

**IB 131-2015/056**

**Simulation des vibroakustischen Verhaltens  
von Gridstrukturen**

Franziska Elisabeth Machtans

Dipl.-Ing Oliver Unruh



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik  
Braunschweig**

September / 2015



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
in der Helmholtzgemeinschaft  
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

**IB 131-2015/056**

**Simulation des vibroakustischen Verhaltens von  
Gridstrukturen**

Braunschweig, September, 2015

Der Bericht umfasst:

61 Seiten

Institutsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Verfasser:

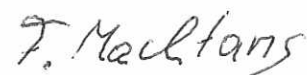


Oliver Unruh

Leiter der Abteilung:



Hans Peter Monner



Franziska Machtans



# Inhaltsverzeichnis

## Abbildungsverzeichnis

## Tabellenverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>i</b>
Formelzeichen . . . . .	i
Indizes . . . . .	ii
Abkürzungen . . . . .	ii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>3</b>
<b>3 Wellenausbreitung in Kontinua und Schallabstrahlung von ebenen Flächen</b>	<b>9</b>
3.1 Schwingungen in Festkörpern . . . . .	9
3.1.1 Biegewellen . . . . .	9
3.1.2 Eigenformen des dynamischen Systems . . . . .	10
3.2 Entstehung und Abstrahlung von Schall . . . . .	11
3.3 Berechnung akustischer Größen nach der Elementarstrahler-Theorie . . . . .	12
3.4 Einflüsse der Bauteilgeometrie auf die Wellenausbreitung . . . . .	15
<b>4 Modellaufbau</b>	<b>17</b>
4.1 Erstellung des parametrischen Modells mit MATLAB . . . . .	18
4.2 Modellierung in ANSYS . . . . .	20
4.2.1 Erstellung des Modells . . . . .	20
4.2.2 Wahl der Elemente . . . . .	21
4.2.3 Modellierung der Einspannung . . . . .	23
<b>5 Modellvalidierung</b>	<b>25</b>
5.1 Versuchsdurchführung und Messergebnisse . . . . .	25
5.2 Variation der Modellparameter . . . . .	27
5.2.1 Validierung der Geometrie . . . . .	27
5.2.2 Validierung der Einspannung . . . . .	29
5.2.3 Validierung der Materialdämpfung . . . . .	31
5.3 Vergleich bei harmonischer Anregung auf dem Hautfeld . . . . .	32

<b>6</b>	<b>Vibroakustische Untersuchung von zwei Gridstrukturen</b>	<b>35</b>
6.1	Untersuchte Anisogridstruktur . . . . .	35
6.1.1	Modalanalyse . . . . .	36
6.1.2	Harmonische Anregung . . . . .	36
6.2	Vibroakustisches Verhalten . . . . .	39
6.2.1	Schallleistung . . . . .	39
6.2.2	Schallabstrahlgrad . . . . .	41
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>45</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>47</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Untersuchte CKF-Platte mit regelmäßigen, applizierten Versteifungselementen . . .	1
1.2	Von CirComp vorgestellte Isogridstruktur . . . . .	1
2.1	Dachkuppel des Ständehauses in Düsseldorf . . . . .	3
2.2	Raketenzwischenstufe aus Gitterstruktur . . . . .	4
2.3	Schematischer Aufbau einer Form für die Herstellung von Gridstrukturen . . . . .	5
2.4	Mittels Selective Laser Melting gefertigte Gitterstruktur . . . . .	5
2.5	Klassifizierung von Grid-Typen . . . . .	5
2.6	Der qualitativer Verlauf des Schalldämmmaßes orthotroper Platten . . . . .	6
2.7	Glatte Stahlplatte: Frequenzgang des Körperschallmaßes . . . . .	7
2.8	Stahlplatte mit einem diagonal angeordneten Rippenkreuz: Frequenzgang des Körperschallmaßes . . . . .	7
3.1	Biegewelle eines Stabes . . . . .	9
3.2	Frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle und konstanter Schallwelle . . . . .	10
3.3	Eigenformen eines Kragbalkens . . . . .	11
3.4	Longitudinalwelle einer Luftsäule . . . . .	11
3.5	Abstrahlung von Schall . . . . .	13
3.6	Abstrahlung einer Fläche mit Elementarstrahlertheorie . . . . .	13
3.7	Reflexion und Transmission an Impedanzgrenzen . . . . .	15
4.1	Schematisches Modell . . . . .	17
4.2	Ablauf von der Modellerstellung über das Simulieren in ANSYS bis zur Auswertung	18
4.3	Parameter zur Erstellung der Gridstruktur in MATLAB . . . . .	19
4.4	Variationsmöglichkeiten der Gridstruktur . . . . .	19
4.5	Ablauf der Erstellung des Modells in ANSYS . . . . .	21
4.6	Schematischer Aufbau der diagonal verlaufenden Stege auf einer Platte . . . . .	21
4.7	Shell181 . . . . .	22
4.8	Anisogridstruktur als Modell in ANSYS mit Vergrößerung auf einen Kreuzungsbereich zweier Stege . . . . .	23
4.9	Randbedingungen (BC) werden an den äußeren, im Raum liegenden Knoten der Combin14 Elemente definiert . . . . .	23
5.1	Übertragungsfunktion Steganregung Modell 1 . . . . .	26

5.2	Exp. 45,6 Hz (1,3)	27
5.3	Sim. 50 Hz (1,3)	27
5.4	Exp. 107,5 Hz (3,4)	28
5.5	Sim. 115 Hz (3,4)	28
5.6	Exp. 261,3 Hz (4,4)	28
5.7	Sim. 283 Hz (4,4)	28
5.8	Mod. 47 Hz (1,3)	29
5.9	Mod. 144 Hz (3,4)	29
5.10	Mod. 283 Hz (4,4)	29
5.11	Übertragungsfunktionen: Änderung der Aufhängung bei konstanter Materialdämpfung mit Vergleich zur experimentell bestimmten Übertragungsfunktion	30
5.12	Übertragungsfunktionen Anregung auf dem Steg Modell 1 mit verschiedenen Dämpfungswerten	31
5.13	Übertragungsfunktion Anregung auf Hautfeld Modell 1	32
5.14	Sim. 50,6 Hz (1,3)	33
5.15	Sim. 283,8 Hz (4,4)	33
6.1	FE-Modell der geometrisch veränderten Anisogridstruktur	36
6.2	Eigenform bei 29,6 Hz (2,1)	36
6.3	Eigenform bei 38,5 Hz (2,2)	36
6.4	Eigenform bei 111,2 Hz (1,3)	37
6.5	Eigenform bei 284,4 Hz (7,2)	37
6.6	Übertragungsfunktionen Modell 2	37
6.7	Betriebsschwingform bei 31,2 Hz (1,1)	38
6.8	Betriebsschwingform bei 30,6 Hz (4,1)	38
6.9	Betriebsschwingform bei 113,1 Hz (1,3)	38
6.10	Betriebsschwingform bei 285,6 Hz (7,2)	38
6.11	Einfallende und abgestrahlte Schalleistung beider Gridstrukturen mit Vergleich zu einer ebenen CFK-Platte	40
6.12	Schalldämmmaß der Anisogridstrukturen mit Vergleich zu einer ebenen CFK-Platte	40
6.13	Betriebsschwingform bei 550,6 Hz des Modells 2 bei Schallfeldanregung	41
6.14	Mittelwert der effektiven Schnelle der schwingenden Anisogridstruktur Modell 2	42
6.15	Schallabstrahlmaß für beide Modelle mit Vergleich einer ebenen CFK-Platte	42
6.16	Betriebsschwingform (2,1) bei 14,4 Hz des Modells 2	43



# Tabellenverzeichnis

4.1 Abmaße der zu untersuchenden Platte . . . . .	18
4.2 Materialkenndaten des Prepreg-Gelege einer einzelnen Lagen . . . . .	20
6.1 Abmaße der Platte mit veränderter Gridgeometrie . . . . .	35



# Nomenklatur

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$c$	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
$f$	[1/s]	Frequenz
$k$	[1/m]	Wellenzahl
$l$	[m]	Länge
$m$	[kg]	Masse
$p$	[Pa]	(Schall-)Druck
$r$	[m]	Radius
$v$	[m/s]	Schnelle
$A$	[m <sup>2</sup> ]	(Querschnitts-)Fläche
$E$	[N/m <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul
$I$	[m <sup>4</sup> ]	Flächenträgheitsmoment
$P$	[W]	Schallleistung
$R$	[kg/m <sup>2</sup> ]	Strahlungswiderstandsmatrix
$R_m$	[Nm/(kmolK)]	Universelle Gaskonstante
$T$	[°C]	Temperatur
$TL$	[dB]	Schalldämmmaß, Transmission Loss
$Z$	[kg/(ms)]	Abstrahlimpedanzmatrix
$\alpha$	[kg]	1. Dämpfungskoeffizient Rayleigh-Dämpfung
$\beta$	[kg/s <sup>2</sup> ]	2. Dämpfungskoeffizient Rayleigh-Dämpfung
$\delta$	[kg/s]	konstanter Dämpfungswert
$\kappa$	[–]	Isentropenkoeffizient
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\lambda$	[m]	Wellenlänge
$\varphi$	[rad]	Winkel
$\sigma$	[–]	Abstrahlgrad
$\tau$	[–]	Transmissionsgrad
$\omega$	[rad/s]	Eigenkreisfrequenz

## Indizes

---

Index	Bedeutung
ges	= gesamt
n	= Normalenrichtung
max	= maximal, Maximum
min	= minimal, Minimum
0	= Ausgangswert

---

## Abkürzungen

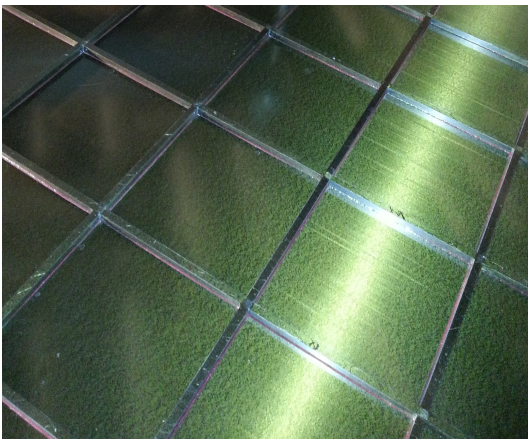
---

Abk.	Bedeutung
Abb.	= Abbildung
ANSYS	= Analysis System
CFK	= Kohlefaserverstärkter Kunststoff
Exp.	= Experiment
FE	= Finite Elemente
FEM	= Finite Elemente Methode
MATLAB	= Matrix Laboratory
Mod.	= Modalanalyse
Prepreg	= engl. preimpregnated fibres
Sim.	= Simulation

---

# 1 Einleitung

Faserverbundwerkstoffe ermöglichen im Hochleistungsleichtbau neuartige Bauweisen, erlauben originelle Gestaltungsmöglichkeiten und bieten alternative Auslegungsmethoden. Anwendungsbeispiele von Faserverbundwerkstoffen finden sich unter anderem in der Luft- und Raumfahrt durch ein gutes Verhältnis von Masse zu Steifigkeit. Ein vielversprechendes Konzept für die Steigerung der mechanischen Eigenschaften der Struktur bei geringer Massenzunahme ist die sogenannte Gridbauweise, welches seit einiger Zeit für den Bau von Flugzeugrümpfen untersucht und bereits angewandt wird ([AIR11], [AC13]). Regelmäßig aufgebrachte Versteifungsstreben, Grids, auf Leichtbaustrukturen werden bereits seit längerer Zeit in der Nutzlastverkleidung von Trägerraketen verwendet. Durch die periodisch aufgebrachten oder integrierten Geometrielemente lassen sich die Eigenschaften einer Faserverbundplatte in gewünschter Art und Richtung beeinflussen und verbessern. Eine Platte mit der Gridbauweise aus einem Kohlefaserverbund ist in Abbildung 1.1 gezeigt, sowie einem Beispiel in Abbildung 1.2 eines zylindrischen Bauteils.



**Abb. 1.1:** Untersuchte CKF-Platte mit regelmäßigen, applizierten Versteifungselementen



**Abb. 1.2:** Von CirComp vorgestellte Iso-gridstruktur [Cir15]

Neue Faserverbundtechnologien, zum Beispiel die automatisierte Fertigung, senken die Herstellungskosten und ermöglichen die wirtschaftliche Serienproduktion. Zudem bieten versteifte Leichtbaustrukturen ein großes Potential für den Leichtbaueinsatz, durch einen reduzierten Masseneinsatz mit gleichzeitig hohen, richtungsoptimierten Steifigkeitseigenschaften. Besonders bei Strukturen mit höherer Steifigkeit und geringerer Masse sinkt die Koinzidenzfrequenz, die Frequenz oberhalb der Schall von Flächen abgestrahlt wird. Für die Anwendung im menschlichen Umfeld ist bereits während des Auslegungsprozesses das vibroakustische Verhalten zu berücksichtigen, sodass der Komfort gewährleistet werden kann.

Bisherige Untersuchungen befassen sich mit der Auslegung, Fertigung und den mechanischen Eigenschaften von Gridstrukturen in unterschiedlicher Bauweise und Anwendung. So gibt es eine

freie Gitterstruktur ohne Zwischenflächen, auf einer Fläche applizierte Grids oder zwischen zwei Flächen integrierte Versteifungselemente (Sandwichstrukturen). Eine weitreichende Variation der Gridgeometrie, Anordnung und Anzahl wurde dabei in den Untersuchungen berücksichtigt.

Die Schalldämpfungseigenschaften einer regelmäßig versteiften Struktur müssen verstanden und Auswirkungen von Geometrieänderungen und Änderung von der Anzahl der Grids untersucht werden. In dieser Arbeit wird die Schalltransmission und Schalldämmung einer CFK-Platte mit applizierten Versteifungselementen aus Kohlefaserstegen numerisch untersucht und Einflussparameter diskutiert. Dabei wird ein parametrisches, Finite-Elemente Modell in der Simulationssoftware ANSYS erstellt und mit vorherig durchgeführten Messungen verglichen. Untersucht werden zwei Geometrien von Gridanordnungen; quadratische Zwischenflächen und Flächen mit einem Diagonalenverhältnis von etwa 1:2.

## 2 Stand der Forschung

Gridstrukturen aus Aluminium wurden bereits in den 70er Jahren von der Firma McDonnell-Douglas Corporation (heute Teil der Boeing Company) im Rahmen der Entwicklung von Raketenzwischenstufen der „Delta launch vehicals“ untersucht und patentiert [Sly77]. 1981 folgte die erste Gridstrukturen aus einem Faserverbundmaterial hergestellt, die für die Anwendung im Raketenbau bestimmt waren. Kurz darauf folgte die Produktion einer Sektion für einen kommerziell genutzten Flugzeugrumpf des Typs IL-114 (des russischen Flugzeugherstellers Iljuschin) [Vas01].

Eine Gridstruktur ist gekennzeichnet durch eine regelmäßig Anordnung von sich kreuzenden Stegen, die somit ein Gitter formen. Typisch ist das entstehende, regelmäßige Muster. In der Faserverbundanwendung bestehen die Stege aus unidirektionalen und kontinuierlichen Fasersträngen. Die Gridstruktur kann als einzelnes Bauteil genutzt werden, auf einer Fläche appliziert sein oder zwischen zwei Flächen integriert.

Konstruktionen von Gitterstrukturen aus Metallen kombiniert mit Glas finden im Design und Architekturwesen hohe Beliebtheit, so zum Beispiel die Dachkonstruktion des Düsseldorfer Ständehauses, gezeigt in Abbildung 2.1.

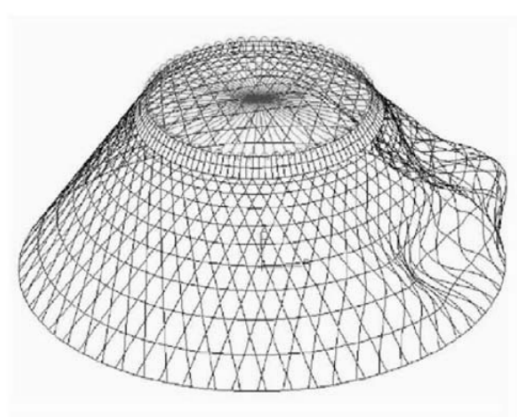
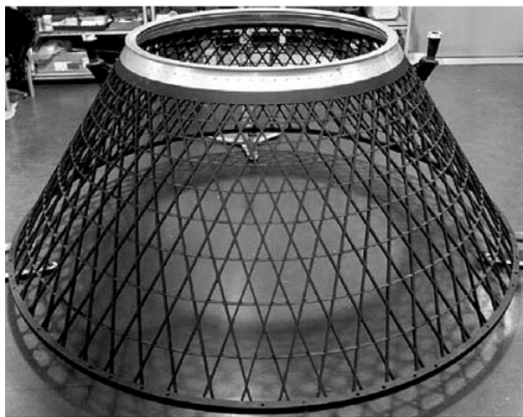


**Abb. 2.1:** Dachkuppel des Ständehauses in Düsseldorf; Konstruktion von Kiessler und Partner (Bild von [Hel15])

### Untersuchungen des Beulverhaltens von Gridstrukturen

Bei einer zylindrischen Gridstruktur, zum Beispiel von einer Raketenzwischenstufe untersucht von Vasiliev und Razin, gezeigt in Abbildung 2.2, tritt Versagen erst bei hohen axialen Druckkräften auf [Vas06]. Das Versagen einzelner Faserrippen trat dabei vor dem erwarteten Beulen der Struktur auf.

Die Rippenanordnung leitet die Drucklast in eine umlaufende Zugspannung in den ringförmigen Rippen um, die mit einer inneren Druckkraft gleichzusetzen ist. Dieser innere Druck führt zu



**Abb. 2.2:** Links: Raketenzwischenstufe aus Faserverbund; Rechts: Aus der FE-Berechnung bestimmtes Beulverhalten der Gridstruktur [Vas06]

einer Selbststabilisation der Struktur, mindert die Anfälligkeit von Formfehlern und steigert die kritische Last des Bauteils [Vas01]. Die Bestimmung der Beullast ist seither in zahlreichen Untersuchungen verschiedener Gridstrukturen, sowohl experimentell, als auch in Simulationen studiert worden.

Huybrechts und Tsai zeigen auf, welche Auswirkungen fehlende Rippen und materielle Fehler auf Torsions- und Druckbelastung haben [Huy96]. Die Berechnungen wurden mit der vorgestellten mathematischen Beschreibung in GridWorks durchgeführt. Zwei Berechnungsmethoden und eine Versuchsreihe werden von Wodesenbet et al. durch eine Parameterstudie verglichen, um die optimale Konfiguration für einen grid-versteiften Zylinder herauszuarbeiten [Wod03]. Neue Untersuchungen befassen sich mit dem Beulverhalten unter dynamischer Belastung ([Jal13], [Bis15]).

### Herstellung und Geometrievariation einer Gridstruktur

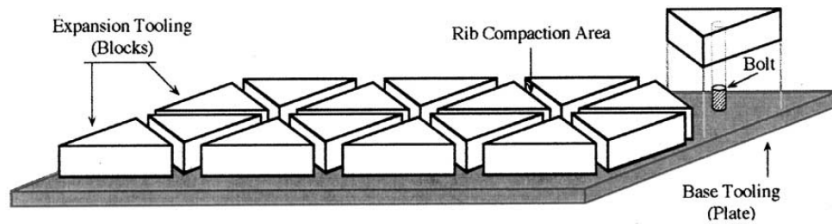
Durch Stege versteifte Strukturen, aus Faserverbundmaterialien hergestellt, sollen bisherige einfachere herzustellende doppelwandige und Isogridstrukturen aus Aluminium ersetzen [Huy01]. Die von Bernot 1974 vorgestellte Wickeltechnik für die Versteifung von Betonröhren wird bis heute für die Herstellung von Flugzeugrümpfen genutzt ([Ber74], [Vas12]). Herausforderungen liegen besonders in der Erstellung der Stege, da sie seitlich begrenzt werden und entstehende Spannungen beim Aushärtungsprozess berücksichtigt werden müssen.

Ein Herstellungsverfahren für Faserverbundplatten mit Stegen ist das „expansion tooling“, abgebildet in Darstellung 2.3. Eine Grundplatte aus einem stabilen, steifen Material und aufgesetzten Blöcken, aus zum Beispiel Silikonkautschuk mit einem hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und geringer Kompressibilität, bilden die Form für das Bauteil.

S.M. Huybrechts et al. beschreiben ein weiteres Verfahren mittels einer hybriden Form, die während des Aushärtungsprozesses des Faserverbundstoffes einen Druck auf die Stege aufbringen [Huy01]. Im Herstellungsprozess tatsächlich erreichte Stegabmessungen können mittels der präsentierten mathematischen Beschreibung der Materialdehnung, sowie die Berechnung von Steghöhe und -breite, prognostiziert werden.

Runde Bauteile mit Grids, z.B. Flugzeugrümpfe, können wie Platten mit einem Silikonkau-





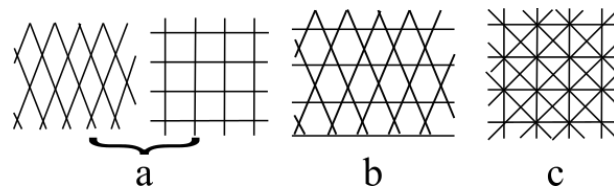
**Abb. 2.3:** Form aus einer stabilen Grundplatte mit aufgesetzten Blöcken für die Herstellung von Gridstrukturen [Huy01]

tschuk als Stützmaterial hergestellt werden. Eine weitere Methode wird von Vasiliev et al. beschrieben und ist das Legen von Fasern in Ausschnitte eines aufgespritzten Stützschaumes [Vas12]. Die auf Maß gebrachte Struktur wird anschließend mit der äußeren Haut belegt. Die Vielfalt an Formen ist bei dieser Herstellungsart begrenzt [Huy99]. Neue Möglichkeiten in Variation der Geometrie und Materialien bieten Verfahren wie der 3D-Druck, das Selective Laser Melting, etc. . Komplexe Strukturen, wie in Abbildung 2.4, können so hergestellt werden.



**Abb. 2.4:** Mittels Selective Laser Melting gefertigte Gitterstruktur [Ker14]

Verschiedene Anordnungen der Stege, eine Variation der Anzahl, Veränderung der Steghöhe und Stegbreit sind in technischen Anwendungen zu finden ([Vas01], [Hoh99]). Von Huybrechts und Tsai werden drei Gruppen von Gridstrukturen klassifiziert, dargestellt in Abbildung 2.5 [Huy96]. Dabei wird zwischen zwei, drei und vier Rippen in unterschiedliche Richtungen differenziert. Bei einem dünnwandigen Blech sind weitere Formen möglich, so zum Beispiel eine hexagonale Wabenstruktur, welche von Langhof untersucht wurde [Lan14].

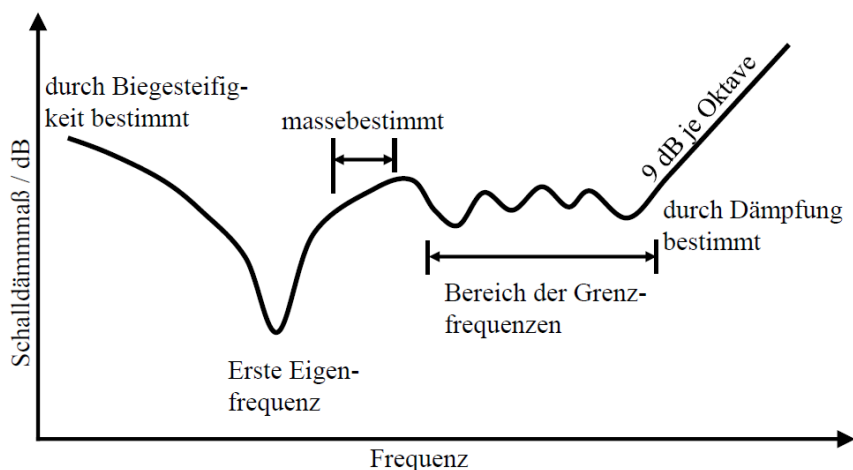


**Abb. 2.5:** Grid-Typen; a: „orthogrid“ und „anglegrid“ Struktur; b: „tri-directional“ Isogrid-Struktur; c: „quadri-directional“ orthorope Struktur (nach [Huy96])

### Schalldämmmaß

Die Beschreibung des Schalldämmmaßes von einfach- und doppelwandigen Bauteilen, sowohl von isotropen als auch orthotropen, ist bisher weitreichend erforscht. Neuere Untersuchungen analysieren die Auswirkungen von strukturierten Blechen mit einer wabenförmigen Prägung [Lan14].

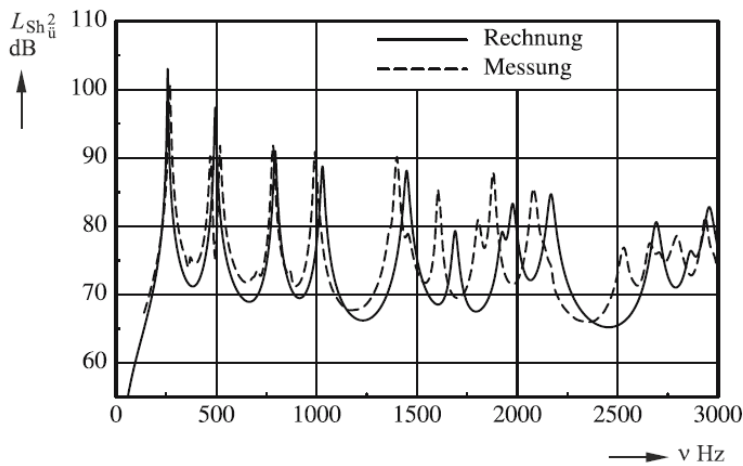
Für die Bestimmung des Schalldämmmaßes ist neben zahlreichen Methoden der praktischen Messungen, auch eine Analyse mittels der Randelemente-Methode (BEM) oder der in dieser Arbeit verwendeten Finite-Elemente-Methode (FEM) möglich. Für eine allgemeine, orthotrope Platte aus einem homogenen Material ist der generelle Verlauf des Schalldämmmaßes in Abbildung 2.6 dargestellt und wurde von Bies und Hansen beschrieben [Bie03]. Im unteren Frequenzbereich, auch über die ersten Eigenfrequenz der Wand oder Platte hinweg, ist das Schalldämmmaß von der flächenbezogenen Masse, somit von der Dichte und der Dicke des Bauteils, abhängig. Nach dem Massengesetz von Berger ergibt sich mit Verdopplung der flächenbezogenen Masse eine Luftschalldämmung von theoretisch 6 dB ([Mös12]). Die richtungsabhängige Biegesteifigkeit der orthotropen Platte wirkt sich auf die höheren Frequenzbereiche aus, wodurch sich verschiedene Grenzfrequenzen für die Schallabstrahlung ergeben.



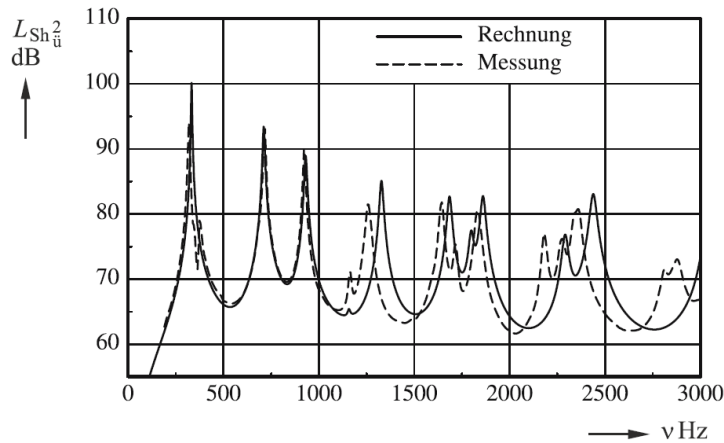
**Abb. 2.6:** Der qualitativer Verlauf des Schalldämmmaßes orthotroper Platten [Bie03]

Rippen wirken sich auf das Abstrahlverhalten von Flächen aus [Kol06]. Sie sind wirksam, wenn äußere Kräfte über diese Stege bzw. Gitterstruktur eingeleitet werden. Eine Platte aus Stahl (350x230x4mm) ohne Rippen und mit einem Rippenkreuz (12mm hohe und 4mm breite Rippe) ist das Körperschallmaß  $L_{Sh_u}^2$ , Beurteilung des Körperschallverhaltens für die Abstrahlung von Luftschall, untersucht worden.

Die Abbildungen 2.7 und 2.8 zeigen die Frequenzgänge des Körperschallmaßes der unversteiften und versteiften Stahlplatte. Die ersten drei Eigenfrequenzen der Struktur mit Rippen liegen höher und im betrachteten Frequenzbereich treten weniger Eigenfrequenzen auf. Ein genannter Grund ist die Anordnung der Rippen, wodurch Eigenformen schwer angeregt werden, bei denen in der Nähe oder auf der Rippen die Schwingungsbäuche liegen. Die zu beobachtende geringere Pegelgröße über die betrachtete Frequenz ist durch den Summenpegel des Körperschallmaßes



**Abb. 2.7:** Glatte Stahlplatte: Frequenzgang des Körperschallmaßes [Kol06, S.95]



**Abb. 2.8:** Stahlplatte mit einem diagonal angeordneten Rippenkreuz: Frequenzgang des Körperschallmaßes [Kol06, S.96]

verdeutlicht. Die versteifte Stahlplatte strahlt etwa 4 dB weniger Schall ab, als eine herkömmliche ebene Platte. Eine Änderung der Anordnung zu parallel verlaufenden Stegen weist für das Schallabstrahlverhalten der Stahlplatte keine maßgebenden Unterschiede auf. Kollmann et al. geben keine Empfehlung für die Anordnung der Rippen, vielmehr ist zu ermitteln, welche Eigenformen unter der vorliegenden Krafteinleitung zur Schwingung angeregt werden und welche Rippenanordnung zu einer Lärminderung führen.

Bisherige Untersuchungen beschränken sich auf statische und dynamische Berechnungen für die Auslegung von Gridstrukturen, sowie die akustische Beschreibung von Strukturen aus homogenen Materialien. In diese Arbeit soll daher näher das vibroakustische Verhalten von Platten aus Kohlefaserverbundstoff, die mit einem applizierten Gitter aus unidirektionalen Kohlefaserverstärkungen versteift sind, untersucht werden.



## 3 Wellenausbreitung in Kontinua und Schallabstrahlung von ebenen Flächen

Das folgende Kapitel bietet eine kurze Einführung in die technische Akustik. Dabei werden die Wellenausbreitung in einem Kontinuum (Abschn.3.1), anschließend die Entstehung und Ausbreitung von Schall (Abschn. 3.2), die Abstrahlung von Schall von Flächen (Abschn. 3.3) und zuletzt die Besonderheiten bei Geometrieabweichungen (Abschn. 3.4) behandelt.

### 3.1 Schwingungen in Festkörpern

Schwingungen in Festkörpern werden auch Körperschall genannt [Mös12]. Die Ausbreitung von Körperschall in einem kontinuierlichen System beruht auf der physikalischen Eigenschaft eines Festkörpers, Normalspannungen und Schubspannungen übertragen zu können. In einem Festkörper können sich verschiedene Wellenformen ausbreiten: Longitudinalwellen und Transversalwellen. Bei longitudinalen Wellen fallen Ausbreitungsrichtung und Schwingungsrichtung zusammen und werden auch Längs- oder Dehnwellen genannt. Bei transversalen Wellen sind Schwingungsrichtung und Ausbreitungsrichtung orthogonal zueinander, was auf Schub-, Torsion- und Biegewellen zutrifft. Da für die weitere Betrachtung der Eigenform und Entstehung von Schall lediglich die Biegewelle von Bedeutung ist, wird auf diese weiter eingegangen.

#### 3.1.1 Biegewellen

Für die Veranschaulichung einer Biegewelle, kann eine symbolische Darstellung, wie sie in Abbildung 3.1 gezeigt ist, herangezogen werden. Bei Betrachtung des Stabes, wird ersichtlich, dass die Ausbreitungsrichtung einer Biegewelle entlang der Stabachse und somit senkrecht zur Auslenkungsrichtung der einzelnen Teilchen ist. Die Auslenkungsgeschwindigkeit der Teilchen senkrecht zur Plattenebene nennt sich Schnelle  $v_n$ .



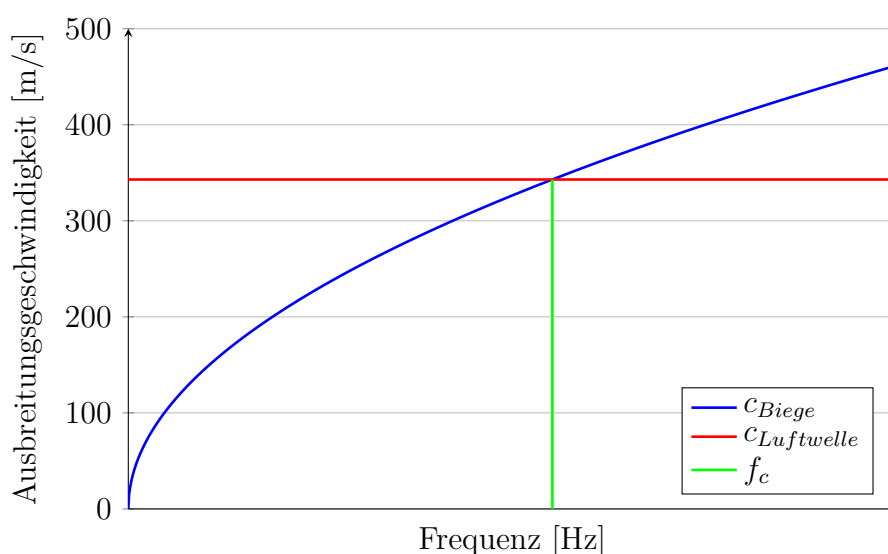
**Abb. 3.1:** Biegewelle eines Stabes [Mös12, S.124]

Diese Wellenform breitet sich in ausgedehnten Platten ringförmig entlang der Plattenebene aus. Biegewellen dominieren in den meisten Fällen die dynamische Antwort des Systems auf äußere Anregungen. Sie sind daher maßgebend an der Abstrahlung von Schall durch Flächen

beteiligt. Ein hervorzuhebendes Merkmal einer Biegewelle ist die frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit, die sich aus Beziehung 3.1 mit dem Elastizitätsmodul  $E$ , dem Flächenträgheitsmoment  $I = \frac{h^3 b}{12}$ , der Querschnittsfläche  $A$  und der Materialdichte  $\rho$  ergibt [Sin14].

$$c_B = \sqrt[4]{\frac{EI}{\rho A}} \sqrt{\omega} \quad (3.1)$$

Die frequenzabhängige Biegewellengeschwindigkeit ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Luftwelle und auf die Koinzidenzfrequenzen  $f_c$  wird in Abschnitt 3.2 näher eingegangen. Diese sogenannte Frequenzdispersion, frequenzabhängige Fortpflanzungsgeschwindigkeit, führt zu charakteristischen Merkmalen einer Struktur, die im folgenden Abschnitt behandelt werden [Mös12].



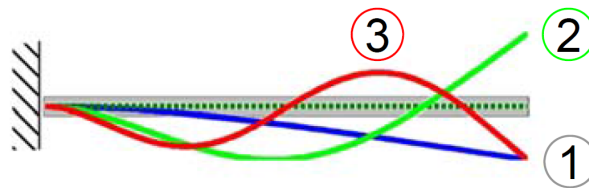
**Abb. 3.2:** Frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle und konstanter Schallwelle

#### 3.1.2 Eigenformen des dynamischen Systems

Eine Biegewelle breitet sich in dem Kontinuum mit einer Abmessung viel kleiner als die beiden anderen Abmessungen (Höhe  $\ll$  Breite, Höhe  $\ll$  Länge) entlang der Ebene senkrecht zur Höhe aus. Dabei ist die Fortpflanzung der Welle in Ebenenrichtung und die Schwingungsrichtung der einzelnen Teilchen ist orthogonal dazu. Bei einem endlichen System wird die Ausbreitung der Welle am Rand des Systems aufgrund des Impedanzsprunges (z.B. Einspannung oder freier Rand) verhindert. Die Art der Einspannung beeinflusst die Phase der Schwingung und somit das Interferenzverhalten der entgegenlaufenden Wellen. Die sich überlagernden Wellen bilden konstitutive bzw. destruktive Bereiche aus. Es gilt das Superpositionsprinzip für die gegenseitige Beeinflussung der Wellen, sodass Wellenamplituden sich verdoppeln bzw. auslöschen. Von den Eigenschaften der Struktur beeinflusst, bilden sich durch die frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle charakteristische Schwingungsbilder aus. Diese Überlagerung

der stehenden Wellen zu typischen Schwingungsformen der Struktur werden als Eigenformen oder auch Moden bezeichnet. Diese Moden sind weiter durch die Geometrie, das Material und die Frequenz der sich ausbreitenden Biegewelle gekennzeichnet.

Bei der Ausbildung von Eigenformen schwingen zwei benachbarte Abschnitte bzw. Flächen in entgegengesetzter Richtung. Die Phasenbeziehung von  $180^\circ$  kennzeichnet, dass es sich dabei um eine stehende Welle handelt und sich das Schwingungsbild zeitlich nicht ändert. Für einen an einer Seite fest eingespannten Balken ergeben sich die erste bis dritte Eigenform, wie sie in Abbildung 3.3 dargestellt ist.



**Abb. 3.3:** 1. bis 3. Eigenform eines einseitig, fest eingespannten Balkens [Sin15]

## 3.2 Entstehung und Abstrahlung von Schall

Die Ausbreitung von Schwingungen in einem gasförmigen oder flüssigen Medium obliegen den physikalischen Eigenschaften eines solchen Mediums. So unterscheidet sich die Art und Weise der Übertragung der Schwingungen, insbesondere im Rückblick auf die Ausbreitung im festen Körper. Die bereits in Kapitel 3.1 genannten longitudinalen Dehnwellen sind in dem hier betrachteten gasförmigen Medium Luft von alleiniger Bedeutung für das Übertragungsverhalten von Schwingungen. Luft leitet ausschließlich bei Kompression bzw. Dilatation, einem lokalen Druckunterschied, kinetische Energie an die umliegenden Luftteilchen weiter. Es werden keine Scherspannungen übertragen. Aus den lokalen Druckunterschieden folgt, dass die Welle sich kugelförmig im Raum ausbreitet. Ein schwingendes Luftteilchen überträgt seine Bewegungsenergie an alle ihm umgebene Teilchen weiter, so ist ersichtlich, dass die Amplitude der Schwingung mit zunehmender Distanz zur Schallquelle abnimmt; es gilt  $p_{Schall} \sim 1/r^2$ . Ausbreitungsrichtung und Schwingungsrichtung der Teilchen fallen bei einer Druckwelle zusammen. In der Skizze 3.4 ist die Art der Schwingung schematisch für eine eindimensionale Ausbreitungsrichtung dargestellt. Die einzelnen Luftteilchen schwingen um ihre eigene Ruhelage, bewegen sich nicht vorwärts, und bauen so eine lokale Druckänderung auf. Die Druckschwankungen ab  $20 \mu Pa$  nimmt das menschliche Gehör im Bereich von etwa  $16 Hz$  bis  $20 kHz$  als Schall wahr.



**Abb. 3.4:** Longitudinalwelle einer Luftsäule [Mös12, S.124]

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle, auch Dilatationswelle genannt, wird mit der Gleichung 3.2 berechnet [Sin14]. Für den Schall ist die Geschwindigkeit bei Raumtemperatur etwa 343 m/s.

$$c_{Gas} = \sqrt{\kappa_{Gas} R_{m_{Gas}} T} \quad (3.2)$$

Sie zeigt die alleinige Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der absoluten Temperatur  $T$  in Gasen mit konstanter Gaskonstante  $R_{m_{Gas}} = 8,314 \text{ Nm/K}$  und konstantem Isentropenexponent  $\kappa_{Gas} = 1,4$ , welche als gleichbleibend in der Umgebungsluft angenommen werden können. Für die Schallübertragung in einem gasförmigen Medium folgt daraus, dass jede Dilatationswelle frequenzunabhängig gleich schnell übertragen wird, im Gegensatz zu der frequenzabhängigen BiegeWellenausbreitung. Der Verlauf beider Wellengeschwindigkeiten über die Frequenz ist in Abbildung 3.2 gezeigt.

Die Wellenlänge  $\lambda$  jeder Wellenart definiert sich über die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  und der Frequenz  $f$  der Schwingung mittels der Gleichung 3.3. Die Wellenlänge  $\lambda$  gibt den Abstand zwischen zwei gleichphasig schwingenden Punkten an.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.3)$$

### 3.3 Berechnung akustischer Größen nach der Elementarstrahler-Theorie

Von einer schwingenden Platte kann die umgebene Luft zur Schwingung angeregt werden. Für die Entstehung von Dilatationswellen durch die schwingende Fläche wird angenommen, dass die Luftteilchen an der Grenze zur Struktur normal zur Plattenebene beschleunigt werden. Die Schnelle der Luft und die normale Schnellekomponente der Platte sind identisch. Diese Annahme ist die Fluid-Struktur-Kopplung und ermöglicht die vibroakustische Beschreibung der Schallentstehung mit den beschriebenen Gleichungen. Die Druckänderung der Luftteilchen entsteht orthogonal zu der schwingenden Platte und bildet sich danach kugelförmig im Raum aus. Für die spätere Betrachtung der Schalltransmission ist weiterhin wichtig, den Begriff der Koinzidenzfrequenz zu erläutern. Die BiegeWelle der Platte  $\lambda_B$  ist frequenzabhängig, die Longitudinalwelle der Luft  $\lambda_{Luft}$  ist dagegen konstant über den Frequenzbereich, dargestellt in der Abbildung 3.2. Die BiegeWelle induziert senkrecht zur Plattenoberfläche Druckunterschiede in der angrenzenden Luft, die zunächst synchron mitläuft. Diese Druckschwankungen werden ab der kritischen Wellenlänge der BiegeWelle in den Raum abgestrahlt. Somit ergibt sich aus der Gleichheit der beiden Wellenlängen  $\lambda_B$  und  $\lambda_{Luft}$  und den Gleichungen 3.1 und 3.3 eine Koinzidenzfrequenz  $f_c$ , die sich mittels der Gleichung 3.4 berechnet. Schall wird von der Platte oberhalb der Koinzidenzfrequenz abgestrahlt, wodurch eine Verschlechterung in der Schalldämmung festzustellen ist.

$$f_c = \frac{1}{2\pi} c_0^2 \sqrt{\frac{\rho A}{EI}} \quad (3.4)$$

Die Abbildung 3.5 zeigt die Anregung von Dilatationswellen durch die BiegeWelle einer Struktur bei gleicher Wellenlänge. Die Fortpflanzung der Luftwelle erfolgt zunächst parallel zu der



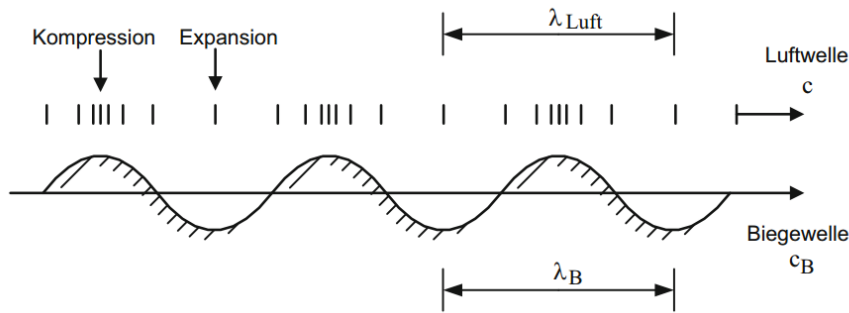


Abb. 3.5: Abstrahlung von Luftwellen durch BiegeWellen einer Platte [Sin14]

BiegeWellenausbreitungsrichtung, wird mit ansteigender Frequenz zunehmend senkrecht abgestrahlt. Ein Maß für den abgestrahlten Schall von einer schwingenden Platte kann über die Schalleistung  $P_K$  eines Kolbenstrahlers beschrieben werden. Der Kolbenstrahler ist eine starre, oszillierende Fläche, an der kein Druckausgleich zwischen Ober- und Unterseite stattfindet, somit ist sie akustisch kurzgeschlossen. Über die Schnelle  $\tilde{v}_n$ , die Dichte  $\rho$  der umgebenen Luft, die Schallausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0$  und die Fläche  $A$  wird die Schalleistung mittels der Gleichung 3.5 berechnet. Die so berechnete Schalleistung wird später für den Abstrahlgrad als Bezugswert verwendet.

$$P_K = \tilde{v}_n^2 \rho c A \quad (3.5)$$

Die Schalleistung  $P$ , die von einer Platte in das Fernfeld abgestrahlt wird, vgl. Abb. 3.6, kann aus dem Schnellenvektor  $v_n$ , dem Schalldruck  $p$  und der Fläche  $A$  aus Gleichung 3.6 berechnet werden, mit H als Kennzeichnung der konjugiert komplexen Transponierten.

$$P = \frac{A}{2} \operatorname{Re}(v_n^H p) \quad (3.6)$$

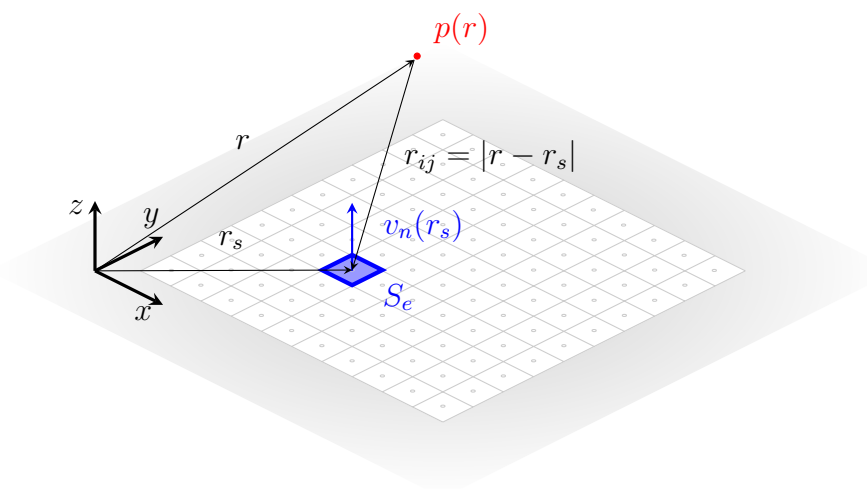


Abb. 3.6: Geometrische Interpretation des Ansatzes für einen Elementarstrahler [Unr15]

Die diskrete Form des Rayleigh-Integrals [Fah91] ist der spezielle Formalismus der Kirchhoff-Helmholtz Gleichung für planare Quellen mit freien Randbedingungen nach Sommerfeld. Der emittierte Schalldruck kann durch die Schnelle und die frequenzabhängige Strahlungsimpedanz-Matrix  $Z$  ausgedrückt werden. Die Nebendiagonale dieser Matrix ergibt sich aus Gleichung 3.8 mit der Distanz  $r_{ij}$  zwischen dem Element  $i$  und dem Element  $j$ , sowie der Wellenzahl  $k$ , bestimmt mit Gleichung 3.7.

$$k = \omega/c_0 \quad (3.7)$$

Die Hauptdiagonale der Strahlungsimpedanz-Matrix ergibt sich aus Gleichung 3.9, entsprechend zu den Impedanzen eines Kolbenstrahlers und ersetzen die aus Gleichung 3.8 entstehenden, singulären Werte.

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\rho_0 A e^{-jkr_{ij}}}{2\pi r_{ij}} \quad (3.8)$$

$$Z_{ii} = \rho_0 c_0 (1 - e^{-kj\sqrt{A/\pi}}) \quad (3.9)$$

Somit kann die Schalleistung umformuliert werden und es ergibt sich die Gleichung 3.10.

$$P = \frac{A}{2} \operatorname{Re}(v_n^H Z v_n) = v_n^H R v_n \quad (3.10)$$

Die Strahlungswiderstands-Matrix  $R$  bildet den ins Fernfeld abstrahlenden Teil der Strahlungsimpedanz-Matrix  $Z$  und hat die Form aus Gleichung 3.11.

$$R = \frac{\omega^2 \rho_0 A^2}{4\pi c_0} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin(kr_{12})}{kr_{12}} & \dots & \frac{\sin(kr_{1N})}{kr_{1N}} \\ \frac{\sin(kr_{21})}{kr_{21}} & 1 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{\sin(kr_{N1})}{kr_{N1}} & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

Die maximal abgestrahlte Schalleistung wird dadurch dezimiert, dass eine größere Fläche biegeelastisch ist, somit verschiedene Bereiche nicht phasengleich schwingen. Der entstehende Druckausgleich auf der Plattenoberfläche minimiert die Schalleistung. Eine Beziehung zwischen ideal abgestrahlter Schalleistung des idealen Kolbenstrahlers und der tatsächlich abgestrahlten Schalleistung einer realen Struktur stellt der Abstrahlgrad  $\sigma$  mit der Gleichung 3.12 her [Fah91].

$$\sigma = \frac{P}{P_K} = \frac{P}{\overline{\tilde{v}_n^2} \rho_0 c_0 A} \quad (3.12)$$

Dabei ist  $\overline{\tilde{v}_n^2}$  das mittlere „Quadrat des Effektivwertes der Schnelle auf der abstrahlenden Fläche  $A$ “ [Sin14, S.127].

Eine Struktur emittiert Schall, kann jedoch ebenso durch Schall angeregt werden. Treffen Schallwellen auf ein Bauteil, zum Beispiel eine Fensterscheibe, wird dieses zur Schwingung angeregt. Die schwingende Scheibe strahlt zu beiden Seiten Schall ab, eine transmittierte Schallwelle und auf der Anregungsseite die reflektierte Schallwelle. Die von einem Bauteil abgestrahlte Schalleistung ist demnach geringer und wird mittels dem Transmissionsgrad  $\tau$  beschrieben. Er stellt

die einfallende Schalleistung  $P_e$  und transmittierte Schalleistung  $P_t$  ins Verhältnis nach 3.13 und beschreibt somit die Schallenergie durchlässigkeit eines Bauteils.

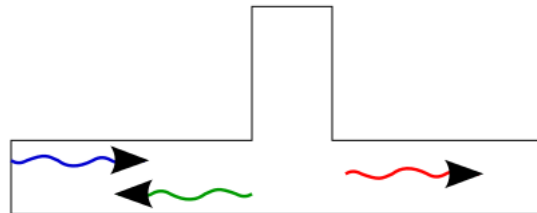
$$\tau = \frac{P_t}{P_e} \quad (3.13)$$

Das Schalldämmmaß  $TL$ , auch als Transmission Loss bezeichnet, ist der Kehrwert des Transmissionsgrads. Sie wird als Pegelgröße nach Gleichung 3.14 angegeben [Mös12].

$$TL = 10 * \log_{10} \frac{1}{\tau} \quad (3.14)$$

### 3.4 Einflüsse der Bauteilgeometrie auf die Wellenausbreitung

Bei Betrachtung einer endlichen Platte mit applizierten Versteifungselementen kann sich eine Biegewelle nicht ungehindert ausbreiten. Reflexionen treten immer dort auf, wo Steifigkeitsänderungen vorliegen, zum Beispiel durch Geometrieänderung, Materialwechsel etc. Dies gilt für Biegewellen gleichermaßen wie für Longitudinalwellen. Bei einem Impedanzsprung durch abrupte Änderung der Bauteileigenschaften wird die fortlaufende Welle beeinflusst. Je nach Beschaffenheit dieses Impedanzsprunges wird die Welle teilweise reflektiert und transmittiert. In Zeichnung 3.7 ist ein einfallendes Wellenpaket in blau dargestellt, nach Passieren der Geometrieänderung des Bauteils teilt sich das Wellenpaket in eine fortlaufende, transmittierte, rote Welle und eine reflektierte, grüne Welle auf. Die Anteile der reflektierten bzw. transmittierten Welle werden durch die Beschaffenheit, Geometrie, Material, Anbindung, etc. beeinflusst.



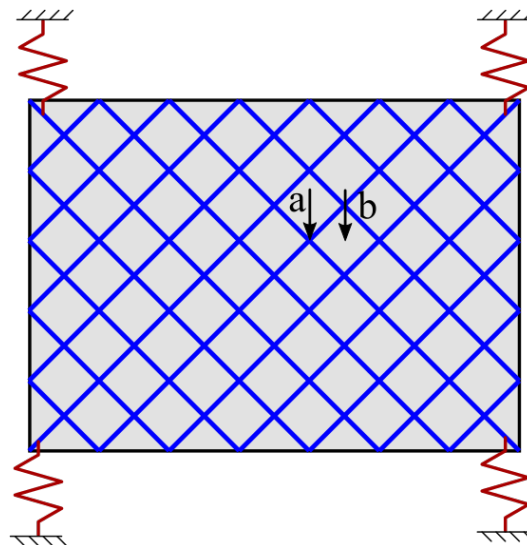
**Abb. 3.7:** Reflexion und Transmission an Impedanzgrenzen. Die einfallende blaue Welle, transmittierte rote Welle und reflektierte grüne Welle

Ist eine Teilfläche einer Struktur, zum Beispiel durch Vergrößerung des Querschnitts, wie oben dargestellt, begrenzt, so wirkt sich dies auf die Ausbreitungsrichtung und Phase der Biegewelle aus. Es kommt zu veränderter Überlagerung der Wellen und Ausbildung von Eigenformen der Struktur innerhalb des begrenzten Flächenabschnitts [Kol06]. So kann bei höheren Frequenzen die Steifigkeitsänderung an einem Impedanzsprung ausreichen, dass die Biegewellen innerhalb eines solchen Bereichs lokale Eigenformen ausbilden. Ab welcher Frequenz dies geschieht, ist durch die Wellenlänge bestimmt, die innerhalb einer Fläche eine stehende Welle ausbilden kann. In dem applizierten Steg können sich Longitudinalwellen ausbilden, dies sei hier erwähnt, jedoch nicht weiter vertieft, da es für das vibroakustische Verhalten nicht von Relevanz ist [Koh12]. In

Bezug auf die in dieser Arbeit betrachteten Anisogridpanelen, Platten mit applizierten, versteifenden Stegen, ist die Reflexion an inneren Impedanzsprüngen von besonderer Wichtigkeit. Die versteifenden Stege reflektieren die fortlaufenden BiegeWellen, in den Flächen zwischen den Stegen bilden sich somit eigene Moden aus. Eine versteifte Platte kann demnach als eine Vielzahl von kleineren, unversteiften Platten betrachtet werden. Jede Flächen wirkt als Schallquelle, wodurch die Schallabstrahlung beeinflusst wird.

## 4 Modellaufbau

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie die parametrische Erstellung der Gridstruktur, dargestellt in Abbildung 4.1, mit Hilfe von MATLAB realisiert wird (Abschn. 4.1) und wie das Finite Elemente Modell in ANSYS aufgebaut ist (Abschn. 4.2). Dabei wird auf die Parametrisierbarkeit und Grenzen des Modells eingegangen. Die Wahl der Elemente für die Simulation erläutert, damit das vibroakustische Verhalten einer Anisogridstruktur simuliert werden kann.



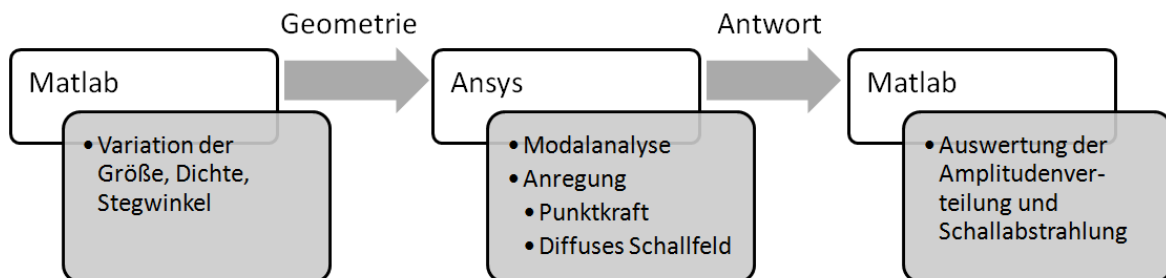
**Abb. 4.1:** Die zu modellierende Gridstruktur mit der Aufhängung an den Ecken; Position der Kraftanregung a: auf dem Steg, b: auf dem Hautfeld

Eine Anisogridplatte mit den Abmaßen aus Tabelle 4.1 wurde zuvor in einem Versuch mittels einer harmonischen Anregung auf ihr Schwingungsverhalten hin untersucht. Die vermessene Struktur soll als Modell erzeugt werden und dient als Referenz für die Validierung des Modells.

Ziel des parametrischen Modellaufbaus ist es, dass das akustische Verhalten bei verschiedenen Anordnungen der Stege untersucht werden kann. Mittels MATLAB wird die Geometrie berechnet, um diese in ANSYS zu laden, wo die eigentliche Simulation durchgeführt wird. Das Auswerten der Ergebnisse wird wiederum in MATLAB durchgeführt. Der Ablauf und übergebene Größen, sowie mögliche Einstellungen sind in dem Ablaufplan 4.2 aufgeführt.

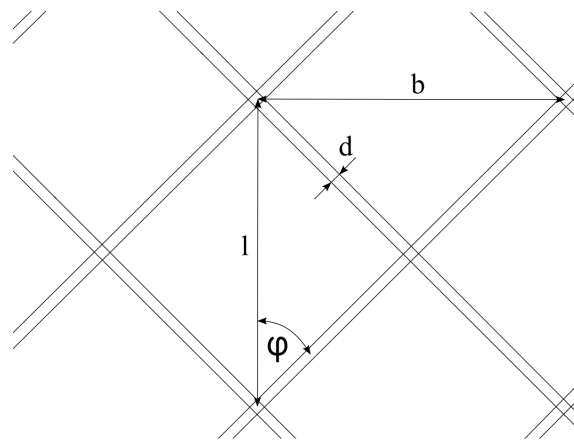
**Tabelle 4.1:** Abmaße der zu untersuchenden Platte

Breite	$B = 1,44 \text{ m}$
Länge	$L = 1,03 \text{ m}$
Masse	$m = 4358 \text{ g}$
Öffnungswinkel	$\varphi = 45^\circ$
Zellenbreite	$b = 206,25 \text{ mm}$
Zellenlänge	$l = 206,25 \text{ mm}$
Stegbreite	$d = 6,35 \text{ mm}$
Plattendicke	$t = 1,0336 \text{ mm}$
Steghöhe	$h = 10 \text{ mm}$

**Abb. 4.2:** Ablauf von der Modellerstellung über das Simulieren in ANSYS bis zur Auswertung

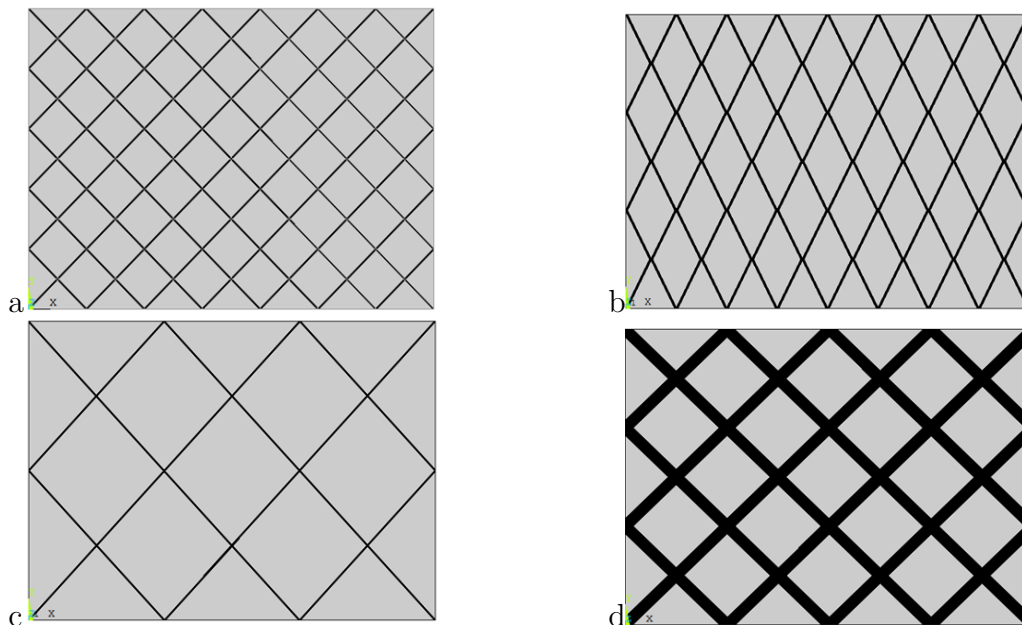
## 4.1 Erstellung des parametrischen Modells mit MATLAB

Die Erstellung der Geometrie der Gridstruktur erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden mithilfe von drei Parametern, der Breite  $b$  und der Länge  $l$  jeder entstehenden Einheitszelle und der Stegbreite  $d$ , die Koordinaten der Eckpunkte in MATLAB berechnet. Die Eckpunkte begrenzen die einzelnen Flächensegmente. Die Koordinaten werden nummeriert, damit eine spätere Zuordnung für die Modellerstellung in ANSYS erfolgen kann. Die generierten Punkte werden im zweiten Schritt einzelnen Flächen zugeordnet. Dies erfolgt mittels einer Abstandsüberprüfung der generierten und tatsächlichen Länge zwischen zwei Punkten. Jeder Punkt wird vier Flächen zugeordnet, Randpunkte lediglich zu zwei bzw. drei Flächen. Durch die Überprüfung können die zugeordneten Nummern der Punkte, welche einer Fläche zugehörig sind, in einer Zeile einer Matrix abgelegt werden. Diese Matrix wird zur Erstellung des Modells mit ANSYS ausgelesen. In der Skizze 4.3 sind die drei bestimmenden Parameter aufgezeigt, zusätzlich ist die Stegorientierung, Winkel  $\varphi$ , von Bedeutung für die Ausrichtung des anisotropen Materials. Sie ergibt sich jedoch aus dem Verhältnis der Zellenbreite zu Zellenhöhe und kann nicht direkt eingestellt werden.



**Abb. 4.3:** Parameter zur Erstellung der Gridstruktur in MATLAB

Das Modell bietet die Erstellung verschiedener Gridstrukturen, beispielhaft sind in Abbildung 4.4 vier Beispiele aufgezeigt. So kann die Größe und Form der Zelle verändert werden und die Breite des versteifenden Stegs zwischen verschiedenen Modellen variieren.



**Abb. 4.4:** Variationsmöglichkeiten der Gridstruktur; a: vermessene Struktur; b: anderer Öffnungswinkel  $\varphi$ ; c: größere Zellen; d: breitere Stege

Die erste Struktur, Abbildung 4.4 a, hat die Anordnung der vermessenen Anisogridplatte und wird im weiteren Verlauf als Modell 1 referenziert. Eine weitere, simulierte Geometrie ist die in Abbildung 4.4 b gezeigte Struktur und wird als Modell 2 bezeichnet. Die Einflussparameter auf das akustische Verhalten der unterschiedlichen Gridgeometrien können somit näher bestimmt werden.

Grenzen des parametrischen Modells liegen darin, dass keine weiteren versteifenden Stege hin-

zugefügt werden können. Es sind lediglich viereckige, innere Zellen möglich. Des Weiteren ist der Rand der Platte immer eine halbierte Zelle und an den Eckknoten läuft ein Steg aus.

## 4.2 Modellierung in ANSYS

In den folgenden Abschnitten wird auf den Vorgang zur Erstellung des parametrischen Modells mit Hilfe von ANSYS eingegangen. Dazu zählen die Definition des Materials, die Geometrierstellung innerhalb der Simulationsumgebung (Abschn. 4.2.1), sowie der Aufbau des Modells im Hinblick auf die Elementwahl (Abschn. 4.2.2) und Einspannungscharakteristik (Abschn. 4.2.3).

### 4.2.1 Erstellung des Modells

Die Materialkennwerte, in Tabelle 4.2 zusammengefasst, sind für eine Lage des verwendeten Prepregs, welches für die Herstellung der Anisogridplatte genutzt wurde. Die Orientierung und die Stapelfolge der Lagen beeinflussen die resultierenden Kenndaten des Faserverbundes und werden daher in ANSYS implementiert.

**Tabelle 4.2:** Materialkenndaten des Prepreg-Gelege einer einzelnen Lagen

Elastizitätsmodul	$E_{11}$	= 158500 MPa
	$E_{22}$	= 8500 MPa
Schubmodul	$G_{12}$	= 5110 MPa
	$G_{13}$	= 5110 MPa
	$G_{23}$	= 3036 MPa
Querkontraktion	$\nu_{12}$	= 0,33
Dichte	$\rho$	= 1620 kg/m <sup>3</sup>
Lagendicke	$p$	= 0,1292 mm

Die in MATLAB berechneten Koordinaten der geometrie-bestimmenden Eckpunkte für die Platte, inklusive Referenznummern, werden in ANSYS mittels der erstellten Matrix eingelesen. Über die Referenznummer jeden Knotens kann anschließend eine Fläche aus drei bzw. vier Eckpunkten erstellt werden. Die Zuordnung der Referenznummern zu einzelnen Flächen erfolgte zuvor in MATLAB, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben. Flächen mit unterschiedlicher Stapelfolge der CFK-Lagen müssen für die Materialzuordnung unterschieden werden. Der Ablauf der Modellerstellung ist in Abbildung 4.5 zusammengefasst.

Die Flächen werden in Elemente unterteilt, zu denen abschließend das Material zugeordnet wird. Da es sich bei der zu simulierenden Gridstruktur um einen Faserverbundwerkstoff handelt, wird der Lagenaufbau, Orientierung und Anzahl, vorgegeben. Aus den Materialkenndaten einer einzelnen Lage wird mittels der in ANSYS implementierten Theorie zur Berechnung von Faserverbunden (allg. beschrieben in [Sch07]) die resultierenden Elastizitätsmoduln, Schubmoduln und Querkontraktionszahlen der zu simulierenden Platte berechnet. Dabei ist die Lagenorientierung maßgebend. Bei dieser Platte wurde ein symmetrischer Lagenaufbau mit der Stapelfolge



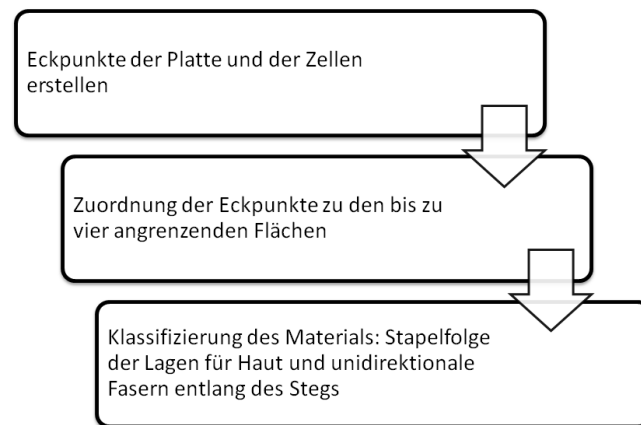


Abb. 4.5: Ablauf der Erstellung des Modells in ANSYS

(45/0/-45/90)<sub>s</sub> realisiert. Die Stege sind aus unidirektionalen Fasern. Der Winkel der Ausrichtung ist in das globale Koordinatensystem je nach Orientierung des Stegs zu überführen. Die Bereiche auf denen Stege aufgebracht sind, bekommen in dem Lagenaufbau zunächst die Stapelfolge der Platte und zusätzlich 78 Lagen mit der Orientierung des Stegs. Nominell sollte eine maximale Dicke der Stege mit darunter liegender Platte von 10 mm erreicht werden, in der Fertigung kam es hier zu Abweichungen von  $\pm 0,5$  mm. In der Simulation wurden insgesamt 78 Lagen in den Bereichen der Stege verwendet, sodass sich eine gesamte Dicke von 10,078 mm des Modells ergibt (vgl. Abschnitt 5.2.1). Die Skizze 4.6 zeigt eine Gridstruktur mit den zugehörigen Abmaßen der Stege und der Platte, die sich durch den Lagenaufbau und die Anzahl für das Modell.

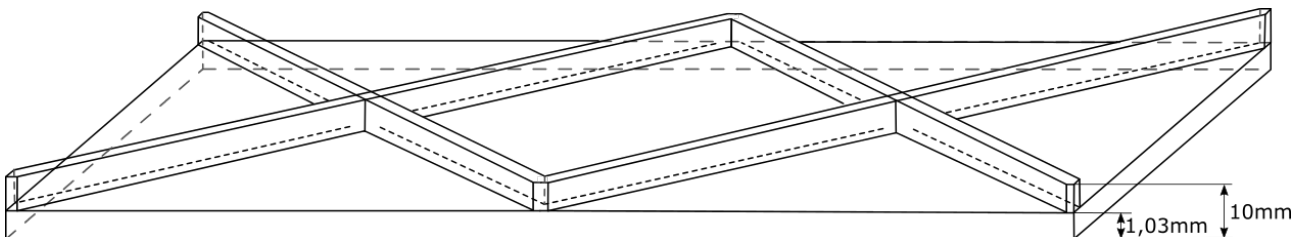


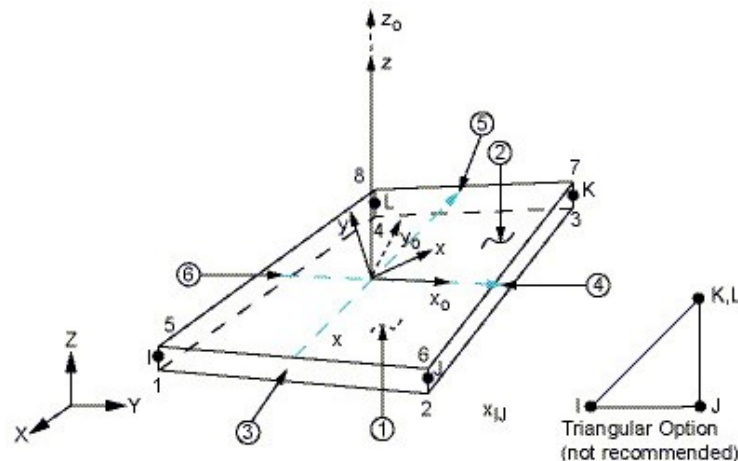
Abb. 4.6: Schematischer Aufbau der diagonal verlaufenden Stege auf einer Platte

## 4.2.2 Wahl der Elemente

Bei der FE-Simulation kann ein Bauteil auf drei verschiedene Arten von Elementtypen erzeugt werden: Stabelemente, Flächenelemente oder Volumenelemente. Dabei besteht zusätzlich Variationsmöglichkeit zwischen verschiedenen Ansatzfunktionen zur Berechnung der Verschiebung der diskretisierten Punkte. Die Elementwahl beeinflusst die Modellgröße, Anzahl der Knoten und somit die Genauigkeit der Lösung, wobei das Modell bei akzeptabler Komplexität und Rechenzeit die physikalischen Effekte abbilden soll.

Für die Simulation der dünnwandigen, ebenen Platte mit den versteifenden Stegen wurden

Flächenelemente verwendet. Bei der Betrachtung der CFK-Gridstruktur sind Deformationen senkrecht zur Plattenebene von Bedeutung, da die Fluid-Struktur-Kopplung ausschließlich senkrecht zur Plattenebene für die Schallabstrahlung berücksichtigt wird. Die Auslenkung in Normalenrichtung wird von Flächenelementen ausreichend gut abgebildet. Weiterhin ist für den verwendeten Elementtyp wichtig, dass ein Lagenaufbau implementiert werden kann.



**Abb. 4.7:** Positionen der Berechnungsknoten für die linearen Ansatzfunktionen des Flächenelements Shell181 [Ans15]

Die *SHELL181*, dargestellt in Abbildung 4.7, wird von ANSYS als einfaches, vier-Knoten Element mit sechs Freiheitsgraden (Translation und Rotation) für die Simulation eines Faserverbundes bereitgestellt. Für die Simulation der Gridstruktur bietet die *SHELL181* ausreichende Knotenparameter, bei gleichzeitiger Linearisierung der Randfaserverformung innerhalb eines Berechnungsschrittes. Es ist zu beachten, dass dreieckige Elemente im Modell für diesen Elementtyp zu vermeiden sind, da diese durch die Art der Ansatzfunktion versteifend wirken.

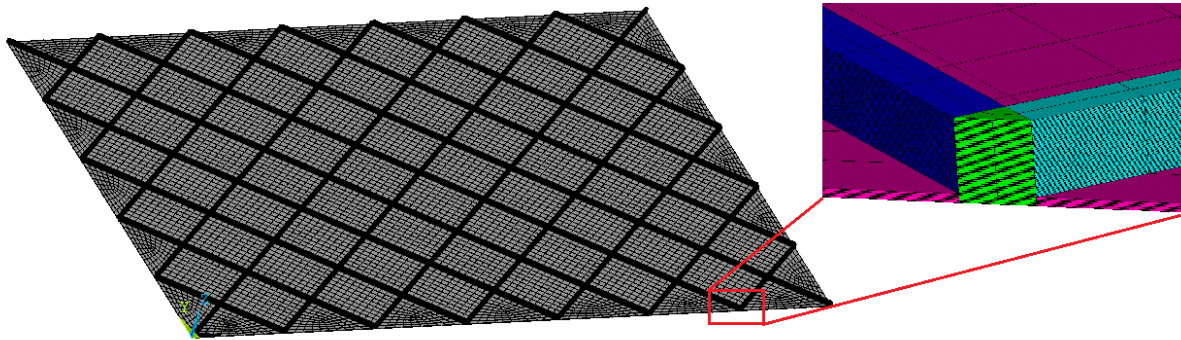
Zunächst wird das verwendete Element definiert und die noch fehlende Ausdehnung, die Dicke, klassifiziert. Eine Verbindung zwischen der Art des Elements und des verwendeten Elementtyps wird anschließend hergestellt. Ein Offset, der Aufbau der nachfolgend definierten Lagen in eine Vorzugsrichtung senkrecht zur modellierten Fläche, setzt die Stapelfolge der Lagen fest. Besonders bei Modellen mit unterschiedlichen Dicken in verschiedenen Bereichen ist auf die Stapelfolge zu achten. Die Bestimmung des Offset gibt an, wo die simulierte Shell-Ebene in Bezug auf die Materialdicke liegt. Die Erstellung, sowie Bestimmung der Eigenschaften ist hier kurz aufgelistet und enthält die finalen Parameter der Modells:

```

ET, 1, shell181
R, 1, 1,0336 * 10-3 ! Gesamthöhe [m]
SECT, 1, shell
SECOFFSET, bot
SECDATA, 1,292 * 10-4, 1, 45, 3 ! Beispiel für eine 45° Lage

```

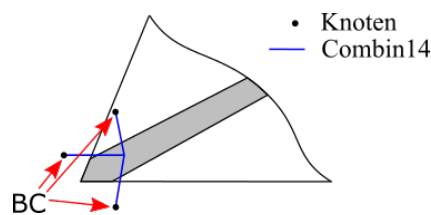
Das erstellte Modell mit der Vernetzung ist in der Abbildung 4.8 gezeigt. Anordnung der Grids, Abmessungen der Platte, Materialdicke und Lagenaufbau entsprechen der Anisogridstruktur, die in einem Versuch vermessen wurde. Die unterschiedlich zugeordneten Lagenaufbauten in den Stegen und Kreuzungsbereichen sind farblich voneinander getrennt dargestellt.



**Abb. 4.8:** Anisogridstruktur als Modell in ANSYS mit Vergrößerung auf einen Kreuzungsbereich zweier Stege

### 4.2.3 Modellierung der Einspannung

Die Positionierung der Struktur im Raum während der Versuchsdurchführung wurde mit Hilfe von Gummiseilen an jeder Ecke realisiert, wobei Metallhaken in Bohrungen an den Plattenecken greifen. Für die Modellierung einer solchen Aufhängung wurde ein Feder-Dämpfer Element *COMBIN14* verwendet. Die Elemente sind standardmäßig masselos und können zu reinen Feder- oder Dämpferelemente in eine oder mehrere Raumrichtungen mittels der anzugebenden Parameter klassifiziert werden. Biegung und axiale Kräfte werden nicht berücksichtigt.



**Abb. 4.9:** Randbedingungen (BC) werden an den äußeren, im Raum liegenden Knoten der Combin14 Elemente definiert

In der Skizze 4.9 ist verdeutlicht, dass in der Plattenebene zwei und senkrecht dazu ein solches Element für die Anbindung der Randbedingungen modelliert ist und somit alle Raumrichtungen bzgl. ihrer Eigenschaften beeinflusst werden können. Die außerhalb der Platte liegenden Knoten werden für die Simulation in allen Bewegungs- und Rotationsmöglichkeiten festgesetzt, somit ist keine Bewegung und Rotation erlaubt. Eine Dämpfung des Gummiseils wird bei den folgenden Simulationen vernachlässigt.



## 5 Modellvalidierung

Modelle sollen bestmöglich die Realität nachbilden, dabei je nach Detailgrad wesentliche Effekte wiedergeben und zuverlässige Aussagen im Auslegungsprozess liefern. Für die Struktur zunehmende Werte für die Steifigkeit und Dämpfung des FE-Modells, werden oftmals erst nach Erstellung des Modells durch eine Reihe von Simulationen und durch Vergleiche mit Ergebnissen von Experimenten näher spezifiziert.

Im folgenden Abschnitt wird die Modellvalidierung beschrieben. Nachdem die Steghöhe und Dichte verifiziert wurden, erfolgt eine Veränderung der Randbedingungen und der Materialdämpfung, um Einflüsse zu identifizieren. Dabei dient die vermessene Anisogridstruktur als Referenz. Die Eigenformen sowie der Amplitudenverlauf über den Frequenzbereich werden für die Modellvalidierung herangezogen.

### 5.1 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

#### Versuchsaufbau

Die rechteckige, versteifte CFK-Platte wurde für den Versuch an jeder Ecke mit Bohrungen versehen, um diese mit Hacken und Gummiseilen in einem Rahmen zu befestigen. Dabei spannt lediglich das Eigengewicht der Platte die oberen Gummiseile, die Unteren stellen sicher, dass die Struktur während der Anregung in der gewünschten Position bleibt. Durch die geringe Steifigkeit der Gummiseile soll eine frei hängende Platte realisiert werden.

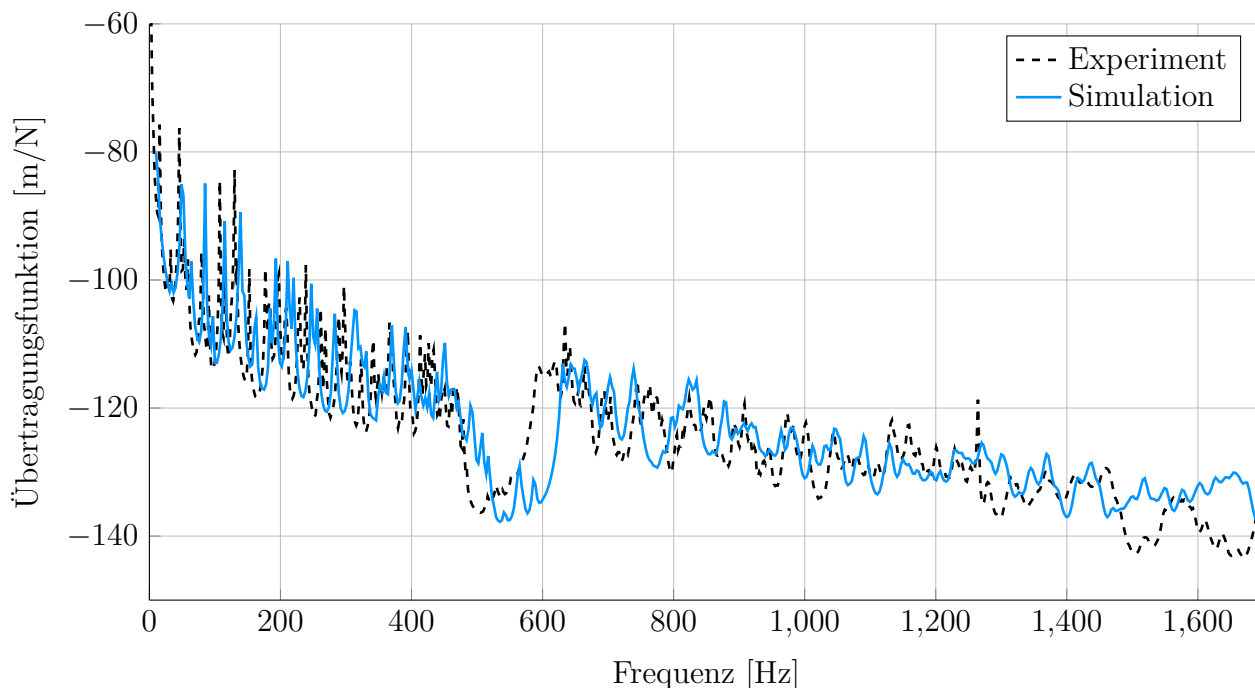
#### Versuchsdurchführung

Mit einem elektromechanischen Erreger wird die Struktur nacheinander an zwei Punkten zur Schwingung angeregt. Im ersten Versuchsdurchlauf wird der Stößel auf einen Kreuzungsbereich von zwei diagonal verlaufenden Stegen angesetzt und die Platte zur Schwingung angeregt, vgl. Abb. 4.1 Kap. 4 Punkt a. Im zweiten Durchlauf wirkt der Stößel zentral auf eine der entstandenen Teilflächen, Punkt b in Abb. 4.1, damit direkt auf dem Hautfeld. In beiden Messungen wird von  $0,625\text{ Hz}$  bis  $2000\text{ Hz}$  in  $0,625\text{ Hz}$  Schritten mit einem Pseudo Random Rauschsignal die Platte zur Schwingung angeregt. Ein Laser-Scanning-Vibrometer nimmt die resultierenden Schwinggeschwindigkeiten auf. Die dahinter liegende Messsoftware „9.1 Scanning Vibrometer Software“ ermöglicht eine umfassende Aufnahme und zugleich Auswertung der erfassten Daten. Für den Vergleich mit den Daten aus der Simulationen werden neben dem Kraftvektor (Eingeleitete Kraft je Frequenzschritt) die senkrechte Auslenkung jedes in der Messung betrachteten Punktes bei jeder Frequenz exportiert.

#### Ergebnisse

Eine Übertragungsfunktion wird zum Vergleich der Messungen mit den Simulationen berechnet. Die Übertragungsfunktion lässt sich aus der Simulation durch die erhaltene Antwort ermitteln. Die Knotenverschiebung orthogonal zur Plattenebene mit der dazugehörigen Phase bei jeder analysierten Frequenz werden als Real- und Imaginärteil aus ANSYS exportiert. Über folgende Schritte wird die Übertragungsfunktion bestimmt: von der komplexen Zahl jedes Knotens wird der Absolutwert gebildet, über die Knoten bei jeder Frequenz gemittelt, auf die Größe der anregenden Kraft bezogen und der Pegel berechnet. Die Pegelgröße der Übertragungsfunktion ist die logarithmische Darstellung

von  $y$ , der gemittelten Amplitude pro Kraft ( $y_{log} = 20 * \log_{10}(y)$ ). Die in Abbildung 5.1 dargestellte, schwarz gestrichelte Übertragungsfunktion ist durch den Versuch, bei der Anregung auf dem Kreuzungsbereich zweier Stege, ermittelt worden. Weiterhin ist die Übertragungsfunktion des erstellten, validierten Modells in blauer Farbe dargestellt.



**Abb. 5.1:** Aus dem Experiment und der Simulation ermittelte Übertragungsfunktionen bei der Anregung auf dem Kreuzungsbereich von zwei Grids

In den Bereichen mit hohen Amplituden in der Übertragungsfunktion sind Resonanzen der Struktur zu vermuten. Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben wird, überlagern sich die ausbreitenden Wellen konstruktiv bzw. destruktiv und es kommt zu einer stationären Amplitudenverteilung. Bei den lokalen Maxima der Übertragungsfunktion lassen sich Betriebsschwingformen der Gridstruktur identifizieren, bei denen es zu einer konstanten Schwingungsamplitude jedes Knotens über die Platte kommt. Die Amplitudenverteilungen sind in den Abbildungen 5.2 bis 5.7 mit der zugehörigen Phase dargestellt. Die linke Darstellung zeigt die Betriebsschwingform aus der experimentellen Durchführung, die rechte Darstellung ist aus der Simulation des FE-Modells. Die zusätzlich gezeigte Phase ermöglicht die Identifizierung der gleichen oder entgegengesetzten Schwingungsrichtung von Bereichen der Struktur. Eine Phasendifferenz von  $180^\circ$  von aneinander angrenzenden Bereichen deutet auf die entgegengesetzte Schwingungsrichtung hin. Für die Darstellung der Betriebsschwingformen wurden im niedrigen Frequenzbereich dominante Amplitudenpeaks ausgewählt und die Auslenkung jedes vermessenen Punktes über die Gridstruktur aufgezeichnet.

Neben der Frequenz bei der sich das Schwingungsbild ergibt, ist die Ordnung für die zugehörige Schwingform angegeben. Der zuerst genannte Wert  $m$  gibt die Anzahl der Maxima bzw. Minima in horizontaler, der Wert  $n$  die Anzahl in vertikaler dargestellter Richtung an. Die Ordnung wird als  $(m,n)$  angegeben. Bei höheren Frequenzen, so bereits in dem Schwingungsbild 5.4 zu erkennen, bilden sich lokale Schwingungsbilder aus. Da die Stege, eine abrupte Steifigkeitsänderung der Platte ergeben, werden an diesen Grenzen die sich ausbreitenden Wellen reflektiert. Bei Betrachtung eines einzelnen Flächensegments als eigenständige Platten mit den Stegen als fester Rand und somit einem

ausreichend hohen Reflexionsgrad der Wellen, ergeben sich lokale Schwingformen innerhalb einer Betriebsschwingform. In der Darstellung 5.6 ist besonders gut zu erkennen, dass sich in einem viereckigen Flächenelement eine (1,1) Schwingungsform ausbildet. Die einzelnen Flächen zwischen den Stegen sind beispielhaft gekennzeichnet.

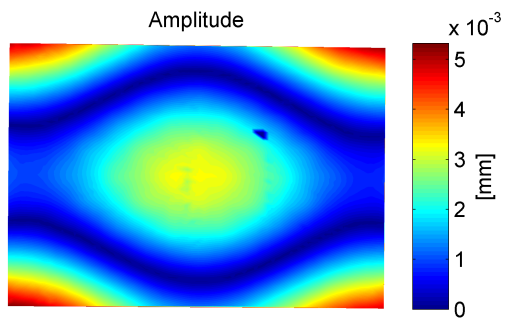


Abb. 5.2: Exp. 45,6 Hz (1,3)

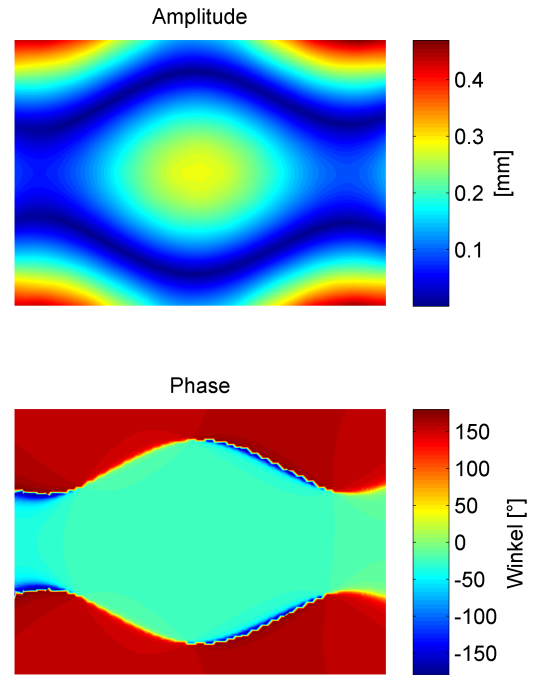


Abb. 5.3: Sim. 50 Hz (1,3)

## 5.2 Variation der Modellparameter

Im den folgenden Abschnitten werden Parameter des Modells variiert, um die zuvor gewählten Parameter zu validieren. Mögliche Sensitivitäten bestimmter Parameter auf die Genauigkeiten des Modells sollen so herausgestellt werden. Zunächst wird in Abschn. 5.2.1 auf die Gesamtmasse und auf die angenommene Steghöhe eingegangen. Anschließend werden Einflüsse der Steifigkeit der Elemente der Einspannung und eine Vorspannung in der Struktur untersucht (Abschn. 5.2.2). In Abschnitt 5.2.3 sind verschiedene Dämpfungsmodelle und Dämpfungswerte untersucht worden.

### 5.2.1 Validierung der Geometrie

Die gemessene Masse der vermessenen Struktur beträgt 4358 g, die Dicke der dünnen Platte von 1,03 mm wurde im Herstellungsprozess erfüllt, jedoch die Steghöhe variiert mit etwa  $\pm 0,5$  mm um den nominell erwünschten Wert von 10 mm. Für die Veränderung der Masse wurden die Steghöhe und die Dichte im Modellerstellungsprozess variiert.

Eine Lagendicke wird mit 0,1292 mm angegeben, so kann rechnerisch betrachtet mit einer Steghöhe von

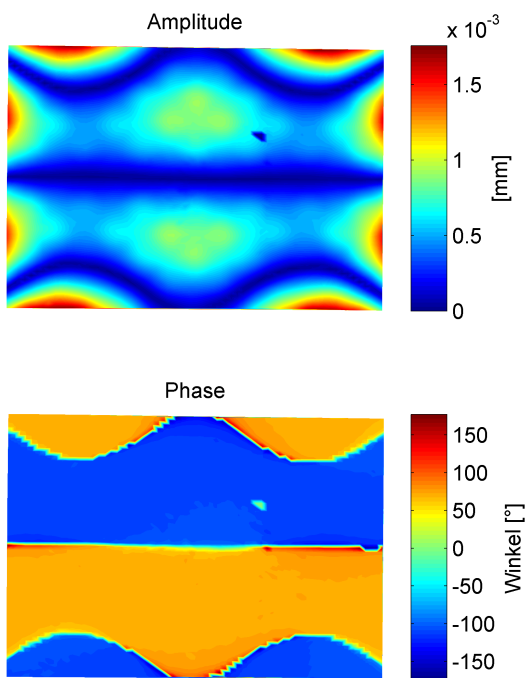


Abb. 5.4: Exp. 107,5 Hz (3,4)

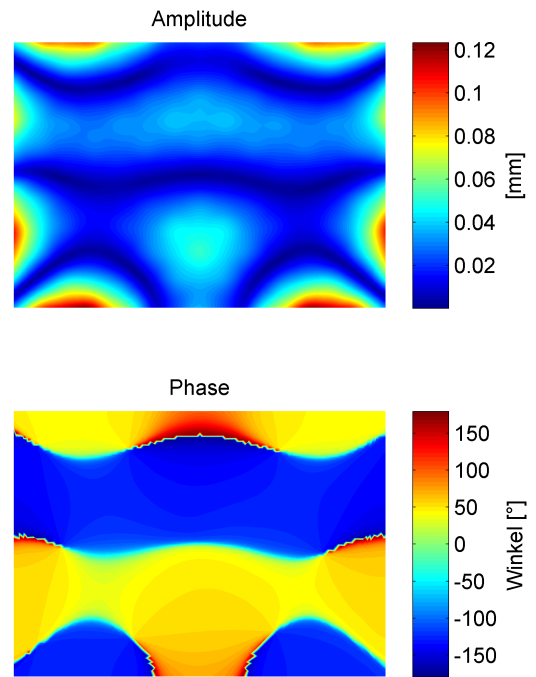


Abb. 5.5: Sim. 115 Hz (3,4)

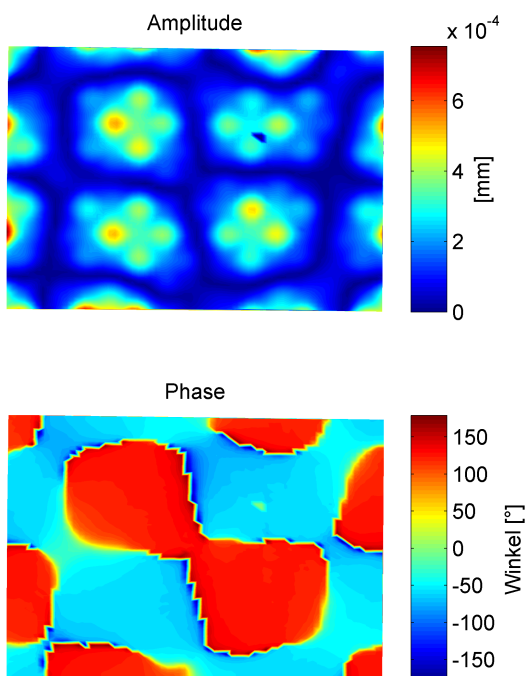


Abb. 5.6: Exp. 261,3 Hz (4,4)

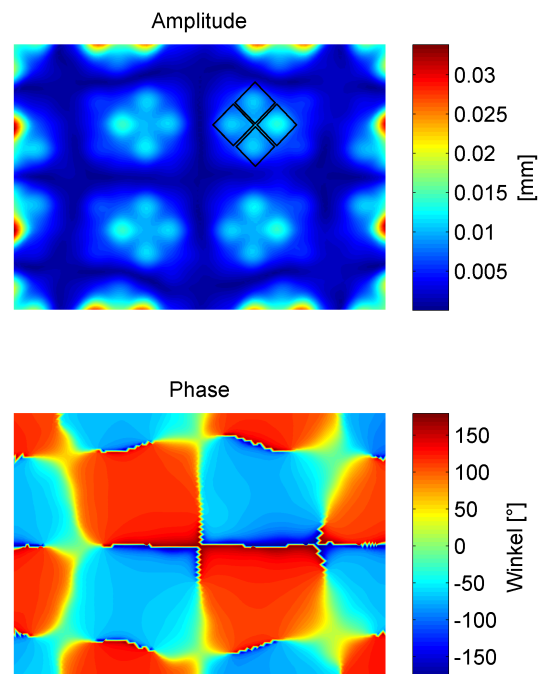


Abb. 5.7: Sim. 283 Hz (4,4)



9,9484 mm oder 10,0776 mm simuliert werden. Die Dichte des Prepreg Materials nach Verarbeitung ist vom Herstellungsprozess abhängig und kann in der Größenordnung um  $1,5 - 1,8 \text{ g/cm}^3$  angenommen werden. Die Eigenfrequenz wird durch die Masse und Steifigkeit der Platte beeinflusst, wobei lediglich die Masse verändert wurde. Die Steifigkeit des Prepreg-Materials für eine Lage ist von dem Hersteller angegeben und wurde nicht variiert, wobei durch den Herstellungsprozess der Faservolumengehalt, folglich die Steifigkeit, abweichen kann. Die Bestimmung der Steghöhe und Masse erfolgte mittels eines Vergleichs des Experiments und den Ergebnissen einer Modalanalyse. Beispielhaft sind in den Abbildungen 5.8 bis 5.10 die drei, auch oben gezeigten, Schwingungsformen dargestellt. Die Werte der Amplitude, die über die Farbe gekennzeichnet sind, ist für jede Eigenform auf die modale Masse bezogen. Die Darstellungen sind dementsprechend nicht absolut über die Amplitude vergleichbar und stellen die Form der entstehenden Eigenschwingung dar. Die modal berechneten Eigenformen und Frequenzen wurden mit denen aus dem Versuch ermittelten Formen und Werten verglichen. Aufgrund der Übereinstimmung der Eigenmoden aus der Modalanalyse und den Betriebsschwingformen aus dem Experiment bei einer Stegdicke von 10,0776 mm und einer Dichte von  $1620 \text{ kg/m}^3$  wurden weitere Simulationen mit diesen Parametern durchgeführt. Somit ergibt sich für die simulierte Masse ein Gewicht von 4351 g, welche weniger als 1% von der tatsächlichen Masse abweicht.

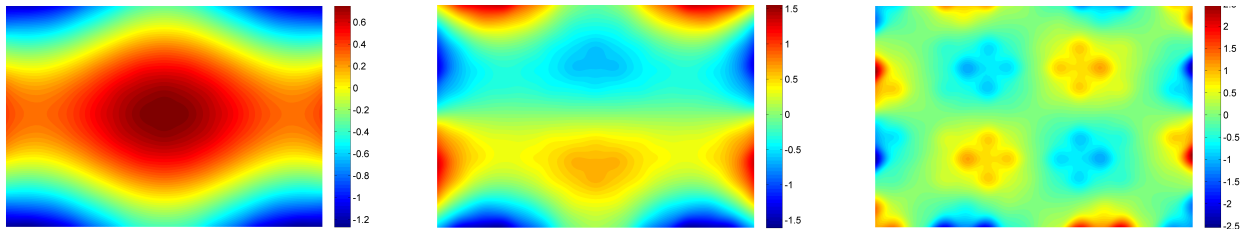


Abb. 5.8: Mod. 47 Hz (1,3)    Abb. 5.9: Mod. 144 Hz (3,4)    Abb. 5.10: Mod. 283 Hz (4,4)

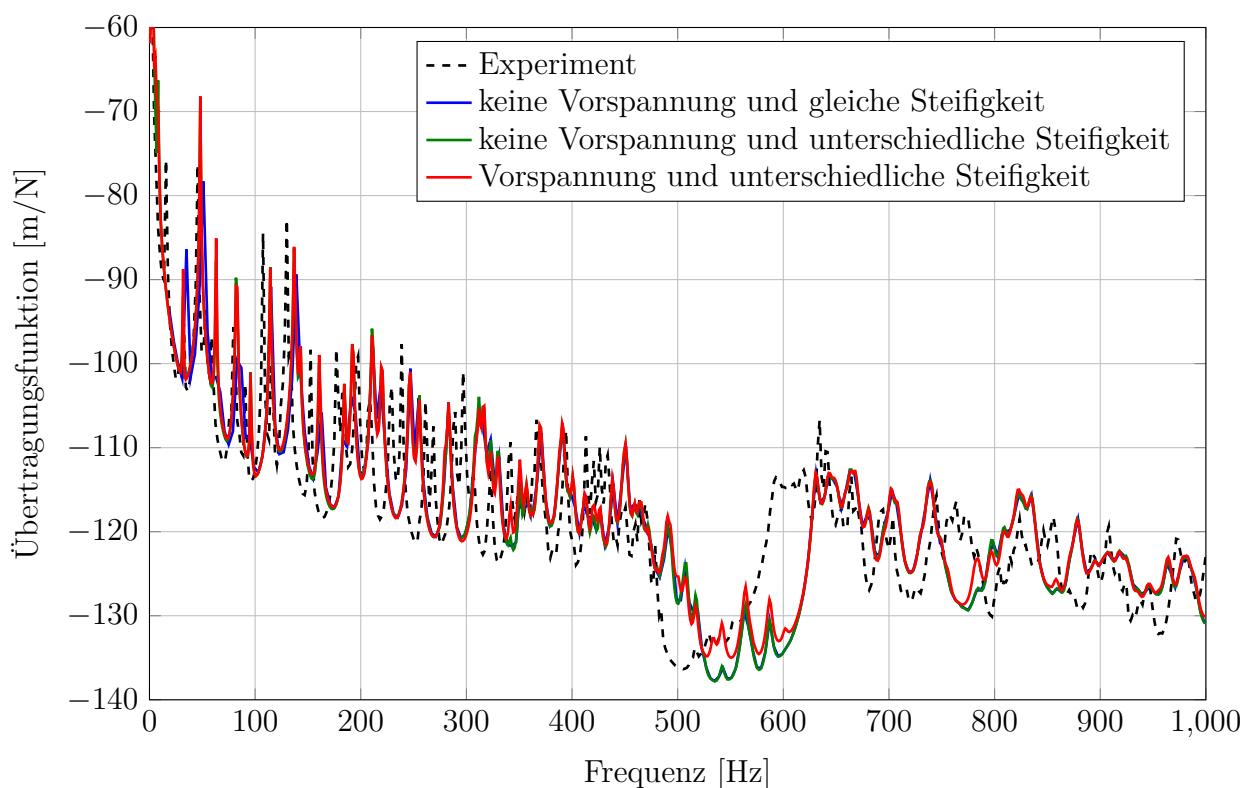
### 5.2.2 Validierung der Einspannung

Die Steifigkeit der *COMBIN14* Elemente wurde mittels eines Skriptes (in MATLAB) variiert, um so die beste Übereinstimmung von gemessenen zu berechneten Eigenfrequenzen zu ermitteln. Die Optimierung erfolgt über den Vergleich von Residualtermen, die aus dem aufgezeichneten Übertragungsverhalten des Versuchs für ausgewählte Frequenzabschnitte ermittelt werden. Diese Residualterme sind Funktionen, die den Verlauf der Übertragungsfunktion in einem kleinen Bereich beschreiben. Ein Vergleich der modalen Eigenschaften aus der Messung und der Simulation über den gewählten Frequenzabschnitt und eine Mittelung über den gesamten betrachteten Frequenzbereich, ermittelt die modellierten Parameter, die das Verhalten, Verlauf und Pegelgröße, des Experiments wiedergeben. Das Skript wurde im Rahmen einer Studienarbeit erstellt [Alb12].

Die Steifigkeit der *COMBIN14* Elemente wurde variiert, wobei eine Unterscheidung zwischen der vertikalen Aufhängung und den horizontalen Anbindungen gemacht wurde. Zudem wurde eine Knotenverschiebung implementiert, die auf die außen liegenden Knoten in vertikaler Richtung der Aufhängung aufgebracht ist. Die Verschiebung spannt die Elemente der Aufhängung vor und induziert somit eine Vorspannung innerhalb der Platte. Dabei sollte die Auswirkung des Eigengewichts der Platte auf die Aufhängung berücksichtigt werden.

Für die Validierung der Steifigkeit der Aufhängung wurde lediglich der Frequenzbereich bis  $1000 \text{ Hz}$  in Betracht gezogen, da die Art der Einspannung sich auf die unteren Eigenfrequenzen auswirkt. In der

Simulation wurde die Steifigkeit in vertikaler Richtung zwischen 100 und 100000  $N/m$ , die senkrechten Richtungen zwischen 250 und 1000  $N/m$  verändert. Für die Verschiebung der Knoten wurde ein minimaler Wert von 0.8  $mm$  bis maximal 20  $mm$  ermöglicht. Ein zweistufiges Lösungsverfahren ist bei dieser Art der Optimierung notwendig. Im ersten Schritt wird die statische Vorspannung in der Platte berechnet, die aus der Verschiebung des Knotens in Richtung der Aufhängung resultiert. Im zweiten Schritt werden die Eigenfrequenzen und die zugehörigen Eigenformen bestimmt. Ziel der Optimierung ist es, die Steifigkeiten und die Verschiebung im physikalisch sinnvollen Bereich anzupassen. Die ermittelten Werte, Steifigkeit in vertikaler Richtung von 2340  $N/m$ , in horizontaler Richtung von 384  $N/m$  und eine Verschiebung der Knoten von 6  $mm$  wurden übernommen und eine Simulation mit harmonischer Anregung durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Variation der Einspannung wenig Einfluss auf die Simulation hat. Die zugehörigen Übertragungsfunktionen, bei keiner Verschiebung und gleicher Steifigkeit der Aufhängung in jede Raumrichtung, sind in Abbildung 5.11 gezeigt.



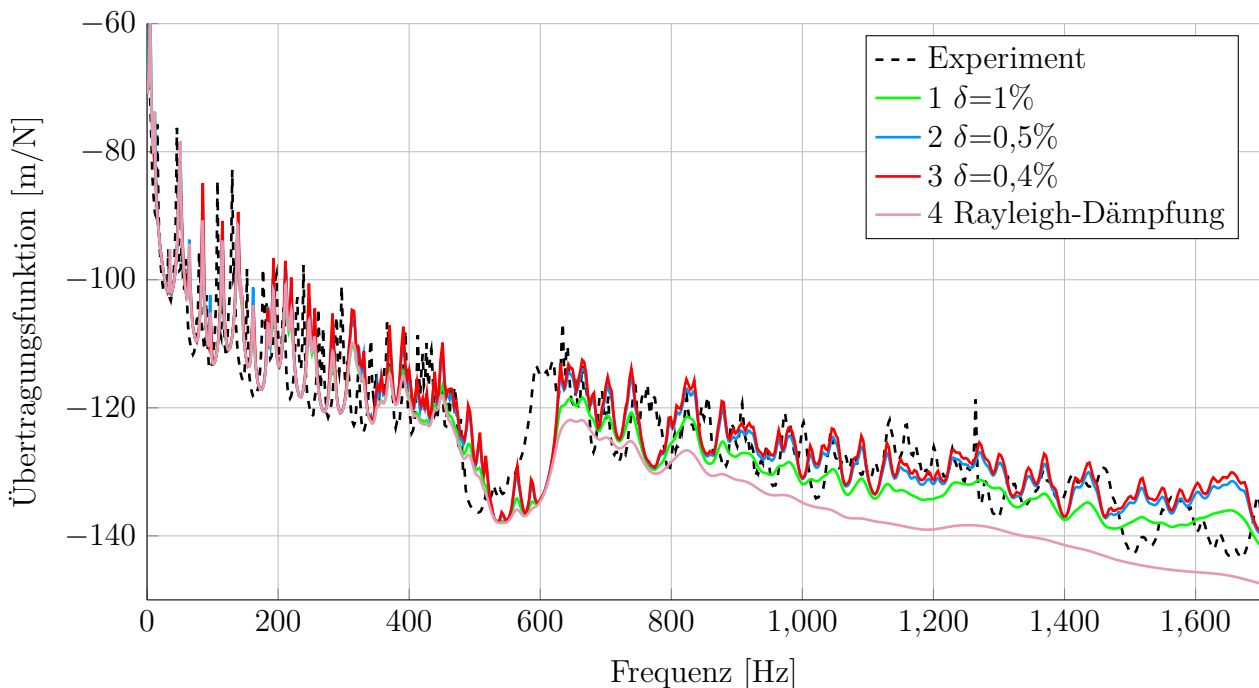
**Abb. 5.11:** Übertragungsfunktionen: Änderung der Aufhängung bei konstanter Materialdämpfung mit Vergleich zur experimentell bestimmten Übertragungsfunktion

Die verschiedenen Simulationen unterscheiden sich lediglich geringfügig. Die Pegelgröße ist vergleichbar und auch die Lage von Maxima ist bei den Übertragungsfunktionen über den gesamten Frequenzbereich nahezu gleich. Die hohe Steifigkeit der Kohlefaserverbundplatte überwiegt der Versteifung durch die Verschiebung induzierte Vorspannung der Aufhängungspunkte. Die Verschiebung hat dementsprechend einen verschwindend geringen Einfluss auf das Übertragungsverhalten. Aufgrund der zusätzlich höheren Rechenzeit bei einem zweistufigen Lösungsverfahren, wie es bei der Berücksichtigung einer Vorspannung nötig ist, wird eine vorherige Verschiebung der Aufhängungspunkten nicht weiter in Betracht gezogen. Die Einspannung ist punktuell an der Platte, somit hat die Variation der Randbedingungen, die Steifigkeit der Elemente, einen geringen Einfluss auf das Schwingungsverhalten der

Struktur und wird mit zunehmender Frequenz weiter geringer. Für weitere Messungen wurde zusätzlich die geringere Steifigkeit der beiden *COMBIN14* Elemente in horizontaler Richtung mit den der Steifigkeit in vertikaler Orientierung gleichgesetzt. Für alle weiteren Simulationen wurde eine Steifigkeit der Aufhängung von  $2340 \text{ N/m}$  und keine Vorspannung der Gridstruktur berücksichtigt.

### 5.2.3 Validierung der Materialdämpfung

In der Abbildung 5.12 sind die Übertragungsfunktionen des Experiments mit den Simulationsergebnissen für verschiedene Dämpfungswerte bei der Kraftanregung im Kreuzungsbereich zweier Stege abgebildet.



**Abb. 5.12:** Übertragungsfunktionen: Anregung auf dem Kreuzungsbereich zweier Stege mit unterschiedlichen Dämpfungsmodellen und Werten

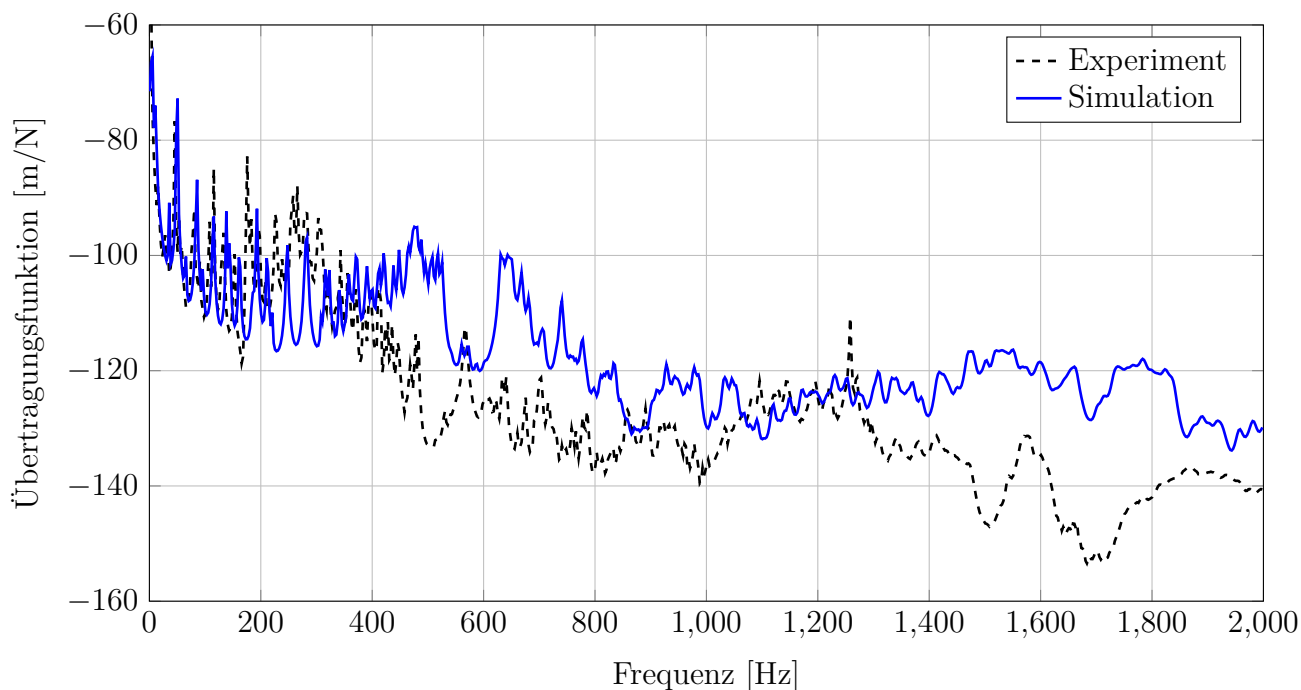
Ein Anhaltswert für die Materialdämpfung für Faserverbundwerkstoffe kann zwischen 0,1 - 5% angenommen werden. Zunächst wurde für die innere Dämpfung der Struktur eine Rayleigh-Dämpfung [Wal91] angenommen, ein Beispiel für die zugehörige Übertragungsfunktion ist als 4. Kurve aufgeführt. Bei Einstellung von  $\alpha = 6,28$  und  $\beta = 7,96 \cdot 10^{-6}$  ergibt sich eine minimale Dämpfung von  $\delta_{min} = 1\%$  und eine Dämpfung bei  $2000 \text{ Hz}$  von  $\delta_{end} = 5\%$ . Aus der Übertragungsfunktion ist erkennbar, dass bis  $600 \text{ Hz}$  der generelle Verlauf übereinstimmt. Die Lage der Maxima/Minima der Simulation gleichen denen aus der Messung. Oberhalb von  $500 \text{ Hz}$  zeigt sich jedoch bereits und im weiteren Verlauf deutlicher, dass die Dämpfung zu hoch gewählt wurde und die Simulation die Messung unterschätzt.

Bessere Ergebnisse, Kurve 1, 2 und 3 in Abbildung 5.12, ließen sich mit einer konstanten Dämpfung erzielen. Da die Dämpfung weiterhin eine Unbekannte ist, wurde eine konstante Dämpfung von 1%, 0,5% und 0,4% simuliert. Diese Dämpfungswerte ergaben eine Wiedergabe des generellen Verlaufs und teilweise eine Übereinstimmung der Lokalität von den Maxima/Minima in Bezug auf die Frequenz.

Für die weitere Betrachtung im Hinblick auf das vibroakustische Verhalten, die Schallabstrahlung und Schalltransmission der Gridstruktur ist der Pegel der Übertragungsfunktion von Bedeutung, weniger relevant ist es, die genaue Eigenfrequenzen der Struktur analytisch nachzurechnen. Die Übertragungsfunktion, die sich aus der Simulation mit einer konstanten Dämpfung von 0,4% über den gesamten Frequenzbereich ergibt, in Abbildung 5.12 als rote Kurve hervorgehoben, zeigt eine Wiedergabe der Versuchsergebnisse in Bezug auf die Pegelgröße für die Untersuchung des akustischen Verhaltens. Die Übertragungsfunktionen sind auf die anregende Kraft bezogen, somit ist die eingehende Kraft für die Simulationen auf ein Newton normalisiert. Weitere Untersuchungen und dargestellte Ergebnisse wurden mit einer Kraftanregung von  $F = 1\text{N}$  und einer konstanten Dämpfung von 0,4% durchgeführt.

### 5.3 Vergleich bei harmonischer Anregung auf dem Hautfeld

In der Abbildung 5.13 sind die Übertragungsfunktionen dargestellt, die sich bei der Anregung auf dem Hautfeld ergeben. Der Kraftvektor ist auf dem Knoten der zu jedem Steg den maximalen Abstand auf einer Fläche platziert, so wie es im Experiment realisiert wurde (vgl. Abb. 4.6). Dabei wurden alle zuvor ermittelten Parameter (Abschn. 5.2) übernommen.



**Abb. 5.13:** Aus der Simulation ermittelte Übertragungsfunktion bei der Anregung auf dem Hautfeld

Das Übertragungsverhalten der Simulation bei der Anregung auf dem Hautfeld überschätzt die Pegelgröße, die in dem Experiment ermittelt wurde. Ab etwa 400 Hz sind erste Abweichungen feststellbar, ab 1400 Hz werden die Pegelwerte mit bis zu 20 dB überschätzt. Die Simulation bei der Kraftanregung auf dem Hautfeld gibt ein besseres Schwingungsverhalten wieder, als das Experiment zeigt. Die Anregung auf dem Hautfeld ist lokal, sodass die Zelle, auf welcher die Kraft platziert ist, mehr zur Schwingung angeregt wird, als die gesamte Platte. Eine globale Anregung ist für die akustische

Simulation vorgesehen, weshalb die Parametervariation mit der Kraftanregung auf dem Steg durchgeführt wurde. Zudem ist das Interface zwischen Kraftanregungspunkt und dem Erreger in dem Versuch innerhalb der Simulationsumgebung idealisiert nachgebildet.

Ein Vergleich mit den bereits vorher betrachteten Schwingungsformen, in den Abbildungen 5.14 und 5.15 dargestellt, zeigt die sowohl bei der Hautfeldanregung, als auch bei der Kraftanregung auf dem Steg entstehenden Betriebsschwingformen.

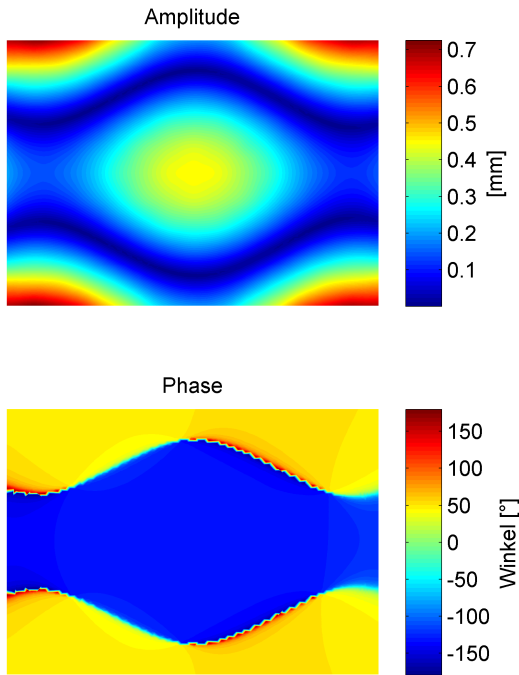


Abb. 5.14: Sim. 50,6 Hz (1,3)

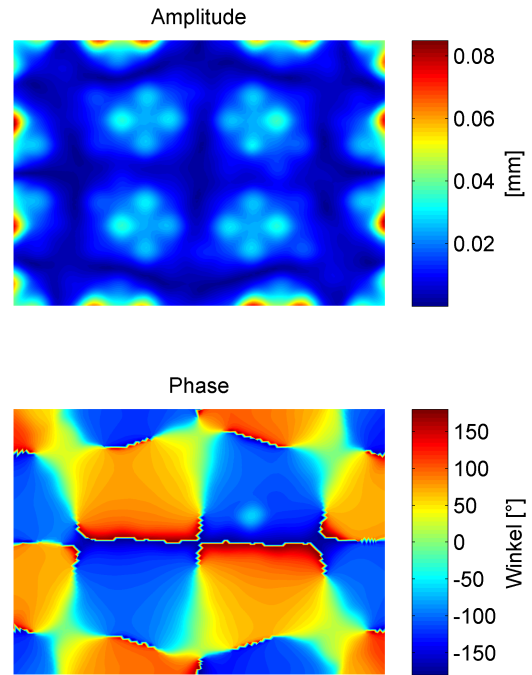


Abb. 5.15: Sim. 283,8 Hz (4,4)

#### Abweichungen des Modells zu der vermessenen Gridstruktur

Bei Betrachtung der Übergänge von der Platte zu den Stegen, an den Impedanzsprüngen, sind Unterschiede zwischen der realen Gridstruktur und dem Modell festzustellen. In dem FE-Modell ist keine Klebeschicht modelliert, die an den leicht abgerundeten Kanten im Übergang von Steg zu Platte bei der Herstellung entstanden sind. (Feststellung durch Betrachtung der vermessenen Gridstruktur.) Die Übergänge von der Platte zum Steg beeinflussen die Reflexion bzw. Transmission der Biegewelle. Die Wellenausbreitung ist in dem Versuch mehr beeinflusst, als in der Simulation angenommen und führt zu der Überschätzung der Schwingungsamplitude in der Simulation.



## 6 Vibroakustische Untersuchung von zwei Gridstrukturen

In dem folgenden Kapitel wird zunächst eine geometrisch veränderte Gridstruktur vorgestellt (Abschn. 6.1). Anschließend wird das Transmissionsverhalten der beiden Strukturen analysiert und die Auswirkungen der unterschiedlichen Geometrien untersucht.

### 6.1 Untersuchte Anisogridstruktur

Ein geometrisch variierte Gridstruktur, Kap. 4.2.3 Abb. 4.4 d, wird im folgenden Abschnitt untersucht. Die Stege haben einen Öffnungswinkel von  $30,4^\circ$  und trotz ihrer orthotropen Eigenschaften in Anwendungen zu finden. Im Hinblick auf die Untersuchung der Schallabstrahlung wurde die Größe der Flächen, die zwischen den Stegen eingeschlossen ist, nicht verändert, auch die Stegbreite wurde konstant bei  $6,35 \text{ mm}$  belassen. Mit drei Zellen in der Länge und acht Zellen in der Breite ergeben sich die Plattenabmaße, wie sie in der Tabelle 6.1 angegeben sind.

**Tabelle 6.1:** Abmaße der Platte mit veränderter Gridgeometrie

Breite	$B = 1,248 \text{ m}$
Länge	$L = 0,816 \text{ m}$
Masse	$m = 3080 \text{ g}$
Öffnungswinkel	$\varphi = 30,4^\circ$
Zellenbreite	$b = 156 \text{ mm}$
Zellenlänge	$l = 272 \text{ mm}$
Stegbreite	$d = 6,35 \text{ mm}$
Plattendicke	$t = 1,0336 \text{ mm}$
Steghöhe	$h = 10 \text{ mm}$
Materialdämpfung	$\delta = 0,4 \%$

Zunächst wird im tieffrequenten Bereich davon ausgegangen, dass die ausbildenden Schwingungsformen mit denen aus der vorherig analysierten Platte vergleichbar sind. Somit die Versteifungselemente auf die Formen der ersten Betriebsschwingungen keine signifikante Auswirkung haben und sich zunächst lediglich Moden auf der gesamten Platte ausbilden bevor sich in den inneren Zellstrukturen stehende Wellen ausbilden, wie im vorherigen Kapitel Abschnitt 5.1 gezeigt. Die Größe der Platte ist geringer, zudem sind weniger Grids appliziert. Die Masse der Struktur ist insgesamt geringer, da sie in Höhe und Breite jeweils  $0,2 \text{ m}$  kleiner als die Platte des Modells 1 ist. Betrachtet wird eine einzelne Zelle, um die Wahl der Abmaße zu ergründen. Eine einzelne Zelle wirkt, ab höheren Frequenzen, als ein Ein-Kolbenstrahler, der Schall oberhalb einer bestimmten Wellenlänge abstrahlt. Für die abgestrahlte Schallleistung eines Kolbenstrahlers  $P_K$  ist die Fläche  $A$  relevant (vgl. Formel 3.5). Ist die Fläche

eines solchen Kolbenstrahlers vergleichbar, wird bei gleicher, effektiver Schnelle  $v_n$  auch die gleiche Schalleistung  $P_K$  abgestrahlt. Ziel dabei ist es, dass der Einfluss der Geometrieänderung der Gridstruktur auf das akustische Abstrahlverhalten identifizierbar ist. Die sich ergebene Anisogridstruktur ist in Abbildung 6.1 mit der Vernetzung dargestellt.

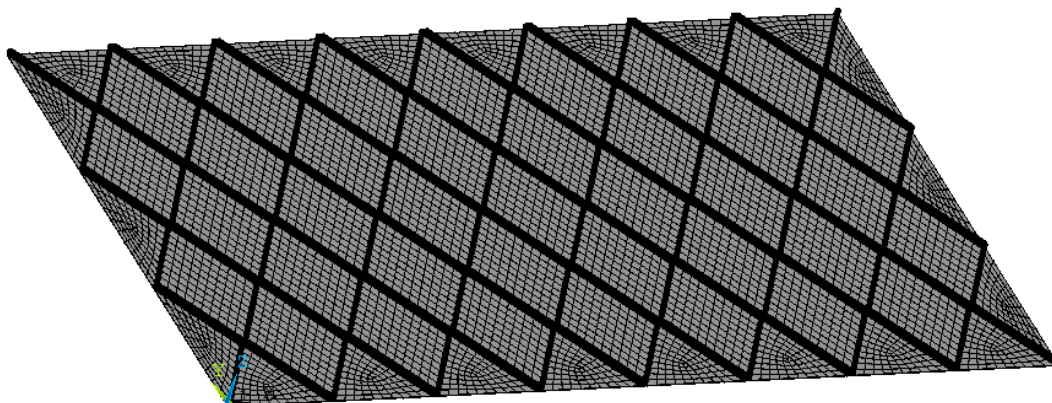


Abb. 6.1: FE-Modell der geometrisch veränderten Anisogridstruktur

### 6.1.1 Modalanalyse

Die Modalanalyse zeigt, dass für diese Gridgeometrie sich ähnliche Plattenmoden ausbilden. Die Eigenformen sind in den Abbildungen 6.2 bis 6.5 gezeigt. Es können Analogien zu den in den Betriebschwingformen 6.2 bis 6.5 dargestellten Moden der vorherigen Gridgeometrie gebildet werden.

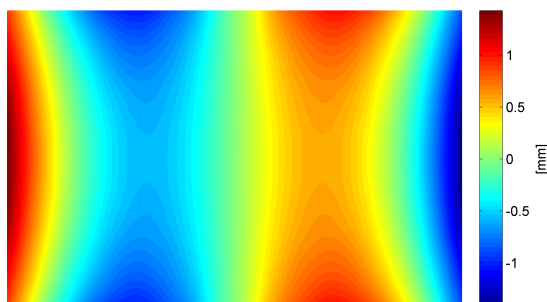


Abb. 6.2: Eigenform bei 29,6 Hz (2,1)

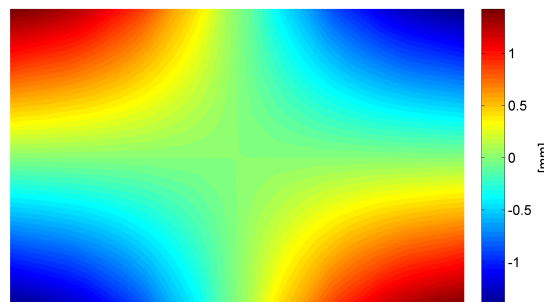


Abb. 6.3: Eigenform bei 38,5 Hz (2,2)

Ab einer Frequenz von 284,4 Hz sind in den Segmenten zwischen den Stegen innere Eigenschwingungsformen erkennbar. Ausgeprägter waren diese inneren Moden bei der Simulation des Modells 1 zu beobachten.

### 6.1.2 Harmonische Anregung

In der Abbildung 6.6 ist in Blau dargestellt die Übertragungsfunktion für das Modell 2 bei der Kraftanregung auf dem Steg und in Rot die zugehörige Übertragungsfunktion bei Anregung auf dem dünn-



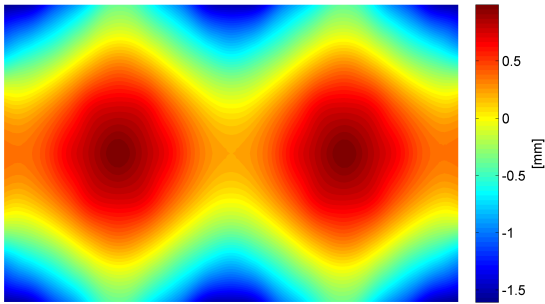


Abb. 6.4: Eigenform bei 111,2 Hz (1,3)

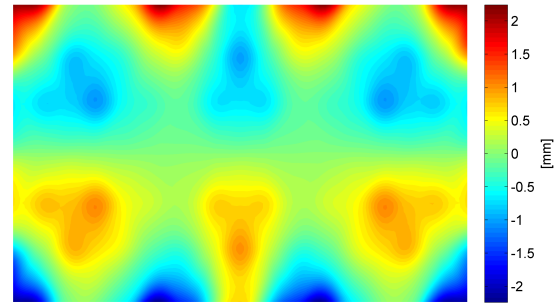


Abb. 6.5: Eigenform bei 284,4 Hz (7,2)

wandigen Bereich. Gestrichelt hinterlegt ist zum Vergleich die simulierte Übertragungsfunktion von Modell 1 für die Anregung am Steg.

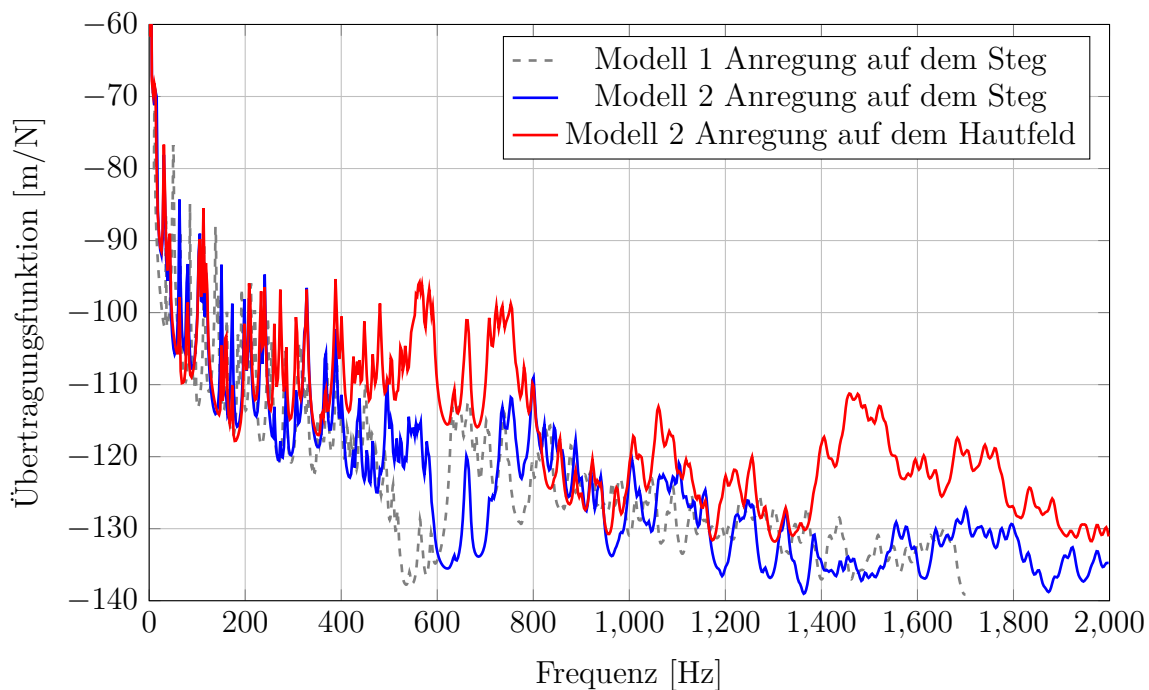


Abb. 6.6: Übertragungsfunktionen der Simulation bei Anregung am Steg und auf der Fläche für das Modell 2 mit Modell 1 als Vergleich

Der Vergleich der Betriebsschwingformen zwischen beiden Anregungsarten zeigt im unteren Frequenzbereich wenig Abweichung, besonders im Bezug auf die Eigenfrequenz bei der die Schwingform auftritt (Abb. 6.6). So sind in den Abbildungen 6.7 bis 6.10 die Betriebsschwingformen gezeigt, die in beiden Simulationen, unabhängig von dem Kraftanregungspunkt, deutlich zu erkennen sind. Aufgrund der verzerrten Geometrie und einer kürzeren Seite der Einheitszelle wird die Ausbildung von inneren Plattenmoden ab einer kleineren Wellenlänge, demnach höheren Frequenz, vermutet. Dies bestätigt die Schwingungsform bei 285,6 Hz bei der erste innere Eigenformen einer Zelle festzustellen sind. Deutlich ausgeprägter und auch bereits bei etwa 110 Hz konnten in dem vorherigen Modell 1 diese inneren Schwingungen festgestellt werden.

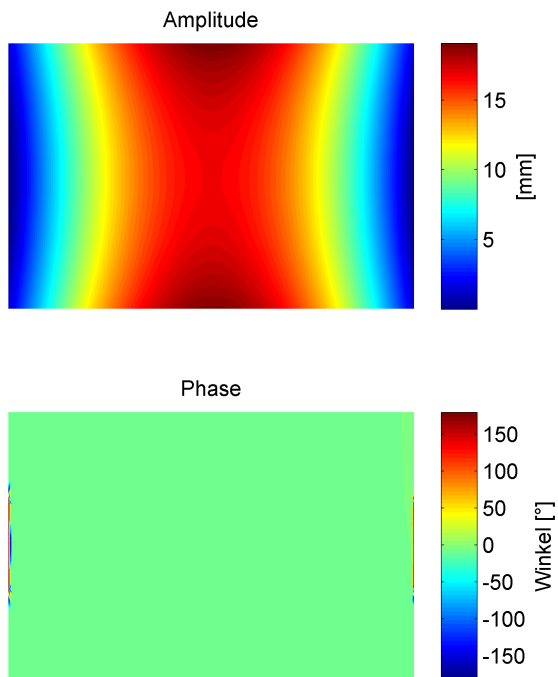


Abb. 6.7: Betriebsschwingform bei 31,2 Hz (1,1)

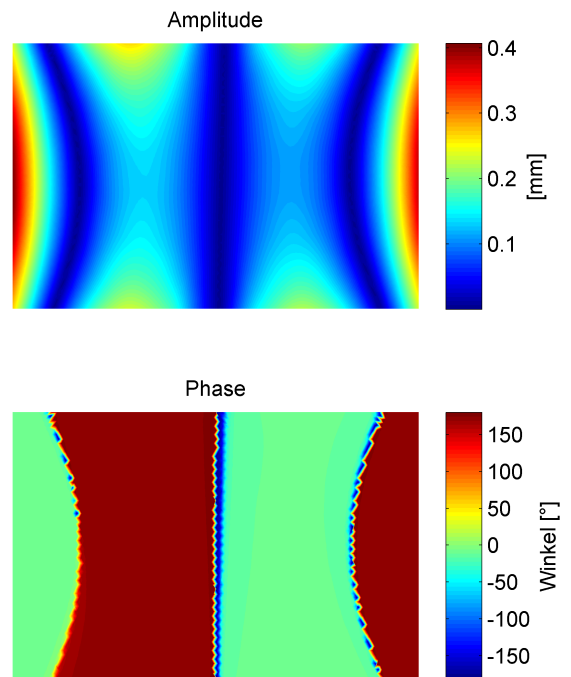


Abb. 6.8: Betriebsschwingform bei 30,6 Hz (4,1)

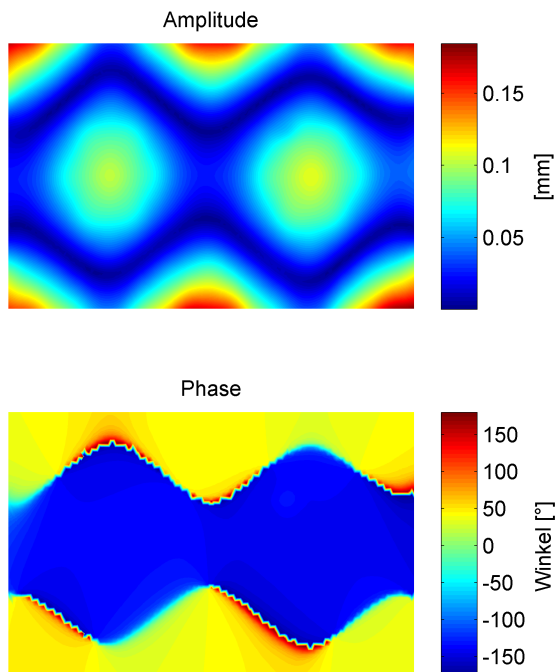


Abb. 6.9: Betriebsschwingform bei 113,1 Hz (1,3)

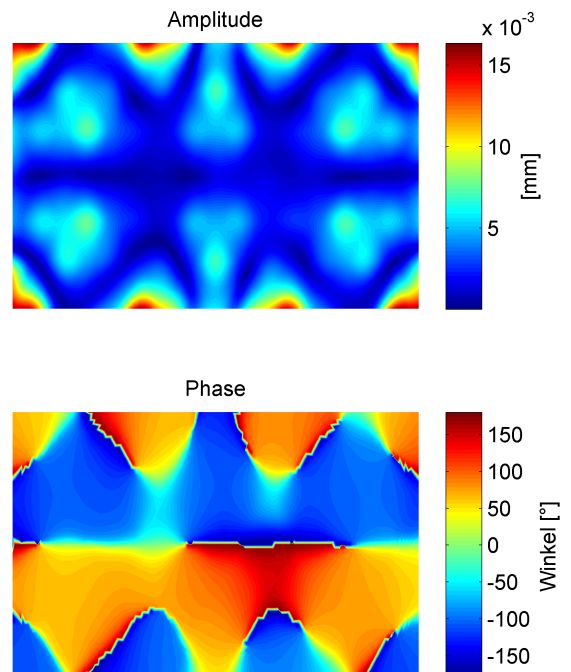


Abb. 6.10: Betriebsschwingform bei 285,6 Hz (7,2)

Allgemein können die Betriebsschwingformen aus der harmonischen Anregung mit den berechneten Eigenschwingungen aus der Modalanalyse verglichen werden. Jedoch ist auffällig, dass die 1. Schwingungsform bei 29,6,5 Hz Abb. 6.2 bzw. 31,2 Hz Abb. 6.7 nicht übereinstimmen, jedoch ab höheren Frequenzen, beispielhaft an den Schwingungsformen 6.9 und 6.10 gezeigt, mit guter Wiedergabe der Eigenfrequenz, die Betriebsschwingformen berechnet werden können. Diese Problematik der Bestimmung der 1. Schwingform konnte bereits in dem Modell 1 festgestellt werden. Es wird für die Bewertung der Schalleistung und des Schalldämmmaßes dennoch von einer Vergleichbarkeit der Modelle ausgegangen. Besonders die Pegelgröße der Auslenkung, vgl. Abbildung 6.6, ist in der gleichen Größenordnung, wie schon für das vorherige Modell, mit einer ähnlichen Abweichung für die Anregung auf dem Hautfeld.

## 6.2 Vibroakustisches Verhalten

Die Gridstruktur wird mittels eines diffusen Schallfeldes angeregt und das akustische Antwortverhalten simuliert. Ein diffuses Schallfeld realisiert eine Gleichverteilung der Schallenergie mit gleicher Intensität aus allen Richtungen auf der Oberfläche der anzuregenden Struktur. Zur Berechnung des anregenden Schallfeldes werden Schallquellen auf einer Halbkugel um die Struktur herangezogen. Für jede Frequenz wird die Verteilung der einfallenden Schalleistung berechnet. In der Simulation wird die Energie durch eine Kraft an jedem Knoten des Modells eingebracht.

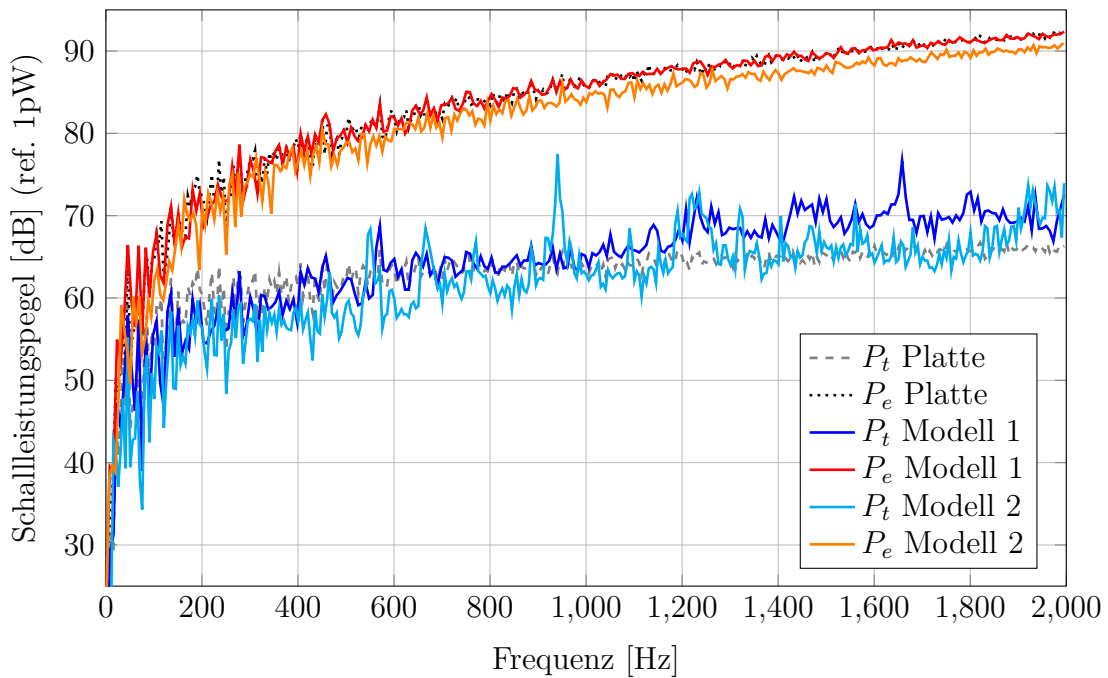
### 6.2.1 Schalleistung

In der Abbildung 6.11 ist die eingebrachte und die von der Gridstruktur abgestrahlte Schalleistung über den simulierten Frequenzbereich für das Modell 1 und Modell 2 aufgezeigt. Zudem wurde eine einfache CFK-Platte zum Vergleich herangezogen. Lagenaufbau, Material, Dicke und Größe der Platte entsprechen denen der Gridstruktur aus Modell 1 ohne die applizierten, versteifenden Stege.

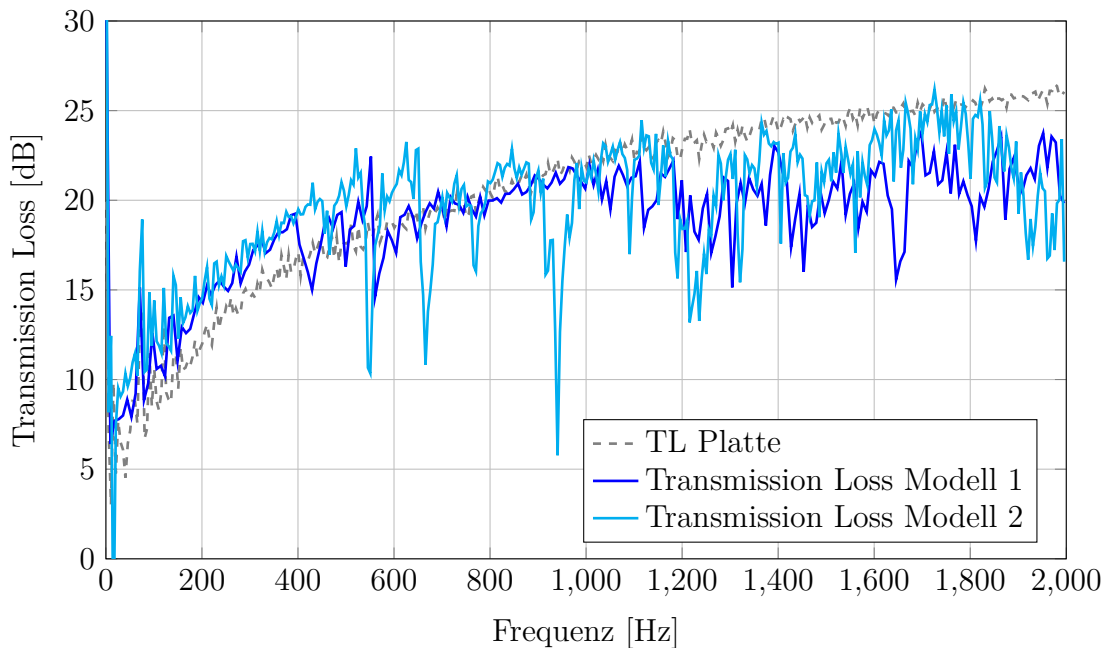
Für die Geometrie der Gridstruktur mit verzerrten Zwischenflächen ergibt sich eine geringere eingebrachte Schalleistung. Die abgestrahlte Schalleistung ist im Vergleich zu der von einer Platte mit applizierten rechtwinkligen Stegen ebenso geringer. Dieser Unterschied ist auf die Masse der Anisogridstruktur zurückzuführen, die bei dem Modell 2 geringer ist. Unabhängig von der Masse und Größe der Platte lässt sich die Dämpfungseigenschaft einer Anisogridstruktur mit Hilfe des Transmission Loss (vgl. Gl. 3.14) beschreiben. Die jeweiligen Schalldämmmaße für eine einfache Platte, Modell 1 und Modell 2 sind in Abbildung 6.12 dargestellt.

Für die einfache ebene Platte ist eine stetige Zunahme der Schalldämmung zu erkennen, ohne lokale Minima bzw. Einbrüche. Bei höheren Frequenzen ist eine bessere Schalldämmung zu erwarten. Die Strahlungswiderstands-Matrix  $R$ , Gl. 3.11, zeigt den quadratischen Zusammenhang zwischen der Schallabstrahlung ins Fernfeld und der Anregungsfrequenz, welcher in dem Verlauf des Schalldämmmaßes der ebenen Platte zu erkennen ist.

Für die betrachteten Gridstrukturen zeigt sich, wie bei der ebenen Platte, eine generelle Zunahme des Schalldämmmaßes über den betrachteten Frequenzbereich. Die applizierten Versteifungselemente auf der Platte führen zu einer Beeinflussung des Schalldämmmaßes. Im unteren Frequenzbereich bis etwa 600 Hz, ausgenommen die lokalen Einbrüche, wirken die Stege schalldämmend im Vergleich zu einer ebenen Platte des gleichen Materials. Bis 400 Hz ist die Schalldämmung der Gridstrukturen um 3 dB



**Abb. 6.11:** Einfallende und abgestrahlte Schalleistung beider Gridstrukturen mit Vergleich zu einer ebenen CFK-Platte



**Abb. 6.12:** Schalldämmmaß der Anisogridstrukturen mit Vergleich zu einer ebenen CFK-Platte

höher. Die zusätzliche Masse und die Versteifungsstege behindern die Höhe der Schwingungsamplitude. Insbesondere oberhalb von 1200 Hz zeigt sich, dass eine Gridstruktur bei einer Schallanregung, mehr Schall transmittiert. Dies kann auf die Ausbildung von stehenden Wellen und der dadurch entste-

henden Schwingungsamplitudenerhöhung innerhalb einer Fläche zwischen den Stegen zurückgeführt werden. Im Frequenzbereich zwischen 600 und 1200  $Hz$  ergibt sich, besonders das Modell 1 lediglich eine geringe Abweichung des Schalldämmmaßes zu einer ebenen Platte. Das Modell 2 weist deutliche Schwankungen in der Schalltransmission auf. Eine Anregung von inneren Flächenmoden führt bei der hier betrachteten Geometrie zu einer hohen Schallabstrahlung.

In Kap. 5 Abschn. 5.1 wurde gezeigt, dass bei höheren Frequenzen innerhalb einer Zelle sich Schwingungsmoden ausbilden, besonders gut abstrahlenden Moden führen zu einem Einbruch der Schalldämmung, wie es für das Modell 2 bei etwa 550  $Hz$ , 660  $Hz$  und 940  $Hz$  zu erkennen ist.

Beispielhaft ist die Betriebsschwingform bei 550  $Hz$  in Abbildung 6.13 dargestellt, bei der etwa 10  $dB$  Schalldämmung vorhanden ist. In dieser Abbildung ist eine innere Fläche in Weiß umrandet, die von den Stegen eingeschlossen wird. In der inneren Fläche bildet sich eine (1,2) Betriebsschwingform aus und mittels der Phase ist eine entgegengesetzte Schwingungsrichtung festzustellen. Trotz des lokalen Druckausgleichs auf der Plattenoberfläche wird mehr Schall transmittiert. Bei Betrachtung der effektiven mittleren Schnelle der Plattenoberfläche des Modells 2, dargestellt in Abbildung 6.14, zeigt sich, dass bei den genannten Frequenzen die Struktur stärker schwingt. Die erhöhte Schnelle der Plattenoberfläche führt insgesamt zu einer vermehrten Schallabstrahlung.

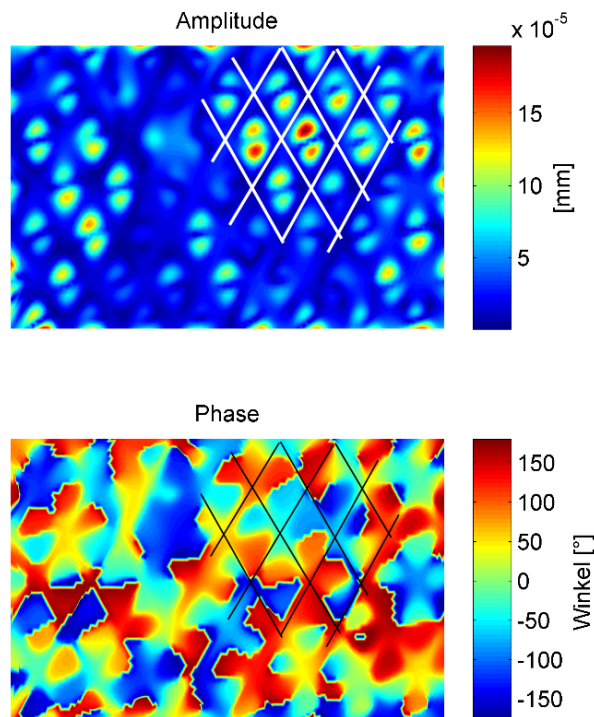
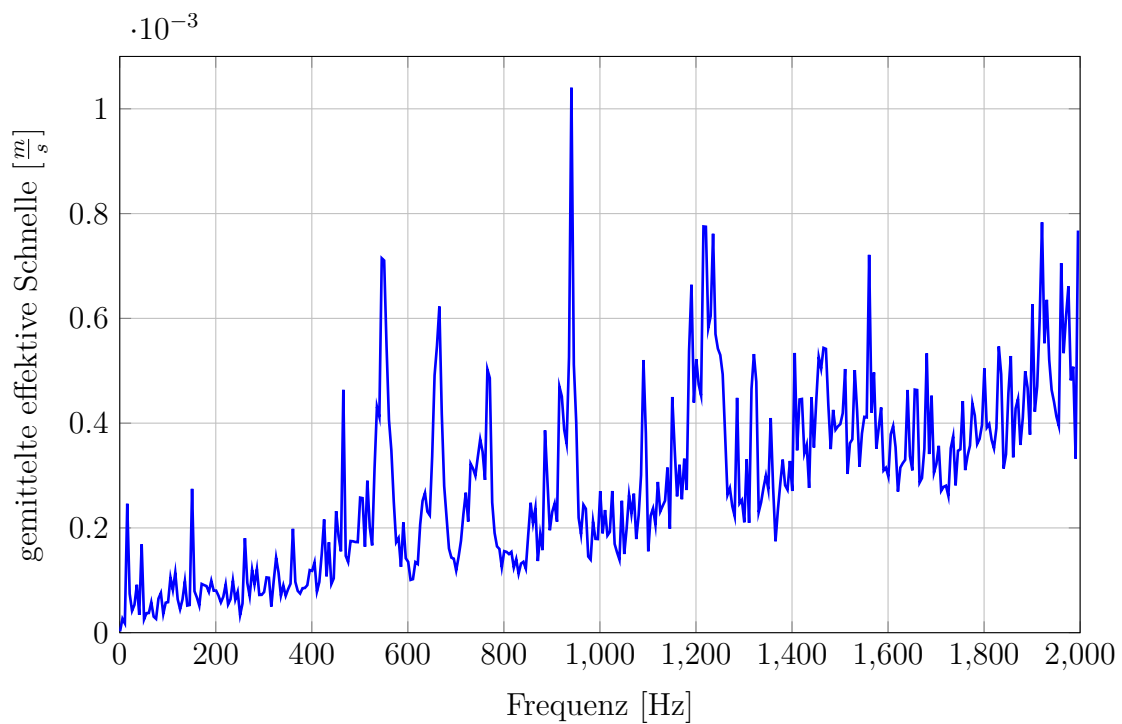


Abb. 6.13: Betriebsschwingform bei 550,6  $Hz$  des Modells 2 bei Schallfeldanregung

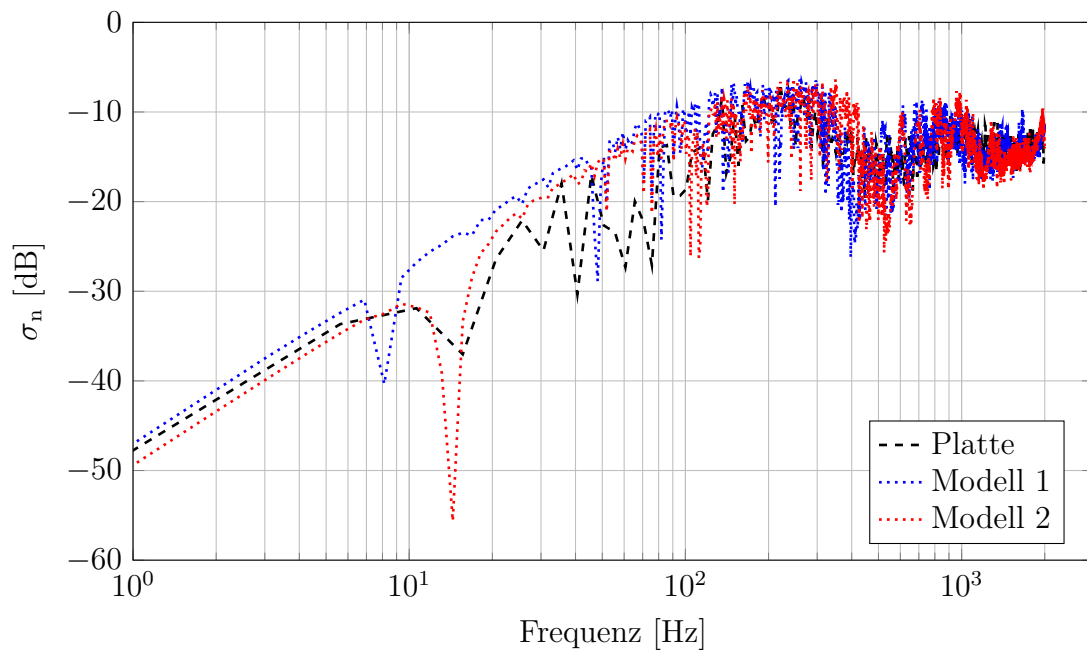
## 6.2.2 Schallabstrahlgrad

Der Abstrahlgrad stellt eine Beziehung zwischen dem optimal abstrahlenden Kolbenstrahler und der tatsächlich abgestrahlten Schalleistung der Platte, nach Formel 3.12, her. Es gibt somit an, wie viel we-



**Abb. 6.14:** Mittelwert der effektiven Schnelle der schwingenden Anisogridstruktur Modell 2

niger Schalleistung von der Gridstruktur abgestrahlt wird, als von einem akustisch kurzgeschlossenen Kolbenstrahler mit gleicher mittlerer Schnelle. In logarithmischer Darstellung mittels  $\sigma_n = 10 * \log(\sigma)$  wird es Abstrahlmaß genannt.



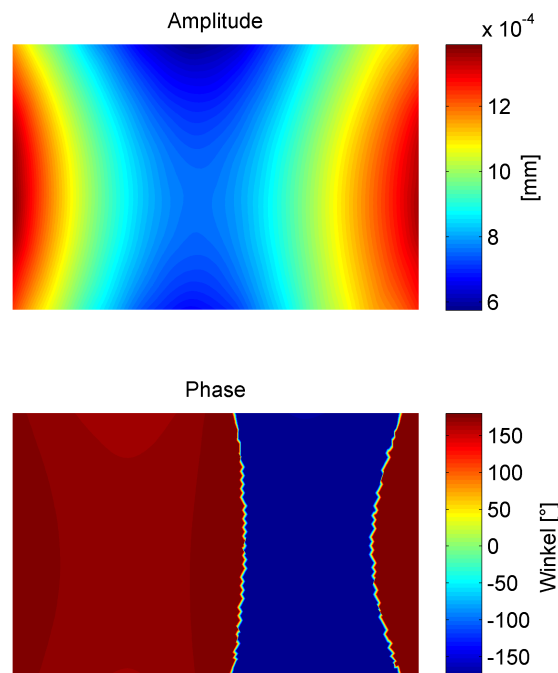
**Abb. 6.15:** Schallabstrahlmaß für beide Modelle mit Vergleich einer ebenen CFK-Platte

$\sigma_n = 0$  besagt, dass zu 100% Schall durch die Strukturschwingungen abgestrahlt wird und gleichphasig schwingende Bereiche der Platte größer sind als die Wellenlänge der entstehenden Dilatationswelle. Für  $\sigma_n < 0$  wird der Einfluss der Strukturschwingung auf die Schallabstrahlung immer geringer. Für den betrachteten Bereich bis 2000  $Hz$  ist keine vollständige Schallabstrahlung aller Eigenformen festzustellen.

Der deutliche Einbruch der Schallabstrahlung bei 8  $Hz$  für das Modell 1 und bei 14  $Hz$  für das Modell 2 zu erkennen. Die Betriebsschwingform des Modells 2 bei der genannten Frequenz ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Sie zeigt, dass die linke und rechte Plattenhälfte in entgegengesetzte Richtung schwingen, sodass ein Druckausgleich auf der Plattenoberfläche entsteht, wodurch die Schallabstrahlung in das Fernfeld geringer ist. Analog gilt dies für das Modell 1.

Eine vollständige Schallabstrahlung,  $\sigma_n = 0$ , ist in dem simulierten Frequenzbereich nicht zu erwarten, da die Biegewellenlänge  $\lambda_B$  und die Abmaße der konphas schwingenden Flächen kleiner ist, als die abgestrahlte Schallwellenlänge  $\lambda_{Luft}$ . So findet lokal ein Druckausgleich auf der Plattenoberfläche statt, der die Schallabstrahlung mindert.

Wie für versteifte Stahlplatten bereits festgestellt wurde, hat die Änderung der Orientierung der Stege und die daraus resultierende Verzerrung der inneren Zellenfläche lediglich einen geringen Einfluss auf das Schallabstrahlmaß von CFK-Gridstrukturen.



**Abb. 6.16:** Betriebsschwingform (2,1) bei 14,4 Hz des Modells 2





## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden verschiedenen Anisogridstrukturen in der FE-Software ANSYS auf das vibroakustische Verhalten hin untersucht. Um unterschiedliche Geometrien der Steganordnung untersuchen zu können, wurde eine parametrische Erstellung der Gridstruktur programmiert. Das in MATLAB erstellte Modell ermöglicht eine Variation der Orientierung der Stege, die auf der Platte appliziert sind. Es kann die Breite und Höhe einer jeden, zwischen den Stegen entstehenden, Zelle variiert werden. Zudem ist die Breite der Stege einzustellen. Zusätzliche Stege, in drei oder vier Richtungen verlaufend und sich somit ergebende andere Formen der Zwischenflächen, wurden nicht in Betracht gezogen.

Die Gridstruktur aus Kohlefaserverbundwerkstoff mit den Stegen aus unidirektionalen Fasern wird in dem FE-Modell als Schalen-Elementen vom Typ *Shell181* simuliert, zu denen der Lagenaufbau und die resultierende Dicke zugeordnet wird. Zuvor durchgeführte Messungen des Schwingungsverhalten einer Gridstruktur durch eine harmonische Anregung bis  $2000\text{ Hz}$  wurden für die Modellvalidierung herangezogen. Dabei ist in dem Modell die Materialdichte, Steghöhe, Randeinspannung und materielle Dämpfung in kleinen, physikalisch sinnvollen Bereichen variiert worden. Die Simulation bei einer lokalen Kraftanregung auf dem Steg gibt ein vergleichbares Übertragungsverhalten, wie es im Versuch gemessen wurde. Entstehende Betriebsschwingungsformen, sowie die über die Platte gemittelte Amplitude sind mit der Simulation in der Art und Höhe nachzurechnen.

Die untersuchten Anisogridstrukturen weisen in der Simulation der abgestrahlten Schalleistung ein von vielen Resonanzen geprägtes Verhalten der Schalltransmission über den Frequenzbereich auf. Für die verzerrte Gitterstruktur mit einem Diagonalenverhältnis der Zellen von etwa 1:2 bei gleicher eingeschlossener Fläche zeigt sich eine stärkere Abhängigkeit von der resultierenden mittleren effektiven Schnelle auf die Schallabstrahlung, als von einer Platte mit rechtwinkligen Innenflächen. Das Verhalten der einzelnen Resonanzen hat einen geringeren Einfluss auf das Schalldämmmaß beider Geometrien der Gridstruktur. Bestimmender auf das Verhalten des Schalldämmmaßes sind die Masse-Steifigkeits- und Dämpfungsbelegung, welche für beide Modelle relativ ähnlich sind, sodass beide Modelle eine vergleichbare Schalldämmung aufweisen. Im unteren Frequenzbereich bis  $600\text{ Hz}$  ist die Schalldämmung für versteifte Platten höher als bei einer ebenen Platte. Eine niedrigere Schalldämmung ist bei höheren Frequenzen ab  $1200\text{ Hz}$  zu beobachten. Die versteifenden Stege begünstigen die Ausbildung von Betriebsschwingformen innerhalb einer Zelle und es ergibt sich ein geringes Schalldämmmaß.

Zwei Variationen der Gridstruktur wurden in der Arbeit im Hinblick auf das Schallabstrahlungsverhalten und die Schalldämmeigenschaften untersucht. Eine Veränderung der Gridgeometrie hat lediglich geringe Auswirkungen auf die Schallabstrahlung. Dabei wurde die zwischen den Stegen eingeschlossene Fläche annähernd gleich belassen. Somit sind weitere Untersuchungen nötig, um weitere Einflussparameter auf das vibroakustische Verhalten einer Gridstruktur herauszuarbeiten. Eine Parameterstudie, in der die Orientierung, Stegbreite und Anzahl der Stege variiert werden, jedoch bei gleicher flächenbezogener Masse und/ oder Gesamtsteifigkeit, ist eine Möglichkeit weitere Einflussfaktoren zu untersuchen.



# Literaturverzeichnis

- [AC13] ARÉVALO, R.E. ; CRUZ, D.F.J.: *Aircraft fuselage made out with composite material and manufacturing processes*. <http://www.google.com/patents/EP2589532A2?cl=en>. Version: Mai 2013. – EP Patent App. EP20,110,763,746
- [AIR11] AIRBUS, Group: *First A350 XWB Forward Fuselage shaping up*. Version: 2011. [http://northamerica.airbus-group.com/north-america/usa/Airbus-Defense-and-Space/news/press.20110930\\_airbus\\_a350\\_fuselage.html](http://northamerica.airbus-group.com/north-america/usa/Airbus-Defense-and-Space/news/press.20110930_airbus_a350_fuselage.html), Abruf: 31.08.2015
- [Alb12] ALBRECHT, Sascha: *Aufbau und Test einer Model-Updating-Toolbox mit MATLAB und ANSYS*, Universität Magdeburg, Studienarbeit, 2012
- [Ans15] ANSYS (Hrsg.): *ANSYS Mechanical APDL 14.0*. Ansys, 2015. – User Guide
- [Ber74] BERNOT, J.: *Machine and method for producing an expansible cylindrical lattice structure, in particular for a reinforcement of a pipe having a socket*. <https://www.google.com/patents/US3837372>. Version: Sept. 1974. – US Patent 3,837,372
- [Bie03] BIES, C. H. D. A. und Hansen H. D. A. und Hansen: *Engineering Noise Control: Theory and Practice*. Version 3. London : Spon Press, 2003. – ISBN ISBN 0-415-26714-5
- [Bis15] BISAGNI, Chiara: Composite cylindrical shells under static and dynamic axial loading: An experimental campaign. In: *Progress in Aerospace Sciences* (2015). – ISSN 0376-0421
- [Cir15] <http://www.circomp.de/en/products/isogrid.html>
- [Fah91] FAHY, Paolo Frank und G. Frank und Gardonio: *Sound and Structural Vibration*. 2. Auflage. Elsevier, 1991. – ISBN 978-0-12-373633-8
- [Hel15] <http://www.detail.de/inspiration/kunstmuseum-in-duesseldorf-106635.html>
- [Hoh99] HOHE, C. und Becker W. J.; Beschorner B. J.; Beschorner: Effective elastic properties of hexagonal and quadrilateral grid structures / Universität Siegen, Institut für Mechanik und Regelungstechnik. 1999. – Paper
- [Huy96] HUYBRECHTS, Stephen W. Steven M. und Tsai T. Steven M. und Tsai: Analysis and behaviour of grid structures / Department of Aeronautics and Astronautics. 1996. – Paper
- [Huy99] HUYBRECHTS, Steven und Meink Troy E. Steven M.; Hahn H. Steven M.; Hahn: GRID STIFFENED STRUCTURES: A SURVEY OF FABRICATION, ANALYSIS AND DESIGN METHODS / Space Vehicles Directorate, Air Force Research Lab und Boeing Space and Defense, The Boeing Company. 1999. – Paper
- [Huy01] HUYBRECHTS, Troy E.; Wegner Peter M. und Ganley Jeff M. Steven M.; Meink M. Steven M.; Meink: Manufacturing theory for advanced grid stiffened structures / Air Force Research Laboratory. 2001. – Paper

- [Jal13] JALILI, Jamal; Shariyat M.; Jalili N.; Aydrai M.A.B. und Jafari M. Sina; Zamai Z. Sina; Zamai: Experimental and numerical investigation of composite conical shells' stability subjected to dynamic loading / Mechanical Engineering Faculty, Khaje Nasir University of Technology, Tehran, Iran. 2013. – Forschungsbericht
- [Ker14] KERSTING, Robert: *Leichtbau für Turbomaschinen*. <http://www.ipk.fraunhofer.de/futur/magazin/industrie-40/article/leichtbau-fuer-turbomaschinen/>. Version: 2014, Abruf: 02.09.2015. – Fraunhofer IPK
- [Koh12] KOHLHUBER, Markus M.: *Ausbreitung elastischer Wellen in komplexen dünnwandigen Strukturen*. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2012
- [Kol06] KOLLMANN, Thomas Franz und Angert R. Franz Gustav; Schösser S. Franz Gustav; Schösser: *Praktische Maschinenakustik*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006. – ISBN 978-3-540-30975-8. – Schriftreihe: VDI-Buch
- [Lan14] LANGHOF, Carsten: *Schalldämmung strukturierter Bleche*, Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Dissertation, 2014
- [Mös12] MÖSER, Michael: *Technische Akustik*. 9. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer, 2012. – ISBN 978-3-642-30932-8
- [Sch07] SCHÜRMMANN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Version 2. Berlin : Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-72190-1
- [Sin14] SINAMBARI, Stephan Gh. Raza und S. Gh. Raza und Sentpali: *Technische Akustik*. 6. Auflage. Wiesbaden : Springer, 2014. – ISBN 978-3-540-71386-9
- [Sin15] SINAPIUS, Michael: *Experimentelle Modalanalyse*. Vorlesungsfolien, April 2015
- [Sly77] SLYSH, P.: *High strength composite structure*. <https://www.google.com/patents/US4012549>. Version: 15. März 1977. – US Patent 4,012,549
- [Unr15] UNRUH, Oliver: Sound Radiation Properties of Complex Modes in Rectangular Plates: A Numerical Study / German Aerospace Center DLR. 2015 (Volume 101). – Journal of the European Acoustics Association
- [Vas01] VASILIEV, V.A. und Rasin A. V.V.; Barynin B. V.V.; Barynin: Anisogrid lattice structures - survey of development and application / Central Institute of Special Machine Building. 2001. – Paper
- [Vas06] VASILIEV, A.F. V.V. und R. V.V. und Razin: Anisogrid composite lattice structures for spacecraft and aircraft applications / Central Institute of Special Machine Building. 2006. – Paper
- [Vas12] VASILIEV, V.A. und Razin A. V.V.; Barynin B. V.V.; Barynin: Anisogrid composite lattice structures - Development and aerospace applications / Central Institute of Special Machinery, Moskau. 2012. – Paper
- [Wal91] WALLER, Reinhard Heinz und S. Heinz und Schmidt: *Schwingungslehre für Ingenieure: Theorie, Simulation, Anwendung*. 1. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig, 1991. – ISBN 3-343-00580-0

- [Wod03] WODENSENBET, Samuel und Pang Su-Seng Eyassu; K. Eyassu; Kidane: Optimization for buckling loads of grid stiffened composite / Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University. 2003. – Forschungsbericht