich der Luftschalldämmung als ähnlich einer sehr steifen Einzelwand zu beschreiben.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Der Inhalt der vorliegenden Arbeit ist die nähere Untersuchung des Verhaltens der Luftschalldämmung von strukturierten Blechen und das Verhältnis dieser im Vergleich zum aktuellen Stand der Erkenntnisse über der Schalldämmung orthotroper Platten. Als Parameter zur Klassifizierung des Schalldämmungsverhaltens wurde das Schalldämmmaß gewählt. Um dieses zu bestimmen, wurden zu diesem Zweck umfangreiche numerische Simulationen mittels Finite-Elemente-Methode durchgeführt. Dabei wird ein diffuses Schallfeld simuliert, welches auf das endliche Modell einer Anordnung aus strukturiertem Blech einfällt. Diese untersuchten Anordnungen bilden Einfachwände und Doppelwände, die bestimmte, festgelegte Abmessungen besitzen. Durch die anschließende Berechnung der abgestrahlten Schalleistung kann so das jeweilige Schalldämmmaß ermittelt werden. Dies wurde über einen großen Frequenzbereich realisiert, um möglichst viele frequenzabhängige Effekte zu ermitteln. Der Vergleich mit Schalldämmmaßen, die Ergebnisse von Berechnungen mit bekannten analytischen Formulierungen sind, zeigt eine hohe Genauigkeit der FEM-Berechnungen für glatte und strukturierte Bleche. Zusätzlich wurden Messungen von zahlreichen Konfigurationen aus glatten und strukturierten Blechen von sowohl Einfachwänden als auch Doppelwänden durchgeführt. Die Größe der Probekörper entsprach dabei denen, die in der rechnerischen Simulation verwendet wurden. Erneut stimmen die Werte der Schalldämmmaße sehr gut überein, wie die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen.

Die untersuchten Bleche weisen in ihrer Basiskonfiguration eine Strukturierung in regelmäßiger, hexagonaler Wabenform auf. Diese Waben sind durch ihre Schlüsselweite charakterisiert und liegen in den Schlüsselweiten 33 mm, 43 mm und 51 mm vor. Die kleinste Schlüsselweite wurde in den Blechdicken 0,5 mm, 0,7 mm und 1,0 mm untersucht, bei den Blechen mit den beiden größeren Schlüsselweiten betrug die Blechdicke jeweils 0,5 mm. Zusätzlich wurden in der numerischen Simulation drei weitere, abgewandelte Strukturgeometrien untersucht, diese wurden in einer Variation aller drei Blechdicken modelliert. Der Werkstoff der Bleche in allen Messungen ist Stahl, in der Simulation wurde auch der Werkstoff Aluminium simuliert.

Basierend auf den Ergebnissen der Messungen und Berechnungen besitzen die wabenförmig strukturierten Bleche insgesamt eine schlechtere Schalldämmung als gleich schwere glatte Bleche. Dabei muss jedoch nach dem Frequenzbereich unterschieden werden. So verhalten sich die strukturierten Bleche hinsichtlich des Schalldämmmaßes sehr ähnlich ihren gleich schweren glatten Blechen in dem Frequenzbereich, in dem das Massegesetz gilt, nämlich zwischen erster Eigenfrequenz und der Annäherung an den Bereich der Koinzidenzfrequen-

zen. Die erste Eigenfrequenz der strukturierten Bleche ist aufgrund der erhöhten Biegesteifigkeit erwartungsgemäß etwas höher angesiedelt, jedoch immer noch in einem sehr tiefen Frequenzbereich und damit mit einer geringen praktischen Bedeutung bzw. ohne dass strukturierte statt glatte Bleche hier einen Nachteil bezüglich der Schalldämmung bieten.

In einem höherfrequenten Bereich beginnend ab etwa 4 kHz weisen die untersuchten strukturierten Bleche in den drei verschiedenen Blechdicken jedoch eine verminderte Schalldämmung von bis zu 15 dB im Terzbandpegel auf. Dieser Effekt setzt sich bis zu einer Frequenz von 12,5 kHz fort, darüber hinaus wurden die Grenzen der Gültigkeit sowohl in der Simulation als auch in der Messung erreicht. Strukturierte Bleche besitzen somit einen Einbruch im Verlauf des Schalldämmmaßes, der schon bei weit tieferen Frequenzen als der Grenzfrequenz, die für glatte Bleche gleicher Dicke existiert, beginnt.

Mit einer Vergrößerung der Schlüsselweite der Strukturierung verlagert sich die Verminderung des Schalldämmmaßes in etwas tiefere Frequenzen. In ähnlichem Maße wirkt sich eine Verringerung der Blechdicke und allgemein die Verringerung der flächenbezogenen Masse und des Elastizitätsmoduls des Werkstoffes auf die Verschiebung der beginnenden Schalldämmungsverminderung aus, ein dünneres Blech zeigt in etwas tieferen Frequenzen bereits diesen Effekt, ebenso wie ein Werkstoff mit geringerem Elastizitätsmodul, in dieser Arbeit am Beispiel von Aluminium gezeigt.

Die Durchschallungsrichtung der strukturierten Bleche in Bezug auf ihre positive und negative Wabenorientierung zeigt keine Unterschiede des Schalldämmmaßes mit einer leichten Tendenz dazu, dass das Blech mit der negativen Seite in Richtung der Lärmquelle orientiert einen weniger starken Einbruch des Schalldämmmaßes erfährt, der Effekt aber dennoch stark nachweisbar ist.

Der Effekt der Schalldämmungsverminderung ist nicht allein für die wabenförmige Strukturierung typisch. Bleche mit leicht variierten Strukturgeometrien zeigen dieselben Effekte im selben Frequenzbereich und in gleichem Maße. Allein die kleinsten Abmessungen der regelmäßigen Strukturen und der versteifende Effekt auf das Blech haben einen Einfluss auf die Schalldämmungsherabsetzung.

Die ermittelten eigenen Effekte der Schalldämmung der strukturierten Bleche stimmen sehr gut mit der Theorie der Schalltransmission durch orthotrope Platten überein. Die erhöhte und in verschiedenen Achsen innerhalb der Blechebene variierende Biegesteifigkeit bewirkt eine Verbreiterung und Verlagerung des Frequenzbereiches der Koinzidenzfrequenzen, in welchem die Schalldämmung nach einem Anstieg abnimmt, hin zu tieferen Frequenzen. Weiterhin bewirken lokale Moden der Strukturgeometrien, anhängig von der Größe der regelmäßigen Strukturen, eine verminderte Schalldämmung in Frequenzbereichen, in denen diese auftreten.

Da allgemein zur Verbesserung der Schalldämmung von Wänden bei gleich bleibender Gesamtmasse häufig Doppelwandkonstruktionen eingesetzt werden, wurde untersucht, ob sich der Effekt der strukturierten Bleche bei solchen Konstruktionen ähnlich auswirkt. Für höhere Frequenzen, wieder beginnend ab etwa 4 kHz, weist die Doppelwand aus zwei strukturierten Blechen eine Verminderung des Schalldämmmaßes um bis zu 20 - 25 dB gegenüber der Doppelwand aus zwei glatten Blechen auf. Konstruiert man eine Doppelwand mit einem strukturierten und einem glatten Blech, so verringert sich der Effekt auf eine Differenz von bis zu 10 dB gegenüber der glatten Doppelwand. Dabei weisen die Doppelwandkombina-

tionen immer ein größeres Schalldämmmaß auf als gleich schwere Einzelwände aus glatten oder strukturierten Blechen.

Aus den Messergebnissen kann sehr gut ein starker Einfluss der Zwischenraumbedämpfung auf die Schalldämmung der Doppelwand aus strukturierten Blechen im höheren Frequenzbereich abgeleitet werden. Bei Auskleidung des Zwischenraumes mit einem porösen Absorbermaterial kann eine starke Verminderung des Einbruchs der Schalldämmung von bis zu 6 dB für die Doppelwandkombination strukturiert-glatt und von bis zu 13 dB für zwei strukturierte Bleche erzielt werden.

Eine vergrößerte Schlüsselweite der strukturierten Bleche verursacht bei der Doppelwand eine ebenso geringfügige Verschiebung des Frequenzbereiches mit einer verminderten Schalldämmung in tiefere Frequenzen wie dies bei der Einfachwand der Fall ist.

Die Anordnung der beiden strukturierten Schalen zueinander ist dabei von geringem Einfluss auf das Schalldämmmaß. So weist eine Doppelwand mit um 90° zueinander gedrehten Schalen in einigen Frequenzbereichen eine geringfügig höhere Schalldämmung auf als die deckungsgleiche Anordnung aus zwei kongruenten Schalen. Die Orientierung der Waben der strukturierten Schalen in Bezug auf positive und negative Wabenbeulungen zeigt nur einen sehr geringen Unterschied zwischen einer Anordnung, bei der beide Schalen gleich eingesetzt sind und einer Anordnung, bei der beide Schalen zueinander gespiegelt sind mit keiner eindeutigen Tendenz einer Anordnung zu einem höheren Schalldämmmaß.

Eine Werkstoffsubstitution mit dem Ergebnis einer geringeren flächenbezogenen Masse und eines geringeren Elastizitätsmoduls bewirkt wie bei der Einfachwand bei der Doppelwand ebenfalls eine weitere Verringerung des Schalldämmmaßes im höheren Frequenzbereich.

Zwei durch Kleben oder Verschweißen an der Wabenmitte gefügte strukturierte Bleche bieten eine sehr hohe Steifigkeit und eine Schalldämmung, die in tieferen Frequenzen gleich und teils etwas höher als die einer gleich schweren glatten oder strukturierten Wand ist. Diese gefügten Verbindungen weisen jedoch mit zunehmender Frequenz eine geringere Schalldämmung verglichen mit glatten oder strukturierten Einzelwänden auf. Eine FEM-Simulation der Schalldämmung für eine punktgeschweißte Verbindung zweier Bleche stimmt gut mit den Messwerten überein.

Das Schalldämmungsverhalten von strukturierten Einfach- und Doppelwandkombinationen kann mit der FEM gut numerisch simuliert werden mit einer maximalen Abweichung von 5 dB zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen, wobei eine sehr gute Wiedergabe der Unterschiede im Verlauf des Schalldämmmaßes zwischen glatten und strukturierten Blechen möglich ist. Eine analytische Berechnung des Schalldämmmaßes für eine Doppelwand aus orthotropen Platten mit der Vorgabe eines Orthotropiegrades berechnet ein ähnliches Verhalten der Schalldämmung in einem höheren Frequenzbereich mit einer Verringerung des Schalldämmmaßes gegenüber isotropen Platten.

Zukünftige Untersuchungen sollten eine vielfältige Variation der Strukturgeometrien beinhalten. Dabei kann die FEM gut zur schnellen Ergebniserzielung eingesetzt werden, ergänzt durch eine weitere Validierung besonderer Geometrien und Anordnungen durch Schalldämmungsmessungen. Ein wichtiger zu untersuchender Aspekt ist die Bedämpfung des Doppelwand-Zwischenraumes und die korrekte numerische Modellierung dessen. Weiterhin sollte die numerische Berechnung des vibroakustischen Verhaltens und der Schalldämmung der gefügten Blechkombinationen auf geklebte Verbindungen ausgeweitet und für Verbindungen, hergestellt durch Widerstands-Punktschweißen, verfeinert werden.

Basierend auf den vielfältigen und schnellen Möglichkeiten der Berechnung mittels der FEM sollte eine Optimierung der Strukturgeometrien nach verschiedenen Zielfunktionen durchgeführt werden, um etwa bei einer möglichst hohen Biegesteife ein möglichst großes Schalldämmmaß über weite Frequenzbereiche zu erzielen. Dies bietet ein großes Potenzial, um ingenieurwissenschaftlich schnelle und korrekte Aussagen zu erhalten und weitere Fortschritte in der Genauigkeit und Belastbarkeit der Ergebnisse zu erlangen.

Literaturverzeichnis

- [1] Ackermann, L., & Antes, H. (2002). Simulation der Schalltransmission durch Wände. *PAMM*, 1(1), 379.
- [2] Actran, MSC (2013). *Actran 13.1 User's Guide*, Free Field Technologies SA, 16 Place de l'Université, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgium.
- [3] Antonio, J. M. P., Tadeu, A., & Godinho, L. (2003). Analytical evaluation of the acoustic insulation provided by double infinite walls. *Journal of sound and vibration*, 263(1), 113-129.
- [4] Beranek, L. L., & Work, G. A. (1949). Sound transmission through multiple structures containing flexible blankets. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 21(4), 419-428.
- [5] Bies, D. A., & Hansen, C. H. (2003). *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. CRC Press.
- [6] Bolton, J. S., Shiau, N. M., & Kang, Y. J. (1996). Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials. *Journal of Sound and Vibration*, 191(3), 317-347.
- [7] Bosmans, I., Mees, P., & Vermeir, G. (1996). Structure-borne sound transmission between thin orthotropic plates: Analytical solutions. *Journal of sound and vibration*, 191(1), 75-90.
- [8] Butt, U., & Egbers, C. (2013). Aerodynamic Characteristics of Flow over Circular Cylinders with Patterned Surface. *J. Materials, Mechanics, Manufacturing*, 1(2).
- [9] Cederfeldt, L. (1975). A finite element approach to two-dimensional sound radiation and a discussion of sound insulation of corrugated plates. Report 59, Division of Building Technology, Lund Institute of Technology.
- [10] Craik, R. J. (1996). *Sound transmission through buildings: using statistical energy analysis*. Aldershot, England: Gower.
- [11] Craik, R. J. M., & Smith, R. S. (2000). Sound transmission through double leaf light-weight partitions part I: airborne sound. *Applied Acoustics*, 61(2), 223-245.
- [12] Cremer, L. (1942). Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall. *Akust. Z*, 7, 81-104.
- [13] Cremer, L., & Heckl, M. (1973). *Structure-borne sound*. Springer.

- [14] Cremer, L., & Heckl, M. (1995). Körperschall, Physikalische Grundlagen und Technische Anwendungen. 2., völlig neubearbeitete Auflage. Springer, Berlin.
- [15] Crocker, M. J., & Price, A. J. (1969). Sound transmission using statistical energy analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 9(3), 469-486.
- [16] Cummings, A., & Mulholland, K. A. (1968). The transmission loss of finite sized double panels in a random incidence sound field. *Journal of Sound and Vibration*, 8(1), 126-133.
- [17] Davy, J. L. (1991). Predicting the sound insulation of stud walls. In *Proceedings of Internoise*, Vol. 91, pp. 251-254.
- [18] Davy, J. L. (1993). The sound transmission of cavity walls due to studs. In *INTER-NOISE*, Vol. 2, pp. 975-975. NOISE CONTROL FOUNDATION.
- [19] DIN, E. 140-4 DIN EN ISO 140-3: Akustik-Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen—Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen. Teil, 3, 140-3.
- [20] Eibl, M. (2003). Berechnung der Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Feinbleche mit lokalen Konzepten. Doctoral dissertation, TU Darmstadt.
- [21] Faggiani, D. (1935). Transmission of Sound Through Multiple Walls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 7(1), 73-73.
- [22] Fahy, F. (2001). *Foundations of Engineering Acoustics*. Academic Press. San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo.
- [23] Fasold, W., Sonntag, E., & Winkler, H. (1987). *Bau- und Raumakustik*. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- [24] Fausti, P., Pompoli, R., & Smith, R. S. (1999). An intercomparison of laboratory measurements of airborne sound insulation of lightweight plasterboard walls. *Building Acoustics*, 6(2), 127-140.
- [25] Freedman, A. (1982). On the „overlapping resonances“ concept of acoustic transmission through an elastic plate, II: Numerical examples and physical implications. *Journal of Sound and Vibration*, 82(2), 197-213.
- [26] Fritzsche, S., Ossenbrink, R., & Michailov, V. (2011). Experimental characterisation of structured sheet metal. In *Key Engineering Materials*, Vol. 473, pp. 404-411.
- [27] Gösele, K. (1953). Schallabstrahlung von Platten, die zu Biegeschwingungen angeregt sind. *Acta Acustica united with Acustica*, 3(4), 243-248.
- [28] Gösele, K. (1954). Der Einfluss der Biegesteifigkeit auf die Schalldämmung von Doppelwänden. *Acta Acustica united with Acustica*, 4(1), 276-278.
- [29] Gösele, K. (1965). Über Prüfstände zur Messung der Luftschalldämmung von Wänden und Decken. *Acta Acustica united with Acustica*, 15(Supplement 1), 317-324.

- [30] Gösele, K. V. (1980). Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelschaligen Bauteilen (ohne Verbindung der Schalen). *Acta Acustica united with Acustica*, 45(4), 218-227.
- [31] Grosveld, F. W. (1985). Field-incidence noise transmission loss of general aviation aircraftdouble-wall configurations. *Journal of Aircraft*, 22(2), 117-123.
- [32] Guyader, J. L., & Lesueur, C. (1978). Acoustic transmission through orthotropic multilayered plates, part I: Plate vibration modes. *Journal of Sound and Vibration*, 58(1), 51-68.
- [33] Guyader, J. L., & Lesueur, C. (1978). Acoustic transmission through orthotropic multilayered plates, part II: Transmission loss. *Journal of Sound and Vibration*, 58(1), 69-86.
- [34] Guyader, J. L., & Lesueur, C. (1980). Transmission of reverberant sound through orthotropic, viscoelastic multilayered plates. *Journal of Sound and Vibration*, 70(3), 319-332.
- [35] Heckl, M. (1960). Untersuchungen an orthotropen Platten. *Acustica*, 10(109), 15.
- [36] Heckl, M. (1960). Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche. *Acta Acustica united with Acustica*, 10(2), 98-108.
- [37] Heckl, M. (1981). The tenth Sir Richard Fairey memorial lecture: sound transmission in buildings. *Journal of Sound and Vibration*, 77(2), 165-189.
- [38] Hongisto, V. (2000). Airborne sound insulation of wall structures: measurement and prediction methods. Helsinki University of Technology.
- [39] Hongisto, V. (2006). Sound insulation of double panels-comparison of existing prediction models. *Acta acustica united with acustica*, 92(1), 61-78.
- [40] Hopkins, C. *Sound Insulation*, 2007. Elsevier.
- [41] Hoppe, M. (2003). Umformverhalten strukturierter Feinbleche. Doctoral dissertation, BTU Cottbus.
- [42] Kang, Y. J., & Bolton, J. S. (1996). A finite element model for sound transmission through foam-lined double-panel structures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(5), 2755-2765.
- [43] Kang, Y. J., & Bolton, J. S. (1997). Sound transmission through elastic porous wedges and foam layers having spatially graded properties. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(6), 3319-3332.
- [44] Kropp, W., & Rebillard, E. (1999). On the air-borne sound insulation of double wall constructions. *Acta Acustica united with Acustica*, 85(5), 707-720.
- [45] Kurtze, G. (1959). New Wall Design for High Transmission Loss or High Damping. *Acoustical Society of America Journal*, 31, 739.
- [46] Langer, S. (2001). Schalltransmission durch Isolierverglasung. Doctoral dissertation, TU Braunschweig. Mechanik-Zentrum.

- [47] Lauriks, W., Mees, P., & Allard, J. F. (1992). The acoustic transmission through layered systems. *Journal of sound and vibration*, 155(1), 125-132.
- [48] Legault, J., & Atalla, N. (2009). Numerical and experimental investigation of the effect of structural links on the sound transmission of a lightweight double panel structure. *Journal of sound and vibration*, 324(3), 712-732.
- [49] London, A. (1949). Transmission of reverberant sound through single walls. *J. Research Nat. Bur. of Stand.*, 42(605), 2.
- [50] London, A. (1949). Transmission of Reverberant Sound through Double Walls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 21(4), 466-466.
- [51] Malikov, V. (2013). Experimentelle und numerische Untersuchungen der Umformung von strukturierten Blechen. Doctoral dissertation, BTU Cottbus-Senftenberg.
- [52] Maysenhölder, W. (1996). Low-frequency sound transmission through periodically inhomogeneous plates with arbitrary local anisotropy and arbitrary global symmetry. *Acta Acustica united with Acustica*, 82(4), 628-635.
- [53] Maysenhölder, W. (1998). Sound transmission through periodically inhomogeneous anisotropic thin plates: Generalizations of Cremer's thin plate theory. *Acta Acustica united with Acustica*, 84(4), 668-680.
- [54] Maysenhölder, W., & Haberkern, R. (2003). Sound transmission through periodically inhomogeneous plates: Solution of the general problem by a variational formulation. *Acta Acustica united with Acustica*, 89(2), 323-332.
- [55] Meier, A. (2000). Die Bedeutung des Verlustfaktors bei der Bestimmung der Schalldämmung im Prüfstand. Doctoral dissertation, Bibliothek der RWTH Aachen.
- [56] Möser, M. (2010). *Messtechnik der Akustik*. Heidelberg: Springer.
- [57] Möser, M. (2012). *Technische Akustik*. Springer DE.
- [58] Mulholland, K. A., Parbrook, H. D., & Cummings, A. (1967). The transmission loss of double panels. *Journal of Sound and Vibration*, 6(3), 324-334.
- [59] Panneton, R., Atalla, N., & Charron, F. (1995). A Finite-Element Formulation for the Vibroacoustic Behaviour of Double-Plate Structures with Cavity Absorption. *Canadian Aeronautics and Space Journal*, 41(1), 5-12.
- [60] Panneton, R., & Atalla, N. (1996). Numerical prediction of sound transmission through finite multilayer systems with poroelastic materials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(1), 346-354.
- [61] Pietrzko, S. J., & Mao, Q. (2008). New results in active and passive control of sound transmission through double wall structures. *Aerospace science and technology*, 12(1), 42-53.
- [62] Piscoya, R., Burgschweiger, R., & Ochmann, M. (2012). Numerical simulation of the transmission loss of plates. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 3271-3271.

- [63] Rayleigh, J. W. S., & Lindsay, R. B. (1945). The theory of sound.
- [64] Sas, P., Bao, C., Augusztinovicz, F., & Desmet, W. (1995). Active control of sound transmission through a double panel partition. *Journal of Sound and Vibration*, 180(4), 609-625.
- [65] Schirmer, W. (Ed.). (2006). *Technischer Lärmschutz: Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen*. Springer-Verlag.
- [66] Schoch, A. (1952). Der Schalldurchgang durch Platten. *Acta Acustica united with Acustica*, 2(1), 1-17.
- [67] Sewell, E. C. (1970). Transmission of reverberant sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle. *Journal of Sound and Vibration*, 12(1), 21-32.
- [68] Sgard, F. C., Atalla, N., & Nicolas, J. (2000). A numerical model for the low frequency diffuse field sound transmission loss of double-wall sound barriers with elastic porous linings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(6), 2865-2872.
- [69] Sharp, B. H. (1978). Prediction methods for the sound transmission of building elements. *Noise Control Engineering*, 11(2), 53-63.
- [70] Simmons, C. (1991). Structure-borne sound transmission through plate junctions and estimates of SEA coupling loss factors using the finite element method. *Journal of Sound and Vibration*, 144(2), 215-227.
- [71] Simmons, C. (2007). Uncertainty of measured and calculated sound insulation in buildings-Results of a Round Robin Test. *Noise control engineering journal*, 55(1).
- [72] Sonsino, C.M. ; Mueller, F. (1993). *Konstruktion, Berechnung und Fertigung lasergeschweißter Verbindungen im Automobilbau*. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit, LBF-Bericht Nr. 6520/3. Darmstadt.
- [73] Steel, J. A., & Craik, R. J. M. (1994). Statistical energy analysis of structure-borne sound transmission by finite element methods. *Journal of Sound and Vibration*, 178(4), 553-561.
- [74] Stelzer, R. (2012). *Une méthode énergétique pour les systèmes vibro-acoustiques couplés*. Doctoral dissertation, INSA de Lyon.
- [75] Sterzing, A. (2005). *Bewertung von Leichtbaupotenzial und Einsatzfähigkeit wölbstrukturierter Feibleche*. Verlag Wiss. Scripten.
- [76] Trochidis, A., & Kalaroutis, A. (1986). Sound transmission through double partitions with cavity absorption. *Journal of Sound and Vibration*, 107(2), 321-327.
- [77] TU Berlin, ISTA. *Datenblatt Fensterprüfstand (25.06.2013)*.
- [78] Wang, J., Lu, T. J., Woodhouse, J., Langley, R. S., & Evans, J. (2005). Sound transmission through lightweight double-leaf partitions: theoretical modelling. *Journal of sound and vibration*, 286(4), 817-847.
- [79] White, P. H. (1966). Transmission of Random Sound and Vibration through a Rectangular Double Wall. *Acoustical Society of America Journal*, 40, 821.

- [80] Wittstock, V. (2005). Uncertainties in building acoustics. In Proceedings of Forum Acusticum, Budapest.
- [81] Wittstock, V., & Bethke, C. (2005). On the uncertainty of sound pressure levels determined by third-octave band analyzers in a hemianechoic room. In Forum Acusticum.
- [82] Wittstock, V. (2007). Unsicherheiten in der Bauakustik. PTB-Mitteilungen 117, 40-42.
- [83] Wittstock, V., Schmelzer, M., & Kling, C. (2008). On the use of scaled models in building acoustics. Journal of the Acoustical Society of America, 123(5), 3502.
- [84] Woodcock, R., & Nicolas, J. (1995). A generalized model for predicting the sound transmission properties of generally orthotropic plates with arbitrary boundary conditions. The Journal of the Acoustical Society of America, 97(2), 1099-1112.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Mit einer hexagonalen Wabenstruktur versehenes, strukturiertes Blech in einem Hilfsrahmen	2
2.1	Verlauf des Schalldämmmaßes für orthotrope Platten [5]	5
3.1	Trapezblechgeometrie als Beispiel einer orthotropen Platte (links) und Geometrien von wabenförmig strukturierten Blechen (mittig) sowie als Pyramidenstumpf ausgeführte, strukturierte Bleche (rechts)	10
3.2	Blick auf einen Teil der Presse zur Fertigung strukturierter Bleche durch Hydroumformung, mit sichtbarer Matrize mit Wabenstruktur und gummierter, entleerter Membran	11
3.3	Geometriedefinitionen bei der verwendeten Strukturart	12
3.4	Spuranpassung	16
3.5	Schalldämmmaß einer 1 mm starken Einfachwand aus Stahl mit 1 % Materialdämpfung für aus verschiedenen Winkeln einfallende ebene Wellen und für diffusen Schalleinfall und Integration von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 90^\circ$	17
3.6	Schalldämmmaß einer Einfachwand aus Stahl mit 1 % Materialdämpfung und diffusen Schalleinfall und Integration von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 78^\circ$ und von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 90^\circ$ für drei verschiedene Blechdicken: 0,5 mm, 0,7 mm und 1,0 mm	18
3.7	Winkel- und Richtungsdefinitionen an der orthotropen Platte	19
3.8	Schalldämmmaß von 1 mm starken isotropen und orthotropen Einfachwänden aus Stahl mit 1 % Materialdämpfung und mit verschiedenen Verhältnissen der Biegesteifigkeiten in den orthotropen Richtungen für diffusen Schalleinfall und Integration von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 90^\circ$	20
3.9	Schalldämmmaß von einer isotropen Doppelwand aus Stahl mit Blechdicken von je 0,5 mm und einen Wandabstand von 40 mm und einer gleich schweren isotropen Einfachwand aus Stahl mit einer Blechdicke von 1 mm mit 1 % Materialdämpfung und diffusen Schalleinfall und Integration von je $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 78^\circ$ und von je $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 90^\circ$	21

3.10	Schalldämmmaß isotroper und orthotroper Doppelwände aus Stahl mit Blechdicken von je 0,5 mm, einem Wandabstand von 40 mm und 1 % Materialdämpfung und mit verschiedenen Verhältnissen der Biegesteifigkeiten in den orthotropen Richtungen für diffusen Schalleinfall und Integration von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 78^\circ$	22
3.11	Unterteilung der Geometrien in Gebiete für eine Doppelwandkonfiguration mit geltenden Differentialgleichungen, Randbedingungen und Kopplungen .	24
3.12	Diskretisierung eines CAD-Modells durch Dreieck-Schalenelemente	27
3.13	Auf eine Wand unter dem Winkel θ einfallende ebene Welle und von der Wand reflektierte ebene Welle	30
3.14	Erzeugung eines diffusen Schallfeldes aus ebenen Wellen, die von einer Halbkugeloberfläche über einer Wand auf diese einfallen	31
3.15	Veränderung des Schalldämmmaßes bei 500 Hz, abhängig von der Anzahl der Wiederholungen der Ebene-Wellen-Überlagerung und der Anzahl der Parallelschnitte durch die Halbkugel sowie Vergleich mit Cholesky-Zerlegung	32
3.16	Streuung des Schalldämmmaßes zwischen 200 Hz und 8 kHz für Anregung durch Cholesky-Zerlegung für eine Anzahl von Wiederholungen dieses Vorganges, die zwischen 1 und 30 liegt sowie 50 und 100	33
3.17	Streuung des Schalldämmmaßes zwischen 200 Hz und 8 kHz für Anregung durch überlagerte ebene Wellen aus 30 Parallelschnitten für eine verschiedene Anzahl von Wiederholungen dieses Vorganges, die zwischen 1 und 30 liegt sowie 50 und 100	34
3.18	Streuung des Schalldämmmaßes zwischen 200 Hz und 8 kHz für Anregung durch überlagerte ebene Wellen und 30 Wiederholungen dieses Vorganges für eine verschiedene Anzahl von Parallelschnitten, die zwischen 1 und 30 liegt sowie 50 und 100	35
3.19	In eine schallharte, ebene Wand mit der Fläche Γ_B eingesetzte ebene Struktur mit der Fläche Γ und dem Normalenvektor \mathbf{n}	36
3.20	Vernetztes CAD-Modell eines strukturierten Blechs mit skizzierter einfallender und abgestrahlter Schalleistung	37
3.21	Fensterprüfstand mit Messausrüstung und skizzierten Bahnverlauf des Mikrofons am Schwenkgalgen	38
3.22	Fixierung und Einbau eines strukturierten Blechs in Hilfsrahmen und Fensterprüfstand	39
3.23	Momentanwert des Terzband-Schalldruckpegels vom Mikrophon am Schwenkgalgen zu verschiedenen Zeitpunkten an räumlichen Punkten auf der Kreisbahn im Empfangsraum	44
3.24	Schalldruckpegel des Anregungssignals im Senderraum	45

3.25	Gemessenes und analytisch berechnetes Schalldämmmaß der MDF-Platten in der Dicke 38 mm, die als Adaptionrahmen für die Blechaufnahme verwendet wurden, sowie aus den analytischen Ergebnissen eine Abschätzung des Schalldämmmaßes für MDF-Platten der Gesamtdicke von 107 mm, wie sie bei den Messungen der Doppelwände verwendet werden	46
4.1	Vergleich zwischen analytisch und mittels FEM berechnetem und gemessenem Schalldämmmaß R_{diff} sowie mit aus der Literatur [65, 23] bekannten Werten von einer 1,0 mm starken, einschaligen Wand aus glattem Blech der Größe 587×587 mm beziehungsweise unendlicher Ausdehnung ([23]) . . .	52
4.2	Mittels FEM berechnetes Schalldämmmaß R_{diff} einschaliger Wände aus glattem Blech der Dicken 0,5 mm und 1,0 mm im Frequenzbereich von 1 Hz bis 200 Hz mit sichtbarer Lage der Platten-Eigenfrequenzen	53
4.3	Unterschiede in den Abweichungen der analytisch und mittels FEM berechneten und gemessenen Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus glattem Blech der Dicke 1,0 mm von den Dicken: 0,5 mm und 0,7 mm	54
4.4	Abhängigkeit der analytisch und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus glattem Blech der Dicke 1,0 mm vom Bereich der Einfallswinkel, über den integriert wird	55
4.5	Vergleich zwischen analytisch (Orthotropiefaktor $\nu = 4$) und mittels FEM berechnetem und gemessenem Schalldämmmaß R_{diff} von einer 1,0 mm starken, einschaligen Wand aus strukturiertem Blech der Schlüsselweite 33 . . .	56
4.6	Mittels FEM berechnetes Schalldämmmaß R_{diff} einschaliger Wände aus glatten und strukturierten Blechen mit Schlüsselweite 33 und 51 der Dicke 0,5 mm und 1,0 mm im Frequenzbereich von 1 Hz bis 200 Hz mit sichtbarer Lage der Platten-Eigenfrequenzen	57
4.7	Differenz der Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus glattem und strukturiertem Blech der Dicke 0,5 mm, jeweils analytisch und mittels FEM berechnet und gemessenen	58
4.8	Unterschiede in den Abweichungen der analytisch und mittels FEM berechneten und gemessenen Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus strukturiertem Blech mit Schlüsselweite 33 und Dicke 1,0 mm von den Dicken: 0,5 mm und 0,7 mm	59
4.9	Abhängigkeit der analytisch (Orthotropiefaktor $\nu = 4$) und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus strukturiertem Blech SW 33 der Dicke 1,0 mm vom Bereich der Einfallswinkel, über den integriert wird	60
4.10	Eigenform eines 0,5 mm dicken, strukturierten Blechs der Schlüsselweite 33 bei einer Frequenz von 5906 Hz mit auftretenden Waben-Eigenmoden . . .	60
4.11	Eigenform eines 1,0 mm dicken, strukturierten Blechs der Schlüsselweite 33 bei einer Frequenz von 7701 Hz mit auftretenden Waben-Eigenmoden . . .	61
4.12	Eigenform eines 0,5 mm dicken, strukturierten Blechs der Schlüsselweite 51 bei einer Frequenz von 2155 Hz mit auftretenden Waben-Eigenmoden . . .	61

4.13	Eigenform eines 0,5 mm dicken, strukturierten Blechs der Schlüsselweite 51 bei einer Frequenz von 2357 Hz mit auftretenden Waben-Eigenmoden . . .	61
4.14	Modendichte für glatte Bleche der Dicke 0,5 mm, 0,7 mm und 1,0 mm . . .	62
4.15	Modendichte für strukturierte Bleche der Dicke 0,5 mm, 0,7 mm und 1,0 mm und der Schlüsselweite 33	62
4.16	Modendichte für strukturierte Bleche der Schlüsselweiten 33, 43 und 51 und der Dicke 0,5 mm	63
4.17	Abhängigkeit der gemessenen und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus strukturiertem Blech der Dicke 0,5 mm von der Schlüsselweite: SW 33, SW 43, SW 51, und für SW 43 und SW 51 von der Wabenhöhe	64
4.18	Abhängigkeit der mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} einschaliger Wände aus strukturiertem Blech der Dicke 0,5 mm von der Schlüsselweite: SW 33, SW 43, SW 51 und einer Wabenhöhe von 3,3 mm, Abbildung mit verkleinertem Frequenzbereich und Darstellung als Schmalbandspektrum mit einer Frequenzauflösung von 20 Hz	65
4.19	Abhängigkeit der gemessenen und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} glatter Bleche von der flächenbezogenen Masse: 7,85 kg/m ² , 5,495 kg/m ² , 3,925 kg/m ² (Werkstoff Stahl) und 2,7 kg/m ² , 1,89 kg/m ² , 1,35 kg/m ² (Werkstoff Aluminium)	66
4.20	Abhängigkeit der gemessenen und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} strukturierter Bleche SW 33 von der flächenbezogenen Masse: 7,85 kg/m ² , 5,495 kg/m ² , 3,925 kg/m ² (Werkstoff Stahl) und 2,7 kg/m ² , 1,35 kg/m ² (Werkstoff Aluminium)	67
4.21	Abhängigkeit der mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} strukturierter Bleche SW 33 von der flächenbezogenen Masse: 7,85 kg/m ² , 5,495 kg/m ² , 3,925 kg/m ² (Werkstoff Stahl) und 2,7 kg/m ² , 1,35 kg/m ² (Werkstoff Aluminium), Abbildung mit verkleinertem Frequenzbereich und Darstellung als Schmalbandspektrum mit einer Frequenzauflösung von 20 Hz	67
4.22	Differenz des gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} strukturierter Bleche SW 33 der Dicken 0,5 mm und 0,7 mm zwischen negativer und positiver Orientierung der Waben	68
4.23	Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Einfachwänden, bestehend aus 1,0 mm und für einen Teil zusätzlich aus 0,7 mm starken Wänden aus strukturierten Blechen von der Strukturgeometrie: wabenförmig SW 33, halbkugelförmig, wabenförmig ohne Stege, hexagonaler Pyramidenstumpf	69
4.24	Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Einfachwänden, bestehend aus 1,0 mm und für einen Teil zusätzlich aus 0,7 mm starken Wänden aus strukturierten Blechen von der Strukturgeometrie: wabenförmig SW 33, halbkugelförmig, wabenförmig ohne Stege, hexagonaler Pyramidenstumpf, Abbildung mit verkleinertem Frequenzbereich und Darstellung als Schmalbandspektrum mit einer Frequenzauflösung von 20 Hz .	69

4.25	Vergleich zwischen analytisch und mittels FEM berechnetem und gemessenem Schalldämmmaß R_{diff} von einer Doppelwand, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus glattem Blech der Größe 587×587 mm und mit einem Wandabstand von 60 mm und Vergleich mit einer Einzelwand bestehend aus 1 mm dickem, glatten Blech	72
4.26	Differenz der mittels FEM berechneten und gemessenen Schalldämmmaße R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus glattem Blech der Größe 587×587 mm, davon einmal mit einem Wandabstand von 60 mm und einmal von 40 mm	73
4.27	Differenz des gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus glattem Blech der Größe 587×587 mm und mit einem Wandabstand von 40 mm und 60 mm, davon einmal mit einem durch Dämmmaterial gedämpften und einmal einem ungedämpften Zwischenraum	74
4.28	Vergleich zwischen analytisch und mittels FEM berechnetem und gemessenem Schalldämmmaß R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei glatten Blechen, aus zuerst einem strukturierten Blech der Schlüsselweite 33 und zuletzt einem glatten Blech, und aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33, der Größe 587×587 mm und mit einem Wandabstand von jeweils 60 mm	76
4.29	Differenz des gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei glatten Blechen, aus zuerst einem strukturierten Blech der Schlüsselweite 33 und zuletzt einem glatten Blech, und aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33, der Größe 587×587 mm und mit den Wandabständen 40 mm und 60 mm, davon einmal mit einem durch Dämmmaterial gedämpften und einmal einem ungedämpften Zwischenraum	77
4.30	Abhängigkeit der mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei glatten Blechen, aus zuerst einem strukturierten Blech der Schlüsselweite 33 und zuletzt einem glatten Blech, und aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm, vom Bereich der Einfallswinkel, über den integriert wird, zusätzlich analytische Ergebnisse für zwei orthotrope Bleche, $\nu = 4$	78
4.31	Abhängigkeit der gemessenen und mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen und mit dem Wandabstand 60 mm, von der Schlüsselweite: SW 33, SW 43, SW 51, 1. Schale SW 33 und 2. Schale SW 51	79
4.32	Abhängigkeit der mittels FEM berechneten Schalldämmmaße R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen und mit dem Wandabstand 60 mm, von der Schlüsselweite: SW 33, SW 43, SW 51, 1. Schale SW 33 und 2. Schale SW 51, Abbildung mit verkleinertem Frequenzbereich und Darstellung als Schmalbandspektrum mit einer Frequenzauflösung von 20 Hz	79

- 4.33 Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen und mit dem Wandabstand 40 mm, von der Strukturgeometrie: wabenförmig SW 33, halbkugelförmig, wabenförmig ohne Stege, hexagonaler Pyramidenstumpf 80
- 4.34 Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweiten: 43 und 51 und mit dem Wandabstand 60 mm, von der Wabenhöhe 80
- 4.35 Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm von der Orientierung der Waben in den Blechebenen der einzelnen Schalen zueinander 82
- 4.36 Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm von der positiven und negativen Orientierung der Ausbeulungen der Waben der einzelnen Schalen 82
- 4.37 Abhängigkeit des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je 0,5 mm starken Wänden aus zwei glatten und zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm, von der flächenbezogenen Masse 83
- 4.38 Verlauf des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus unterschiedlich starken Wänden aus zwei glatten und zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm, mit gleicher flächenbezogener Masse 84
- 4.39 Verlauf des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus unterschiedlich starken Wänden aus zwei glatten und zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und mit dem Wandabstand 40 mm, mit gleicher flächenbezogener Masse und einer Kombination aus den Werkstoffen Stahl und Aluminium 85
- 4.40 Verlauf des mittels FEM berechneten Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus zwei glatten Blechen der Dicke 0,5 mm und mit den Wandabständen 10 mm, 40 mm, 50 mm und 60 mm und Vergleich mit Messergebnissen für die Wandabstände 40 mm und 60 mm 86
- 4.41 Verlauf des mittels FEM berechneten und gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus je einem glatten und einem strukturierten Blech der Schlüsselweite 33 und je der Dicke 0,5 mm und mit den Wandabständen 40 mm und 60 mm 86
- 4.42 Verlauf des mittels FEM berechneten und gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} von Doppelwänden, bestehend aus zwei strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 und je der Dicke 0,5 mm und mit den Wandabständen 40 mm und 60 mm 87

4.43	Verlauf des gemessenen Schalldämmmaßes R_{diff} von zwei mittels verschiedener Fügeverfahren in den Wabenmitten verbundenen strukturierten Blechen mit einer Dicke von je 0,5 mm und der Schlüsselweite 33 und Vergleich mit den Messergebnissen von glatten und strukturierten Einfach- und Doppelwänden mit gleicher flächenbezogener Masse mit Vernachlässigung der Masse der Klebstoffe; zusätzlich für den durch Widerstands-Punktschweißen erzeugten Verbund mittels FEM berechnetes Schalldämmmaß	88
A.1	Schalldämmmaß R_{diff} von Einfachwänden aus glatten und strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 wenn nicht anders angegeben, verschiedene Stahlsorten, Ergebnisse von zwei Messkampagnen	109
A.2	Schalldämmmaß R_{diff} von Doppelwänden aus glatten (G-G), strukturierten und glatten (S-G) und strukturierten (S-S) Blechen der Blechdicke von je 0,5 mm, Wandabstand 40 mm und Hohlraumbedämpfung mittels Absorbermaterial	110
A.3	Schalldämmmaß R_{diff} von Doppelwänden aus glatten (G-G), strukturierten und glatten (S-G) und strukturierten (S-S) Blechen der Blechdicke von je 0,5 mm (wenn nicht anders angegeben), 0,7 mm und 1 mm, Wandabstand 60 mm und Hohlraumbedämpfung mittels Absorbermaterial	111
A.4	Schalldämmmaß R_{diff} von Doppelwänden aus glatten (G-G), strukturierten und glatten (S-G) und strukturierten (S-S) Blechen der Blechdicke von je 0,5 mm und Wandabständen von 40 mm und 60 mm ohne Hohlraumbedämpfung	112

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht der strukturierten Bleche, die für Messungen oder numerischer Simulation vorlagen und verwendet wurden (alle Zahlenwerte in Millimeter)	14
3.2	Angenommene Materialparameter	15
3.3	Übersicht aller Konfigurationen der in zwei Messkampagnen erfolgten Schalldämmungsmessungen (alle Zahlenwerte in Millimeter), Teil 1	40
3.4	Übersicht aller Konfigurationen der in zwei Messkampagnen erfolgten Schalldämmungsmessungen (alle Zahlenwerte in Millimeter), Teil 2	41
4.1	Übersicht über Frequenzen, bei denen die Biegewellenlänge der Wand mit den untersuchten Schlüsselweiten übereinstimmt	71

Anhang A

Vollständige Messergebnisse

In den folgenden Abbildungen werden noch einmal die Ergebnisse aller erfolgten Messungen vollständig dargestellt.

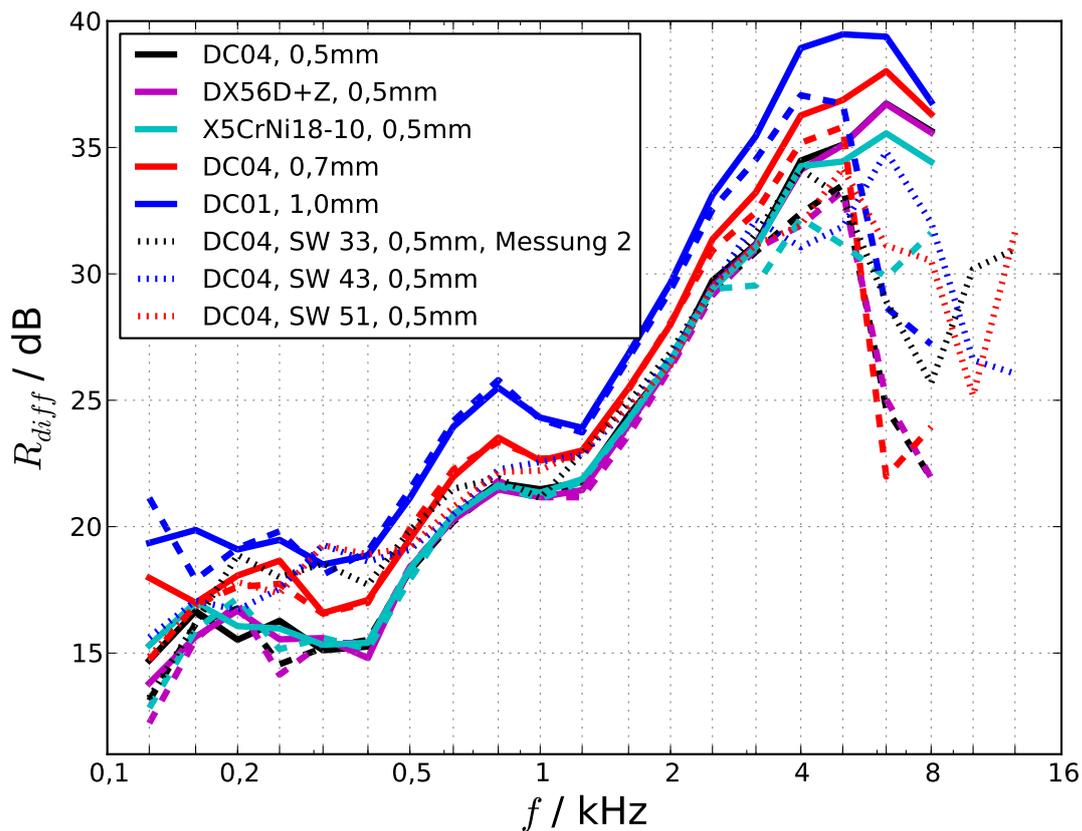


Abbildung A.1: Schalldämmmaß R_{diff} von Einfachwänden aus **—** glatten und **- - -** strukturierten Blechen der Schlüsselweite 33 (wenn nicht anders angegeben), 43 und 51, verschiedene Stahlsorten, Ergebnisse von zwei Messkampagnen

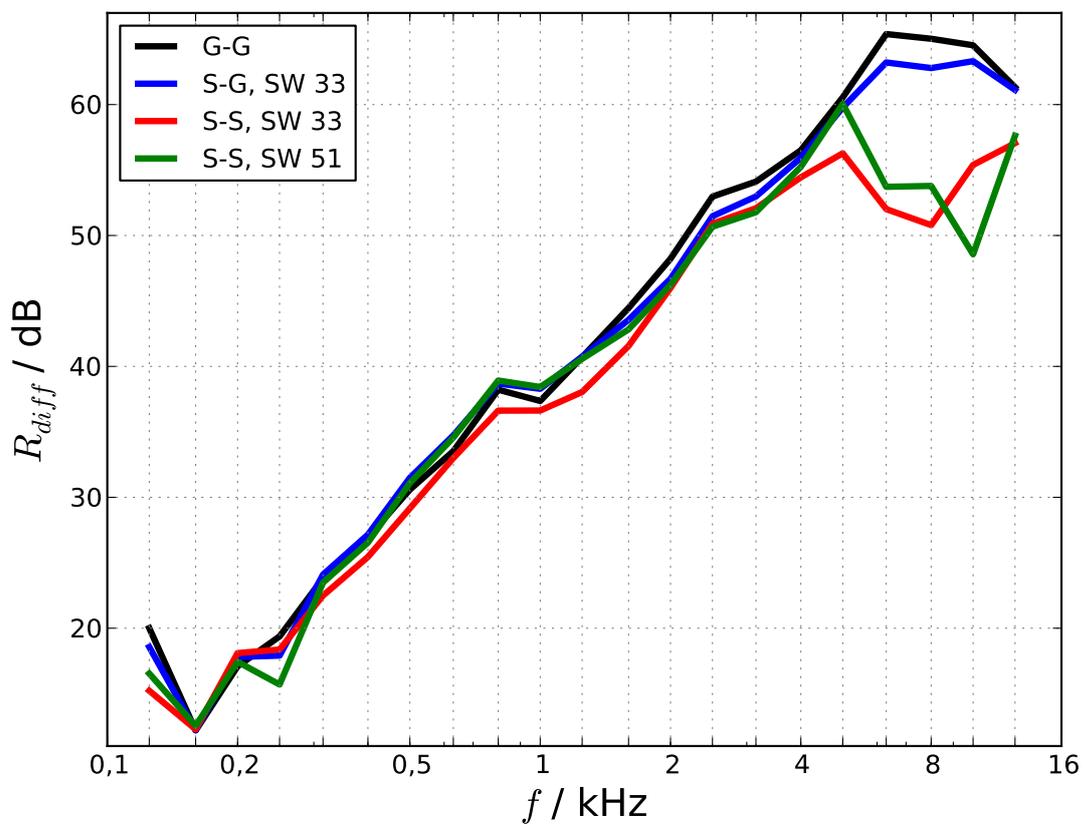


Abbildung A.2: Schalldämmmaß R_{diff} von Doppelwänden aus glatten (G-G), strukturierten und glatten (S-G) und strukturierten (S-S) Blechen der Blechdicke von je 0,5 mm, Wandabstand 40 mm und Hohlraumbedämpfung mittels Absorbermaterial

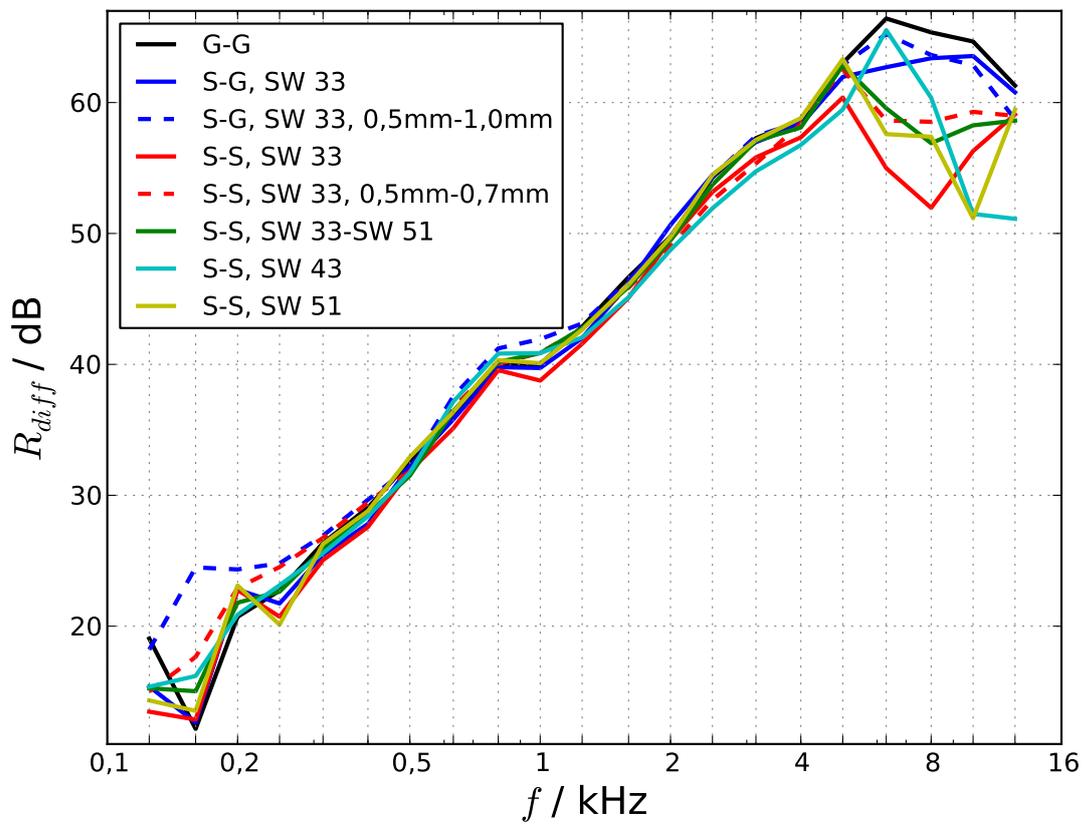


Abbildung A.3: Schalldämmmaß R_{diff} von Doppelwänden aus glatten (G-G), strukturierten und glatten (S-G) und strukturierten (S-S) Blechen der Blechdicke von je 0,5 mm (wenn nicht anders angegeben), 0,7 mm und 1 mm, Wandabstand 60 mm und Hohlraumbedämpfung mittels Absorbermaterial

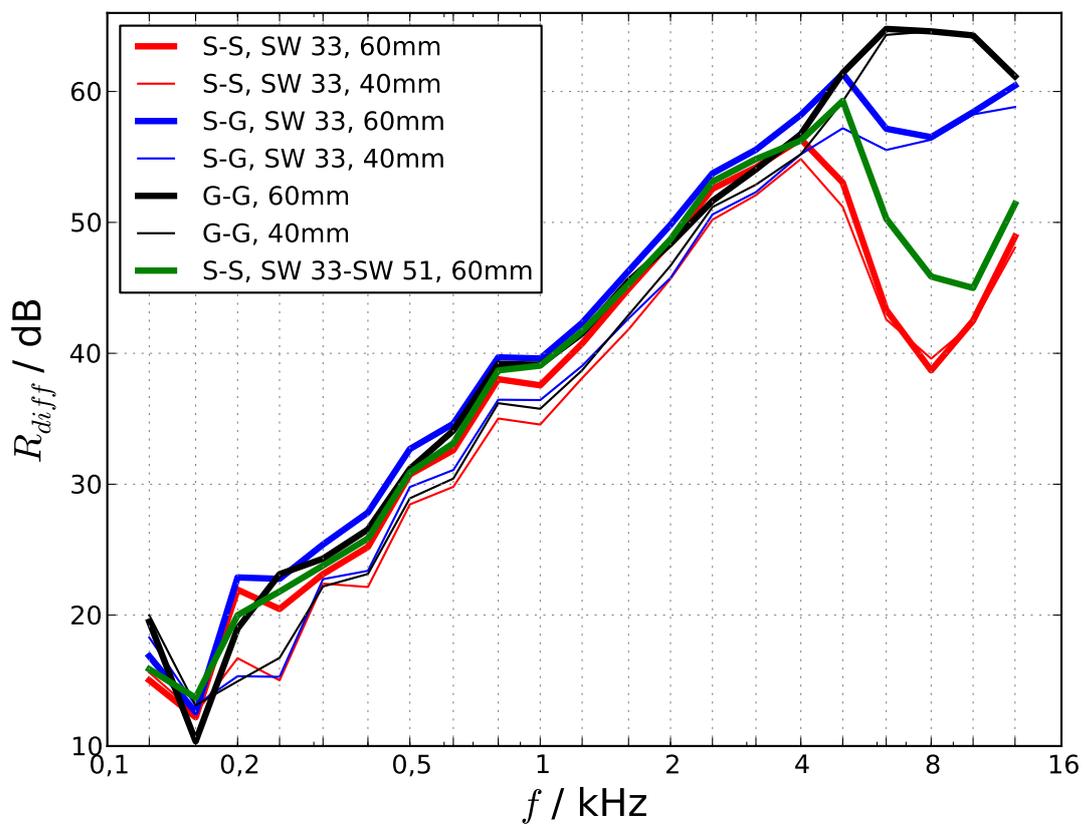


Abbildung A.4: Schalldämmmaß R_{diff} von Doppelwänden aus glatten (G-G), strukturierten und glatten (S-G) und strukturierten (S-S) Blechen der Blechdicke von je 0,5 mm und Wandabständen von 40 mm und 60 mm ohne Hohlraumbedämpfung

Anhang B

Eingabedatei FEM

Hier wird beispielhaft der Aufbau einer Eingabedatei gezeigt, wie sie zur Steuerung des FEM-Programms *Actran* benutzt wird. Dateien in dieser und ähnlicher Form wurden zur numerischen Berechnung des Schalldämmmaßes innerhalb dieser Arbeit verwendet. Dieses Beispiel gilt für Berechnungen an einer Doppelwand, in entsprechend gekürzter und abgewandelter Form werden Berechnungen an einer Einfachwand gesteuert.

```
BEGIN ACTRAN

COMMENT_START
  ActranVI output file
  version : 13.0
  date    : 21-12-2012
  time    : 16:29:58
COMMENT_STOP
BEGIN FREQUENCY_DOMAIN
  20.0 20.0 6740.0
END FREQUENCY_DOMAIN

BEGIN TOPOLOGY 21
  BDF
  FILE ../CAD_Modelle/587x587x0_sh_beam_elemtria8_3mm_double40mm_nohotp.bdf
  BEGIN DOMAIN Default_587x587x0_igs1
    PID 1
  END DOMAIN Default_587x587x0_igs1
  BEGIN DOMAIN Default_587x587x0_igs3
    PID 3
  END DOMAIN Default_587x587x0_igs3
  BEGIN DOMAIN Default_PBEAM_Property2
    PID 2
  END DOMAIN Default_PBEAM_Property2
  BEGIN DOMAIN Default_PBEAM_Property4
    PID 4
  END DOMAIN Default_PBEAM_Property4
```

END TOPOLOGY 21

BEGIN TOPOLOGY 22

BDF

FILE ../CAD_Modelle/587x587x0_glatt_sh_beam_elem8_3mm_double40mm_cav8mm_0.bdf

BEGIN DOMAIN Default_587x587x0_glatt_igs1

PID 1

END DOMAIN Default_587x587x0_glatt_igs1

BEGIN DOMAIN Default_587x587x0_glatt_igs3

PID 3

END DOMAIN Default_587x587x0_glatt_igs3

BEGIN DOMAIN Default_PBEAM_Property2_2

PID 2

END DOMAIN Default_PBEAM_Property2_2

BEGIN DOMAIN Default_PBEAM_Property4_2

PID 4

END DOMAIN Default_PBEAM_Property4_2

BEGIN DOMAIN Default_PSOLID_Property5

PID 5

END DOMAIN Default_PSOLID_Property5

END TOPOLOGY 22

BEGIN TOLERANCE_LIST

BEGIN TOLERANCE 1

GAP_TOL 100.0

PLANE_TOL 100.0

END TOLERANCE 1

END TOLERANCE_LIST

BEGIN MATERIAL 2

ISOTROPIC_SOLID

YOUNG_MODULUS { 2.1e+08, 2100000}

SOLID_DENSITY { 7.85e-06, 0}

POISSON_RATIO { 0.31, 0}

END MATERIAL 2

BEGIN MATERIAL 4

FLUID

SOUND_SPEED { 340000, 340}

FLUID_DENSITY { 1.225e-09, 0}

THERMAL_CONDUCTIVITY 25.61

VISCOSITY 1.821e-08

CP 1.004e+09

CV 7.16e+08

END MATERIAL 4

BEGIN COMPONENT 1

```
DSHELL
DOMAIN Default_587x587x0_igs1
  MATERIAL 2
THICKNESS 0.5
END COMPONENT 1

BEGIN COMPONENT 3
DSHELL
DOMAIN Default_587x587x0_igs3
  MATERIAL 2
THICKNESS 0.5
END COMPONENT 3

BEGIN COMPONENT 5
ACOUSTIC
DOMAIN Default_PSOLID_Property5
  MATERIAL 4
END COMPONENT 5

BEGIN COUPLING_SURFACE 5
DOMAIN Default_587x587x0_igs1
END COUPLING_SURFACE 5

BEGIN COUPLING_SURFACE 6
DOMAIN Default_587x587x0_glatt_igs1
END COUPLING_SURFACE 6

BEGIN COUPLING_SURFACE 7
DOMAIN Default_587x587x0_igs3
END COUPLING_SURFACE 7

BEGIN COUPLING_SURFACE 8
DOMAIN Default_587x587x0_glatt_igs3
END COUPLING_SURFACE 8

BEGIN COMPONENT 4
RAYLEIGH_SURFACE
MATERIAL 4
DOMAIN Default_587x587x0_igs3
END COMPONENT 4

BEGIN INTERFACE 4
  NAME interface
SURFACE 5 6
PROJECTION_TOL 1
END INTERFACE 4

BEGIN INTERFACE 5
```

```
SURFACE 7 8
PROJECTION_TOL 1
END INTERFACE 5
BEGIN BOUNDARY_CONDITION
BEGIN DISPLACEMENT 1
DOMAIN Default_PBEAM_Property2 Default_PBEAM_Property4
CONSTANT FREE {          0,          0} FREE
END DISPLACEMENT 1
END BOUNDARY_CONDITION
BEGIN DIFFUSE_FIELD 8
DOMAIN Default_587x587x0_igs1
SOUND_SPEED 340000.0
FLUID_DENSITY 1.225e-09
REFERENCE_PSD          1
NUMBER_SAMPLES 30
END DIFFUSE_FIELD 8
BEGIN SOLVER
  MUMPS
END SOLVER
BEGIN OUTPUT_FRF
  TL_587_sh05_elemtria8_3mm_damp1_cavdamp01_double40mm_cav8mm_coupling_20_20_6740.plt
  PSD_FILENAME PSD_TL_587_sh05_elemtria8_3mm_damp1_cavdamp01_double40mm_cav8mm_coupling_20_20_6740.plt

BEGIN INCIDENT_SURFACE 3
MATERIAL 4
DOMAIN Default_587x587x0_igs1
END INCIDENT_SURFACE 3
END OUTPUT_FRF
BEGIN OUTPUT_MAP
  BEGIN SAVE 1
    NFF
    TL_587_sh05_elemtria8_3mm_damp1_cavdamp01_double40mm_cav8mm_coupling_20_20_6740.nff 1

  END SAVE 1
END OUTPUT_MAP

END ACTRAN
```