



Eiserkennung auf Grundlage von Körperschallwellen

Studienarbeit

an der Technischen Universität Braunschweig

Verfasser: Leonard Vier
im Studiengang: Maschinenbau
Matr.-Nr.: 4684138

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

Betreuer: Dipl.-Ing. Christian Mendig

Betreuer: Dr.-Ing. Naser Al Natsheh

Bearbeitungszeitraum: 4 Monate und 2 Wochen

Abgabedatum am: 25.02.2017

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	IV
Nomenklatur	V
Aufgabenstellung	VI
1. Vorbetrachtungen	1
1.1. Einleitung.....	1
1.2. Stand der Technik und Motivation.....	2
1.3. Fragestellung und Struktur der Arbeit	4
2. Grundlagen.....	6
2.1. Vereisungsproblematik	6
2.2. Körperschallwellen	8
2.2.1. Dispersion von Lambwellen und horizontalen Scherwellen	9
2.2.2. Amplitudenabschwächung.....	12
2.2.3. Eiseinfluss auf die Wellenausbreitung	14
2.3. Piezowandler	15
2.3.1. Effekt	15
2.3.2. Aktoren für die Wellenanregung.....	17
2.3.3. Wellenübertragungsverhalten	18
2.4. Signalverarbeitung	21
3. Stand der Forschung.....	23
4. Konzept.....	27
5. Berechnung von Dispersionseigenschaften	31
6. Voruntersuchungen.....	39
6.1. Automatisierter Messablauf mit <i>LabVIEW</i> ®	39
6.2. Vorbetrachtungen zu Zeitsignalen und Amplitudengängen	42
6.3. Auswirkung der Anregungsbandbreite	49
6.4. Reflexionsunterdrückung	53
6.5. Anregung mittels Gleitsinus	59
6.6. Eisapplikation	61
6.7. Zusammenfassung.....	65
7. Untersuchungen.....	67
7.1. Präparation der Versuchsplatte	67
7.2. Kontamination mit Eis	73
8. Ergebnisse	78
8.1. Temperatureinfluss	79

8.2. Eiskontamination.....	83
8.2.1. Amplitudenabschwächung.....	83
8.2.2. Dispersionsänderung.....	85
8.2.3. Gleitsinus.....	89
8.2.4. Bruch und Delamination	91
9. Diskussion der Ergebnisse	96
10. Resümee.....	102
11. Darstellungsverzeichnis.....	104
12. Literaturverzeichnis.....	107
13. Anhang.....	112
A) Separationslänge von S0 - und A0 -Lambwellenpaketen.....	112
B) Materialparameter	112
C) Berechnete Dispersionsdiagramme der CFK-Platte	113
D) Temperatureinfluss auf die d31 -Konstante der Piezokeramik.....	117
E) Extrapolation für die Auswertung aus Kapitel 8.2.4.....	118
F) Digitaler Anhang	119

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Ausführungen, die anderen veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, habe ich kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Fassung noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

Nomenklatur

Abkürzungen

CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
FFT	von eng. <i>fast fourier transformation</i> „schnelle Fourier-Transformation“

Lateinische Symbole

A	Amplitude
A_i	Antisymmetrischer Lambwellenmode der Ordnung i
c_g	Gruppengeschwindigkeit
c_l	Longitudinalgeschwindigkeit
c_p	Phasengeschwindigkeit
c_t	Transversalgeschwindigkeit
d	Plattendicke
E	Elastizitätsmodul
\bar{E}	Elektrische Feldstärke
f	Frequenz
G	Schubmodul
I_e, I_r	Einfallende und reflektierte Energie einer Welle
k	Kreiswellenzahl
l	Übertragungsweg
n	Periodenanzahl
R	Reflexionsgrad
s	Separationslänge: Weg nach dem Wellenpakete klar räumlich getrennt sind
S_i	Symmetrischer Lambwellenmode der Ordnung i
s_n	Standardabweichung einer Stichprobe
SH_i	Horizontaler Scherwellenmode der Ordnung i
t	Zeit
Z_i	Schallkennimpedanz des Materials i
x	Wegkoordinate
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert

Griechische Symbole

ε	Dehnung
ν	Querkontraktionszahl
λ	Wellenlänge
ρ	Dichte
ω	Kreisfrequenz



Studienarbeit
für
Herrn Leonard Vier
Matr.-Nr.: 4684138

Thema: Eiserkennung auf Grundlage von Körperschallwellen

Hintergrund:

Im Projekt SuLaDI (Super Large Droplet Icing) forschen das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und die Technische Universität Braunschweig gemeinsam an neuen Lösungsansätzen zur Vermeidung, Erkennung und Entfernung von Flugzeugvereisung.

Für die Eiserkennung ist ein Ansatz denkbar, bei dem nach dem Sender-Empfänger-Prinzip Körperschallwellen übertragen werden. Bei Vorhandensein von Eisansatz kann durch Auswertung des vom Empfänger generierten elektrischen Spannungsverlaufs auf das Vorhandensein von Eis, die Eisdicke und auf die Eisart geschlossen werden. Hierzu sind der Amplitudenverlauf und der Frequenzgang des empfangenen Zeitsignals bei Anregung mit einem Gleitsinus hinsichtlich der Parameter Eisansatz, Eisdicke und Eisart zu untersuchen. Bei Anregung einer geführten Welle sind der Amplitudenverlauf, die Änderungen der Frequenz, der Gruppen- und Phasengeschwindigkeit einzelner Moden auf die genannten Größen zu untersuchen. Grundlage hierfür bilden Versuche an einer Platte aus CFK oder Aluminium. Die Ausbreitung der geführten Wellen mit und ohne Eisansatz ist anhand einer Berechnung mit den experimentell ermittelten Werten hinsichtlich der zu untersuchenden Parameter zu vergleichen.

Aufgabenstellung:

- Literaturrecherche zum Thema Eiserkennung und Charakterisierung mittels Ultraschall und geführten Wellen
- Stand der Technik bei der Eiserkennung darstellen
- Festlegung der Randbedingungen für die Versuche
- Untersuchung des Einflusses von aufgefrorenem Wasser auf die genannten Parameter bei Anregung mittels Gleitsinus und geführter Wellen
- Berechnung der Ausbreitung von Lambwellen mit und ohne Eisansatz
- Vergleich von berechneten und experimentell bestimmter Ausbreitung
- Schritthaltende Dokumentation

Die Arbeiten werden am Institut für Adaptronik und Funktionsintegration durchgeführt. Für die Versuche können die institutseigene Werkstatt, die Tiefkühlkammer, das Fertigungslabor, der Autoklav, der Enteisungsprüfstand, sowie die Versuchseinrichtungen des DLR-Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik genutzt werden.

Die Betreuung seitens des DLR übernimmt Herr Dipl.-Ing. Christian Mendig. Herr Dr.-Ing. Naser Al Natsheh übernimmt die Betreuung seitens des IAF.

Änderungen der Aufgabenstellung sind nur mit Zustimmung des IAF möglich. Die Studienerarbeit ist fristgemäß elektronisch im WISA-Portal und gebunden in doppelter Ausfertigung im Institut für Adaptronik und Funktionsintegration der TU Braunschweig einzureichen.

Hiermit bestätige ich den Empfang der Aufgabenstellung:



Leonard Vier

Bearbeitungszeit: 4 Monate

Ausgegeben am: 11.10.16

Abgegeben am:



Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

1. Vorbetrachtungen

1.1. Einleitung

Eisbildung an Flugzeugtragflächen stellt eine erstzunehmende Gefährdung in der Luftfahrt dar und wurde als Ursache zahlreicher Flugzeugabstürze identifiziert. Bereits dünne Eisschichten auf den Tragflächen stören empfindlich deren lamellare Umströmung und verringern in Konsequenz den Auftrieb, erhöhen den Luftwiderstand, als auch den Treibstoffbedarf und schränken die Manövrierfähigkeit ein [1, 2]. Durch das Eis resultiert zusätzlich eine höhere Masse, die jedoch im Vergleich zu den geänderten Strömungsbedingungen nur einen geringen Effekt hat. Vereisungsbedingungen können am Boden oder während des Fluges auftreten. Dabei existieren verschiedene Mechanismen der Eisbildung, die Eisschichten mit stark unterschiedlichen Eigenschaften hervorbringen. Am Boden verursachen kleine Frostpartikel, Schnee, gefrierender Regen oder deren Kombination einen Auftriebsverlust, der ein Abheben unterbinden kann. Zwei von vielen Beispielen sind der *Air Florida Flug 90* und der *Air Ontario Fluge 1363*. Beide Flugzeuge verunfallten unmittelbar nach dem Start, unfähig weiter an Höhe zu gewinnen. Die Unfalluntersuchungen schildern gefrorene Ablagerungen auf den Tragflächen als Unfallursache [3, 4]. Zu den Tragödien trugen jedoch auch menschliche Komponenten bei, denn die Piloten schätzten die von dem Eis ausgehende Gefährdung falsch ein. Zur Prävention derartiger Unfälle ist unmittelbar vor dem Start eine Enteisung vorgesehen, die in den angeführten Beispielen nicht oder nur unzureichend erfolgte.

Ein anderer Mechanismus der Eisanlagerung tritt während des Fluges auf. Die im Flug auftretende Eisbildung wird bereits intensiv in den 1980er Jahre von der *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) untersucht [5]. In Wolken liegt Wasser in einem weiten Temperaturbereich unter 0 °C als unterkühlte Flüssigkeit vor und kann im Kontakt mit der Flugzeugaußenhaut gefrieren. Abhängig von der Temperatur und Tropfengröße bildet sich verschiedenartiges Eis aus, das auch die Aerodynamik unterschiedlich stark beeinflusst. Unter anderem wächst ausgehend von der Staukante der Tragfläche eine Eisschicht auf, von der je nach Eisart und Zuwachsrates eine Gefährdung ausgeht. Daher müssen Flugzeuge, die unter Vereisungsbedingungen betrieben werden, über Maßnahmen zur Eibeseitigung oder Eisverhinderung verfügen. Dennoch gibt es Unfälle, wie die des *Eagle Flight 4184* [6], die auf Vereisung im Flug zurückzuführen sind. Ursächlich ist die Kontamination mit besonders großen unterkühlten Tropfen, sogenannten „*Supercooled Large Droplets*“ (SLD).

Die Beispiele verdeutlichen, dass Eis an kritischen Oberflächen eines Flugzeugs zeitnah detektiert und entfernt werden muss, um so den effizienten und sicheren Betrieb zu gewährleisten. Gerade der Eisdetektion kommt eine Schlüsselrolle zu. Mit genauer Kenntnis über den Anlagerungsort und die Eisart können Fehleinschätzungen vermieden und das Eis gezielt und effektiv entfernt werden. Der Stand der Technik bei der Eiserkennung deckt sich jedoch nicht mit der Forderung, vereiste Strukturstellen direkt zu überwachen. Daten über den Anlagerungsort, sowie die Eisart und Eisdicke werden nicht erhoben und unterbinden

es, einer Vereisung gezielt zu begegnen. Die Entwicklung und Untersuchung neuer Verfahren zur Eisidentifikation ist erforderlich und Gegenstand dieser Arbeit. Ein vielversprechender neuartiger Ansatz sind von der Flugzeugaußenhaut geführte Schallwellen. Die Wellen laufen über einen Bereich der Struktur, interagieren mit Eis und können für den Bereich Auskunft über das Vorhandensein von Eis, die Eisdicke und Eisart geben [7]. Im nächsten Kapitel gibt der Stand der Technik einen Überblick über die Flugzeugenteisung am Boden und in der Luft. Die Motivation und Notwendigkeit einer neuartigen Lösung für die Eisdetektion wird anhand der Vor- und Nachteile verschiedener Eissensoren herausgearbeitet, um im nächsten Schritt die Forschungsfrage der Arbeit zu entwickeln.

1.2. Stand der Technik und Motivation

Der Pilot identifiziert Eisansätze am Boden auf Sicht und initiiert bereits auf Verdacht die gründliche Entfernung. Enteisungsflüssigkeit, ein mitunter erhitztes Gemisch aus Glykol und Wasser, wird unmittelbar vor dem Start flächendeckend auf das Flugzeug aufgebracht. Dadurch schmilzt jegliches Eis und der Gefrierpunkt sinkt abhängig vom Glykolanteil auf bis zu -57°C . Zusätzlich können Verdickungsmittel beigemischt werden, die für verbesserte Haftung sorgen und innerhalb einer gewissen Vorhaltezeit präventiv gegen erneute Vereisung wirken. Üblich sind auffällige Einfärbungen der Enteisungsflüssigkeit, damit keine Bereiche übersehen oder mehrfach enteist werden. Die Entscheidung, ob und in welchen Mischungsverhältnissen enteist wird, obliegt ausschließlich dem Piloten. [8]

Besonders kritisch sind Flügelvereisungen während des Fluges. Eine gängige Enteisungsmethode bei Verkehrsflugzeugen mit Strahltriebwerken ist es die Flügelvorderkanten und Triebwerkseinlässe zu beheizen. Die Heizung wird durch heiße Zapfluft der Triebwerke gespeist. Da moderne Triebwerke jedoch zunehmend effizienter und leichter werden, übernehmen elektrische Heizmatten das Erwärmen, mit dem zusätzlichen Vorteil einer wesentlich verkürzten Ansprechzeit. Kleinere Propellermaschinen sind hingegen oft mit aufblasbaren Gummibälgen an den Staukanten ausgestattet, die beim Aufblasen Eis absprengen. Weniger verbreitete Systeme pumpen Flüssigkeit durch ein netzartiges Gewebe, das in die Flügelvorderkante integriert ist. Aktiviert der Pilot die Enteisung, so tritt Alkohol aus, fließt über den Flügel ab und löst das Eis. [9]

Rückgestreute Laserstrahlung [10], Mikrowellen [11] oder Radar [12] werden genutzt, um den Luftraum vor dem Flugzeug auf Vereisungsbedingungen hin zu überwachen, so dass diese vermieden werden können. Weit verbreitet sind Wetterradarsysteme, wie die Produktfamilie *WXR-2100* von *Rockwell Collins*, die unter anderem im Airbus A320 und A330 eingesetzt werden. Die meteorologischen Bedingungen für die Eisbildung lassen sich allerdings nicht immer umfliegen, gerade bei ausgedehnten Gebieten in denen Vereisung auftritt. Zur Eiserkennung an der Flugzeugstruktur ist eine große Bandbreite verschiedener Systeme im Einsatz: Es existieren spezielle Lampen, die unter anderem mit einem Lichtbogen [13] die Flügelkanten beleuchten, um so die visuelle Inspektion zu unterstützen. Ein Eissensor des Herstellers *Aerospace Lucas Limited* arbeitet rein mechanisch und besteht aus einem rotierenden Zapfen, der aus dem Rumpf in die Strömung ragt. In engem Abstand zu dem Zapfen liegt eine Abstreifkante. Vereist der Zapfen, detektiert das System das

notwendige Drehmoment zum Abstreifen des Eises und meldet dem Piloten den Vereisungszustand [14]. Ein optischer Eisdetektor [15], wie er von der *New Avionics Corporation™* vertrieben wird, ist an der Flugzeugaußenhaut montiert und sendet einen Lichtstrahl über eine kurze Übertragungsstrecke hin zu einem Sensorelement. Eis im Übertragungspfad ändert die Transmission des Lichtes und kann so erfasst werden. Das aktuell am meisten genutzte System besteht jedoch aus einer in Resonanz vibrierenden Sonde, die überwiegend am Flugzeugrumpf angebracht und dem Luftstrom ausgesetzt ist [16]. Vereist der Sensor, so ändert sich die Schwingungsfrequenz proportional zur akkumulierten Eismasse. Aus der Frequenzverschiebung kann auf den Vereisungszustand und über die Zeit auf die Zuwachsrates rückgeschlossen werden. Ab einer festgelegten Vereisungsmasse wird die Sonde erhitzt, das Eis abgetaut und ein weiterer Aufnahmezyklus angeschlossen, so dass die Sonde stets in einem Bereich optimaler Sensitivität betrieben wird. Weit verbreitet sind derartige Vibrationssensoren der Firma *Goodrich UTC Aerospace Systems*, die beispielsweise an dem *Airbus A330* und *A340* verbaut werden.

Alle aufgeführten Enteisungsmethoden sind an Nachteile gebunden: Thermische Enteisung ist effektiv, hat allerdings einen erheblichen Energiebedarf. Elektro-thermische Systeme benötigen zudem eigene Transformatoren, die zusätzliches Gewicht bedeuten. Pneumatische Gummibälge sind energieeffizient, leiden aber unter Materialermüdung. Daher sind kurze Wartungsintervalle notwendig und die Lebensdauer beschränkt sich auf wenige Jahre, bis diese komplett ausgewechselt werden müssen. Während des Fluges eingesetzte Flüssigkeitssysteme stellen einen Kompromiss aus Zusatzgewicht und limitierter Einsetzbarkeit dar. Wie Abstürze unmittelbar nach dem Start zeigen, birgt die Sichtprüfungen und alleinige Entscheidungsgewalt des Piloten ebenso ein Risiko. Daneben sind die Enteisungsflüssigkeiten auf Glykolbasis, wie sie am Boden aufgebracht werden, gefährlich für die Umwelt, weswegen ein übermäßiger Gebrauch zu vermeiden ist. Nicht zuletzt nimmt Enteisungsflüssigkeit besonders bei zugesetzten Verdickungsmitteln Einfluss auf die Aerodynamik, eine Widerstandserhöhung und ein Auftriebsverlust sind messbar [17]. Genaue Kenntnis über den Vereisungszustand ist notwendig, damit Fehlinterpretationen seitens der Piloten vermieden und die Enteisung ausschließlich benutzt wird, wenn diese auch gebraucht wird. Nur so kann der Energieverbrauch von thermischen Enteisungssystemen reduziert, die Lebensdauer pneumatischer Systeme verlängert und die Umweltbelastung durch Enteisungsflüssigkeit gemindert werden. Die dargestellten Eissensoren zeigen zwar Sensitivität für Eis, geben jedoch nicht über den gesamten Vereisungszustand des Flugzeugs Aufschluss. Ein erheblicher Nachteil ist, dass alle Eiserkennungssysteme ausschließlich punktuell und mit Ausnahme des Vibrationssensors [16] binär Auskunft über das Vorhandensein von Eis geben. Manche der Sensoren stellen zusätzlich Ansprüche im Hinblick auf ihre Implementierung und müssen, wie der Vibrationssensor, der drehende Zapfen oder der optische Sensor, an der Außenhaut montiert werden, wo sie die Aerodynamik beeinflussen. Wegen der Aerodynamik und nicht zuletzt dem begrenzten Bauraum innerhalb der Flügelvorderkante, kann der derzeit überwiegend genutzte Vibrationssensor nicht direkt hier angebracht werden und sitzt in der

Regel am Rumpf oder unter dem Flügel. Dem Piloten wird lediglich der Vereisungszustand des Sensors gemeldet, der nur indirekt auf Eis an aerodynamisch relevanten Stellen hindeutet. Des Weiteren gibt es keine Rückmeldung über einen Erfolg der daraufhin eingeleiteten Enteisung und die Systeme werden zu oft, zu lang oder im schlimmsten Fall gar nicht aktiviert. Daher besteht starkes Interesse an einem Eiserkennungssystem, das direkt an kritischen Stellen den Eisansatz detektiert. Es soll ferner in der Lage sein, die Eisdicke und Eisart zu erfassen, dabei jedoch nicht die aerodynamischen Eigenschaften stören. Zusätzliche Informationen über den Anlagerungsort und die Eisdicke ermöglichen es, die Enteisung auf den konkreten Vereisungszustand abzustimmen. Bereits am Boden wird der Pilot in seiner Entscheidung unterstützt, ob und in welchem Mischungsverhältnis Enteisungsflüssigkeit aufgebracht wird. Erst ein System dieser Art ermöglicht eine (Teil-)Automatisierung der Enteisung. So kann eine Tragflächenheizung beispielsweise segmentiert und in Kombination mit mehreren Überwachungsbereichen ausgeführt werden, um so die Effizienz weiter zu steigern.

1.3. Fragestellung und Struktur der Arbeit

Eine vielversprechende Alternative zu den herkömmlichen Eissensoren stellt die Technologie geführter Ultraschallwellen dar. Die Idee ist, durch die Struktur propagierende Wellen zu nutzen, die mit dem Eis interagieren. Nach dem Sender-Empfänger-Prinzip dient beispielsweise die Außenhaut einer Tragfläche als wellenleitende Übertragungsstrecke. Am Sender generierte Wellen laufen über diese Strecke und wechselwirken mit dem Eis. Dabei ändert sich das Übertragungsverhalten der Wellen, so dass aus dem Empfängersignal Rückschlüsse auf das Vorhandensein von Eis, die Eisdicke und Eisart gezogen werden können. Die Komponenten einer solchen Aktor-Sensor-Strecke sind in der folgenden Abbildung gezeigt.

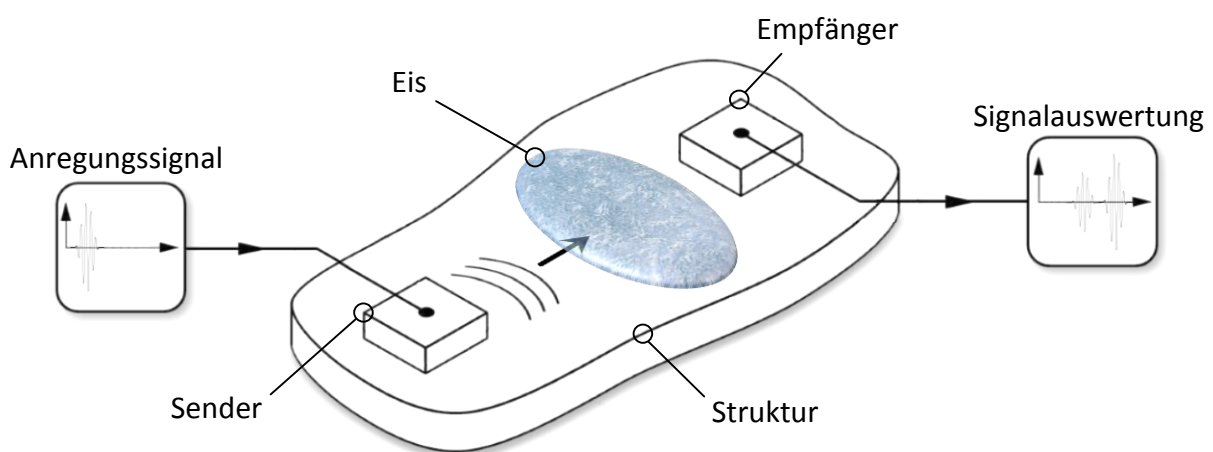


Abbildung 1: Komponenten der Aktor-Sensor-Strecke nach [26, p. 7].

Ein Vorteil eines derartigen Systems liegt in der Montage innerhalb der Tragfläche eines Flugzeugs, so dass die Aerodynamik nicht gestört wird. Darüber hinaus breiten sich Wellen über weite Strecken in der Struktur aus und decken so großflächige Überwachungsbereiche direkt an aerodynamisch relevanten Stellen ab. Die Technik geführter Ultraschallwellen wird

als Teil des Projektes SuLaDI (*Super Large Droplet Icing*) an der *Technischen Universität Braunschweig* und dem *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) erforscht. Die vorliegende Arbeit geht der Frage nach, wie sich Eisansätze mit einer variierenden Eisdicke an einer Platte aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) auf das Übertragungsverhalten von Körperschallwellen auswirken. Priorisiert wird zunächst das grundlegende Verständnis der Wellenausbreitung in dünnen Faserverbundstrukturen, wie sie als Außenhaut zunehmend in der Luftfahrt eingesetzt werden. In dem anisotropen Verbundmaterial liegt eine erste Herausforderung, die diese Arbeit von anderen abgrenzt. Die Wellenausbreitung in Verbundwerkstoffen wurde bislang nur in Grundzügen im Hinblick auf die Eisdetektion untersucht. Das Ziel des ersten Kapitels ist es, Grundlagen der Vereisungsproblematik, Aktorik und Sensorik, sowie der Interaktionsmechanismen von Wellen mit Diskontinuitäten zu erklären. Eine wichtige Teilaufgabe liegt im nächsten Schritt darin, den Stand der Forschung zu ermitteln und in Bezug zu dieser Arbeit zu setzen. Es folgt die methodische Untersuchung der Fragestellung. Der Fokus liegt dabei zunächst auf Berechnungen, die das Verhalten der Wellen unter einem Eisansatz prognostizieren. Bevor die Ergebnisse in einem Modellversuch experimentell validiert werden, sind jedoch Voruntersuchungen notwendig, in denen praktische Erfahrung im Umgang mit der Akteur-Sensor-Strecke gesammelt wird. Die hier gewonnenen Kompetenzen fließen in die Auslegung des Modellversuches ein. Die Wellenausbreitung wird systematisch hinsichtlich einer Eisablagerung untersucht, mit den Berechnungen verglichen und dahingehend diskutiert, wie die gewonnen Erkenntnisse das Forschungsgebiet um die Eiserkennung auf Grundlage von geführten Wellen ergänzen.

2. Grundlagen

Das vorliegende Kapitel konzentriert sich auf die Grundlagen zu den einzelnen Komponenten der Aktor-Sensor-Strecke. Das Augenmerk richtet sich auf das Übertragungsverhalten von Ultraschall- bzw. Körperschallwellen. Der Begriff Körperschall beschreibt allgemein die Wellenausbreitung in einem Festkörper, wohingegen Ultraschallwellen definitionsgemäß und unabhängig vom Medium oberhalb der Hörfrequenz des Menschen ($> 16\text{ kHz}$) vorliegen. Da diese Arbeit die Wellenausbreitung in Festkörpern vorwiegend bei Frequenzen $> 16\text{ kHz}$ betrachtet, werden die Begriffe Körper- und Ultraschallwellen synonym verwendet. Im Fokus stehen verschiedene Körperschallwellen, wie die in dünnen Platten vorkommenden Lambwellen und horizontal polarisierte Scherwellen, deren Eigenschaften im Hinblick auf die Eiserkennung beschrieben werden. Zunächst widmet sich das Kapitel jedoch der Vereisungsproblematik. Die Vereisungsmechanismen zu verstehen, bildet eine wichtige Voraussetzung verschiedene Eistypen unter Laborbedingungen naturgetreu nachzubilden. Darüber hinaus werden die Risiken der Vereisung anhand von Beispielen verdeutlicht.

2.1. Vereisungsproblematik

Nominell liegt der Gefrierpunkt von Wasser bei 0 °C . In der Atmosphäre vorhandenes Wasser gefriert jedoch nicht immer bei dieser Temperatur, sondern liegt in großen Mengen als unterkühlte Flüssigkeit vor. In diesem metastabilen Zustand genügen kleinste Anregungen, wie Kristallisationskeime oder mechanische Impulse, um die Schmelzenthalpie freizusetzen und einen spontanen Phasenübergang hin zum Eis auszulösen. An der Flugzeugaußenhaut kann sich so unterhalb von 0 °C ein Eisansatz bilden. In welchem Ausmaß und welcher Form es zur Eisbildung kommt, hängt von der Windgeschwindigkeit, der Temperatur, dem Feuchtegehalt der Luft, der Tröpfchengröße und der Expositionszeit ab. Die dabei auftretenden Eisarten können generell in Klareis, Raueis und Mischeis unterschieden werden. [18]

Raueis wird gebildet, wenn sehr kleine unterkühlte Wassertropfen rasch im Kontakt mit der Oberfläche gefrieren. Aufgrund des geringen Durchmessers läuft die Phasenumwandlung nahezu augenblicklich ab und sorgt für eine Mischung kleiner Eispartikel und eingeschlossener Luft. Die gebildete Schicht ist demzufolge rau, opak und hat eine geringe Eigensteifigkeit, weshalb sie einfacher als andere Eisarten zu entfernen ist. Typischerweise wird Raueis bei Temperaturen unter -12 °C gebildet und konzentriert sich an Staupunkten, wie der Flügelvorderkante. Tests in einem Eiswindkanal und Feldversuche zeigen, dass eine Raueisschicht auf den Tragflächen, die in ihrer Dicke und Rauigkeit Sandpapier ähnelt, den Auftrieb bereits um 30 % reduzieren kann [1].

Treffen größere Tropfen auf die Flugzeugaußenhaut, gefrieren diese nicht sofort. Die Tropfen können eine Laufstrecke zurücklegen, bevor sie auffrieren und eine Klareisschicht hervorbringen. Wenn die Tropfen größer sind und der Gefrierprozess langsam abläuft, werden die Tropfen gleichmäßiger verteilt und führen nach kurzen Vereisungsdauern zu homogenen und transparenten Klareisschichten, die die Tragflächenvorderkante umschließen. Typischerweise bildet sich Klareis bei Temperaturen die knapp unterhalb des

Gefrierpunktes liegen. Moderate Klareisschichten sind kaum zu sehen und so versagt die noch häufig bei kleineren Flugzeugen angewendete Sichtprüfung. Die von dünnen Klareisschichten ausgehende Gefährdung ist beachtlich, Addy et al. [2] berichten von einem Auftriebsverlust von 24 % bei einer Vereisungsdauer von zwei Minuten. Mitunter treten bei längeren Vereisungsdauern oder stärkeren Vereisungsbedingungen andere charakteristische Eisformen zutage. Abbildung 2 stellt exemplarisch Eisspitzen dar, die auch als *Hörner* bezeichnet werden. Diese können in verschiedenen Formen an der Flügelvorderkante auftreten und werden infolge ihrer robusteren Struktur größer als Raueisstrukturen. Derartige Eisanlagerungen beeinflussen die Aerodynamik drastisch und können fatale Konsequenzen nach sich ziehen, wenn sie nicht rechtzeitig identifiziert und entfernt werden.

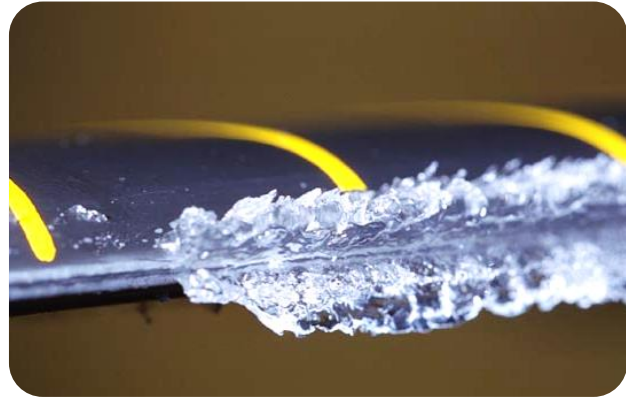


Abbildung 2: In einem Eiswindkanal (NASA Icing Research Tunnel) erzeugte Klareisanlagerung auf einem Rotorblatt [55].

In einem weiten Bereich zwischen den meteorologischen Bedingungen, die einerseits Raueis und andererseits Klareis hervorrufen, entsteht Mischeis. Seine Erscheinung wird wesentlich durch den Anteil von unterkühlten Wassertropfen verschiedener Größe bestimmt. Welche Tropfengröße allerdings bis auf die Struktur vordringt, ist an die lokalen Strömungsverhältnisse gebunden. Die Druckwelle an der Flugzeugnase ist eine andere als vor den Tragflächen und somit werden verschiedene Tropfendurchmesser abgelenkt und verschiedenartiges Eis ausgeprägt. Besonders großvolumige Tropfen führen rasch zu starker Vereisung, da sie wegen ihrer größeren Trägheit weniger von der Strömung abgelenkt werden und die Struktur bedeutend schneller benetzen. Diese werden auch als *Supercooled Large Droplets* (SLD, zu Deutsch: unterkühlte große Tropfen) bezeichnet, haben definitionsgemäß einen Durchmesser von $> 50 \mu\text{m}$ und umfassen daher auch gefrierenden Regen (typ. Tropfendurchmesser: 2 mm) [19, p. 8]. Die Gefahr, die von dieser Vereisung ausgeht, ist immens; denn häufig wird die Vereisung vom Piloten spät erkannt und unterschätzt. Ein Beispiel ist der Absturz des *Eagle Flight 4184*, der direkt auf die SLD-Vereisung zurückzuführen ist [6]. Dabei müssen seit 1973 Transportflugzeuge für Flüge unter Eisbedingungen spezielle Zulassungsvoraussetzungen erfüllen. Wie in den Zertifizierungsspezifikationen (§ 25.149 [4]) vermerkt, muss das Flugzeug in der Lage sein, unter kontinuierlichen und periodisch maximalen Vereisungsbedingungen sicher zu funktionieren. In den Bedingungen werden unter anderem der Wassergehalt von Wolken und deren durchschnittliche Tropfengröße spezifiziert. Bis vor kurzem umfasste die Spezifikation lediglich Tropfendurchmesser bis $50 \mu\text{m}$ und demzufolge war kein Unbedenklichkeitsnachweis für SLD-Vereisung (\emptyset ab $50 \mu\text{m}$) gegeben. Die Europäische Agentur für Flugsicherheit hat die Richtlinien im Jahr 2016 um die SLD-Vereisung ergänzt [20]. Mit dieser Neuerung geht das aktuelle Interesse der Luftfahrtindustrie einher, neue Lösungen für die Vereisungsproblematik zu erforschen.

Die Vielfältigkeit der Eisanlagerung verdeutlicht, dass ein einzelner Sensor unmöglich stellvertretend für die gesamte Oberfläche eines Flugzeugs Eis identifizieren kann. Die direkte Überwachung aerodynamisch empfindlicher Stellen mit einem Informationsgewinn über den Anlagerungsort, den Eistyp und die Schichtdicke ermöglicht eine speziell darauf angepasste Reaktion. Fatale Unfälle, wie der des *Eagle Flight 4184* hätten durch eine frühzeitige Eiserkennung womöglich verhindert werden können.

2.2. Körperschallwellen

Die folgenden Ausführungen beruhen auf den Ausarbeitungen von [21, p. 4 ff, 22, p. 7.1 ff]. In der Natur können verschiedene mechanische Wellenphänomene beobachtet werden. Das wohl bekannteste ist die Schallausbreitung in Flüssigkeiten oder Gasen. Es handelt sich dabei um Longitudinalwellen, bei denen die Schwingungsrichtung eines Teilchens parallel zu der Ausbreitungsrichtung der Welle erfolgt. Longitudinalwellen können sich allerdings auch in Festkörpern ausbreiten. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Phasengeschwindigkeit, die im Allgemeinen auch oft als Schallgeschwindigkeit bezeichnet wird. Die Phasengeschwindigkeit von Wellen beschreibt die Geschwindigkeit mit der sich Punkte gleicher Phasenlage ausbreiten und kann durch die Beziehungen $c = \lambda * f$ und $c = \omega/k$ beschrieben werden. Die Phasengeschwindigkeit ergibt sich bei Longitudinalwellen in Festkörpern zu:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (1)$$

In Festkörpern, die eine ausgeprägte Schubsteifigkeit aufweisen, treten zusätzlich Transversalwellen auf, bei denen die Partikeldynamik transversal (von lat. *transversus* „quer“) zur Ausbreitungsrichtung stattfindet. Die Phasengeschwindigkeit der Transversalwellen berechnet sich dabei wie folgt:

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

Zu beobachten sind noch weitere Wellentypen, die sich aus der Interferenz longitudinaler und transversaler Wellen unter bestimmten Randbedingungen ergeben. Ein Beispiel sind Rayleigh-Wellen, die an Phasenübergängen, wie der Materialoberfläche auftreten. Die Welle dringt etwa eine halbe Wellenlänge in das Material ein und breitet sich von der Oberfläche geführt aus. Auch die Partikelbewegung ergibt sich als Überlagerung von Längs- und Querschwingungen und ist im Allgemeinen elliptisch.

Im Hinblick auf dünne Plattenstrukturen, die in dieser Arbeit behandelt werden, existieren grundsätzlich zwei, durch die Richtung der Teilchenschwingung charakterisierte Wellentypen. Der erste Typ sind die in Abbildung 3 dargestellten Transversalwellen, deren Hauptkomponente in der Plattenebene schwingt. Man spricht auch von einer horizontal polarisierten Scherwelle, die mit SH (*shear horizontal*) abgekürzt wird. Ist die Platte dünner als eine Wellenlänge, tritt als zweiter Wellentyp eine Abwandlung der oben

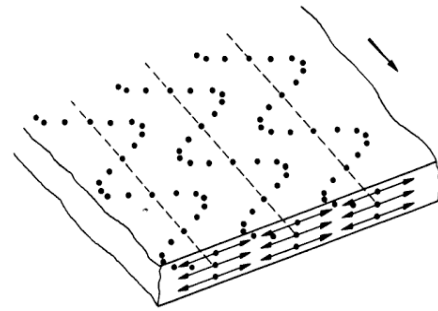


Abbildung 3: Horizontal polarisierte Scherwelle in einer Platte [21].

beschriebenen Rayleigh-Wellen auf. Es handelt sich um komplexe Vibrationsmoden, die sogenannten Lambwellen. Die Partikelbewegung dieser Lambwellen hat Komponenten in der Wellenausbreitungsrichtung und senkrecht zur Oberfläche. Lambwellen und horizontale Scherwellen werden oft unter dem Begriff der Plattenwellen zusammengefasst. Wenn Strategien zur Eidentifikation entwickelt werden, ist ein vertieftes Verständnis der Wellenausbreitung und der Interaktionsmechanismen zwischen den Plattenwellen und der Struktur unabdingbar. In diesem Zusammenhang sind sowohl die sogenannten Dispersionseigenschaften der Plattenwellen, als auch die Amplitudenabschwächung entscheidende Größen, die nachfolgend erläutert werden. Der letzte Unterpunkt dieses Kapitels betrachtet den potentiellen Einfluss, den eine Eisanlagerung auf die Wellenübertragung ausübt.

2.2.1. Dispersion von Lambwellen und horizontalen Scherwellen

Horace Lamb beschrieb 1917 erstmals die heute nach ihm benannten Lambwellen [23]. Ausgehend von einer dünnen Platte unendlicher Ausdehnung und isotropen Materialeigenschaften formulierte Lamb, wie eine einfallende Longitudinalwelle teilweise in eine Transversalwelle konvertiert. An den Grenzflächen der Platte reflektieren longitudinale und transversale Wellen unter verschiedenen Winkeln, interferieren und erzeugen eine stehende Welle. Die Welle breitet sich von der Platte geführt als Lambwelle aus. Die Lambwellen existieren in zwei verschiedenen Grundmoden. In Bezug auf die Mittelebene der Platte ist dies der symmetrische S_i -Mode und der antisymmetrische A_i -Mode, der Ordnung i . Die einzelnen Moden können sich dabei völlig unabhängig voneinander ausbreiten. In Abbildung 4a sind die Grundmoden mit ihren elliptischen Partikelbewegungen schematisch dargestellt. Eine wichtige Eigenschaft von Lambwellen ist ihr dispersives Verhalten. Das heißt, die Phasengeschwindigkeit c_p der Moden hängt jeweils von der Frequenz und der Plattendicke ab. Dieses Verhalten wird üblicherweise in Dispersionsdiagrammen dargestellt, in denen die Phasengeschwindigkeit c_p der einzelnen Moden über das Produkt aus Frequenz und Plattendicke $f * d$ aufgetragen wird. Die Dispersionskurven ergeben sich aus der sogenannten *Rayleigh-Lamb-Gleichung*, deren ausführliche mathematische Dokumentation in [24] hinterlegt ist. Die Berechnung der Dispersionskurven erfolgt ausschließlich numerisch und wird separat im Vorfeld der Untersuchungen (4.1.) behandelt. In Abbildung 4b ist exemplarisch ein Dispersionsdiagramm

einer Aluminiumplatte dargestellt. Es wird zunächst isotropes Material betrachtet, da bei anisotropen Materialien eine Reihe weiterer Besonderheiten auftreten.

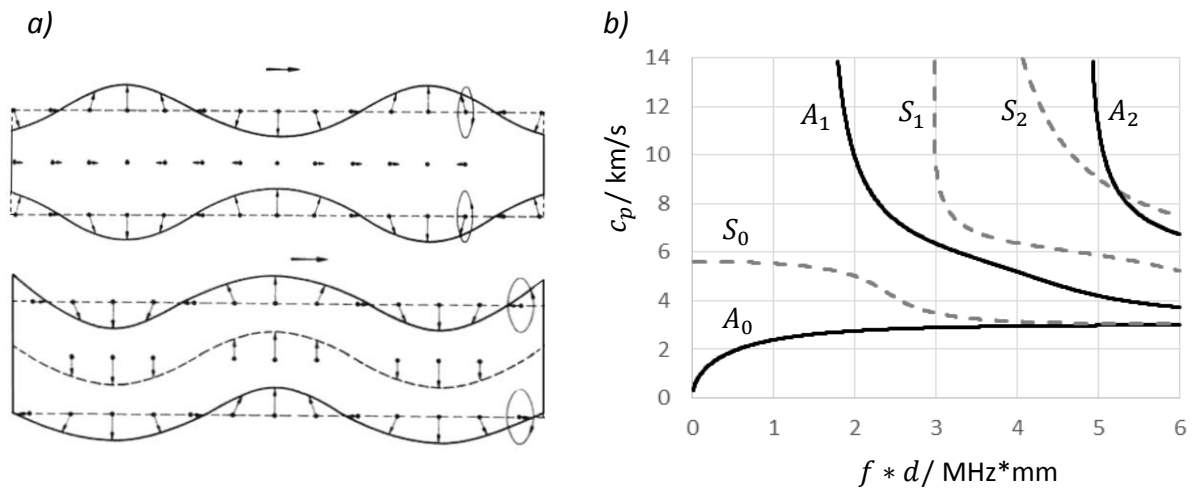


Abbildung 4: a) Schematische Darstellung der Lambwellen-Grundmoden, symmetrisch (oben) und antisymmetrisch (unten) nach [21]. b) Dispersionsdiagramm einer Aluminiumplatte (Materialparameter in Anhang B).

Das Dispersionsdiagramm der Aluminiumplatte zeigt, wie mit steigender Frequenz und Plattendicke mehr Moden parallel in der Platte vorkommen und sich unterschiedlich schnell ausbreiten. Anhand eines Beispiels lässt sich das Dispersionsverhalten veranschaulichen: In einer 1 mm starke Aluminiumplatte werden durch einen Wandler mit einem Sinussignal weniger Perioden und der Frequenz von 1 MHz Wellen angeregt. Das sogenannte Burstsinal kann die beiden Fundamentalmoden A_0 und S_0 anregen (vgl. Abbildung 4b). Ausgehend vom Anregungsort wird eine Wellengruppe ausgesendet, die superponiert aus den beiden Moden besteht. Da die Phasengeschwindigkeit der harmonischen Anteile stark unterschiedlich ist, separiert sich die Gruppe mit der Zeit in eine A_0 - und S_0 -Wellengruppe. Die Wellengruppe des S_0 -Modes breitet sich schneller aus und eilt dem langsameren A_0 -Mode voraus. Weiterhin enthält das Anregungssignal neben seiner Grundfrequenz eine gewisse spektrale Bandbreite (dazu näheres in Kapitel 2.4.). Innerhalb eines Modes existieren daher auch schneller und langsamer fortschreitende Frequenzen und die Wellengruppen „zerfließen“ mit der Zeit (Dispersion von lat. *dispergere* „verteilen, ausbreiten, zerstreuen“). Somit entspricht die Gruppengeschwindigkeit c_g , mit der sich das gesamte Wellenpaket, also die Einhüllende fortpflanzt nicht der Phasengeschwindigkeit. Die Gruppengeschwindigkeit c_g berechnet sich aus der Ableitung der Kreisfrequenz ω nach der Kreiswellenzahl k und beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich das Maximum der Einhüllenden ausbreitet [25, p. 110].

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = c_p + k \frac{dc_p}{dk} \quad (3)$$

Einen zu den Lambwellen analogen multimodalen Charakter besitzen die horizontalen Scherwellen. Die Scherwellenmoden können im Gegensatz zu Lambwellen jedoch einfach

analytisch beschrieben werden. Gleichung (4) zeigt die Beziehung der Phasengeschwindigkeit in Abhängigkeit von Frequenz und Plattendicke. Der Gleichung kann entnommen werden, dass die Lösung des Modes SH_i für $i = 0$ über das Produkt aus Frequenz und Plattendicke konstant ist, also keine Dispersion aufweist. Die Phasengeschwindigkeit entspricht hier genau der Scherwellengeschwindigkeit aus Gleichung (2). Das Dispersionsdiagramm in Abbildung 5 zeigt qualitativ die Phasengeschwindigkeit der Moden SH_0 bis SH_4 über das Produkt aus Frequenz und Plattendicke.

$$c_p = \frac{2c_t f d}{\sqrt{4(f d)^2 - i^2 c_t^2}} \quad (4)$$

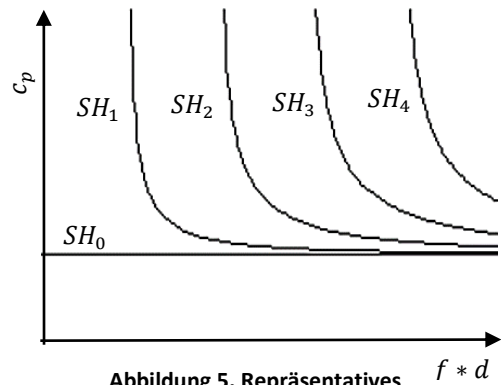


Abbildung 5. Repräsentatives Dispersionsdiagramm horizontal polarisierter Scherwellen nach [7].

Faserverbundwerkstoffe, wie sie als Außenhaut von Flugzeugtragflächen verwendet werden, sind anisotroper Natur. Dieser Besonderheit folgt ein richtungsabhängiges Dispersionsverhalten, da die Dispersion abgesehen von der Frequenz und Plattendicke auch von den elastischen Werkstoffeigenschaften abhängt. Die Arbeit von Schmidt [26, p. 12] verdeutlicht den direkten Zusammenhang der richtungsabhängigen Elastizitätsgrößen zu den Phasengeschwindigkeiten. Für ein CFK-Laminat, das ausschließlich aus unidirektionalen Lagen in einem Winkel von 0° und 90° zusammengesetzt ist, ergeben sich in den Hauptrichtungen für den S_0 -Lambwellenmode maximale Phasengeschwindigkeiten, während in einer Orientierung von 45° Minima vorliegen. Die Ausprägung der anisotropen Dispersion erweist sich zudem als äußerst frequenzabhängig. Das Dispersionsverhalten in einer anisotropen Platte verkompliziert sich weiterhin über eine Kopplung zwischen Lambwellen und horizontalen Scherwellen. Die Partikeldynamik der Lambwellen, deren Schwingungsellipse eine Komponente in Ausbreitungsrichtung und orthogonal zur Plattenebene hat, überlagert sich mit den Bewegungen der horizontalen Scherwellen, die in der Plattenebene schwingen. So ergibt sich eine Polarisation der Welle, die nunmehr in einem Winkel zur Plattenormale schwingt. Dieses Verhalten ist empfindlich von der Ausbreitungsrichtung in der Platte abhängig und erweist sich als äußerst kompliziert. An dieser Stelle sei daher auf die Literatur [27] verwiesen, die umfänglich auf die Kopplung eingeht.

2.2.2. Amplitudenabschwächung

Die Dispersionseigenschaften bewirken durch unterschiedliche Phasengeschwindigkeiten ein Verschieben von Wellengruppen gegeneinander; eine initiale Wellengruppe zerfließt oder separiert sich. Über die Zeit verteilt sich die mitgeführte Energie daher räumlich und die Amplituden werden reduziert. Die Amplitudenabschwächung einer Welle korrespondiert allerdings mit einer Reihe weiterer Mechanismen, die einzeln oder zumeist parallel auftreten. Im Folgenden werden dazu die Reflexion und Transmission, Absorption und Streuung, sowie die Modenkonzersion betrachtet.

Reflexion und Transmission

Wenn sich Schwingungsenergie durch ein Material ausbreitet und auf eine Phasengrenze trifft, wird ein Energieanteil zurückreflektiert, während die übrige Energie in das angrenzende Medium transmittiert. Der Anteil der reflektierten und transmittierten Energie ist dabei eine Funktion der akustischen Impedanz beider Materialien. Die akustische Impedanz, oder auch Schallkennimpedanz kann als Widerstand verstanden werden, der einer Schwingungsausbreitung entgegenwirkt. Die akustische Impedanz ist definiert als Multiplikation der Dichte mit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit des gegebenen Mediums. Je größer der Unterschied zweier Materialien in ihrer akustischen Impedanz, desto größer ist der Anteil reflektierter Energie an der Phasengrenze. Der Zusammenhang wird durch den Reflexionsgrad R beschrieben.

$$R = \frac{I_r}{I_e} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (5)$$

Am Beispiel des Phasenübergangs einer Aluminiumplatte zu Luft liegt der Impedanzunterschied in der Größenordnung von $10^4/1$ und ist damit so groß, dass über 99,9 % der Energie reflektiert wird. Der Energieverlust der Reflexion longitudinaler und transversaler Wellen ist vernachlässigbar und die Wellen können sich durch Mehrfachreflexion in einer dünnen Platte ausbreiten und gegebenenfalls zu einer Lambwelle überlagern. Besitzt eine Struktur im Übertragungspfad der Wellen Versteifungen oder Lagerungspunkte, wie etwa die Rippen innerhalb einer Flugzeugtragfläche, so ist der Impedanzunterschied zwischen der Struktur und dem versteifenden oder lagernden Elementen weitaus geringer. An diesen Stellen muss mit einem „Abfließen“ der Energie gerechnet werden. Darüber hinaus treten Reflexionen an Stellen unstetiger Steifigkeit auf, wie sie unter anderem bei variierender Wandstärke, Materialkombinationen oder Fügstellen vorkommen. Während bei der Reflexion der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel entspricht, sind transmittierte Wellen dem Snelliuschem Brechungsgesetz unterworfen. Es kommt zur sogenannten Refraktion, die besagt, dass Wellenanteile gemäß ihren Ausbreitungsgeschwindigkeiten unter einem anderen Ausfallswinkel gebrochen werden. [22, p. 7.12 f]

Absorption und Streuung

Eine Körperschallwelle breitet sich durch Schwingungen einzelner Partikel aus, deren Bewegung an einen Energieverlust durch innere Reibung gebunden ist. Die Rate mit der Energie dissipiert, ist sowohl vom Material, als auch von der Frequenz abhängig, denn mit zunehmender Geschwindigkeit der schwingenden Partikel wächst die durch innere Reibung dissipierte Energie an. Lambwellen weisen zudem für jede Mode eine unterschiedliche Absorptionscharakteristik auf [26]. Weiterhin wird das Wellenfeld gestreut. Eine von einem Punkt ausgehende Wellenfront breitet sich kreisförmig in der Plattenebene aus. Dabei verteilt sich die Energie der Welle räumlich und die Amplitude fällt mit wachsender Entfernung x geringer aus. In diesem Zusammenhang wird von einem geometrischen Schwächungsverhältnis gesprochen, die Amplitude sinkt proportional zu $1/\sqrt{x}$. Die Amplitudenabschwächung wird im Nahfeldbereich durch die geometrische Streuung dominiert, während sie im Fernfeldbereich primär durch Absorption stattfindet. Nach [28, p. 12] werden Absorption und Streuung zu einem Abschwächungsfaktor α zusammenfasst, der die Amplitudenreduktion mit einer Exponentialfunktion beschreibt.

$$\frac{A_1}{A_0} = e^{-\alpha x} \quad (6)$$

In Faserverbundstrukturen ist die Absorption in der Polymermatrix ausschlaggebend für die Amplitudenabschwächung, so dass mit steigendem Faservolumengehalt und somit geringerem Matrixanteil weniger Energie absorbiert wird [29]. Die Absorption ist dabei eng mit den temperaturabhängigen viskoelastischen Eigenschaften der Matrix verknüpft. Hinzu kommt die Streuung an Inhomogenitäten. Wellen werden sowohl an Fehlstellen, als auch an den Faser-Matrix-Grenzflächen gestreut. Abhängig von der Faserorientierung resultiert so ein anderes Abschwächungsverhalten. Die Arbeit von Leduc et al. [30] zeigt ferner, dass Streuverluste mit steigender Oberflächenrauigkeit zunehmen.

Zusammenfassend verhält sich die Amplitudenabschwächung durch Absorption und Streuung in Faserverbundstrukturen komplex, da viele Einflussfaktoren zusammenwirken, die wichtigsten sind:

- Frequenz und Ausbreitungsmoden der Welle
- Matrix- und Fasermaterial
- Faserorientierung und Faservolumengehalt
- Defektdichte, Defektart und Defektgröße
- Oberflächenrauigkeit

Modenkonversion

Ein weiteres Phänomen, das bei Lambwellen beobachtet werden kann, ist die Modenkonversion. Modenkonversion bezeichnet eine teilweise Umwandlung eines Ausbreitungsmoden hin zu einem anderen. Dies tritt auf, wenn Lambwellenmoden auf einen Steifigkeitssprung treffen, der nicht symmetrisch zu der Symmetrieebene der Platte ist [31].

Demzufolge konvertieren Wellen bei einer Kantenreflexion nicht. In der Praxis kann die Umwandlung hauptsächlich von dem S_0 -Mode in den A_0 -Mode beobachtet werden, wobei die Konversion mit einem Energietransfer von S_0 zu A_0 einhergeht und die Amplitude des S_0 -Modes infolgedessen abgeschwächt wird. Ein besonderes Merkmal von Faserverbundwerkstoffen ist eine zusätzliche, durch das Material hervorgerufene „schleichende“ Modenkonversion. Mook et al. berichten erstmals in [32] von dieser kontinuierlichen Modenumwandlung, die in der untersuchten CFK-Platte durch Gewebelagen in Körperbindung hervorgerufen werden.

2.2.3. **Eiseinfluss auf die Wellenausbreitung**

Basierend auf den vorab dargestellten Interaktionsmechanismen zwischen den Wellen und der Struktur können Überlegungen angestellt werden, wie sich das Übertragungsverhalten von Körperschallwellen unter einer Eisschicht ändert.

Ein Eisansatz ändert vordergründig die Dicke, die Massen-, sowie Steifigkeitseigenschaften, der gesamten Struktur. Das Eis beeinflusst über seine Dicke, ebenso wie über seine Dichte und Steifigkeit, die beide von der Eisart abhängen (vgl. Materialparameter Anhang B), das Dispersionsverhalten. Die Verläufe der Phasengeschwindigkeiten werden im Dispersionsdiagramm verschoben. Variiert ausschließlich die Strukturdicke, so sind die Kurven in einem Dispersionsdiagramm ortsfest, wenn auf der Ordinate das Produkt aus Frequenz und Dicke aufgetragen ist. Der Einfluss der Plattendicke geht in einem solchen Dispersionsdiagramm verloren. Werden die Phasengeschwindigkeiten alleine über der Frequenz aufgetragen, so verschieben sich die Moden mit zunehmender Strukturdicke hin zu niedrigeren Frequenzen. In einem gewählten Frequenzbereich zeigen sich also höhere Moden. In der Praxis kann demnach die Frequenz, ab der ein höherer Mode auftaucht, genutzt werden, um auf die Strukturdicke zu schließen. Messtechnisch ebenfalls gut zugänglich sind über eine Laufzeiterfassung die Geschwindigkeiten der Moden. Die Dispersionslinien von Lambwellen und horizontalen Scherwellen fallen stetig, mit Ausnahme des A_0 - und SH_0 -Modes. Das heißt, bei konstanter Frequenz und wachsender Dicke, nimmt die Phasengeschwindigkeit eines Modes ab, da sich seine Dispersionslinie zu niedrigeren Frequenzen verschiebt. Der A_0 -Lambwellenmode verhält sich dank seines stetig steigenden Verlaufes genau umgekehrt, seine Phasengeschwindigkeit steigt.

Eis stellt zudem eine Versteifung der Struktur dar. Eine erhöhte Steifigkeit führt nach Gleichung (1) und (2) zu höheren Ausbreitungsgeschwindigkeiten von longitudinalen und transversalen Wellen. Die Phasengeschwindigkeit der SH -Moden steigt und der Schluss liegt nahe, dass auch die Phasengeschwindigkeit der Lambwellenmoden zunimmt. Gerade bei Lambwellen ist es jedoch schwer abzuschätzen, wie stark die geänderten Steifigkeitseigenschaften der Struktur das Dispersionsverhalten beeinflussen. Der Grund dafür liegt in dem komplexen und nicht intuitiven Charakter der Wellen. An jeder Grenzschicht des Verbundes muss z. B. Reflexion und Brechung berücksichtigt werden. Parameter wie die Steifigkeit und Dichte einzelner Schichten im Verbund können sich empfindlich auf einzelne

Moden auswirken. Daher werden in Kapitel 5. die Dispersionseigenschaften der genutzten CFK-Platte unter verschiedenen Vereisungszuständen mathematisch näher untersucht.

Während der akustische Impedanzunterschied von Festkörpern zu Luft in der Größenordnung von $10^4/1$ liegt, ist er zwischen Festkörpern in der Regel kleiner als $10/1$. Ein erheblicher Energieanteil wird daher in die Eisschicht transmittiert. Die Welle breitet sich zusätzlich in der Eisschicht aus, in der Energie absorbiert und gestreut wird. Folglich muss mit einer Amplitudenabschwächung gerechnet werden. Darüber hinaus ist anzunehmen, dass die Amplitudenabschwächung je nach Eisart unterschiedlich ausfällt. Raueis weist eine Vielzahl von Lufteinschlüssen und eine besonders raue Oberfläche auf, dank der die Streuverluste wohl größer ausfallen, als bei einer vergleichbaren Klareisschicht. Allerdings hat Raueis dank der vielen Poren eine geringe Dichte und niedrige Steifigkeit, so dass die Schallkennimpedanz geringer ist als bei Klareis. Es wird weniger Energie in die Eisschicht transmittiert und die höheren Streuverluste kommen womöglich nicht zum Tragen. Allgemein wird für jede Ausbreitungsmoden ein anderes Absorptions- und Streuverhalten erwartet. Die Amplitude einzelner Schwingungsmoden reagiert vermutlich unterschiedlich sensitiv auf das Eis und die Eisart.

Ein Eisansatz mit einer abrupten Kante, wie sie nach einem Bruch auftritt, bildet eine sprunghafte Steifigkeitsänderung, an der Wellen reflektieren. Da es sich um eine Störstelle handelt, die asymmetrisch zur Plattenebene ist, muss hier mit Modenkonversion gerechnet werden.

2.3. Piezowandler

Ein genaues Verständnis der Welleneinleitung ist wichtig, um diese effizient, gerichtet oder gar modenselektiv auszulegen. Um Wellen in einer dünnen Platte zu erzeugen und zu empfangen, kommen unterschiedliche Wandler in Frage. Bewährt haben sich Piezoaktoren, die im direkten Kontakt mit der Struktur durch mechanische Expansion und Kontraktion Wellen generieren. Das vorliegende Kapitel beschreibt den physikalischen Effekt, erklärt die Art und Weise, wie ein Piezowandler Wellen erzeugt und erläutert welchen Einfluss der Wandler auf die emittierten und empfangenen Wellen nimmt.

2.3.1. Effekt

Das altgriechische „Piezo“ bedeutet so viel wie drücken oder pressen. Im Jahre 1880 stellten die Brüder Jacques und Pierre Curie eine elektrische Ladung fest, die bei der mechanischen Belastung eines Quarzkristalls auftrat. Sie nannten das Phänomen piezoelektrischen Effekt oder kurz Piezoeffekt. Wird ein piezoelektrisches Material, ein Gitter ohne Symmetriezentrum, mechanisch belastet, so verformen sich dessen Elementarzellen elastisch. Die Ionen des Gitters und somit auch deren Ladungsmittelpunkte werden gegeneinander verschoben und es tritt eine elektrische Polarisierung auf. Als Konsequenz ist nach außen hin eine Spannung messbar. Der piezoelektrische Effekt beschreibt eine direkte Kopplung zwischen mechanischer Spannung und elektrischer Ladung. Das Prinzip

funktioniert ebenso umgekehrt: Wird eine Spannung an einen z. B. scheibenförmigen Piezokristall angelegt, so verformt sich dieser mechanisch und ändert seine Dicke, sowie seinen Durchmesser. Diese Eigenschaft, der sogenannte inverse piezoelektrische Effekt wird für den Bau von Aktoren genutzt. Ein wesentlicher Vorteil von piezoelektrischen Materialien ist also, dass sie gleichermaßen als Aktor und als Sensor verwendet werden können. Der Piezoeffekt natürlich vorkommender Kristalle, wie Quarz, ist äußerst gering. Industriell werden derartige Einkristalle daher kaum genutzt, sondern Piezokeramiken, wie Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), Piezopolymere oder Kompositmaterialien, die jeweils durch ein starkes elektrisches Feld polarisiert werden. Der Vorteil dieser Materialien liegt in einem wesentlich höheren piezoelektrischen Koeffizienten. Der als Piezomodul d bezeichnete Koeffizient beschreibt das im Kleinsignalbereich lineare Verhältnis zwischen dem anliegenden elektrischen Feld \bar{E} und der mechanischen Dehnung ε .

$$d = \frac{\bar{E}}{\varepsilon} \quad (7)$$

Das Dehnungsverhalten von Piezokeramiken ist anisotroper Natur. Es werden die in Abbildung 6a gezeigten Vereinbarungen der Achsenbezeichnungen getroffen. 4, 5 und 6 stellen Scherungen an den Achsen 1, 2 und 3 dar. Die Polarisation P des Piezoaktors zeigt in die Raumrichtung 3.

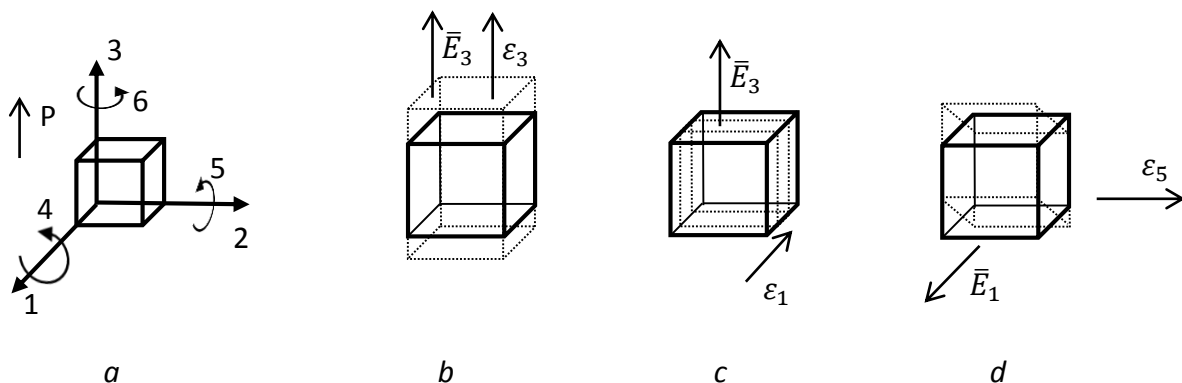


Abbildung 6: a) Achsendefinition, b) Longitudinaleffekt (d_{33} -Effekt), c) Transversaleffekt (d_{31} -Effekt), d) Schereffekt (d_{15} -Effekt) nach [56, p. 71].

Beim Longitudinaleffekt (b) ist das elektrische Feld \bar{E} parallel zur Polarisationsrichtung angelegt und induziert eine mechanische Dehnung ε ebenfalls in Richtung 3. Der Longitudinaleffekt wird daher auch nach der Proportionalität zwischen dem ursächlichen elektrischem Feld \bar{E}_3 und der wirkenden Dehnung ε_3 , dem Piezomodul d_{33} benannt. Es wird die jeweilige Indizierung der Richtungen übernommen. Parallel treten Transversaleffekte (c) auf, die mithilfe von d_{31} quantifiziert werden. Die d_{31} -Konstante beträgt ca. das 0,3 bis 0,5-fache des d_{33} -Wertes und hat ein negatives Vorzeichen, da das Material in Querrichtung kontrahiert. Das letzte Teilbild (d) zeigt einen Scher-, bzw. d_{15} -Effekt. [33, 34]

2.3.2. Aktoren für die Wellenanregung

In Abbildung 7 sind drei mögliche Varianten für die Anregung von Plattenwellen gezeigt. Normalprüfköpfe aus der Ultraschalltechnik (a) werden aufgelegt und nutzen eine Koppelflüssigkeit um durch die Dickenschwingung des Piezowandlers Longitudinalwellen senkrecht in ein Bauteil abzustrahlen. Dazu ist ein Dämpfungskörper notwendig, dessen

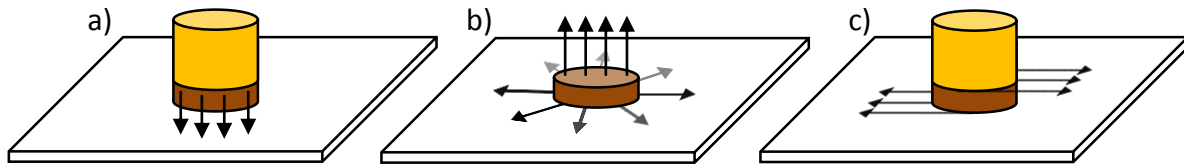


Abbildung 7: Drei Anregungsvarianten von Plattenwellen: a) Normalprüfkopf aus der Ultraschallprüfung bestehend aus Piezoaktor (unten) und Dämpfungskörper (oben), b) verklebte Piezokeramik, c) Scherwellenprüfkopf aus der Ultraschallprüfung nach [35].

Trägheit verhindert, dass der Piezowandler frei auf der Oberfläche schwingt. Die Abstrahlcharakteristik ist gerichtet und Wellen breiten sich vorwiegend innerhalb des vom Prüfkopf abgedeckten Querschnitts aus. Für die Anregung von Plattenwellen kann der Prüfkopf auf einen Keil aufgesetzt werden. Die Longitudinalwelle trifft unter einem Winkel auf die Struktur, wird gebrochen und kann modenselektiv eine Lambwelle induzieren. In [35] wird die Art der Anregung jedoch als ineffektiv geschildert und auch Schmidt [26, p. 29 f] kommt zu dem Schluss, dass diese monomodale Wandlerkonfiguration ungeeignet für ein Überwachungsnetzwerk ist. Für die Anregung von Wellen werden daher häufig scheibenförmige Aktoren verwendet, die auf die Struktur geklebt werden (b). Die Dickenschwingung koppelt infolge der freien Randbedingung auf der Oberseite praktisch nicht in die Platte. Wichtig ist die radiale Expansion und Kontraktion (meist im d_{31} -Mode), die über die Klebschicht in die Platte übertragen wird. Über eine große Frequenzbandbreite können so Wellen in der Platte generiert werden. Der Actor erfasst nur Dehnungen in der Plattenebene und keine Schubverzerrungen, daher liegt keine Sensitivität für Scherwellen (SH -Moden) vor. Die Teilabbildung (c) zeigt einen Scherwellenprüfkopf. Der verklebte Actor vollzieht Scherschwungung, die dank der Gegenkraft einer seismischen Masse in die Struktur koppeln und SH -Moden anregen. Diese Variante wird näher in [36] und [37] untersucht. Wegen des voluminösen Dämpfungskörpers und einem hohen Anteil angeregter symmetrischer Moden findet sie jedoch wenig Beachtung [35].

Gängig für die Anregung und den Empfang von Wellen sind plattenförmige und verklebte Piezowandler (b), die im Folgenden näher diskutiert werden. Ein gebräuchlicher Werkstoff sind Piezokeramiken, die mitunter über aufgesputterte Elektroden verfügen. Der Vorteil von Piezokeramiken besteht in einer hohen Steifigkeit, mit der große Kräfte bzw. hohe Sensoramplituden generiert werden können. Das keramische Material hat allerdings einen hartspröden Charakter, der mit einer geringen Zugfestigkeit verbunden ist. Daher sind die Piezokeramiken äußerst bruchempfindlich und können kaum an gekrümmten Flächen appliziert werden. Vorteile bieten hier flexible Piezopolymere. Die als Folien ausgeführten Piezopolymere weisen geringe Steifigkeiten auf, so dass die generierten Kräfte niedrig ausfallen und die Welleneinleitung in Plattenstrukturen ineffektiv ist. Das Einsatzgebiet von

Piezopolymeren liegt vordergründig in der Ultraschall-Tauchtechnik, da die akustische Impedanz der Polymere vergleichbar mit der von Wasser ist. Piezokomposite sind eine Kombination aus piezoelektrisch aktiven und passiven Werkstoffen und lassen sich durch die Auswahl, den Anteil und die Anordnung der Materialien speziell an Randbedingungen anpassen. Mit diesem Konzept kann ein piezokeramischer Werkstoff mechanisch stabilisiert und elektrisch isoliert werden. [38]

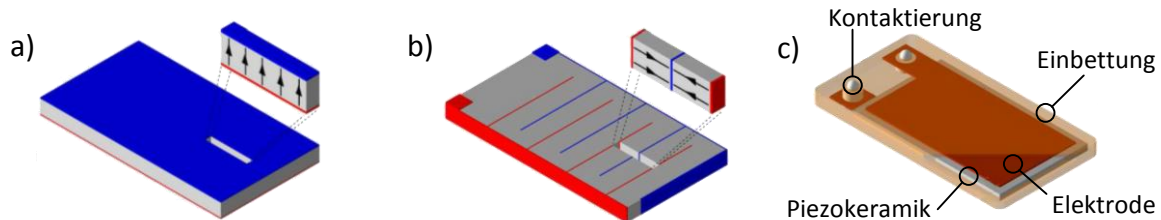


Abbildung 8: Piezo Konfigurationen: a) flächige elektrode [26], b) Multilayertechnologie [26], c) *DuraAct*-Piezokomposit nach [38].

Abbildung 8a zeigt die technisch am einfachsten zu realisierende Elektrodenkonfiguration mit einer flächigen Elektrode an der Ober- und Unterseite. Das elektrische Feld wird normal zur Ebene angelegt und der Wandler im d_{31} -Mode betrieben. Eine andere Konfiguration basiert auf der Multilayer-Struktur von Stapelaktoren (b). Eine keramische Rohmasse, die sogenannte Grünfolie wird mit Elektroden versehen, mäanderförmig gestapelt und gesintert. Es entsteht ein monolithische Block, der alternierend eine positive und eine negative Elektrode besitzt, die jeweils zu den Seiten hinausgeführt sind. Der Block wird abschließend in dünne Platten getrennt, die in der Plattenebene den effektive d_{33} -Effekt nutzen. Ein weiterer Vorteil dieser Bauweise liegt in geringen Elektrodenabständen und infolgedessen niedrigen Versorgungsspannungen. Aktoren mit flächiger Elektrode oder in Multilayer-Bauweise haben jedoch den Nachteil offener Elektroden, so dass gerade bei der Arbeit in feuchten Umgebungen Kurzschlussgefahr besteht. Für die mechanische Vorspannung und elektrische Isolation erfolgt oft die Weiterverarbeitung zu Piezokompositen. Ein Beispiel ist der *DuraAct*-Flächenwandler (c), dessen Keramik mit flexiblen Elektroden versehen und in eine Polymermasse eingebettet ist. Das Polymer schrumpft bei der Aushärtung und spannt die Keramik auf Druck vor, so dass der Aktor biegsam ist.

2.3.3. Wellenübertragungsverhalten

Die absolute Amplitude eines generierten Lambwellenfeldes hängt stark von dem applizierten Aktor ab. Die elektrische Spannung entscheidet zusammen mit den piezoelektrischen und mechanischen Materialparametern darüber, wie effektiv Energie in Form von Wellen eingebracht wird. Eine Änderung dieser Parameter bedeutet, dass verschiedene Moden in ihrer Amplitude gleichermaßen erhöht oder herabgesetzt werden. Weiterhin nimmt die Geometrie des Aktors maßgeblich Einfluss auf die Anregung und den Empfang von Wellen und wirkt sich unterschiedlich auf einzelne Moden aus. Neben den Werkstoffkenngrößen bestimmt die Geometrie, z. B. der Durchmesser einer plattenförmigen

Piezokeramik, bei welchen Frequenzen Schwingungsresonanzen ausgeprägt werden. Der Einfluss dieser Eigenschwingungen auf die emittierten Wellen wird nachstehend qualitativ geschildert. Die Hauptresonanz ist eine Dickenschwingung die bei dünnen Keramiken oft im MHz-Bereich liegt, während bei niedrigeren Frequenzen Biege- und Radialmoden auftreten. Ein dünner Wandler besitzt eine geringe Biegesteifigkeit und zeigt bei niedrigen Frequenzen (unterer kHz-Bereich) Biegeschwingungen. Besonders werden durch die Biegeschwingungen antisymmetrische Lambwellen angeregt, da sich diese durch eine Biegeform auszeichnen (vgl. Abbildung 4a). Mit zunehmender Dicke des Wandlers wächst die Biegesteifigkeit, die Biegeschwingungen werden weniger stark angeregt und wandern zu höheren Frequenzen. Daraus folgt eine weniger effektive Anregung von antisymmetrischen Lambwellen. Zusätzlich sinkt mit steigender Dicke die Resonanzfrequenz der Dickenschwingung. Die Schwingungsformen rücken im Frequenzbereich näher zusammen und bilden einen breiten, gekoppelten Resonanzbereich, der vorzugsweise symmetrische Moden anregt. [32]

Das eigendynamische Verhalten beeinflusst also selektiv, wie stark verschiedene Moden über der Frequenz ausgeprägt sind. Zu beachten ist weiterhin, dass die Eigenfrequenzen eines applizierten Wandlers zusätzlich von dem dynamischen Verhalten der Struktur und der Klebeschicht abhängen. Eine nähere mathematische Beschreibung ist in [39] gegeben.

Die Aktorabmessungen bestimmen nicht nur das eigendynamische Verhalten, sondern wirken auch direkt auf den Empfang und die Anregung von Lambwellen. Runde Aktoren haben ein gleichmäßiges Abstrahlverhalten und senden kreisförmig Wellen aus, während rechteckige Piezowandler stärker gerichtet und ausgehend von ihren Seitenflächen Wellen emittieren. Der Ansatz von Giurgiutiu [40] beschreibt für isotrope Materialien die Dehnungen von Lambwellenfeldern, die bei der Anregung mit einem aufgeklebten Piezoaktor generiert werden. Die maximale Dehnung, die eine Lambwelle in der Platte hervorruft, lässt sich in Näherung nach Gleichung (8) beschreiben. Der einzige variable Parameter ist die Aktorlänge $2a$, die bei rechteckigen Aktoren die Seitenlänge in Abstrahlrichtung beschreibt und bei runden Aktoren den Durchmesser.

$$|\varepsilon| \approx |a * \sin(ka)| \quad (8)$$

Für den jeweiligen Mode werden die von der Frequenz abhängigen Wellenzahlen k eingesetzt, die sich aus dem Dispersionsverhalten ergeben. Mit dem Zusammenhang $k = 2\pi/\lambda$ kann die Gleichung in eine anschauliche Bedingung für die optimale Lambwellenanregung umgeformt werden. Ein Maximum wird erreicht, wenn die Länge des Aktors in Ausbreitungsrichtung einem ungeradzahligem Vielfachen der halben Wellenlänge entspricht. Formelmäßig ist dies in Gleichung 9 festgehalten und wird parallel in Abbildung 9 veranschaulicht.

$$2a = (2n - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(9)

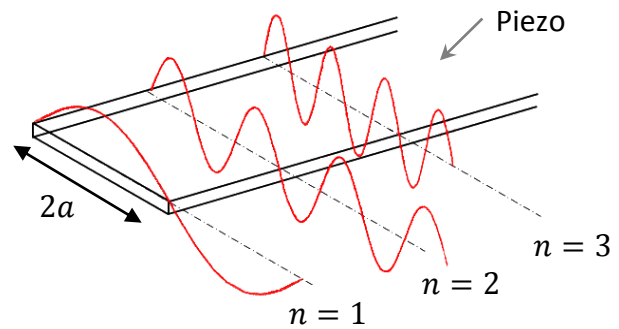


Abbildung 9: Effektiven Lambwellenanregung an einem Piezoaktor.

Bei dem sensorseitigen Empfang von Lambwellen werden die Dehnungen in der Plattenebene in elektrische Spannungen gewandelt. Die in dem Aktor vorherrschenden Dehnungen hängen auch wesentlich von seinen Abmessungen ab. Nach Berechnungen in [26, p. 22] kann die Spannungsantwort auf eine einfache Beziehung reduziert werden:

$$|U| = \left| \frac{\sin(ka)}{ka} \right|$$

(10)

Abbildung 10 zeigt die am Empfänger generierte Spannungsantwort für verschiedene Moden. Dafür wird die Bedingung der Lambwellenanregung (8) mit der empfängerseitigen *sinc*-Funktion (10) multipliziert. In der Berechnung wird für die Kreiswellenzahl k die Beziehung $k = \omega/c$ eingesetzt, wobei die Werte von ω und c aus den Dispersionsdaten stammen und modenspezifisch sind. Es handelt sich rein um die Auswirkung der Aktorlänge, die in dem Beispiel bei Sender und Empfänger 10 mm beträgt. Zu sehen ist das zu erwartende Sensorsignal der beiden Fundamentalmoden A_0 und S_0 über der Frequenz. Die Berechnung wurde beispielhaft anhand des in Kapitel 2.2.1. gezeigten Dispersionsdiagramms

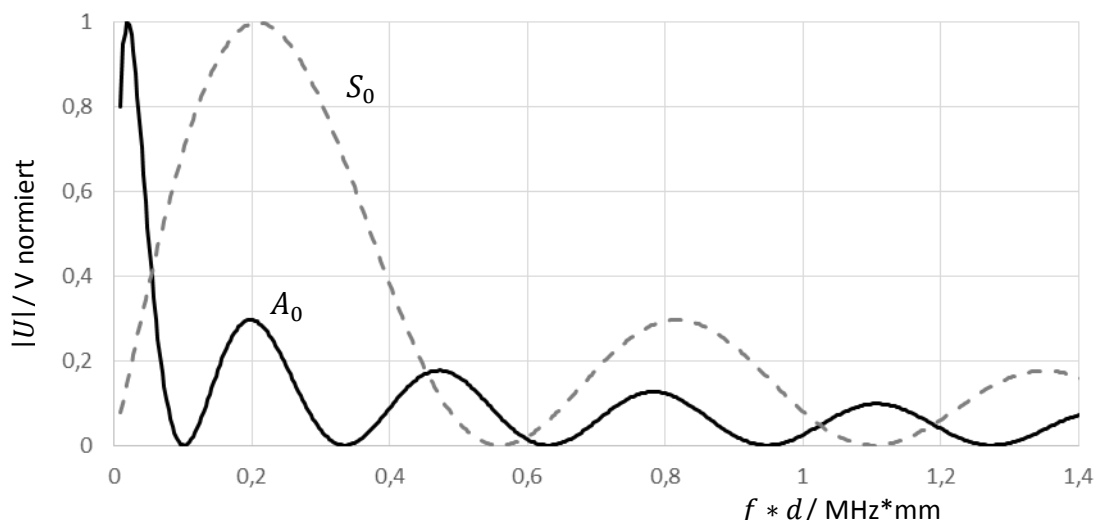


Abbildung 10: Geometrisch bedingtes Modenübertragungsverhalten der fundamentalen Lambwellenmoden – normierte sensorseitige Spannungsantwort. Aktorlänge: 10 mm. Material: Aluminium.

einer Aluminiumplatte durchgeführt. Das Diagramm gibt einen Eindruck davon, wie gut Moden im Frequenzbereich angeregt werden können. Für die Anwendung sind die

Hauptmaxima der einzelnen Moden wichtig, da hier die Anregung und der Empfang von Wellen besonders effektiv ist. Des Weiteren haben die einzelnen Moden Nullstellen bei bestimmten Produkten aus Frequenz und Plattendicke. An diesen Stellen ist demnach eine modenselektive Wellenübertragung möglich. Es sei abschließend noch einmal darauf hingewiesen, dass der Verlauf eine Näherung ist, die von einer streng monofrequenten Anregung ausgeht und bei der unter anderem die Eigendynamik des Aktors unberücksichtigt bleibt.

2.4. Signalverarbeitung

Für eine genaue Analyse, wie die Übertragung unterschiedlicher Lambwellenmoden auf Eis reagiert, ist es wichtig die verschiedenen Moden separat auf ihre Amplitude und Geschwindigkeit hin zu untersuchen. Dafür müssen sich die Wellenpakete einzelner Moden separieren können, was die Anregung mit einem andauernden Signal verbietet. Es wird mit einer begrenzten Anzahl von Perioden fester Frequenz, dem sogenannten Burst-Signal angeregt. Ein damit ausgesendetes Wellenpaket, kann sich gemäß der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten mit zunehmender Lauflänge in eine Wellengruppe je Mode aufspalten. Während ein andauerndes Sinussignal streng monofrequent ist, hat ein Burst zusätzliche Frequenzanteile. Je kürzer und Impulsförmiger der Burst, desto mehr Frequenzen sind enthalten. Mit einem breiteren Frequenzgehalt „verschmieren“ jedoch die Wellenpakete, da innerhalb eines Modes Anteile unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit angeregt werden. Dieses „Zerlaufen“ der Wellengruppen erschwert die Identifikation der einzelnen Moden und sollte bestmöglich unterbunden werden. Zudem ändert sich das in Abbildung 10 präsentierte Modenübertragungsverhalten. Die Amplitude eines Modes wird bei einem spezifischen Frequenz-Dicken-Produkt ausschließlich unter monofrequenter Anregung null. Mit der Burst-Anregung werden hier lediglich Minima erzielt. Ein Mittel, das die Bandbreite im Frequenzbereich reduziert ist die sogenannte Fensterung. Das Signal wird häufig mit einem Hanning-Fenster moduliert. Das Fenster bewirkt ein langsames Ansteigen der Amplitude, die nach dem Maximum wieder abfällt. Die Fouriertransformation des so gewichteten Anregungssignals in den Frequenzbereich besitzt eine schmalere Spektrallinie. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 11 links ein ungefenstertes und ein mit Hanning-Fenster versehenes Burst-Signal im Zeitbereich, das aus fünf Perioden besteht und eine Frequenz von 100 kHz aufweist. Klar zu erkennen sind Unstetigkeitsstellen zu Beginn und am Ende des ungefensterten Zeitverlaufs. Diese Bereiche verursachen bei der Transformation in den Frequenzbereich ausgeprägte Seitenbänder, die neben der Grundfrequenz von 100 kHz auftreten (vgl. Abbildung 11 rechts). Das Hanning-Fenster erzielt einen durchweg stetigen Zeitverlauf und unterdrückt ein spektrales Auffächern. Die spektrale Bandbreite nimmt zudem mit einer höheren Anzahl an Perioden ab. In der praktischen Anwendung muss ein Kompromiss gefunden werden: Einerseits sollte die Periodenanzahl so hoch wie möglich sein um ein schmalbandiges Signal zu erzeugen und viel Energie für große Amplituden und ein großes Signal-Rausch-Verhältnis einzubringen. Andererseits muss gewährleistet sein, dass die Anregung kurz genug ist, damit sich die Wellenpakete der Moden separieren und klar identifiziert werden können. Nähere

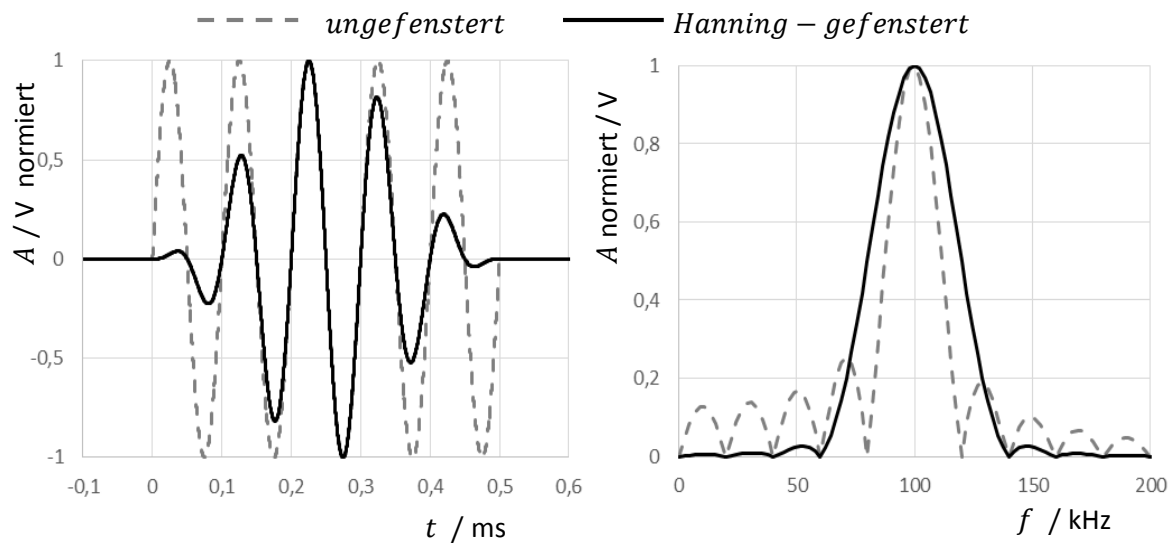


Abbildung 11: Zeitsignal und spektrale Analyse eines ungefensterten und Hanning-gefensterten Burst-Signals.

Untersuchungen dazu, wie sich die Fensterung und Periodenanzahl auf das Empfängersignal auswirkt werden in 4.3. angestellt.

3. Stand der Forschung

Von Eissensoren, die auf geführten Ultraschallwellen basieren und nach dem Sender-Empfänger-Prinzip arbeiten, wurde von Chamuel, Watkins et al., Liu et al. und Rose et al. berichtet [41, 42, 43, 44]. Der Patentanspruch von Chamuel [41] beschreibt die Amplitudenabschwächung des A_0 -Lambwellenmodes bei niedriger Frequenz, um die Kontamination von Wasser und Eis auf einer Aluminiumplatte zu bestimmen. Watkins et al. [42] beschreiben ein System, das von einer dünnen Struktur geführte Ultraschallwellen nutzt, deren vorwiegende Komponente in der Plattenebene schwingt. Es handelt sich um SH -Moden, die sich als effektiv erweisen, Eis von Wasser unterscheiden zu können. Liu et al. [43] präsentieren ein Detektionssystem mit universellem Anspruch, das mit elastischen Wellen auch an Flugzeugen in der Lage sein soll, Eis zu erkennen. In dem Patent wird der Anspruch dahingehend präzisiert, die Amplitudenabschwächung des A_0 -Lambwellenmodes zu nutzen. Das System von Rose et al. [44] markiert einen wichtigen Schritt auf dem Weg, geführte Ultraschallwellen für die Detektion von Eis an Flugzeugen zu nutzen. Aus seinem Patent entwickelt sich das HALO genannte Detektionssystem [45, 46], das für den Einsatz am Boden konzipiert ist. Das System erkennt Eisschichten auf der Flugzeugtragfläche ab einer Dicke von etwa 100 μm , Wasser und Glykol. Genaue Informationen dazu, welche Wellen das System nutzt und anhand welcher Parameter das Eis detektiert wird, werden nicht preisgegeben. Alle aufgeführten Systeme erfassen rein qualitativ Eis und geben keine Auskunft über die Eisdicke und Eisart. Gao und Rose sehen den Grund, weshalb die Systeme nur das Vorhandensein von Eis erfassen darin, dass Eis in den frühen Publikationen nur als eine modifizierte Randbedingung behandelt wird; vielmehr ist Eis aber ein Teil der Struktur [47, p. 335]. Dies wird in aktuellen Publikationen berücksichtigt. Die vorliegende Arbeit baut direkt auf Arbeiten von Gao und Rose [47], Shoja et al. [48] sowie der Vorarbeit „Eiserkennung durch Körperschallwellen“ von Mendig et al. [49] auf.

Gao und Rose [47] präsentieren ein Modell, das die Eisschicht im Sinne eines mehrschichtigen Verbundes berücksichtigt. Für den Verbund einer Aluminiumplatte und einer Eisschicht wird die Ausbreitung von SH -Moden berechnet und mit einem Beispielerperiment mit guter Übereinstimmung validiert. Die Arbeit legt ihren Fokus ausschließlich auf die Dispersionseigenschaften, die sich unter einer homogenen Klareis-, Raueis- oder Mischeisschicht ändern. Anhand von Dispersionsdiagrammen, die für die Eisarten bei unterschiedlichen Eisdicken berechnet werden, entwickeln Gao und Rose verschiedene Strategien die Eisdicke und Eisart zu bestimmen. Die Berechnung zeigt, dass Eis unterschiedlich auf einzelne SH -Moden wirkt. Der SH_0 -Mode ist für den anisotropen Verbund aus Eis und Aluminium dispersiv. Mit wachsender Eisschicht sinkt seine Gruppengeschwindigkeit monoton und das unabhängig von der Eisart. Eine einfache Laufzeitmessung des Modes gibt Aufschluss über die Dicke, egal welchen Eises. In einem festen Frequenzbereich erscheinen mit wachsender Eisschicht höhere Moden. Dies bestätigt die in Kapitel 2.2.3. angestellten Überlegungen. Die Grenzfrequenz, ab der ein Mode in Erscheinung tritt, variiert jedoch deutlich zwischen den verschiedenen Eisarten. Bei bekannter Dicke, die z. B. mit der Laufzeit des SH_0 -Modes bestimmt wird, kann so auf die

Eisart geschlossen werden. Gao und Rose zeigen für die einfachen Randbedingungen von ausschließlich homogenen Eisschichten, isotropen Materialeigenschaften und mathematisch einfach zu lösenden Dispersionsverläufen, dass geführte Wellen ein hohes Potential für eine Eisidentifikation und Eisklassifizierung besitzen.

Eine starke Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zu der Publikation von Gao und Rose liegt in dem verwendeten Material. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Strukturen aus CFK. In dem Validierungsexperiment von Gao und Rose werden Elektromagnetische-Ultraschall-Wandler (*EMUS-Wandler*, engl. *EMAT: electromagnetic acoustic transducer*) genutzt, um horizontal polarisierter Scherwellen in einer Aluminiumplatte zu erzeugen. Diese Wandler generieren durch die Lorentz-Kraft, den magnetostriktiven Effekt, oder deren Kombination Wellen in der zu untersuchenden Struktur. Die physikalische Voraussetzung dafür ist ein elektrisch leitfähiges oder ferromagnetisches Substrat. CFK ist nicht ferromagnetisch und nur eingeschränkt leitfähig; die Wellenanregung mit EMUS-Wandlern ist in derartigen Verbundmaterialien nicht erprobt. Stattdessen wird mit Piezowandlern gearbeitet, die in erster Linie für die Anregung von Lambwellen ausgelegt sind. CFK birgt nicht nur ein komplexeres Dispersionsverhalten als isotrope Materialien, sondern ist über den Einsatz von verklebten Piezoaktoren in der Wellenanregung und dem Wellenempfang an Lambwellen gebunden. Die Ergebnisse die mit horizontalen Scherwellen erzielt werden, geben nur einen qualitativen Eindruck davon, wie sich Lambwellen in eine Verbundstruktur verhalten könnten.

Windkraftanlagen in kalten Regionen sind oft Vereisungen ausgesetzt. Analog zu Flugzeugtragflächen ist auch hier die Eisdetektion wichtig. Shoja et al. [48] untersuchen die Lambwellenausbreitung in einer 20 mm starken und 8 m langen Platte aus glasfaser-verstärktem Kunststoff, die ein Teil eines Rotorblattes repräsentiert. Das Ziel besteht in der Identifikation von Eis und seiner Dicke. Für die Kompositplatte werden äquivalente Steifigkeitseigenschaften berechnet, mit der die Struktur zu einer einzelnen, anisotropen Lage vereinfacht wird. Auf dieser Grundlage präsentiert die Arbeit zunächst Dispersionsdiagramme eines zweischichtigen Verbundes. Die erste Lage des Verbundes bildet die homogenisierte Kompositplatte, auf der sich als zweite Lage eine Eisschicht befindet. Wegen der Homogenisierung sind die Dispersionsdiagramme nur eine Näherung und lediglich für die ersten drei Lambwellenmoden bei niedrigen Frequenzen gültig. Die Dispersionsdiagramme zeigen, dass der A_0 -Lambwellenmode von einer Eisschicht kaum beeinflusst wird, während die Gruppengeschwindigkeit des S_0 -Modes mit zunehmender Eisdicke abfällt. Das Augenmerk der Arbeit liegt auf einem zweidimensionalen Finite-Elemente-Modell, welches zudem experimentell validiert wird: Ein magnetostriktiver Shaker regt an der Stirnseite der Struktur ein S_0 -Lambwellenpaket mit einer Frequenz von 5 kHz an. Das Wellenpaket läuft entlang der 8 m langen Struktur und trifft in seinem Übertragungspfad auf eine Eisanlagerung. Das Eis bedeckt auf einer Länge von einem Meter gleichmäßig die Struktur. Bilder in der Publikation weisen auf eine scharfe und definierte Kante des Eisansatzes hin. Die Untersuchung konzentriert sich zunächst auf die Laufzeit des ausgesendeten Wellenpaketes. Durchläuft das Wellenpaket den vereisten Abschnitt, steigt

mit wachsender Eisschicht die Laufzeit. Das im Vorfeld berechnete Dispersionsverhalten, nach dem die Gruppengeschwindigkeit des S_0 -Lambwellenmodes sinkt, wird bestätigt. Außerdem hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit in den Versuchen gleichermaßen stark von der Temperatur ab. Als zweiter wesentlicher Aspekt treten an der Vorderkante der Eisplatte Reflexionen auf, deren Amplitude mit wachsender Eisschicht zunimmt. Übereinstimmend mit den Betrachtungen in Abschnitt 2.2.3. konvertiert der S_0 -Mode bei der Reflexion zudem teilweise in den antisymmetrischen A_0 -Mode.

Zusammenfassend zeigen Shoja et al. simulativ und experimentell eine signifikant geänderte Ausbreitungsgeschwindigkeit des S_0 -Lambwellenmodes, wenn dieser partiell eine Eisschicht durchläuft oder sich die Temperatur der Struktur ändert. Die aufgebrachte Eisschicht entspricht jedoch nicht einem praxisrelevanten Eisaufbau, wie er beispielsweise an einer Flügelvorderkante vorkommt. Eisschichten liegen natürlicherweise mit einem stetigen Übergang zur Struktur vor und stellen in der Regel eine sprunghafte Steifigkeitsänderung dar. Es ist fragwürdig, ob Reflexionen der Wellen an einer natürlichen Eisschicht auftreten. Denkbar sind jedoch Szenarien in denen Bruchkanten entstehen, die oft mit einer Delamination von Eis einhergehen. Dies stellt jedoch einen Spezialfall dar, der in dieser Arbeit am Rande behandelt wird. Das Bestreben der vorliegenden Studie ist, neben dem S_0 -Lambwellenmode auch andere Moden, deren Amplitudenabschwächung und einen weiteren Frequenzbereich in die Untersuchung einzubeziehen.

Die Publikation von Mendig et al. [49] verfolgt einen empirischen Ansatz. Experimente an plattenförmigen CFK-Laminaten untersuchen die Eiserkennung durch Körperschallwellen. Die Arbeit fokussiert Versuche an einem Tragflächensegment, das praxisnah in einem Eiswindkanal vereist wird. Das Tragflächensegment besitzt zwei austauschbare Flügelvorderkanten mit einer CFK-Außenhaut der Stärke 1 mm. Die Innenseite der Haut ist mit unterschiedlichen Piezokeramiken bestückt. Neben runden Chip-Keramiken, werden hier rechteckige Piezokomposite (*DuraAct* Flächenwandler) appliziert. Für den Betrieb in feuchter Umgebung müssen die Piezokeramiken elektrisch isoliert werden, um die Kontaktierung der Elektroden untereinander zu unterbinden. Voruntersuchungen zeugen von einer Amplitudenabnahme um bis zu 65 %, wenn die Piezokeramiken nachträglich mit Heißklebstoff oder Schiffslack versehen werden. Hier erweisen sich die *DuraAct* Piezokomposite als effektiv, da sie bereits gekapselt sind. Die Publikation behandelt Laufzeit- und Amplitudenunterschiede von Lambwellen, die sich bei wachsendem Eisansatz und geänderter Temperatur ergeben. Mit der Anregung durch einen Sinus-Burst konstanter Frequenz, werden die Laufzeit bis zum Eintreffen der Wellen am Empfänger und deren maximale Amplitude erfasst. Die Auswertung der Amplitude geschieht zusätzlich unter der Anregung mit einem transienten Signal. Ein Gleitsinus ändert innerhalb einer halben Sekunde linear seine Frequenz von 1 kHz bis 500 kHz. Das resultierende Zeitsignal am Empfänger wird hinsichtlich seiner maximalen Amplitude und des Mittelwertes vom Betrag der Auslenkung analysiert. Die Publikation schildert einen deutlichen Einfluss von Eis auf die Laufzeit des ersten Wellenpaketes. Allerdings wird nicht angegeben, um welche Ausbreitungsmode es sich handelt und es ist unklar, ob die verschiedenen Wellenpakete

überhaupt verschiedenen Lambwellenmoden zuzuordnen sind. Denkbar ist, dass die später eintreffenden Wellenpakete Reflexionen sind, die nicht über den direkten Übertragungspfad auf den Empfänger treffen. Die Gruppengeschwindigkeit des ersten Wellenpaketes, mutmaßlich ein S_0 -Lambwellpaket, sinkt kontinuierlich mit wachsender Eisschicht, was sich mit den geschilderten Ergebnissen von Shoja et al. [48] deckt. Im Gegensatz zu der genutzten GFK-Platte in [48] zeigen die CFK-Strukturen von Mendig et al. [49] keine ausgeprägte Abhängigkeit der Gruppengeschwindigkeit von der Temperatur; ein Verzicht auf eine zusätzliche Temperaturüberwachung erscheint bei diesem Werkstoff denkbar. Allgemein wird empfohlen den Temperatureinfluss anwendungs- und materialspezifisch zu berücksichtigen. Die maximale Amplitude nach der Burst-Anregung sinkt mit einer stetig wachsenden Eisschicht. Bei der Anregung mit einem Gleitsinus zeigen sich die maximale Amplitude und der Mittelwert vom Betrag aller Amplitudenwerte ebenso sensitiv gegenüber Eis. Beide Werte fallen bei wachsender Eisschicht rapide ab. Die Amplitudenabschwächung ist so ausgeprägt, dass bei einer Schichtdicke von 2,5 mm Eis an der Flügelvorderkante, nicht mehr als 10 % der ursprünglichen Amplitude verbleiben. Dies bezieht sich allerdings auf die rechteckigen *DuraAct-Flächenwandler*, die ein gerichtetes Lambwellenfeld emittieren. Bei den Chip-Aktoren zeigt sich die Amplitudenabschwächung noch stärker.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Amplitudenabschwächung unter Eis gezielt für verschiedene Moden und über einen breiten Frequenzbereich zu analysieren. Die Anregung mit einem Gleitsinus ist hierfür ungeeignet. Das Empfängersignal bei der Anregung mit einem Gleitsinus bildet eine Überlagerung aller angeregten Moden. Innerhalb eines Moden wird wiederum eine große Frequenzbandbreite angeregt und das Antwortsignal ergibt sich aus dem komplexen Zusammenspiel von stark dispersiven Moden und deren Interferenz. Eine Untersuchung, ob unterschiedliche Moden bei gewissen Frequenzen selektiv abgeschwächt werden, ist nicht möglich. Der Vorteil dieser Methode besteht jedoch in ihrer Einfachheit und Nähe zur praktischen Anwendung. Ein System dieser Form könnte bei einer großen Bandbreite verschiedener Werkstoffe ohne Anpassungen funktionieren und der Aufwand, die Wellenübertragung beispielsweise modenselektiv auf die genauen Gegebenheiten abzustimmen, entfällt. Die Anregung mit einem Gleitsinus wird daher auch in der vorliegenden Arbeit aufgenommen und gründlich analysiert.

4. Konzept

Eis beeinflusst wesentlich die Amplitude und Laufzeit verschiedener Ausbreitungsmoden. Für die gezielte Aufklärung des Sachverhaltes wird ein Modellversuch entworfen, dessen Randbedingungen festgelegt werden müssen. Das Kapitel beschreibt konzeptionelle Überlegungen, die hinsichtlich der Auslegung relevant sind.

Die Krümmung der Außenhaut einer Flügelvorderkante erzeugt hauptsächlich Änderungen in den Dispersionseigenschaften. Diese sind jedoch vernachlässigbar, wenn das Verhältnis von Krümmungsradius zur Plattendicke größer als 10:1 ist [50, p. 35]. Die Ergebnisse, die an einer ebenen Platte erzielt werden, sind in diesem Fall auf eine gekrümmte Tragflächenhaut übertragbar. Es genügt die Versuche an einer einfachen, ebenen Platte durchzuführen. Der genutzte Plattenwerkstoff ist CFK. Auf einen variierenden Lagenaufbau mit Gewebe in Köper- oder Leinwandbindung wird verzichtet. Die Fasern solcher Gewebe liegen nicht in einer Ebene, sondern zeigen eine Ondulation, die womöglich zur schleichenden Modenkonversion führt. Weiterhin sind Steifigkeitssprünge zu vermeiden, um die Komplexität möglichst gering zu halten. Andernfalls treten zusätzliche Reflexionen und Modenkonversionen auf. Der komplexe multimodale Charakter der Wellen kommt stärker zu tragen und einzelne Wellenpakete sind vermutlich nicht mehr klar zu unterscheiden. Die Untersuchungen sind an vorhandenes Material gebunden. Aus den vorangegangenen Untersuchungen [49] existieren CFK-Platten mit den Maßen 880 mm x 580 mm x 1 mm, die die obengenannten Anforderungen an einen einfachen Aufbau erfüllen. Die Platten bestehen aus einem CFK-Prepreg (von eng. *preimpregnated fibres* „vorimprägnierte Fasern“) (*HexPly® M21, IMA-12K*) mit einer unidirektionalen Lagenorientierung von 0°, 90°, 90°, 0°, wobei 0° in Plattenlängsrichtung definiert ist. Außerdem können aus dem genannten Faser-Matrix-Halbzeug bei Bedarf weitere Platten hergestellt werden. Für die Wellenanregung und den Wellenempfang sind zwei verschiedene Arten von Piezoaktoren vorhanden, die aufgeklebt werden. Die Eiserkennung findet deshalb ausschließlich mit Lambwellen statt. Die Aktoren sind einerseits *DurAct-Flächenwandler (PI Ceramic P-876K009)* mit Abmessungen von 51 mm x 11 mm x 0,8 mm und andererseits Chip-Aktuatoren (*PI Ceramic PRYY-1126*) mit einem Durchmesser von 15 mm und 0,2 mm Dicke, die jeweils den gleichen Keramikwerkstoff (*PI Ceramic PIC255*) nutzen. Für die Applizierung wird ein Harzsystem verwendet (*Sikomin SR 1710i mit SD 8824*). Die rechteckigen *DuraAct-Flächenwandler* sind mit ihrer gerichteten Abstrahlcharakteristik besser für den Aufbau einer Strukturüberwachung in Bezug auf eine Eiserkennung nach dem Sender-Empfänger-Prinzip geeignet. Die generierten Lambwellenfelder breiten sich bei einem rechteckigen Aktor nicht als Kugelwellen, sondern viel mehr in Form einer gerichteten Keule aus, die einer geringeren geometrischen Abschwächung unterworfen sind. Die Amplituden der Wellen sind in der Entfernung größer und damit fällt im Vergleich zu den runden Chip-Keramiken das Signal-Rausch-Verhältnis größer aus. In Konsequenz ist die Qualität des Nutzsignals besser. Zusätzlich sind die *DuraAct-Flächenwandler* gekapselt und müssen ausschließlich an den Lötunkten isoliert werden. Der Übertragungsweg liegt in 0°-Richtung der Platte. Für große Empfängeramplituden werden die rechteckigen Aktoren mit den Längsseiten parallel zueinander appliziert. Außerdem begünstigt ein geringer Abstand zwischen Sender und Empfänger große

Empfängeramplituden. Dies ist gerade in Anbetracht der erheblichen Amplitudenreduktion unter einer Eisanlagerung wichtig, wie sie in Mendig et. al. [49] dokumentiert ist. Neben einem erforderlichen Mindestabstand für das Auftragen von Eis, separieren sich Wellenpakete unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit erst nach einer gewissen Lauflänge. Ein Abstand zwischen Sender und Empfänger muss vorliegen, der mindestens der Separationslänge entspricht. Nur so können die einzelnen Wellenpakete separat hinsichtlich ihrer Laufzeit und Amplitude ausgewertet werden. Um Unterschiede in den Laufzeiten deutlich auszumachen, ist ein großer Abstand ebenso vorteilhaft, da der Laufzeitunterschied proportional zur Lauflänge wächst. Die im Anhang A hergeleitete Gleichung (11) gibt eine Abschätzung, nach welcher Lauflänge ein S_0 -Lambwellenpaket örtlich klar von einem A_0 -Lambwellenpaket separiert ist:

$$s = \frac{c_{g,A_0} * c_{g,S_0} * n}{f(c_{g,S_0} - c_{g,A_0})} \quad (11)$$

Die erforderliche Separationslänge hängt neben den Gruppengeschwindigkeiten von der Frequenz und Periodenanzahl des Anregungssignals ab. Denn mit höherer Anzahl an Anregungsperioden und geringer Frequenz, ist die Dauer der Anregung länger und die ausgesendeten Wellenpakete haben eine größere räumliche Ausdehnung, so dass auch die Separationslänge zunimmt. Ein Verbreitern oder „Zerfließen“ der einzelnen Wellenpakete aufgrund der Dispersion wird vernachlässigt und sollte in der Praxis mit einem zusätzlichen Sicherheitsabstand berücksichtigt werden. Die Abschätzung der Separationslänge gestaltet sich dennoch schwierig, da Kenntnis über die Dispersionseigenschaften vorausgesetzt wird und die Dispersionseigenschaften zusätzlich unter einem Eisansatz variieren. Zudem ist nicht klar wie viele Moden angeregt und in der Betrachtung berücksichtigt werden müssen – experimentelle Voruntersuchungen sind unerlässlich. Erst darauf aufbauend kann eine quantitative Betrachtung mithilfe von berechneten Dispersionseigenschaften erfolgen. Insbesondere bei einer weniger starken Amplitudenreduktion ist nicht ausgeschlossen, dass ein schneller propagierender Lambwellenmode an Kanten reflektiert und zeitgleich mit einem zweiten Wellenpaket langsamer Ausbreitungsgeschwindigkeit am Empfänger eintrifft. Das zweite Wellenpaket kann in diesem Fall womöglich nicht identifiziert werden. Eine Prognose, ob z. B. ein reflektiertes S_0 -Lambwellenpaket mit einem direkt übertragenen A_0 -Lambwellenpaket zusammenfällt, kann über die Lauflängen und Gruppengeschwindigkeiten angestellt werden. Die Wellenpakete fallen am Empfänger zusammen, wenn der Quotient der Gruppengeschwindigkeiten dem der Lauflängen entspricht:

$$\frac{c_{g,S_0}}{c_{g,A_0}} = \frac{l_{S_0}}{l_{A_0}} \quad (12)$$

Die rechteckigen Aktoren haben den Vorteil einer vernachlässigbaren Abstrahlung in einer Orientierung von 45° zu den Kanten. Das heißt, es genügt ausschließlich Reflexionen des gerichteten Lambwellenfelds zu berücksichtigen, die an den Längsseiten des

Flächenwandlers emittiert wurden. Dennoch ist eine Abschätzung schwer, da die Gruppengeschwindigkeiten mit der Frequenz und unter Eis variieren. Es ist ratsam die Aktoren symmetrisch, mit gleichen Randabständen auf der Platte aufzukleben, wie es in Abbildung 12 gezeigt ist. Neben dem direkten Übertragungsweg entstehen durch Reflexionen indirekte Übertragungswege (gestrichelte und durchgezogene Pfeile) derselben Länge. Die beiden Reflexionen treffen zeitgleich am Empfänger ein und die absolute Anzahl an Reflexionen im Antwortsignal wird

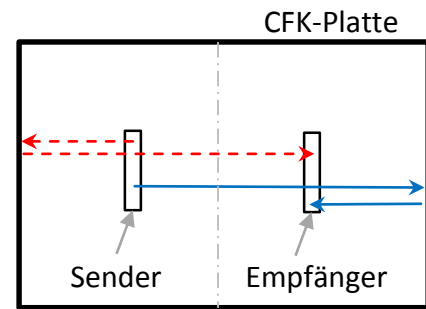


Abbildung 12: Äquivalente Reflexions-Laufängen bei symmetrischer Anordnung.

reduziert, so dass Wellenpakete anderer Moden besser identifiziert werden können. Die geringstmögliche Anzahl an Reflexionen wird erreicht, wenn die Piezokeramiken direkt am Rand aufgeklebt sind und damit eine rückseitige Reflexion komplett unterbunden wird. Neben der geometrischen Anordnung und der beteiligten Gruppengeschwindigkeiten hat die Abschwächung der Wellen einen maßgeblichen Einfluss. Das Verhalten wird daher in den Voruntersuchungen näher analysiert.

Zusammenfassend muss der Abstand zwischen Sender und Empfänger folgende Anforderungen erfüllen: Der Abstand muss

- groß genug für die Applikation von Eis sein.
- so gering wie möglich gewählt werden, um eine große Empfängeramplitude zu erhalten. Dies ist besonders bei einer starken Amplitudenabschwächung wichtig.
- mindestens der Separationslänge der beteiligten Moden entsprechen.
- bei einer weniger starken Amplitudenabschwächung derart gewählt werden, dass Randreflexionen möglichst nicht mit Wellenpaketen anderer Ausbreitungsmoden am Empfänger zusammenfallen.

Für die experimentellen Untersuchungen ist es wichtig, verschieden dicke Eisschichten auf der CFK-Platte zu erzeugen. Dafür steht eine Tiefkühlkammer mit einer Innentemperatur von -18°C zur Verfügung, in der die Versuche stattfinden. Um eine Klareisschicht aufzubringen bieten sich verschiedene Methoden an: Wasser kann in eine temporär auf die Platte aufgelegte Form gegossen werden und am Stück gefrieren. Bei dieser Methode besteht jedoch die Gefahr der Poren- oder Rissbildung, die durch Eigenspannungen beim Gefrierprozess entstehen. Die Eigenschaften entsprechen womöglich nicht mehr denen von Klareis, da beispielsweise die Kerbwirkung an wenigen Poren oder Einschlüssen bereits rapide die Festigkeit von Eis herabsetzt. Eine schichtweise Applikation mit einem angefeuchteten und warmen Textil, das über den zu vereisenden Bereich gezogen wird, umgeht dieses Problem. Auf diese Weise kann Zug um Zug eine spannungsarme Eisschicht gebildet werden. Noch realitätsnäher ist eine Eisbildung aus kleinen Wassertropfen. Die kleinen Wassertropfen entstehen beispielsweise mithilfe einer Sprühpistole oder einer anderweitigen Zerstäubung. Bei ausreichend kleinem Tropfendurchmesser kann durch das Aufsprühen womöglich Misch- oder Raueis hergestellt werden. Die genannten Optionen, das blockweise Gefrieren, das schichtweise Auftragen und das Aufsprühen werden im Rahmen

von Voruntersuchen näher analysiert. In den anstehenden Experimenten soll das Eis zunächst homogen die Übertragungsstrecke bedecken. Dies ist der einfache und berechenbare Fall, wie er auch in Gao und Rose [47] dargestellt ist. Erst im Anschluss ist es angebracht, spezielleren Fragestellungen nachzugehen, z. B. ob an partiell aufgebrachten Eisschichten Reflexionen auftreten, wie bei Shoja et al. [48]. Diese spezielleren Fragestellungen sind allerdings nicht Teil der Arbeit und die Untersuchung konzentriert sich auf eine Eisschicht, die homogen die Übertragungsstrecke bedeckt.

5. Berechnung von Dispersionseigenschaften

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Berechnung von Dispersionseigenschaften. Die Dispersionseigenschaften der CFK-Platte sind elementar. Nach Gleichung (3) können die Gruppengeschwindigkeiten verschiedener Lambwellenmoden abgeleitet werden, die grundlegend für die Identifikation einzelner Moden im Antwortsignal und für die Auslegung des Modellversuchs sind. Der Hauptaspekt ist jedoch, wie sich das Dispersionsverhalten unter einer Eisanlagerung ändert und damit für die Eiserkennung genutzt werden kann.

Für die Berechnung von Dispersionsdiagrammen existieren verschiedene Ansätze, die seit der Ausarbeitung von H. Lamb [23] stetig in ihrer Komplexität steigen. Für isotrope Materialien können die Dispersionseigenschaften mit einem einfachen harmonischen Ansatz, unter Berücksichtigung der spannungsfreien Randbedingungen an den Plattenoberflächen numerisch berechnet werden. In die Lösung werden die horizontalen Scherwellen allerdings nicht eingeschlossen. Bei anisotropen Ausbreitungsmedien ist die Berechnung der Dispersionsbeziehung komplexer. Verbundwerkstoffe bestehen aus mehreren Schichten, die sich unterschiedlich auf die Wellenausbreitung auswirken. Angesichts der verschiedenen Elastizitäten, sowie der Reflexion und Brechung von Wellen an den einzelnen Schichten, müssen elementare Longitudinal- und Transversalwellen in geeigneter Weise zu einer Lambwelle überlagert werden. Diese Arbeit verwendet ein Berechnungsprogramm namens *Displam* [51], das die Berechnung der Dispersionseigenschaften mithilfe der sogenannten Transfermatrix-Methode leistet. Ergänzend bietet [27] einen umfassenden Überblick über das Prinzip der Transfermatrix-Methode und stellt vergleichend weitere Berechnungsmethoden vor.

Das Berechnungsprogramm *Displam* ermittelt inkrementell zu einer bestimmten Frequenz die Phasengeschwindigkeit und Kreiswellenzahl. Ferner wird eine Zuordnung getroffen, ob das berechnete Wertepaar zu einer symmetrischen, antisymmetrischen oder horizontalen Schwingung gehört. Über eine Eingabedatei können dem Programm die folgenden Daten übergeben werden:

- Kennwerte verschiedener Materialien
- Lagenaufbau, Lagenorientierung und Lagendicke
- Ausbreitungswinkel in der Platte
- Intervall für die Frequenz und Phasengeschwindigkeit
- Anzahl der zu berechnenden Inkremente innerhalb des Intervalls

Eine Herausforderung bildet der Umstand, dass die Ausgabedaten von *Displam* eine Punktwolke bilden. Bis auf die Klassifizierung der einzelnen Wertepaare in symmetrisch, antisymmetrisch und horizontal, findet keine weitere Zuteilung oder Ordnung in einzelne Moden statt. Für die Berechnung der Gruppengeschwindigkeit eines Modes wird die numerische Ableitung der Phasengeschwindigkeit nach der Kreiswellenzahl benötigt (s. Gleichung (3)). Dafür müssen die Wertepaare passend zur jeweiligen Mode zugeordnet werden. Das Dispersionsdiagramm in Abbildung 13 a zeigt exemplarisch die von der

Software errechneten Rohdaten. Die Frequenzauflösung ist in diesem Beispiel niedrig, um einzelne Berechnungspunkte getrennt voneinander darzustellen. Eine geringe Auflösung führt jedoch zu Lücken in den Dispersionslinien. Wertepaare aus Frequenz und Phasengeschwindigkeit sind entsprechend ihrer Klassifizierung in symmetrisch, antisymmetrisch und horizontal verschiedenfarbig gekennzeichnet. Diese Gruppierung ist bis zum Erscheinen der ersten Mode höherer Ordnung korrekt und S_0 , SH_0 und A_0 werden richtig zugeordnet. Im Anschluss scheint die Zuordnung willkürlich.

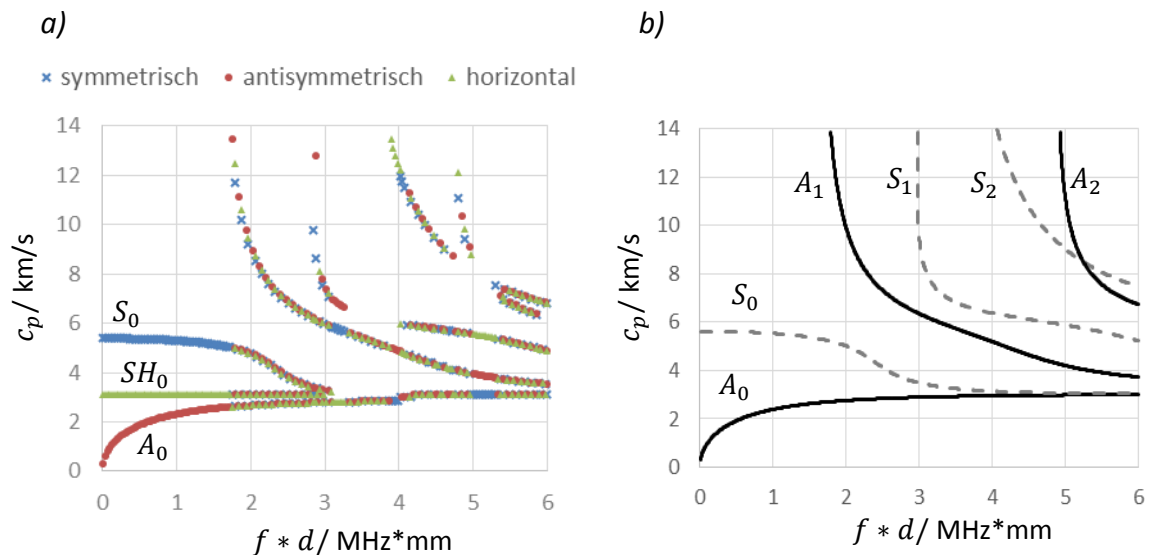


Abbildung 13: Mit *Displam* berechnete Dispersionsdiagramme einer 1 mm dicken Aluminiumplatte: a) Rohdaten, b) Mit einem Sortialgorithmus zugeordnete Dispersionslinien.

In der Teilabbildung b ist dasselbe Dispersionsdiagramm gezeigt, mit dem Unterschied dass die Wertepaare den jeweiligen Dispersionslinien zugeordnet und durch eine Linie verbunden sind. Zugleich bleibt der, für die nachstehenden Untersuchungen uninteressante SH_0 -Mode unberücksichtigt. Beruhend auf Rohdaten höherer Auflösung werden die Wertepaare mit einem in *LabVIEW*® programmierten Algorithmus sortiert. Dieser ordnet ausgehend von niedrigen Frequenzen und den zu Beginn sicher einzuordnenden Moden S_0 , SH_0 und A_0 jedes folgende Wertepaar ein. Dabei werden zwei Bedingungen genutzt: Das Wertepaar muss zum Betrag der Phasengeschwindigkeit und der Steigung einer Dispersionslinie passen. Andernfalls bildet das Wertepaar den Startpunkt der nächst höheren Mode. Dennoch kommt es an Kreuzungspunkten oder an eng benachbarten Kurvenabschnitten ähnlicher Steigung zu Fehlzuordnungen. Eine manuelle und zeitintensive Korrektur der Daten ist notwendig.

In Anhang B sind sämtliche für die Berechnung herangezogenen Materialparameter aufgelistet. Eine Ausnahme bilden die Kennwerte des CFK-Prepreg, da es sich bei ihnen um DLR-interne Informationen handelt, deren Veröffentlichung nicht zugelassen ist. Die CFK-Platte besteht aus vier unidirektionalen und jeweils 0,25 mm dicken Lagen der Orientierung 0° , 90° , 90° , 0° . Optional kann als eine fünfte Schicht Klar-, Rau- oder Mischeis hinzugefügt werden. Der Ausbreitungswinkel in der Platte liegt in 0° -Richtung und wird dem Programm als $0,01^\circ$ übergeben, da sonst Berechnungsfehler eintreten. Die Berechnung für die CFK-

Platte ohne Eis ergibt etwa 50000 einzelne Wertepaare und bedarf einer Rechenzeit von über einer Stunde. Die hohe Punktdichte ist für den Sortieralgorithmus obligatorisch. Ein Nachteil, der mit der hohen Auflösung einhergeht ist numerisches Rauschen. Das Rauschen macht sich insbesondere bei der Berechnung der Gruppengeschwindigkeit durch die gebildete Ableitung bemerkbar. Um die Dispersionsdiagramme adäquat darzustellen, gilt es die Datenmenge zu reduzieren und die Kurven der Phasengeschwindigkeit zu glätten, so dass die Gruppengeschwindigkeit rauschfrei berechnet werden kann. Eine einfache Mittelwertbildung erweist sich hier als zielführend. Abbildung 14 zeigt die Dispersionsdiagramme der CFK-Platte. Links ist die Phasengeschwindigkeit und rechts die Gruppengeschwindigkeit der einzelnen Moden in Abhängigkeit der Frequenz aufgetragen. Für die Gruppengeschwindigkeit des S_1 -Modes wird exemplarisch der stark verrauschte Verlauf gezeigt, der sich aus den ungeglätteten Daten berechnet.

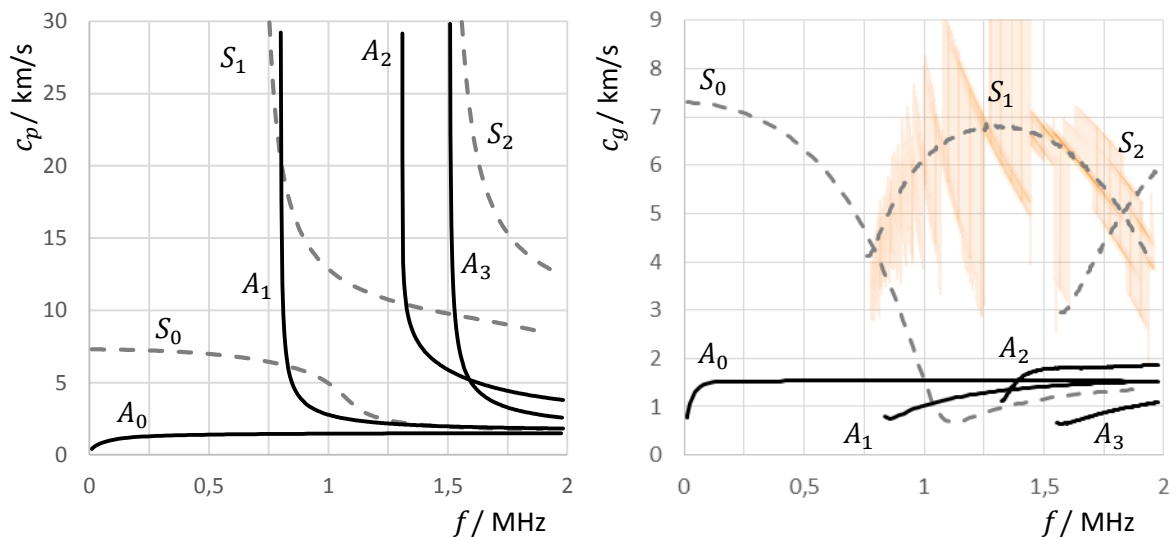


Abbildung 14: Dispersionsdiagramme der CFK-Platte ohne Eis: Phasengeschwindigkeiten (links) und Gruppengeschwindigkeiten (rechts), einschließlich Beispiel von verrauschten Ergebnissen anhand des S_1 -Modes.

Im Folgenden wird das Dispersionsverhalten der CFK-Platte unter einer Klareisschicht analysiert. Im Rahmen der befristeten Bearbeitungszeit entfällt eine genauere Abgrenzung zu Rau- und Mischeis. Der besseren Übersichtlichkeit halber gliedert sich die Darstellung der Berechnungsergebnisse in Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten, sowie in die symmetrischen und antisymmetrischen Lambwellenmoden. Dem Anhang C sind die vollständigen Dispersionsdiagramme für die jeweilige Eisdicke angefügt. Die Analyse konzentriert sich im weiteren Verlauf auf die Gruppengeschwindigkeiten der Fundamentalmoden (S_0 , A_0) und die Grenzfrequenzen, ab der höhere Moden in Erscheinung treten. Diese sind für die praktische Anwendung besonders interessant, da die Laufzeiten und Grenzfrequenz einfach zu bestimmen sind.

Die Geschwindigkeiten sind von nun an nur noch über der Frequenz aufgetragen, da in der Darstellung ansonsten der Einfluss der Dicke verloren geht.

Phasengeschwindigkeiten

Die nachstehende Grafik enthält die Dispersionslinien der ersten drei symmetrischen Lambwellenmoden. Für jeden Mode sind vier Kurven der Phasengeschwindigkeit dargestellt, deren Farbintensität mit zunehmender Eisdicke verblasst. In der Berechnung werden Eisdicken von 0 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,5 mm betrachtet. Die gepunkteten Linienabschnitte überbrücken Lücken in den Kurven. Hier sind die Rohdaten nicht konsistent und eine Zuordnung der Wertepaare zu den Dispersionskurven scheitert. Der Verlauf der eingesetzten Kurvenabschnitte wird angenommen und ist nicht gesichert.

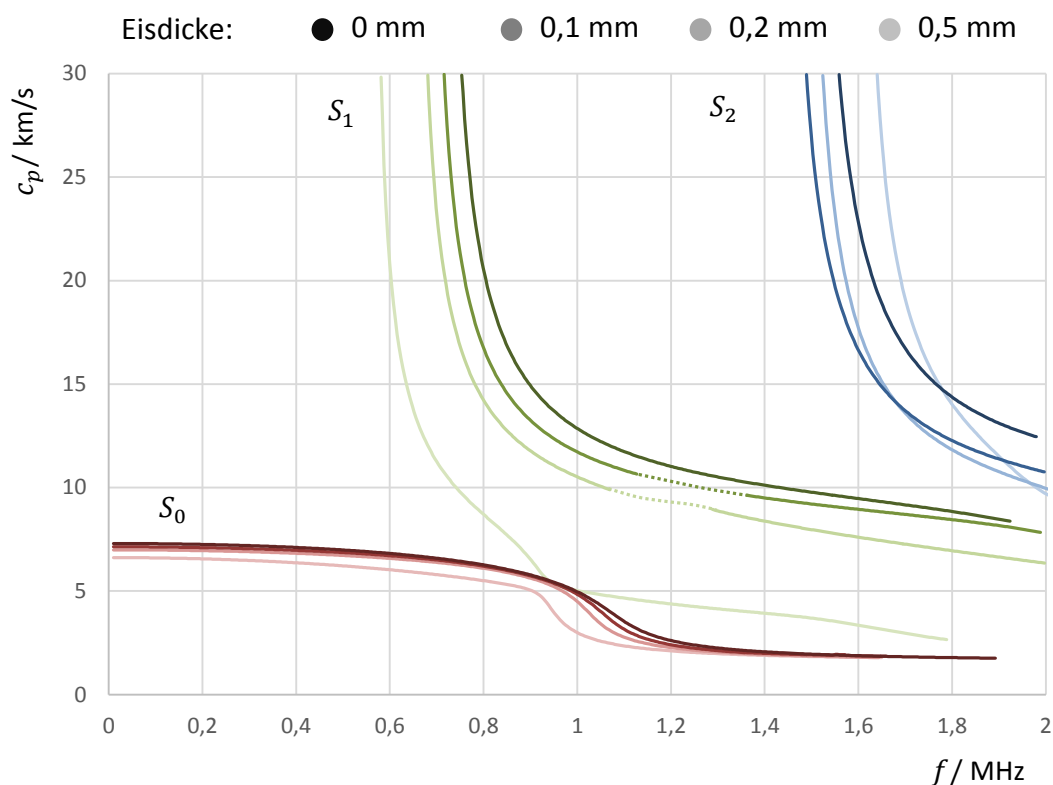


Abbildung 15: Phasengeschwindigkeiten der ersten drei symmetrischen Lambwellenmoden unter einer Klareisschicht von 0 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,5 mm.

Der symmetrische Grundmode S_0 zeigt mit zunehmender Eisdicke geringe Änderung in seinem Kurvenverlauf. Es ist dennoch zu sehen, dass die Phasengeschwindigkeit mit zunehmender Dicke stetig abnimmt. Der nächste symmetrische Mode (S_1) erweist sich deutlich sensibler gegenüber der Eisschicht. Seine Grenzfrequenz verschiebt sich signifikant in Richtung niedriger Frequenzen. Der S_1 -Lambwellenmode ist von weitergehendem Interesse, da es der erste Mode höherer Ordnung ist (vgl. Abb. 14). Gelingt es den S_1 -Mode anzuregen, so kann anhand der Grenzfrequenz direkt auf die Dicke einer Klareisschicht rückgeschlossen werden. Die Dispersionslinien des S_2 -Modes sind im Gegensatz dazu nicht streng nach der Eisdicke gestaffelt und verschieben sich nach 0,1 mm zu niedrigen Frequenzen und im Anschluss für Dicken von 0,2 mm und 0,5 mm zu höheren Frequenzen. Der S_2 -Mode ist daher für eine Dickenmessung weniger geeignet.

Abbildung 16 präsentiert in einem Frequenzbereich von 0 MHz bis 2 MHz die Phasengeschwindigkeiten der antisymmetrischen Lambwellenmoden. Im Gegensatz zu den symmetrischen Moden erscheinen in dem Frequenzintervall nicht nur drei, sondern vier verschiedenen Moden und ab einer Eisdicke von 0,2 mm sogar fünf. Zur besseren Unterscheidung ist der A_3 -Lambwellenmode als Strich-Punkt-Linie gezeichnet.

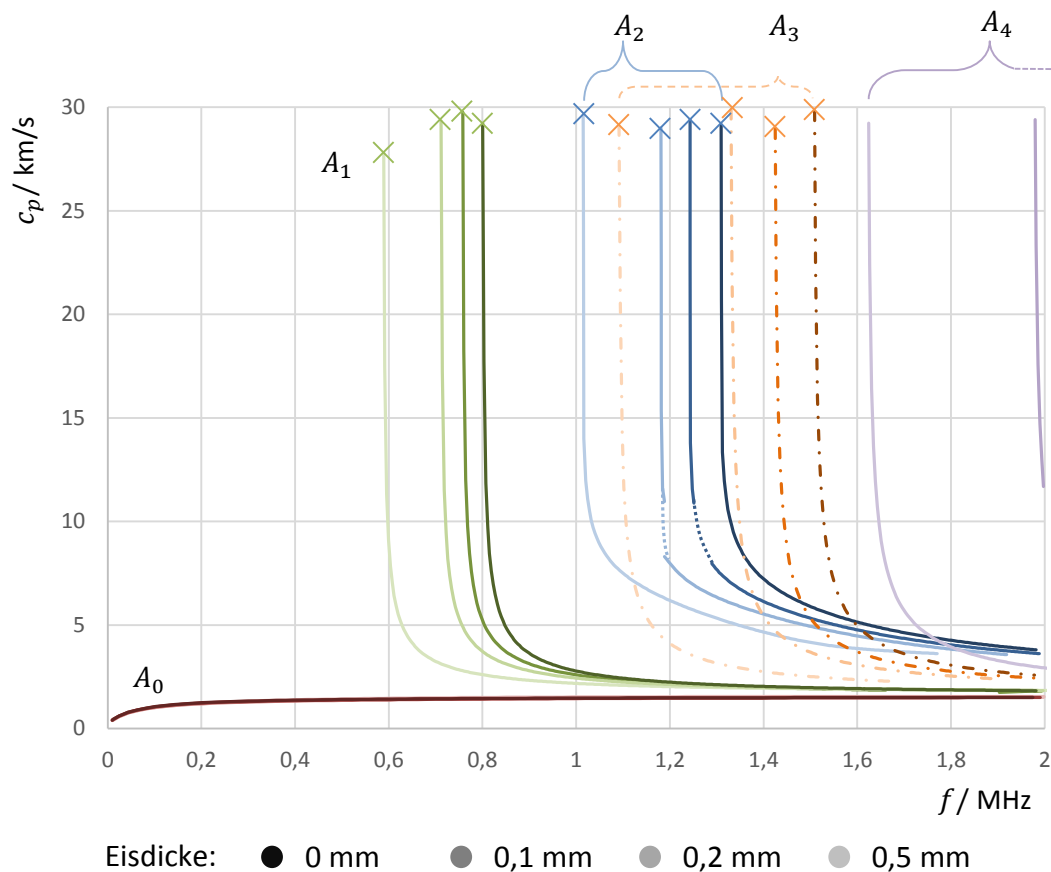


Abbildung 16: Phasengeschwindigkeiten der ersten vier antisymmetrischen Lambwellenmoden unter einer Klareisschicht von 0 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,5 mm.

Während die A_0 -Linie keine nennenswerte Änderung der Phasengeschwindigkeit zeigt, verschieben sich die Dispersionslinien aller höheren Moden konsequent zu niedrigeren Frequenzen, wenn die Eisschicht wächst. Abbildung 17 veranschaulicht den Sachverhalt anhand der Moden A_1 bis A_3 . Aufgetragen ist der Betrag, um den sich die Grenzfrequenz mit der Eisdicke ändert. Die hierfür herangezogenen Punkte sind in Abbildung 16 als Kreuz markiert. Das hervorgehende Diagramm demonstriert einen linearen Zusammenhang zwischen der Grenzfrequenzänderung und der Eisdicke. Die Steigung der Geraden kann als Sensitivität der Moden gegenüber der Eisschicht angesehen werden; je höher der Mode, desto sensibler reagiert dieser auf Eis.

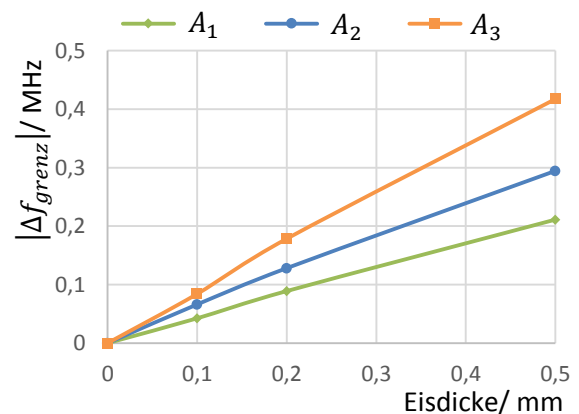


Abbildung 17: Verschiebung der Grenzfrequenz von den Moden A_1 , A_2 und A_3 über der Eisdicke.

Gruppengeschwindigkeiten

Abbildung 18 zeigt die Gruppengeschwindigkeiten der ersten drei symmetrischen Lambwellenmoden. Auch hier verbinden gepunktete Linienabschnitte Lücken in den Kurven. Bei S_1 und einer Eisdicke von 0,2 mm ist die Steigung an den Endpunkten der Lücke stark unterschiedlich. Die Lücke kann nicht mit einer schlichten Verlängerung der angrenzenden Kurvenabschnitte überbrückt werden – das an dieser Stelle eingesetzte Verbindungsstück ist spekulativ.

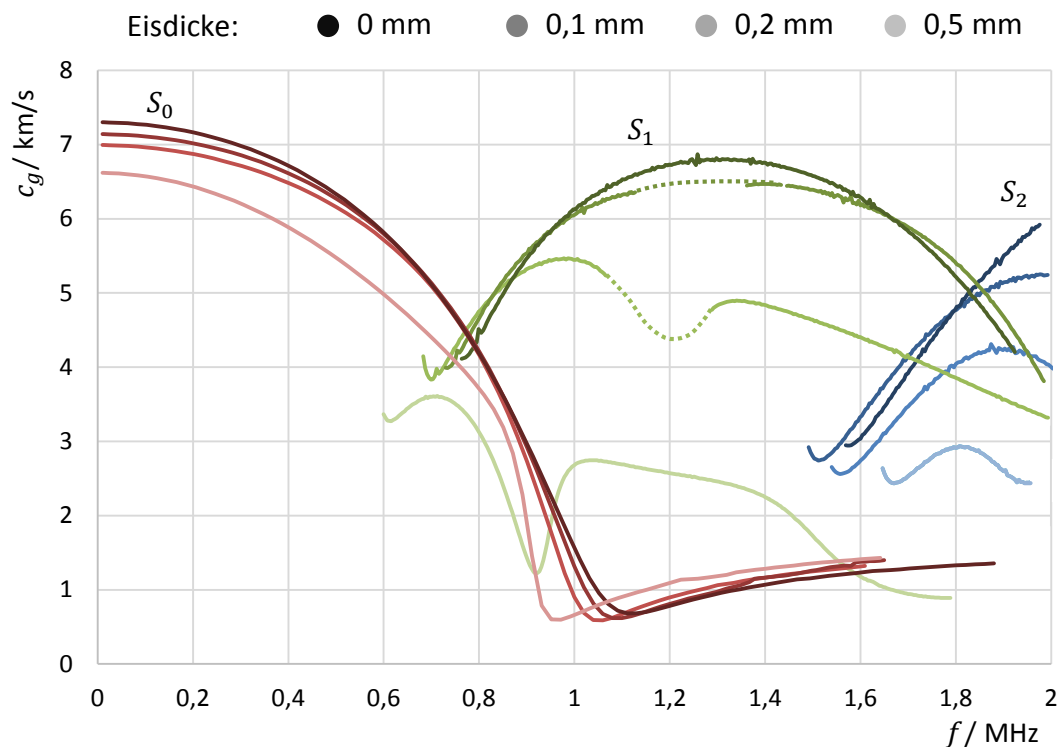


Abbildung 18: Gruppengeschwindigkeiten der ersten drei symmetrischen Lambwellenmoden unter einer Klareisschicht von 0 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,5 mm.

Ähnlich wie bei den Phasengeschwindigkeiten, scheinen höhere Moden empfindlicher auf die Eisschicht zu reagieren. Die Gruppengeschwindigkeit von S_0 sinkt bei einer Eisschicht von 0,5 mm um etwa 0,8 km/s (0,2 MHz), während es bei S_1 bereits 3,2 km/s sind (1 MHz). Die Grafik zeigt nur die Verläufe der ersten beiden symmetrischen Moden hinreichend. Es kann kein Trend bestimmt werden, wie sensibel sich die Gruppengeschwindigkeit mit der Modenordnung ändert. Wie eingangs beschrieben, ist die Gruppengeschwindigkeit des fundamentalen S_0 -Lambwellenmoden in der praktischen Anwendung bedeutend. Die nebenstehende Abbildung zeigt seine Gruppengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eisdicke. Für Frequenzen bis 300 kHz ist die stetige Abnahme nahezu linear und kann gut für

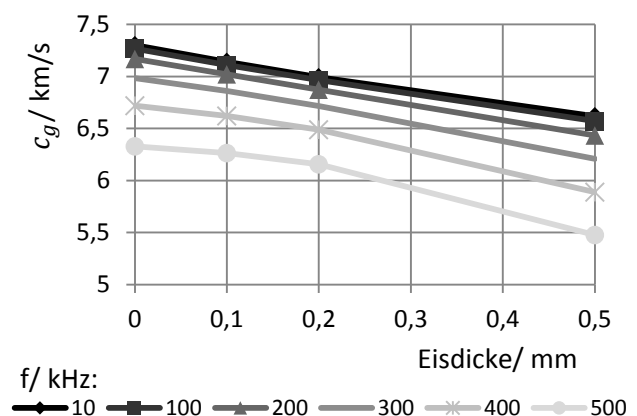


Abbildung 19: Gruppengeschwindigkeit des S_0 -Lambwellenmoden aufgetragen über der Eisdicke bei verschiedenen Frequenzen.

die Bestimmung der Eisdicke herangezogen werden. Im Gegensatz dazu bildet S_1 mit zunehmender Eisdicke einen zusätzlichen Tiefpunkt aus und die Änderung der Gruppengeschwindigkeit ist stark von der Frequenz abhängig.

Die nachstehende Grafik enthält die Gruppengeschwindigkeiten der ersten vier antisymmetrischen Lambwellenmoden. Analog zu seiner Phasengeschwindigkeit, reagiert die Gruppengeschwindigkeit des A_0 -Modes kaum auf das Eis. Der Verlauf der Moden A_1 und A_3 ändert sich wenig und wird lediglich hin zu niedrigen Frequenzen verschoben. Die Verschiebung entspricht dem in Abbildung 17 vorgestellten Verhalten. Die größte Änderung in der Gruppengeschwindigkeit beträgt ca. 1 km/s (A_2 , 1,35 MHz) und ist weitaus geringer als bei den untersuchten symmetrischen Moden. Auffällig ist der Mode A_2 , der mit zunehmender Eisschicht einen Hochpunkt bildet und bei 0,5 mm Eis auch einen Tiefpunkt besitzt.

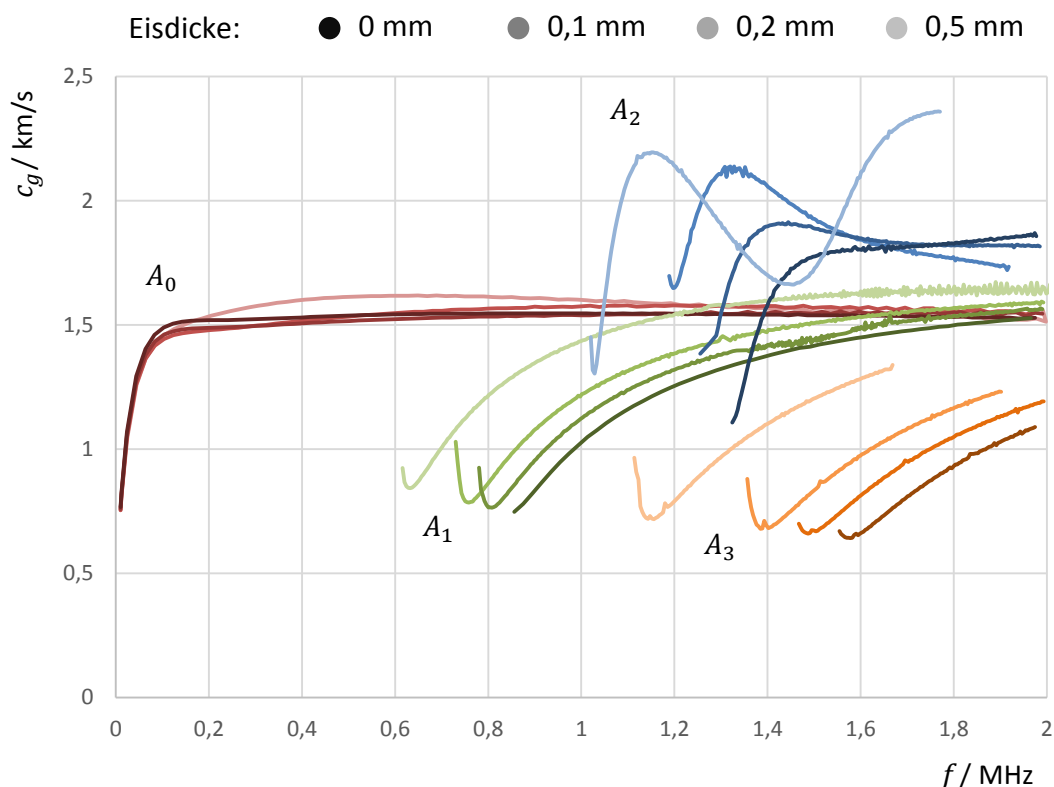


Abbildung 20: Gruppengeschwindigkeiten der ersten vier antisymmetrischen Lambwellenmoden unter einer Klareisschicht von 0 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,5 mm.

Die Laufzeitmessung des A_0 -Lambwellenmodes ist aufgrund seines nahezu unveränderlichen Verlaufes nicht zielführend, um auf das Vorhandensein oder die Dicke von Eis zu schließen. Anders ist es bei den höheren antisymmetrischen Moden, die prinzipiell für eine Eiserkennung und Dickenbestimmung genutzt werden können.

Zusammenfassend zeigen die Berechnungen, dass Klareis unterschiedlich auf die Dispersion einzelner Lambwellenmoden wirkt. Die Schichtdicke kann aus der Grenzfrequenz, ab der ein höherer Mode auftritt, abgeleitet werden. Wie stark die Grenzfrequenz mit einer wachsenden Eisschicht verschoben wird, hängt von der Ordnung der Moden ab. Je höher die

Modenordnung, desto empfindlicher ist die Reaktion auf das Eis. Dies gilt insbesondere für die antisymmetrischen Moden. Unter den betrachteten symmetrischen Moden bildet S_2 eine Ausnahme. Um die Grenzfrequenzen in der Praxis zu nutzen, müssen die höheren Moden angeregt und im Antwortsignal identifiziert werden. Deutlich einfacher ist es die Fundamentalmoden zu nutzen, die bei jeder Frequenz im Ausbreitungsmedium existieren und bei geringen Frequenzen alleine auftreten. Diese haben keine Grenzfrequenz, so dass die Laufzeit einer Wellengruppe ausschlaggebend ist. Die Berechnungsergebnisse demonstrieren, dass nur die Dispersionsänderung der symmetrischen Grundmode für eine Eisidentifikation und Dickenbestimmung tauglich ist. Über einen weiten Frequenzbereich sinkt die Gruppengeschwindigkeit von S_0 linear mit der Eisdicke. Prinzipiell kann auch eine Laufzeitmessung höherer Moden Informationen über den Vereisungszustand geben. Hier zeigen die symmetrischen Schwingungsformen eine weitaus höhere Sensitivität gegenüber dem Eis als die antisymmetrischen. Allerdings entwickeln die Dispersionslinien der symmetrischen Moden mit zunehmender Eisdicke teils neue Extrempunkte. Die Gruppengeschwindigkeit ändert sich hier nichtlinear mit dem Eis und ist empfindlich von der Frequenz abhängig. Daher sind die Moden weniger attraktiv für eine Schichtdickenbestimmung. Abschließend gibt die Tabelle 1 eine qualitative Übersicht, wie die einzelnen Moden in ihrer Grenzfrequenz und Laufzeit auf eine Klareisschicht reagieren.

Tabelle 1: Qualitative Übersicht über die Sensitivität der untersuchten Moden gegenüber einer Klareisschicht

Mode	Sensitivität	
	Grenzfrequenz (c_p)	Laufzeit (c_g)
A_0	☆☆☆☆	☆☆☆☆
A_1	☆☆☆☆	☆☆☆☆
A_2	☆☆☆☆	☆☆☆☆
A_3	☆☆☆☆	☆☆☆☆
S_0	☆☆☆☆	☆☆☆☆
S_1	☆☆☆☆	☆☆☆☆
S_2	☆☆☆☆	☆☆☆☆
Relative Änderung mit Eis:	groß ☆☆☆☆☆ klein ☆	
Linearität:	gut ● schlecht ● nicht einseitig gerichtet ●	
Nicht auswertbar:	●	

Die Berechnung erfasst nur den Einfluss von Klareis auf die Dispersionsbeziehung der CFK-Platte. Eine differenzierte Betrachtung inklusive Rau- und Mischeis oder anderen Stoffen, die eine Tragfläche kontaminieren können, findet aufgrund der eingeschränkten Bearbeitungszeit nicht statt.

6. Voruntersuchungen

Die bislang angestellten Betrachtungen sind theoretischer Natur. Die Intention dieses Kapitels ist es praktische Erfahrung zu sammeln. In Versuchen ohne akkumuliertes Eis wird erforscht, wie gut sich die theoretischen Überlegungen auf die Praxis übertragen lassen. Ein zentraler Bestandteil von jedem Versuchsaufbau ist ein Funktionsgenerator, dessen Ausgangssignal den Sender anregt, und ein Oszilloskop für die Signalauswertung am Empfänger. Da es sehr zeitaufwändig ist, die Messungen manuell auszuführen und jedes einzelne Empfängersignal im Oszilloskop abzuspeichern und für den späteren Vergleich zu exportieren, wird in dieser Arbeit der Messablauf mithilfe einer Programmierung in *LabVIEW®* automatisiert. Der von dem Programm bereitgestellte Funktionsumfang ist Gegenstand im ersten Unterpunkt. Auf der Grundlage des Programms wird darauffolgend die Wellenausbreitung in der CFK-Platte in einer Auswahl von Versuchen näher analysiert. Den Versuchen folgt direkt deren Auswertung und Interpretation.

6.1. Automatisierter Messablauf mit *LabVIEW®*

Für die Generierung von Anregungssignalen steht der Funktionsgenerator *Tektronix AFG3022C* bereit. Bei dem Modell handelt es sich um einen Arbitär-Funktionsgenerator, der beliebig geformte Ausgangssignale erzeugen kann. Dafür wird die gewünschte Signalform in einem Speicher abgelegt. Die maximale Anzahl an Punkten, die der Generator pro Sekunde ausgeben kann liegt bei $250 \cdot 10^6$, man spricht auch von einer Samplerate von 250 MS/s. Der Speicher kann unter anderem via *LabVIEW®* adressiert werden, so dass beispielsweise ein beliebig gefenstertes Anregungssignal verwendet werden kann. Der Funktionsgenerator bietet zudem zwei Ausgangskanäle. Das verwendete Oszilloskop, ein *PicoScope® 5442a* ist ein rein PC-basiertes Messinstrument, das vier Messkanäle, ein Abtastrate von 1 GS/s und eine Auflösung von bis zu 16 Bit bereitstellt.

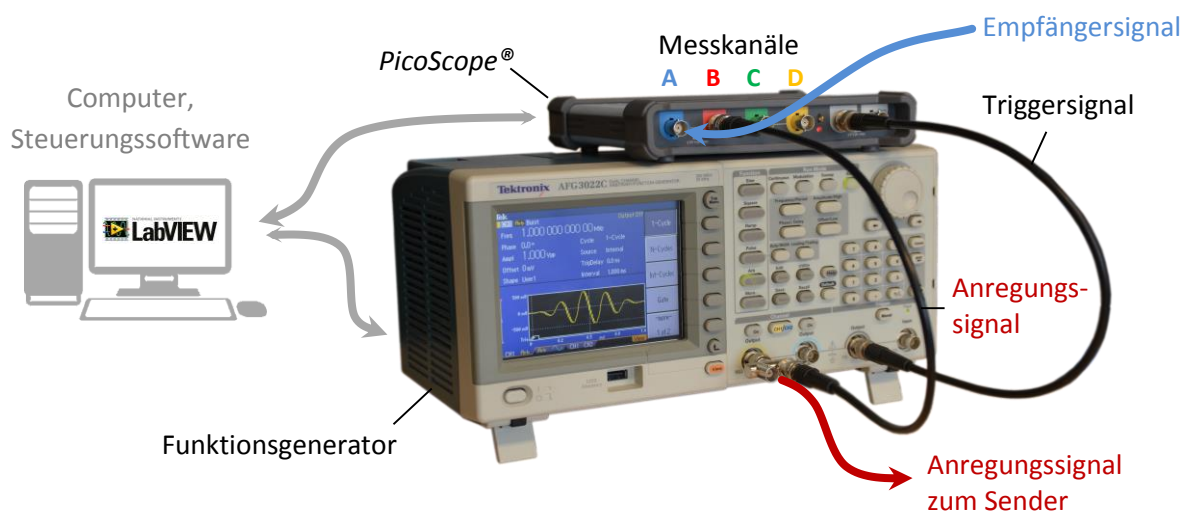


Abbildung 21: Prinzipaufbau der Messtechnik.

Der Prinzipaufbau der Messtechnik ist in der obenstehenden Abbildung dargestellt. Das Zusammenspiel der Komponenten funktioniert wie folgt: Das *PicoScope®* wird im sogenannten Block-Mode betrieben. Das heißt, ausgehend von einem Trigger-Ereignis

nimmt das Oszilloskop für die entsprechenden Messkanäle (A, B, C, D) eine definierte Anzahl von Messwerten auf und speichert sie intern zwischen. Ist die Aufnahme komplett, so wird der Inhalt aus dem Zwischenspeicher an den Computer übertragen, wo eine Visualisierung und Weiterverarbeitung erfolgt. Das Trigger-Ereignis kommt von dem Funktionsgenerator, der genau mit dem Beginn der Anregung einen Impuls an seinem Trigger-Ausgang abgibt. Die Messwertaufzeichnung der gewählten Kanäle startet also zeitgleich mit der Anregung am Sender. In dem Beispielaufbau aus Abbildung 21 liegt das Empfängersignal an Kanal A und das Anregungssignal an Kanal B.

Für eine automatisierte Messwertaufnahme ist die rechnergestützte Ansteuerung wichtig. Der nachfolgende Abschnitt geht auf die Funktionsweise und den Funktionsumfang der Steuerungsroutine ein, die in *LabVIEW*® programmiert ist. Für die Anregung generiert das Programm zunächst ein Sinus-Signal mit einer wählbaren Anzahl an Perioden. Daraufgehend wird das Signal mit einer Fensterfunktion gewichtet. In den durchgeführten Versuchen kommt entweder ein Hanning-Fenster oder ein Rechteck-Fenster zum Einsatz, wobei das Rechteck-Fenster die Signalform nicht verändert. Das Signal wird aus 60000 einzelnen Punkten gebildet, da dies die maximale Punktzahl repräsentiert, die der Funktionsgenerator speichern kann. Weitere Einstellungen, die dem Funktionsgenerator im Verlauf der Initialisierung übergeben werden, betreffen die Signalamplitude, den Ausgangskanal und das Triggerverhalten. Im Anschluss folgt die eigentliche Messung. Der Funktionsgenerator ruft die gespeicherte Wellenform ab und gibt sie in Form eines Spannungssignals aus. Das Anregungssignal wird genau dann generiert, wenn der Funktionsgenerator ein Trigger-Signal auslöst. Die steigende Flanke des Trigger-Signals signalisiert zugleich dem *PicoScope*® den Aufnahmebeginn. Dabei ist die zeitliche Koordinierung sehr wichtig, denn der Triggerimpuls, der die Messung initiiert, darf erst ausgelöst werden, wenn das *PicoScope*® aufnahmebereit ist. Dafür müssen auch hier zunächst Grundeinstellungen initialisiert werden. Die Messauflösung richtet sich nach der Anzahl der aktiven Kanäle. Nur eine Messung mit einem Kanal kann die volle Auflösung von 16 Bit nutzen. Um das ganze Spektrum des Analog-Digital-Konverters auszuschöpfen, müssen die Spannungsbereiche der Messkanäle passend gewählt werden. Zuletzt wird die Abtastrate festgelegt und die Anzahl der aufzunehmenden Messwerte vor und nach dem initialen Trigger-Ereignis eingestellt. Nach den Voreinstellungen ist das Oszilloskop bereit zur Messwertaufnahme. Der Triggerbefehl wird ausgeführt und die Datenspeicherung beginnt. Der Messablauf findet zyklisch in einer Schleife statt, so dass eine Mittelwertbildung einer beliebigen Anzahl identischer Messungen möglich ist. Auf diese Weise wird Rauschen unterdrückt und die Signalqualität verbessert. Dies ist insbesondere hilfreich, wenn mit allen vier Kanälen simultan gemessen wird, da in diesem Fall die Auflösung auf 14 Bit beschränkt ist. Der gemittelte Zeitverlauf kann für eine gesonderte Auswertung als Textdatei gespeichert oder sofort einer Auswertung unterzogen werden. Die Geschwindigkeit, mit der eine Messung auf die andere folgt, ist durch den Ausschwingvorgang der Plattenwellen begrenzt. Erst wenn sich keine Signale mehr von dem Grundrauschen abheben, kann eine zweite Messung erfolgen. In der praktischen Anwendung zeigt sich, dass die Rechenzeit des Programms der limitierende Faktor ist und

das Ausschwingen der Plattenwellen übersteigt. Es sind maximal 10 Messungen pro Sekunde möglich. Der Funktionsumfang des Programms erlaubt zudem, nach jeder Mittelwertbildung die Frequenz zu inkrementieren und damit schrittweise und vollautomatisch Messungen über einen definierten Frequenzbereich zu absolvieren. Durch die Mittelwertbildung wird der Einfluss von zufälligen Fehlern auf das Messergebnis verringert. Die Messkanäle zeigen jedoch auch eine systematische Abweichung in Form eines Offsets, der identifiziert und entfernt wird. Die programmierte Routine umfasst neben der grafischen Ausgabe auch Auswertungsfunktionen. Implementiert ist eine schnelle Fourier-Transformation (englisch: *fast fourier transform*, FFT), mit der die zeitdiskreten Messsignale in ihre Frequenzanteile zerlegt werden können. Das Ergebnis ist ein Amplitudenspektrum, das auf einen Maximalwert von 1 normiert ist. Außerdem erlaubt das Programm, die Laufzeit bis zum Eintreffen eines Wellenpaketes und die maximale Amplitude innerhalb eines Intervalls zu ermitteln. An dieser Stelle sei hervorgehoben, dass die Zeit bis zum Eintreffen einer Wellengruppe nur in erster Näherung Rückschlüsse auf die Gruppengeschwindigkeit zulässt, da für die Gruppengeschwindigkeit das Maximum der Hüllkurve ausschlaggebend ist. Das Programm leistet jedoch keine Berechnung einer Hüllkurve. Für diese Aufgabe wird ein weiteres Programm entworfen, das die Messdaten importiert und die nötigen Berechnungs- und Auswertungsschritte durchführt. Das Programm ist allerdings erst mit dem Ende der Bearbeitungszeit funktionstüchtig und wird innerhalb der Voruntersuchungen daher nicht angewendet.

Alle erstellten *LabVIEW*®-Programme sind dem Datenträger im digitalen Anhang F beigelegt. Die Programme enthalten zudem kurze Anweisungen zur Bedienung.

6.2. Vorbetrachtungen zu Zeitsignalen und Amplitudengängen

Die Intention des nachfolgend dokumentierten Versuchs ist es, einen Eindruck von der Wellenausbreitung in der CFK-Platte zu vermitteln. Dabei wird speziell den Fragen nachgegangen, wie viele Moden in Erscheinung treten, bis in welchen Frequenzbereich Wellen angeregt werden können, ob Dispersion beobachtet werden kann, und ob Kantenreflexionen und sich überlagernde Wellenpakete die Interpretation und Auswertung der Zeitsignale erschweren.

Aufbau

Für den Versuch wird eine Platte genutzt, die bereits mit *DuraAct-Flächenwandlern* bestückt ist, wobei die CFK-Platte und die Piezoaktoren der Beschreibung aus Kapitel 4 entsprechen. Die Piezowandler sind, wie in Abbildung 22 gezeigt, mittig an den Querseiten und direkt am Rand aufgeklebt. Der Abstand von Wandlermitte zu Wandlermitte beträgt 870 mm. Die Platte ist auf vier weichen Silikonfüßen gelagert, die abseits des direkten Übertragungspfades so angeordnet sind, dass sich die Platte unter ihrem Eigengewicht nur geringfügig durchbiegt. Um den Aufbau zu vervollständigen werden die Piezowandler an die, im vorangegangenen Kapitel beschriebene Messtechnik, inklusive rechnergestützter Ansteuerung und Auswertung angeschlossen. Die Wandler belegen jeweils einen Kanal am Oszilloskop. Einer der Piezos bildet den Sender und ist zusätzlich mit dem Anregungssignal des Funktionsgenerators verbunden, während der andere Piezowandler rein sensorisch arbeitet.

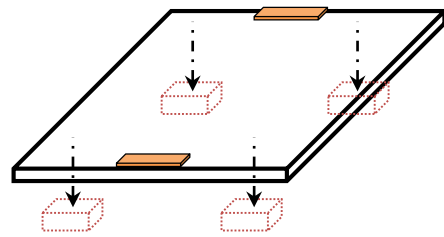


Abbildung 22: CFK-Platte mit zwei applizierten Wandlern und Lagerung auf vier weichen Silikonstützen.

Durchführung

Die Messung setzt sich aus vielen einzelnen Messungen über einen Frequenzbereich von 20 kHz bis 500 kHz zusammen. Pro Frequenzschritt wird der Mittelwert aus 20 Messungen gebildet, bevor sich die Frequenz in einer Schrittweite von 5 kHz erhöht. Die an den beiden Kanälen erfassten und gemittelten Zeitsignale werden einer Frequenzanalyse unterzogen, hinsichtlich ihrer maximalen Amplitude untersucht und abgespeichert. Für die Anregung generiert der Funktionsgenerator ein Burst-Signal, das aus drei Sinus-Perioden mit einer Spannung von 10 Vpp besteht. Die Spannung von 10 Vpp ist die maximale Ausgangsspannung des Funktionsgenerators. Die Aufnahme der gesamten Messreihe nimmt in etwa 6 Minuten in Anspruch.

Ergebnisse und Interpretation

Die Auswertung konzentriert sich zunächst auf zwei Zeitsignale, die beispielhaft analysiert und interpretiert werden. Die anschließenden Auswertungen beziehen den gesamten Frequenzbereich mit ein. In Abbildung 23 sind für eine exemplarische Anregungsfrequenz von 150 kHz die am Sender und am Empfänger detektierten Spannungen über der Zeit aufgetragen. Die Y-Achse zeigt ein Intervall von -0,4 bis 0,4 V, obgleich das Anregungssignal, das zum Zeitpunkt $t = 0 \mu\text{s}$ beginnt, eine Amplitude von 10 Vpp besitzt. Innerhalb einer

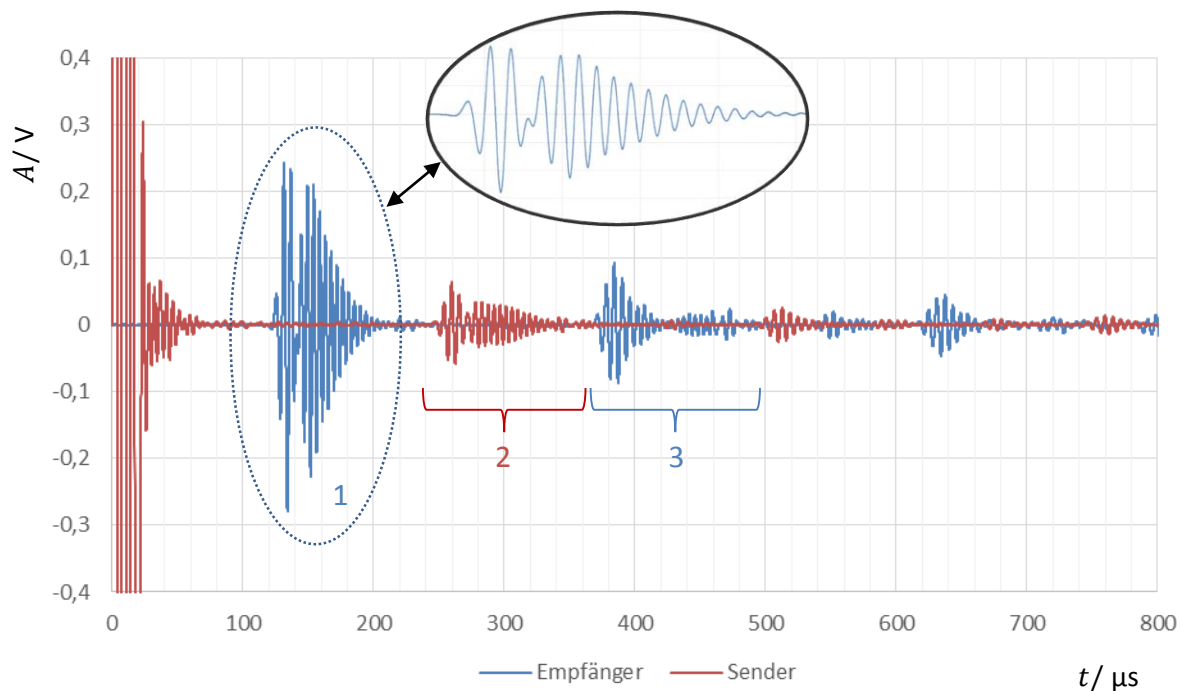


Abbildung 23: Zeitsignal von Sender und Empfänger bei einer Anregungsfrequenz von 150 kHz.

Zeitspanne von $20 \mu\text{s}$ ereignet sich die Anregung am Sender mit drei Sinus-Perioden und der Frequenz von 150 kHz. Im Anschluss zeigt das Signal ein deutliches Nachschwingen mit einer ersten Schwingungsamplitude von 0,3 V. Das Nachschwingen ist nach $t = 80 \mu\text{s}$ abgeklungen. Darauf treffen am Empfänger aber auch am Sender Wellenpakete ein. Zunächst sind die Wellenpakete klar voneinander abgegrenzt und kommen wechselseitig am Empfänger und am Sender an. Ab etwa $500 \mu\text{s}$ geht diese Systematik verloren. Die bis zu diesem Zeitpunkt eintreffenden Wellengruppen sind mit 1, 2 und 3 nummeriert. Die Laufzeit, nach der das erste Wellenpaket am Empfänger eintrifft, beträgt $123 \mu\text{s}$. Die Ankunftszeiten der Wellenpakete 2 und 3 entsprechen mit $250 \mu\text{s}$ und $370 \mu\text{s}$ etwa dem doppelten und dreifachen dieser Zeit und auch bei einem weiteren Vielfachen (ca. $490 \mu\text{s}$ und $620 \mu\text{s}$) beginnen in den Zeitsignalen Wellenpakete. Die ähnliche Form innerhalb der ersten Wellengruppen ist markant. Gerade die Wellengruppen 1 und 2 zeigen eine Zweiteilung. Am Beispiel des ersten Wellenpaketes ist diese Zweiteilung noch einmal genauer mit einer feineren Zeitskalierung dargestellt. Zu sehen ist eine Diskontinuität, die die ersten drei Perioden von dem hinteren Teil der Wellengruppe trennt. Der hintere Teil der Wellengruppe zeigt ein klassisches exponentielles Ausschwingen. Die maximale Auslenkung der gekennzeichneten Wellenpakete wird jeweils mit der dritten Periode erreicht.

Der direkte Übertragungsweg beträgt 870 mm. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des ersten Wellenpaketes kann nach dem Weg-Zeit-Gesetz näherungsweise zu 7,1 km/s bestimmt werden. Im Vergleich zu den berechneten Gruppengeschwindigkeiten in Kapitel 5, ist eine gute Übereinstimmung zu der Gruppengeschwindigkeit des S_0 -Lambwellenmodes zu sehen (s. Abbildung 18, 7,22 km/s). Bei der nächsten Wellengruppe (2), die zurück am Sender eintrifft, handelt es sich um die Reflexion der Wellengruppe 1. Ein Indiz dafür ist die vergleichbare Form, sowie die doppelte Laufzeit, die durch eine verdoppelte Lauflänge aus Hin- und Rückweg entsteht. Die verschiedenen Wellenpakete, die über der Zeit aufgenommen werden, sind lediglich Reflexionen von einem S_0 -Lambwellenpaket, das fortwährend durch die Struktur propagiert und wechselseitig am Empfänger und Sender eintrifft. Allerdings entspricht das Wellenpaket 3 nicht der Erwartung, dass die Amplitude mit zunehmender Lauflänge abgeschwächt wird, denn das Wellenpaket übersteigt die Amplitude der vorangegangenen Wellengruppe 2. Um auszuschließen, dass die beiden Piezowandler unterschiedlich sensitiv sind und dadurch das Empfängersignal größer erscheint, wird die Rolle von Sender und Empfänger vertauscht. Die Ergebnisse bleiben jedoch deckungsgleich. Ein anderer Erklärungsansatz liegt in der Dispersion mit der konstruktiven und destruktiven Überlagerung von Wellen. Ein deutlicher Anhaltspunkt für die Dispersion ist die geänderte Form der Wellengruppe nach jeder Reflexion. So zeigt die Wellengruppe 3 eine Einschnürung in der Mitte, die Gruppe separiert sich in zwei Teile. Mit weiterer Lauflänge und zusätzlichen Reflexionen verläuft diese Separation weiter, so dass für $t > 500 \mu\text{s}$ die Trennschärfe zwischen den einzelnen Reflexionsstufen verschwindet. Der Grund für das „Zerfließen“ sind verschiedene Frequenzen, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreiten. Der erste Teil der Wellengruppe bildet sein Maximum stets mit der dritten Periode aus, was mit den drei Perioden der Anregung korrespondiert. Der zweite Teil des Wellenpaketes wird offenbar durch das Nachschwingen am Sender angeregt, das vermutlich in der Eigenfrequenz der Keramik stattfindet. Somit wird eine zweite Grundfrequenz angeregt die sich mit einer anderen Geschwindigkeit ausbreitet und das stark dispersive Verhalten erklärt. Bemerkenswert ist, dass der Nachschwingvorgang mit einer Amplitude von 0,3 V genauso effektiv Wellen anregt, wie das eigentliche Anregungssignal mit einer Amplitude von 5 V. Eine nähere Analyse wird im Frequenzbereich angestellt. Nebenstehend ist das Amplitudenspektrum der Zeitsignale von Sender und Empfänger sowie deren Quotient abgebildet. Das Amplitudenspektrum des Sendersignals wird von der Anregung dominiert, es ist glatt und hat über seine Grundfrequenz hinaus Nebenmaxima, wie sie in Kapitel 2.4. erklärt werden. Das Erscheinungsbild der Empfänger-Kurve ist hingegen zerklüftet. Der Vergleich zwischen Sender-

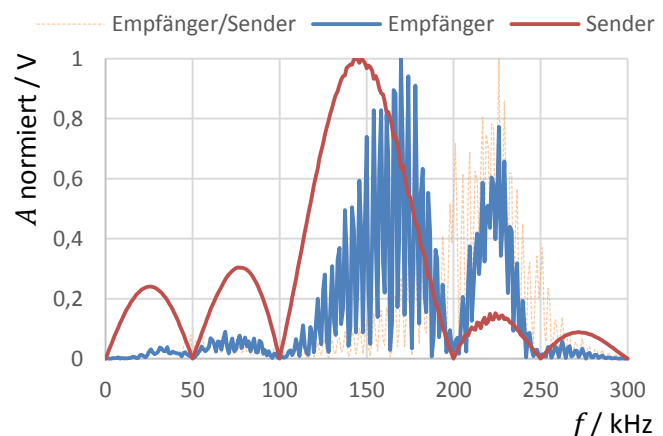


Abbildung 24: Normiertes Amplitudenspektrum der Zeitsignale am Sender und Empfänger.

und Empfängerspektrum zeigt, dass die Verläufe stets gemeinsame Minima aufweisen und dazwischen jeweils ein Maximum gebildet wird. Im Senderspektrum erreicht das höchste Nebenmaximum 30 % von dem Hauptmaximum. Das Hauptmaximum liegt bei der Anregungs- oder Grundfrequenz von 150 kHz. Das Empfängerspektrum bildet sein Hauptmaximum hingegen bei einer Frequenz von 170 kHz und auch das Nebenmaximum bei 225 kHz ist besonders stark ausgeprägt. Zunächst bestätigt das Empfängerspektrum grundsätzlich, dass zwei voneinander getrennte Frequenzbänder angeregt werden und sich aufgrund der Dispersion mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in der Platte ausbreiten. Die Verschiebung der Maxima zueinander deutet darauf hin, dass die S_0 -Wellenanregung bei Frequenzen oberhalb der Anregungsfrequenz von 150 kHz effektiver ist. In dem Diagramm ist weiterhin der Quotient von dem Empfängerspektrum zu dem Senderspektrum abgebildet. Die Kurve repräsentiert die Effektivität, mit der bei der jeweiligen Frequenz Wellen angeregt werden. Bei einer Frequenz von 225 kHz regt der Sender demzufolge am effektivsten Wellen an. Auf diese Weise ist es dem Ausschwingvorgang trotz seiner geringen Amplitude möglich, wirkungsvoll Wellen zu generieren.

Abbildung 25 zeigt einen weiteren Zeitverlauf aus der Messreihe. Das aufgetragene Empfängersignal entsteht unter der Anregungsfrequenz von 55 kHz bei drei Sinusperioden und 10 Vpp. Die Anregung beginnt bei $t = 0 \mu\text{s}$, endet nach $54,5 \mu\text{s}$ und ist zeitgleich in dem Empfängersignal als eine schwach ausgeprägte Welligkeit zu sehen. Nach etwa $122 \mu\text{s}$ trifft mit einer Amplitude von etwa 40 mV das erste, als S_0 -Mode identifizierte Wellenpaket am Empfänger ein. Seine Frequenz wird anhand der Periodendauer auf etwa 225 kHz abgeschätzt. Das Wellenpaket demonstriert eine deutliche Zweiteilung, die circa $54 \mu\text{s}$ nach dem Beginn des Wellenpaketes einsetzt. Das S_0 -Wellenpaket endet nach $250 \mu\text{s}$. In dem anschließenden Bereich von 250 bis $650 \mu\text{s}$ befinden sich eine Reihe von Wellen mit gleichbleibender Amplitude von ca. 10 mV und einer Grundfrequenz von 55 kHz. Zu erkennen ist eine hochfrequente Modulation, die bei etwa $370 \mu\text{s}$ beginnt. Nach $640 \mu\text{s}$ setzt sich deutlich ein Wellenpaket ab, das seine maximale Amplitude von 88 mV mit der dritten Schwingungsamplitude erreicht.

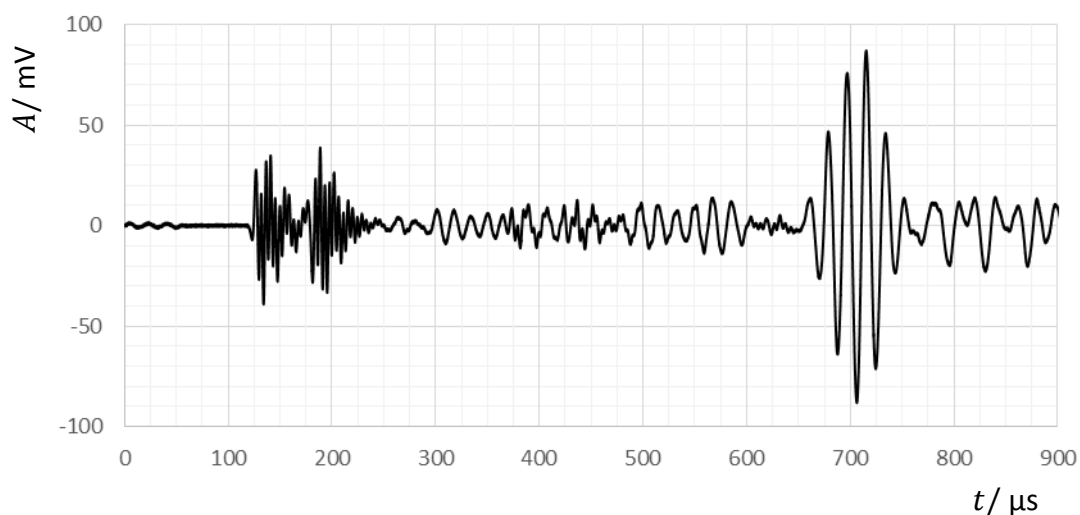


Abbildung 25: Zeitsignal vom Empfänger bei einer Anregungsfrequenz von 55 kHz.

Zwei Ursachen sind denkbar, weshalb das Anregungssignal simultan am Empfänger auftritt. Die Elektroden der Piezowandler kontaktieren eine freiliegende Kohlefaser und es entsteht eine elektrische Verbindung. Da die Wandler jedoch gekapselt sind, ist es wahrscheinlicher, dass ein Störsignal in Form einer elektromagnetischen Kopplung vorliegt. Das S_0 -Wellenpaket zeigt wieder die charakteristische Zweiteilung. Im Unterschied zu dem bereits diskutierten Signal aus Abbildung 23, kann der erste Abschnitt des zweigeteilten S_0 -Wellenpakets in seiner Form und Periodenanzahl aber nicht der Anregung zugeordnet werden. Ausschließlich die Dauer des ersten Abschnittes entspricht mit $54\ \mu\text{s}$ der Anregungsdauer. Bereits rein visuell hebt sich die Frequenz der S_0 -Wellengruppe von dem Signal ab. Die Frequenz liegt in beiden Teilen des zweigeteilten bei S_0 -Wellenpaketes bei etwa 225 kHz und ist vermutlich die Eigenresonanz der Keramik. Die Wellen konstanter Amplitude in dem Bereich von 250 bis $650\ \mu\text{s}$ sind bereits in dem Anregungssignal vorhanden – ihre Herkunft ist unbekannt. Die hochfrequente Modulation die bei $370\ \mu\text{s}$ einsetzt ist eine Reflexion des S_0 -Wellenpaketes. Von besonderen Interesse ist das nach $640\ \mu\text{s}$ eintreffende Wellenpaket. Mit der Lauflänge von 870 mm ergibt sich eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 1,36 km/s und zeigt damit eine gute Übereinstimmung zu den Berechnungsergebnissen der A_0 -Gruppengeschwindigkeit von 1,37 km/s. Der Verlauf belegt, dass neben dem S_0 -Mode auch A_0 angeregt werden kann.

Die bislang dargestellten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf Zeitverläufe, die bei einer Anregungsfrequenz von 150 kHz bzw. 55 kHz aufgenommen wurden. Die gesamte Messwertaufnahme umfasst jedoch Daten von knapp 100 Frequenzschritten in einem Bereich von 20 bis 500 kHz. In Abbildung 26 sind die maximalen am Empfänger verzeichneten Amplituden der Moden S_0 und A_0 über der Anregungsfrequenz aufgetragen.

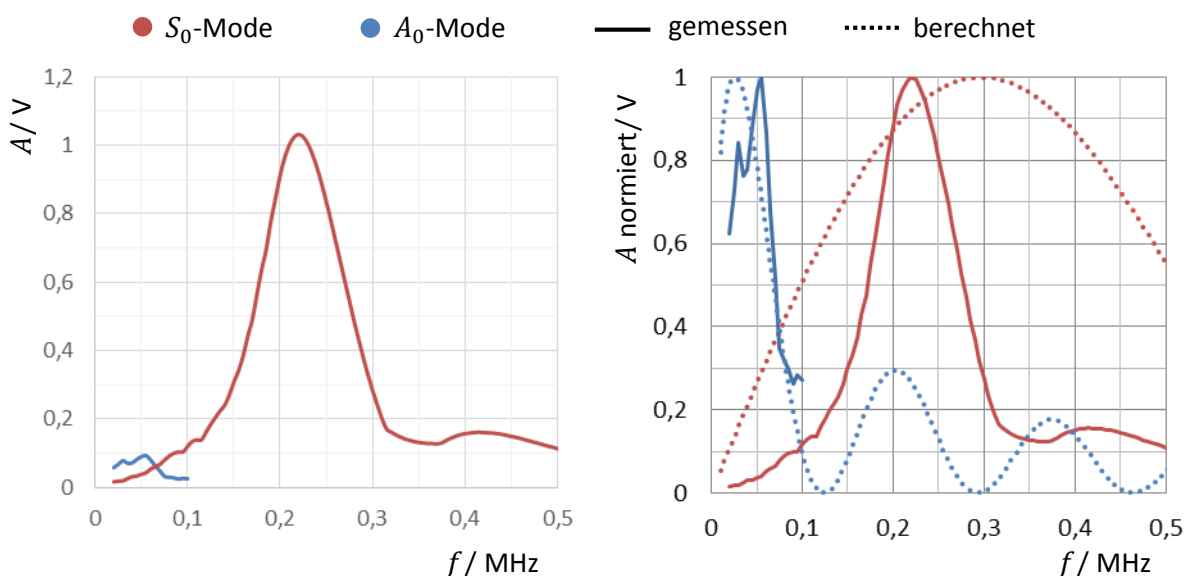


Abbildung 26: Maximale Empfängeramplitude von A_0 - und S_0 -Wellenpaketen über der Anregungsfrequenz. Links, Darstellung der absoluten Spannung. Rechts, Normierte Darstellung und Vergleich zur Berechnung.

Im linken Abbildungsteil bildet die Y-Achse die absoluten Spannungswerte ab. Der gemessene Spannungsausschlag des ersten S_0 -wellenpaketes formt in erster Näherung eine Glockenkurve, die bei einer Frequenz von 225 kHz einen Hochpunkt besitzt. Bei der Frequenz

von etwa 225 kHz ist demnach die Anregung von S_0 -Lambwellen am effektivsten. Die Spannung beträgt hier 1,03 V, was circa 20 % der Anregungsspannung entspricht. Die oben aufgestellte Vermutung, dass die S_0 -Lambwellenanregung oberhalb von 150 kHz effektiver ist, wird bestätigt und auch die Frequenz der effektivsten Anregung von 225 kHz deckt sich mit den Resultaten, die aus der Frequenzanalyse gewonnen wurden. Im Vergleich dazu sind die maximalen Spannungsausschläge des A_0 -Wellenpaketes dargestellt. Das Maximum liegt bei einer Anregungsfrequenz von 55 kHz und besitzt dort eine Spannung von 88 mV. Der dazugehörige Zeitverlauf, in dem dieses Maximum erreicht wird, entspricht dem in Abbildung 25. Im Vergleich zu S_0 wird A_0 deutlich schlechter angeregt und erreicht nur 8,5 % der S_0 -Amplitude. Weiterhin ist der Frequenzbereich, in dem A_0 auftritt, deutlich schmaler. Ab 100 kHz ist die Amplitude so gering, dass sich das A_0 -Wellenpaket nicht mehr von den S_0 -Reflexionen abhebt. Der rechte Teil der Abbildung 26 zeigt die gleichen Verläufe mit dem Unterschied, dass hier die maximalen Amplituden auf einen Wert von 1 V normiert sind. Zusätzlich stellt der gepunktete Verlauf die berechnete Sensoramplitude dar. Die Berechnung wird anhand von Gleichung (8), Gleichung (10) und den Dispersions-eigenschaften aus Kapitel 5 angestellt. Die berechnete Kurve für eine effektive S_0 -Anregung deckt sich kaum mit den gemessenen Werten. Eine Begründung für die Abweichung zwischen den beiden Kurvenverläufen liegt darin, dass die Rechnung die Eigendynamik der Piezowandler vernachlässigt und nur anhand der Aktorlänge beschreibt, ob eine Anregung effektiv ist. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass es sich bei der Frequenz von 225 kHz um die Eigenresonanz der Piezowandler handelt. Die Eigenfrequenz ist damit zusätzlich in einem Frequenzbereich lokalisiert, in dem auch die Aktorlänge eine wirksame Wellenanregung erlaubt. Der Verlauf des A_0 -Modes zeigt eine bessere Übereinstimmung zu der Rechnung. Das Maximum beider Kurven ist dicht benachbart und die Signale fallen bei derselben Frequenz stark ab. Fernab von der Eigenschwingung des Piezowandlers scheint die Näherung über die rein geometrische Betrachtung zulässig. Abbildung 27 zeigt die Spektralanalyse von einem Empfängersignal unter der Anregungsfrequenz von 500 kHz. Das Spektrum weist ausschließlich einen Peak bei einer Frequenz von 225 kHz auf, es sind also keine Anteile von der ursprünglichen Anregungsfrequenz enthalten. Der Verlauf der maximalen Auslenkung des S_0 -Wellenpaketes (s. Abb. 26) wird daher gerade bei höheren Frequenzen verfälscht, da das Antwortsignal auf die eigentliche Anregungsfrequenz nicht reagiert. Hier trägt ausschließlich das Nachschwingen in der Wandlereigenfrequenz zur Wellenanregung bei. Auch bei niedrigen Anregungsfrequenzen kann beobachtet werden, dass die S_0 -Wellengruppe ausschließlich in der Eigenfrequenz des Wandlers schwingt (vgl. Abbildung 25).

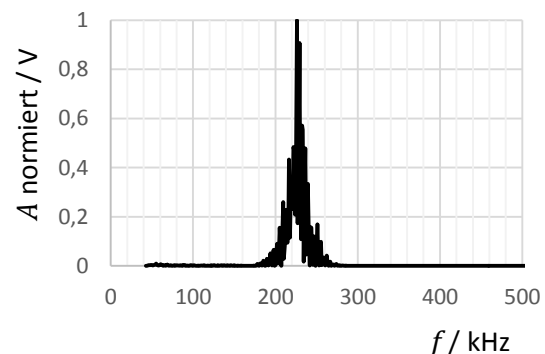


Abbildung 27: Normiertes Amplitudenspektrum des Empfängersignals bei der Anregung mit 500 kHz.

Fazit

Der Versuch veranschaulicht, dass der S_0 -Lambwellenmode deutlich besser als der A_0 -Mode angeregt wird. Die effektive S_0 -Anregung ist in erster Linie auf die Dickeneigenschwingung von etwa 225 kHz zurückzuführen. Diese Frequenz kann einerseits aus dem Amplitudengang und andererseits aus dem Quotienten von dem Empfängerspektrum zu dem Senderspektrum als Maximum abgelesen werden. Zudem besitzt der S_0 -Mode bei dieser Frequenz eine Wellenlänge, die im Einklang mit der Aktorlänge steht und ebenso zu einer besonders wirkungsvollen Anregung beiträgt. Der A_0 -Mode ist weniger stark ausgeprägt und erreicht sein Maximum bei einer niedrigen Frequenz von 55 kHz. Während der Amplitudenverlauf von S_0 wesentlich durch die Eigenresonanz des Piezowandlers festgelegt wird, stimmt der Amplitudenverlauf von A_0 näherungsweise mit den angestellten Berechnungen überein. Die Berechnung betrachtet dabei ausschließlich die Wellenlänge des Lambwellenmodes im Zusammenhang mit der Seitenlänge des Aktors (vgl. Abb. 9). Das Ergebnis, dass nur der Amplitudenverlauf von A_0 und nicht der von S_0 durch die Berechnung angenähert werden kann, deckt sich mit den Aussagen der Literatur [32]. Außerdem zeigen die aufgenommenen Zeitsignale eine Vielzahl an Reflexionen. Der schnelle S_0 -Mode wird mehrfach an den Kanten hin und her reflektiert. Die Reflexionen dominieren bereits ab 80 kHz den Zeitbereich, in dem das langsame A_0 -Wellenpaket auftritt. In Folge von weitläufigen Überlagerungen der Reflexionen, die dank des breiten Frequenzgehaltes und der Dispersion „ineinanderfließen“, kann die A_0 -Wellengruppe nicht mehr eindeutig identifiziert werden. Der breite Frequenzgehalt wird maßgeblich durch den Nachschwingvorgang des Piezoaktors in seiner Eigenresonanz bestimmt. In hohen Frequenzbereichen ist die eigentliche Anregungsfrequenz sogar nicht mehr enthalten, bloß das Nachschwingen regt Wellen an und der effektiv nutzbare Frequenzbereich wird dadurch eingeschränkt.

Die nachfolgenden Untersuchungen konzentrieren sich darauf, das Nachschwingen und die Frequenzbandbreite durch eine Fensterung des Anregungssignals zu minimieren. So kann womöglich auch eine Wellenanregung bei höheren Frequenzen erfolgen. Wünschenswert ist es einen Mode höherer Ordnung anzuregen, dessen Grenzfrequenz für die Eisdickenmessung genutzt werden kann. Ebenso werden Versuche angestellt, in denen darauf hingearbeitet wird, die Kantenreflexionen zu unterdrücken, um Wellenpakete verschiedener Moden trennscharf und ohne Überlagerung aufzuzeichnen.

6.3. Auswirkung der Anregungsbandbreite

Der nachstehend dokumentierte Versuch analysiert, wie eine Fensterung des Anregungssignals die Wellenausbreitung beeinflusst. Der Versuchsaufbau ist identisch zu dem in 6.2. beschriebenen Versuch, in dem die Piezowandler direkt an den Kanten der CFK-Platte appliziert sind. Die Versuchsdurchführung besteht aus zwei Messreihen über einen Frequenzbereich von 20 bis 500 kHz. Das Anregungssignal ist in einer der Messreihen ungefenstert (Rechteck-gefenstert) und in der anderen Messreihe mit einem Hanning-Fenster multipliziert. Die Anregung findet mit einer Amplitude von 10 Vpp und einer Länge von fünf Perioden statt.

Ergebnisse und Interpretation

Die Auswertung fokussiert in erster Linie einen exemplarischen Zeitverlauf bei einer Anregungsfrequenz von 100 kHz und wird im Anschluss auf den gesamten Frequenzbereich erweitert.

Abbildung 28 zeigt das Spannungssignal am Sender für die gefensterte und ungefensterte Anregung mit der Frequenz von 100 kHz. Ab $t = 52 \mu\text{s}$ ist die Spannungsskalierung geändert, so dass das Nachschwingen deutlich zu erkennen ist. Ab hier gilt die rechts aufgetragene Y-Achse. Im Fall des nicht gefensterten Anregungssignals zeigt die Grafik ein deutliches

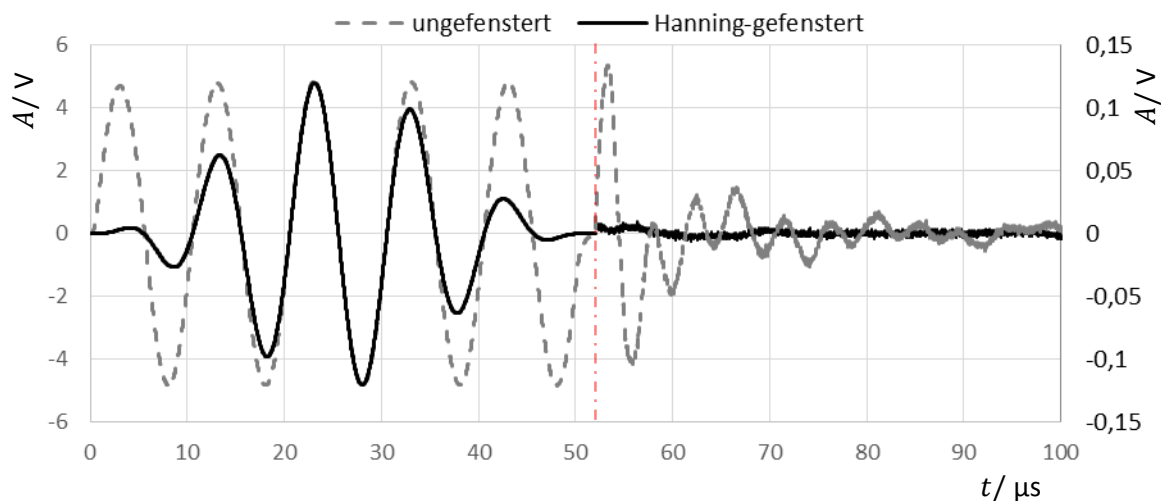


Abbildung 28: Vergleich der Signalverläufe am Sender unter Hanning-gefensterter und ungefensterter Anregung mit 5 Perioden bei 100 kHz (ab $t = 52 \mu\text{s}$ gilt die rechte Y-Achse).

Nachschwingen. Indessen ist das Signal nach der Hanning-gefensterten Anregung nahezu stationär und eine niederfrequente Welle, die sich kaum vom Grundrauschen abhebt ist zu sehen. Diese Welligkeit kann auch nach der Anregung mit dem ungefensterten Signal erahnt werden, sie ist jedoch zusätzlich mit dem Ausschwingen einer höheren Frequenz moduliert. Zwischen $t = 52 \mu\text{s}$ und $74,8 \mu\text{s}$ liegen 5 Perioden dieser Oberschwingung, die demzufolge eine Frequenz von etwa 220 kHz besitzt. Der Aktor schwingt in seiner Eigenfrequenz nach. Die aufgenommenen Sendersignale belegen, dass eine geeignete Fensterung von Anregungssignalen ein Nachschwingen nahezu vollständig unterdrückt.

Abbildung 29 zeigt im linken Teil einen Ausschnitt des Empfängersignals. Abgebildet ist das direkt übertragene S_0 -Lambwellenpaket für die beiden Fälle einer ungefensterten sowie Hanning-gefensterten Anregung. Die Zeit zählt mit Beginn der Anregung. Der Unterschied zwischen gefensterter und ungefensterter Anregung ist erheblich. Das eintreffende Wellenpaket unter der gefensterten Anregung ist klar definiert. Es zeigt einerseits die fünf Perioden der Anregung und besitzt andererseits eine Hüllkurve, die stark dem verwendeten Hanning-Fenster ähnelt. Bei ungefensterter Anregung hat das am Empfänger detektierte S_0 -Wellenpaket eine mehr als doppelt so große zeitliche Ausdehnung und das ursprüngliche Erscheinungsbild des Anregungssignals ist nicht wiederzuerkennen. Zudem besteht das Signal aus der Überlagerung verschiedener Frequenzanteile. Dies lässt sich bereits visuell anhand der geringeren Wellenlänge für $t > 180 \mu\text{s}$ feststellen. Die unterschiedlichen Frequenzen interferieren und bilden eine Wellengruppe mit einer komplizierten und

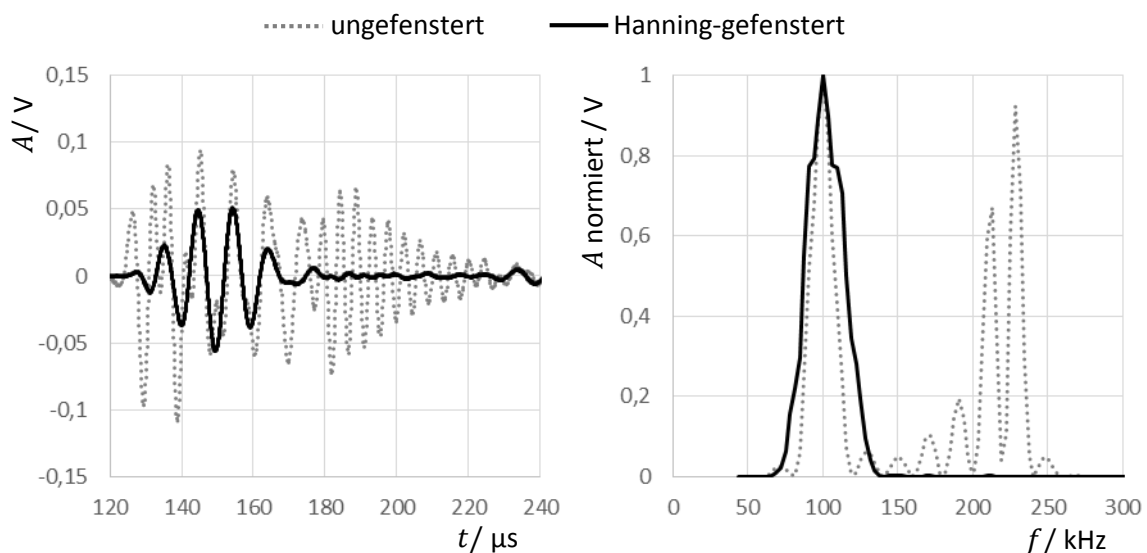


Abbildung 29: Vergleich zwischen gefensterter und ungefensterter Anregung. Links: Empfängersignal des S_0 -Lambwellenpaketes. Rechts: Amplitudenspektrum des Empfängersignals.

asymmetrischen Form. Der rechte Teil der Abbildung 28 stellt das Amplitudenspektrum des Empfängersignals dar. Ereignet sich die Anregung mit einem ungefensterten Sinus-Signal, so treten abgesehen von dem Peak bei der Grundfrequenz von 100 kHz eine ganze Reihe höherer Frequenzanteile auf. Die qualitative Beobachtung, dass das Zeitsignal verschiedene Frequenzen beinhaltet, wird bestätigt. Die Frequenzpeaks nehmen in Richtung der Eigenresonanzfrequenz des Aktors zu und erreichen dort beinahe den gleichen Scheitelwert wie die Grundfrequenz von 100 kHz. Das Frequenzspektrum, das unter der Randbedingung einer Hanning-gefensterten Anregung entsteht, hat keine Nebenmaxima. Im Gegensatz zu dem ungefensterten Anregungssignal werden so nur Frequenzen angeregt, die eng benachbarte zu der Grundfrequenz sind. Innerhalb eines Modes existieren daher weniger Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Wellenpakete „verschmieren“ infolge der Dispersion nicht so stark. Die Ergebnisse für eine Anregungsfrequenz von 100 kHz zeugen von einer wirksam begrenzten Bandbreite durch den Einsatz von einem Hanning-Fenster. Dadurch wird die Eigenfrequenz des Aktors nicht angeregt, das Nachschwingen unterdrückt und es

resultiert ein sauberes Zeitsignal. Im Hinblick auf den gesamten Frequenzbereich kann folgendes beobachtet werden: Eine Fensterung ist besonders effektiv, wenn die Differenz zwischen Anregungsfrequenz und Resonanzfrequenz groß ist. Denn je weiter weg von der Resonanzfrequenz ein Nachschwingen auftritt, desto größer ist der Unterschied, sowohl in den angeregten Frequenzen, als auch in den Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Lambwellen. Das Resultat sind ausgedehnte und überlagerte Wellenpakete, die sich stark dispersiv verhalten. Einer äußeren Anregung in der Resonanz folgt hingegen auch ein Nachschwingen in derselben Frequenz, so dass eine Fensterung hier kaum die Bandbreite beeinflusst und in erster Linie die zeitliche Ausdehnung von generierten Wellenpaketen reduziert.

Abbildung 29 zeigt für die beiden Fälle einer ungefensterten und Hanning-gefensterten Anregung die maximale Amplitude aus dem Empfängersignal, die bei dem jeweiligen Frequenzschritt erreicht wird. Dabei wird nicht zwischen S_0 und A_0 unterschieden. Die beiden glockenförmigen Kurven verlaufen ähnlich und besitzen in der Resonanz der

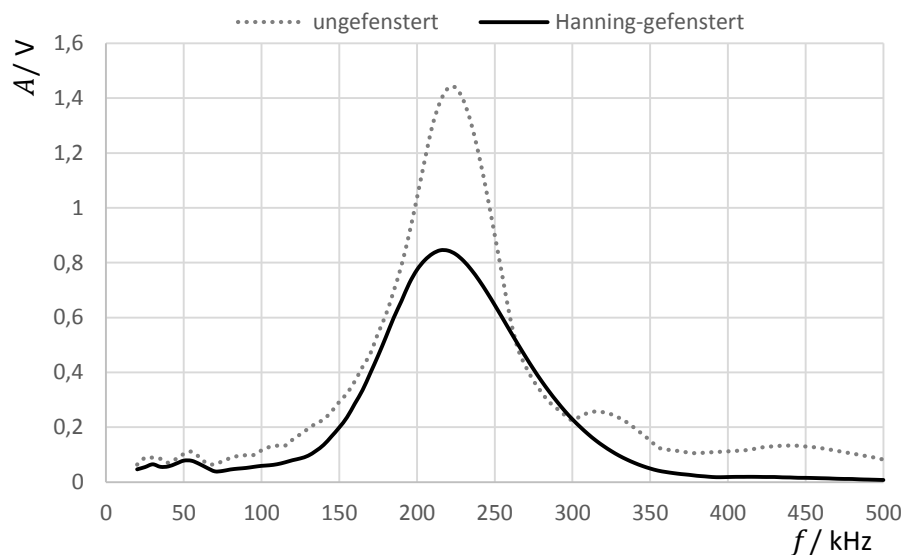


Abbildung 30: Vergleich zwischen Hanning-gefensteter und ungefensteter Anregung: Maximale Amplitude des Empfängersignals über der Frequenz.

Piezowandler von etwa 220 kHz ein Maximum. In einem Frequenzbereich von 20 bis 75 kHz wird der A_0 -Mode angeregt. Die Kurven verlaufen parallel und erreichen bei 55 kHz den Hochpunkt. Die Amplitudenverläufe zeigen zudem auffällige Unterschiede. Zunächst liegt der Verlauf nach der ungefensterten Anregung bei höheren Werten. Dies ist im Resonanzbereich um 220 kHz besonders ausgeprägt, hier erreicht die Kurve mit 1,44 V einen deutlich größeren Scheitelwert im Vergleich zu 0,84 V bei dem Hanning-gefensterten Signal. Ab einer Frequenz von etwa 400 kHz verzeichnet der Empfänger nach der Hanning-gefensterten Anregung keine signifikante Amplituden mehr. Die Amplitude verweilt auch außerhalb des dargestellten Frequenzbereiches auf null. Das heißt es werden auch bei höheren Frequenzen keine weiteren Moden angeregt. Dagegen fällt die Kurve nach der ungefensterten Anregung selbst für hohe Frequenzen nicht auf null. Für Frequenzen ab 300 kHz bestätigt der Vergleich zwischen den beiden Verläufen das aus dem vorangegangenen Versuch gewonnene Ergebnis. Die Amplitude wird hier durch den

Nachschwingvorgang in der Aktor-Eigenfrequenz dominiert. Ein Erklärungsansatz, weshalb die Amplituden um die Eigenfrequenz so unterschiedlich ausgebildet sind, liegt in der Signalverzerrung durch die Fensterfunktion. Die Fensterfunktion bildet die Einhüllende und reduziert in Teilbereichen den Spannungsausschlag. Mit einer herabgesetzten Spannung, gerade zu Beginn und am Ende der Anregung, werden auch die induzierten Dehnungen in dem Piezowandler verringert. Innerhalb der gleichen Anregungszeit verrichtet der Wandler unter der gefensterten Anregung weniger Arbeit und der Energieeintrag in die Wellen ist geringer.

Fazit

Die Anregung mit einem ungefensterten Sinus-Signal zeigt ein Nachschwingen in der Eigenfrequenz des Piezoaktors. Die Folge für die generierten Wellenpakete ist nicht nur eine größere räumliche Ausdehnung, die ein Überschneiden mit anderen Wellenpaketen begünstigt, sondern auch eine höhere Frequenzbandbreite. In diesem Beispiel erweist es sich als zielführend, das Anregungssignal mit einer Fensterfunktion zu verzerren. Wie im Grundlagenteil erwähnt, werden in dem Spektrum so sämtliche Nebenmaxima unterdrücken und die Frequenzbandbreite reduziert. Wenn das Signal ungefenstert ist und eines der Nebenmaxima in unmittelbarer Nähe der Wandlereigenfrequenz liegt, so wird diese Frequenz um ein Vielfaches stärker angeregt. Im Zeitverlauf folgt dem Signal ein Nachschwingen. In den praktischen Versuchen unterdrückt die Signalfensterung äußerst effektiv ein Nachschwingen. Die Fensterung führt zu annähernd monofrequenten Wellenpaketen, die nur eine geringe Bandbreite an Ausbreitungsgeschwindigkeiten enthalten. Demzufolge behalten die Wellenpakete selbst nach längerer Laufzeit ihre Form bei und führen zu einem sauberen Empfängersignal mit klar abgegrenzten Wellengruppen.

6.4. Reflexionsunterdrückung

Das Ziel des Versuches ist es, die Kantenreflexion einer Welle bestmöglich zu unterdrücken. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass die beiden fundamentalen Lambwellenmoden A_0 und S_0 bei Frequenzen bis etwa 100 kHz gemeinsam auftreten. Die Gruppengeschwindigkeit des S_0 -Modes ist dabei etwa fünf Mal so groß, wie die von A_0 und es ist unvermeidlich, dass Reflexionen vor, nach oder zeitgleich mit dem A_0 -Wellenpaket am Empfänger eintreffen. Es ist daher schwierig ein A_0 -Wellenpaket von reflektierten S_0 -Gruppen zu unterscheiden. In den konzeptionellen Überlegungen wird eine einfache Gleichung vorgestellt (12), mit der grob abgeschätzt werden kann, ob Wellenpakete simultan am Empfänger eintreffen. Wichtig für die Abschätzung ist das Verhältnis der Gruppengeschwindigkeiten von den beteiligten Moden. Das Verhältnis zwischen den Gruppengeschwindigkeiten von S_0 und A_0 variiert allerdings stark mit der Frequenz. Zudem bleibt unberücksichtigt, dass sich S_0 -Wellenpakete infolge der Dispersion verbreitern und so in das A_0 -Paket hineinragen können. Zuletzt wird davon ausgegangen, dass sich die Reflexionen nur in der Übertragungsrichtung ereignen. Dies stellt allerdings auch nur eine Annahme dar, die aktorseitig von einer streng gerichteten Abstrahlcharakteristik ausgeht. In der Praxis ist es schwierig alle Faktoren zu berücksichtigen und einen separaten und klar voneinander getrennten Empfang von Wellengruppen einzig durch die geschickte Wandlerpositionierung zu erreichen. Eine einfachere Lösung liegt in der Reflexionsunterdrückung. Mook et al. erwähnen in [52] Silikon, das an den Kanten einer Kompositplatte angebracht ist und dort die Reflexionen bedämpft. Nähere Informationen zu dem verwendeten Material sind nicht gegeben. Der Arbeit ist jedoch ein Bild beigelegt, in dem die einzelnen aufgeklebten Streifen zu sehen sind. Es handelt sich dabei wahrscheinlich um Vakuumdichtband, das für die Herstellung der CFK-Platten verwendet wird. Dichtbänder für die Vakuumtechnik bestehen ausschließlich aus Butyl, ein Material, das ein viskoplastisches Verhalten zeigt. Es tilgt daher vermutlich besonders gut Wellen, die in das Material transmittieren.

Aufbau

Der Versuch wird nicht an der CFK-Platte aus den vorausgegangenen Versuchen durchgeführt, da hier die Wandler direkt an den Kanten appliziert sind. Die Anordnung erlaubt es demnach nicht die Kanten mit Butyldichtband zu umkleben, da das Butyldichtband ansonsten zusätzliche Masse, Versteifung und Dämpfung zu den Piezowandler hinzugefügt. Es existiert eine baugleiche CFK-Platte, die mit einer Reihe von Chip-Keramiken bestückt ist. Die Platte und die Chip-Wandler entsprechen der Beschreibung aus Kapitel 4. Viele der Chip-Keramiken sind jedoch defekt, so dass potentiell nur eine Chip-Keramik für den Versuch in Frage kommt. Die genutzte Chip-Keramik ist wie in Abbildung 31 dargestellt auf der Platte positioniert. Drei der Kantenabstände sind nahezu identisch und die Übertragungswege zu den Kanten sind frei von weiteren

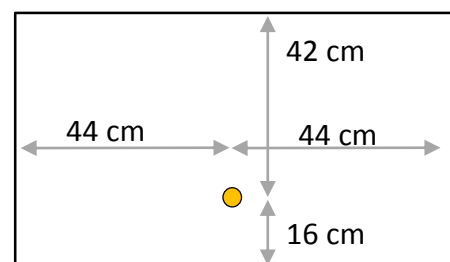


Abbildung 31: CFK-Platte mit Position der genutzten Chip-Keramik.

Steifigkeitssprüngen durch applizierte Wandler. Die Chip-Keramik dient gleichzeitig als Sender und als Empfänger. Der Wandler ist mit dem Ausgangskanal des Funktionsgenerators, sowie einem Kanal am Oszilloskop verbunden.

Durchführung

Der Piezowandler wird mit drei Perioden eines Hanning-gefensterten Sinus-Signals und der Spannung von 10 Vpp angeregt. Der Messbereich erstreckt sich über Frequenzen von 80 bis 400 kHz und wird schrittweise mit einem Inkrement von 5 kHz abgetastet. Das Frequenzintervall von 80 bis 400 kHz hat sich im Vorfeld als sinnvoll erwiesen, da außerhalb keine nennenswerte Anregung stattfindet. Pro Frequenzschritt erfolgt eine Mittelwertbildung aus 20 gemessenen Zeitsignalen. Der Versuch umfasst die Aufnahme von fünf Messreihen, wobei zwischen den Messreihen die Randbedingungen variieren. Der erste Durchgang nimmt den Grundzustand als Referenz auf. In den folgenden drei Messzyklen wird eine Kante der Platte verstärkt mit Butyldichtband abgeklebt. Die betroffene Kante bildet in Abbildung 31 die Unterseite. Das Butyldichtband (*General Sealants™ AT-200Y*) verläuft entlang der Kante und deckt diese auf einer Länge von 20 cm direkt unterhalb der Keramik ab. Die drei Schritte, in denen das Abkleben erfolgt, sind in Abbildung 32 dargestellt. Das Butyldichtband hat im Querschnitt eine Breite von etwa 13 mm und eine Höhe von

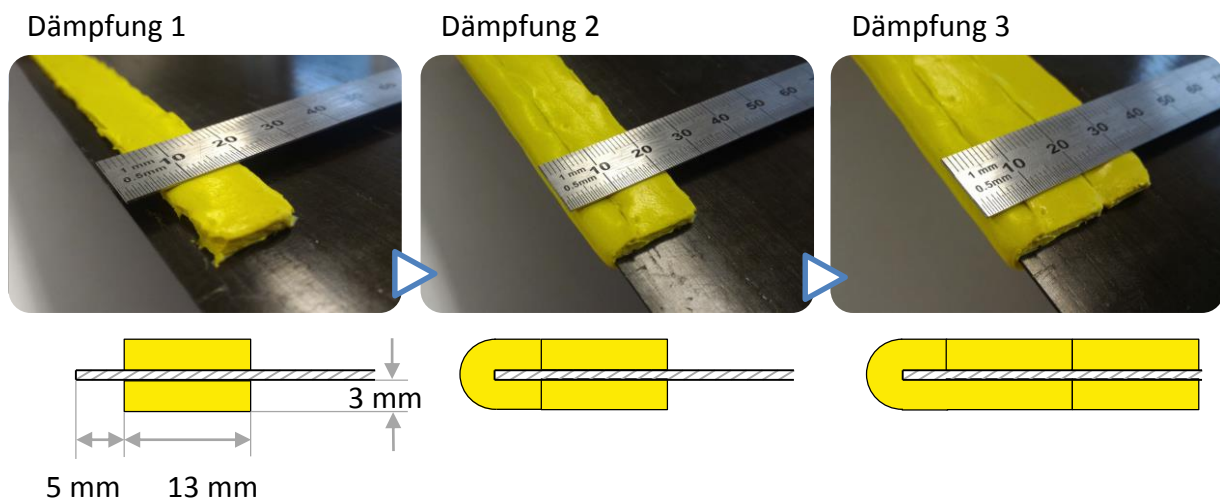


Abbildung 32: Drei Stufen der Kantenabklebung mit Butyldichtband.

3 mm. Im ersten Schritt verlaufen zwei Butylstreifen auf der Ober- und Unterseite der Platte und in einem Abstand von 5 mm parallel zur Kante (Dämpfung 1). Als nächstes folgt ein zusätzlicher Streifen, der die Kante umschließt (Dämpfung 2). Zuletzt werden im dritten Schritt zwei zusätzliche Butylstreifen auf der Ober- sowie Unterseite angefügt (Dämpfung 3). In diesem letzten Zustand wird eine weitere Messung angestellt mit dem Unterschied, dass die CFK-Platte mit dem Butyldichtband in einer Tiefkühlkammer der Temperatur von etwa -18 °C ausgesetzt ist.

Ergebnisse und Interpretation

Die Auswertung richtet ihre Aufmerksamkeit zunächst auf beispielhafte Zeitverläufe, die unter einer Anregungsfrequenz von 220 kHz entstehen. Denn auch die Chip-Keramiken erweisen im Vorfeld eine gute Anregung bei dieser Frequenz. Jede Kurve aus Abbildung 33 entstammt einer Messreihe. Neben der Referenzmessung, bei der die Kante nicht mit Butyldichtband versehen ist, sind die Zeitverläufe der beklebten Zustände (Dämpfung 1 bis Dämpfung 3, vgl. Abbildung 32) dargestellt. Die Zeitsignale enthalten alle dieselben

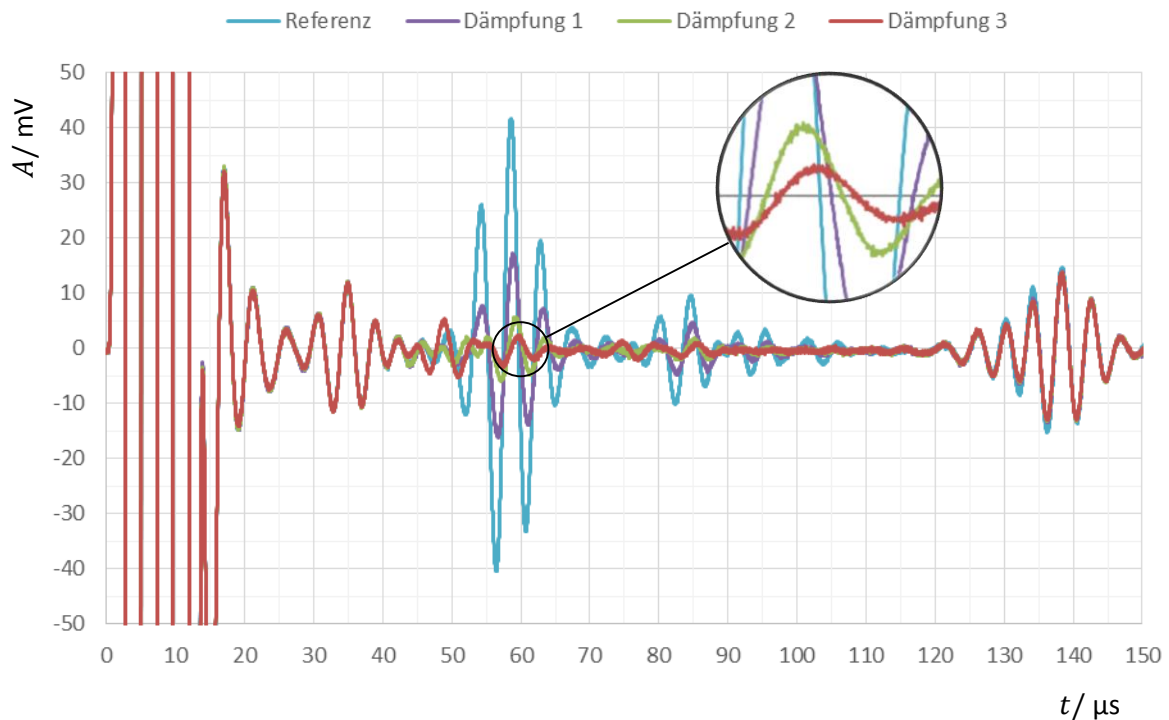


Abbildung 33: Zeitsignale an der Chip-Keramik unter der Anregungsfrequenz von 220 kHz bei zunehmendem Abkleben der nächstgelegenen Plattenkante mit Butyldichtband.

Elemente: Von 0 bis etwa 14 μs ist das Anregungssignal zu sehen, das in seiner Amplitude den abgebildeten Spannungsbereich von $\pm 50 \text{ mV}$ weit übersteigt. Bis zu einem Zeitpunkt von etwa 45 μs tritt ein Nachschwingen auf. Dem folgt bei $t = 50 \mu\text{s}$ ein S_0 -Lambwellenpaket, das von der 16 cm entfernten Kante reflektiert wird. Das Wellenpaket setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Der vordere Teil wird direkt durch das Anregungssignal generiert, während der zweite Teil, der nach $t = 80 \mu\text{s}$ eintrifft, aus dem Nachschwingen resultiert. Die Identifikation, dass es sich um den S_0 -Mode handelt, erfolgt analog zu den vorangegangenen Abschnitten, mit einer Geschwindigkeitsabschätzung und dem Vergleich mit den berechneten Gruppengeschwindigkeiten aus Kapitel 5. Nach 120 μs trifft ein weiteres Wellenpaket ein. Es ist die Überlagerung von S_0 -Reflexionen, die von den drei übrigen Kanten zurückgeworfen werden. Der Vergleich zwischen den einzelnen Kurven zeigt zunächst, wie alle Signale beim Ausschwingen und bei dem reflektierten Wellenpaket nach 120 μs deckungsgleich verlaufen. Mit dem verstärkten Abkleben der Unterkante werden die an der Kante reflektierten Wellen stark in ihrer Amplitude reduziert. Die maximale Amplitude wird mit jeder Stufe der Kantenabklebung etwa halbiert. Ein weiterer Einfluss, den das Butyldichtband auf die reflektierten Wellen ausübt, ist eine Laufzeitänderung. In dem vergrößerten Ausschnitt in

Abbildung 33 kann zwischen den Kurven deutlich eine Phasenverschiebung ausgemacht werden. Zwischen den Nulldurchgängen von der Referenzmessung und dem vollumklebten Zustand liegt ein Laufzeitunterschied von $1\text{ }\mu\text{s}$. Das Butyl verändert als zusätzlicher Teil der Struktur das Dispersionsverhalten, da die Dicke, die Massen- und Steifigkeitseigenschaften geändert sind. Die Gruppengeschwindigkeit von S_0 nimmt in diesem Bereich ab und bewirkt eine verzögerte Ankunft der Wellen.

Abbildung 34 zeigt einerseits den bereits bekannten Verlauf von Dämpfung 3 und andererseits das Zeitsignal von Dämpfung 3 im tiefgefrorenen Zustand. Die Temperatur im Butyldichtband wird zu $-15\text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. In der Messung bei Raumtemperatur sind die an

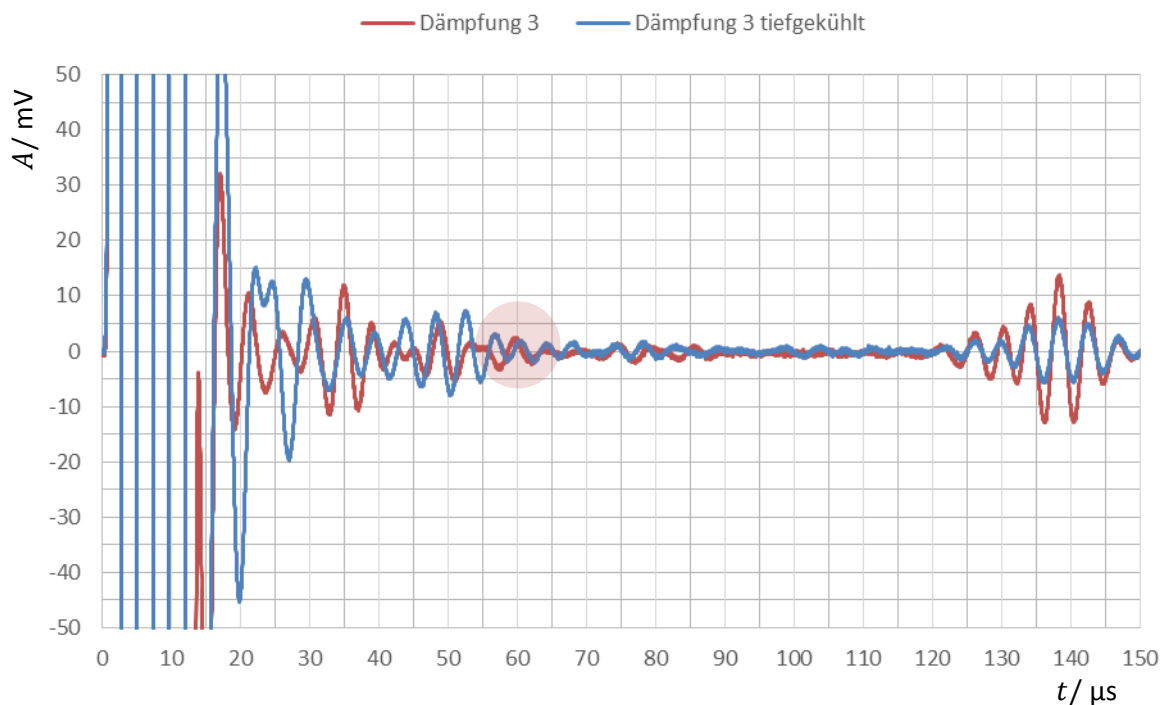


Abbildung 34: Vergleich der Zeitsignale von Dämpfung 3 bei Raumtemperatur und bei circa $-18\text{ }^\circ\text{C}$.

der Kante reflektierten Wellen bereits so stark bedämpft, dass diese nur sehr schwer von dem angrenzenden Ausschwingen unterschieden werden können. Die Unterscheidung ist nur im Vergleich mit den anderen Zeitsignalen eindeutig und daher ist das reflektierte S_0 -Wellenpaket hier noch einmal farblich hinterlegt. Die tiefe Temperatur ruft ein anderes Ausschwingverhalten hervor und dem Signal kann selbst im Vergleich zur Raumtemperatur nicht entnommen werden, zu welcher Zeit reflektierte Wellen eintreffen. Das heißt, das Butyldichtband dämpft auch bei tiefen Temperaturen effektiv eine Kantenreflexion. Auffällig ist dagegen die reduzierte Amplitude von dem Wellenpaket, das nach $120\text{ }\mu\text{s}$ eintrifft. Da die Wellen phasengleich verlaufen, scheint die Temperatur nicht das Dispersionsverhalten und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu beeinflussen, sondern vielmehr die Amplitudenabschwächung. Die allgemeine Erwartung ist, dass sich die Polymermatrix der CFK-Platte mit zunehmender Temperatur viskoser verhält und damit die Energiedissipation durch Absorption ansteigt. In Konsequenz steigen die Amplituden bei tiefen Temperaturen – der Befund in diesem Versuch widerspricht jedoch der Erwartung. Um auszuschließen, dass die Amplitudenabschwächung beispielsweise die Folge einer unbemerkten Beschädigung ist,

erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt eine weitere Messung bei Raumtemperatur. Die Amplitude steigt wieder auf ihren Ausgangswert und die Messung wird verifiziert.

Die Betrachtung beschränkt sich bislang auf eine Anregungsfrequenz von 220 kHz. Das Diagramm aus Abbildung 35 trägt die maximale Amplitude des reflektierten S_0 -Wellenpaketes über der Anregungsfrequenz auf. Neben der Referenzmessung sind die einzelnen Stufen, in denen die Kante zunehmend mit Butyldichtband abgeklebt wird (Dämpfung 1 bis Dämpfung 3) dargestellt. Dämpfung 3 wird dabei nicht im tiefgekühlten Zustand einbezogen, da hier das reflektierte Wellenpaket nicht einwandfrei identifiziert werden kann.

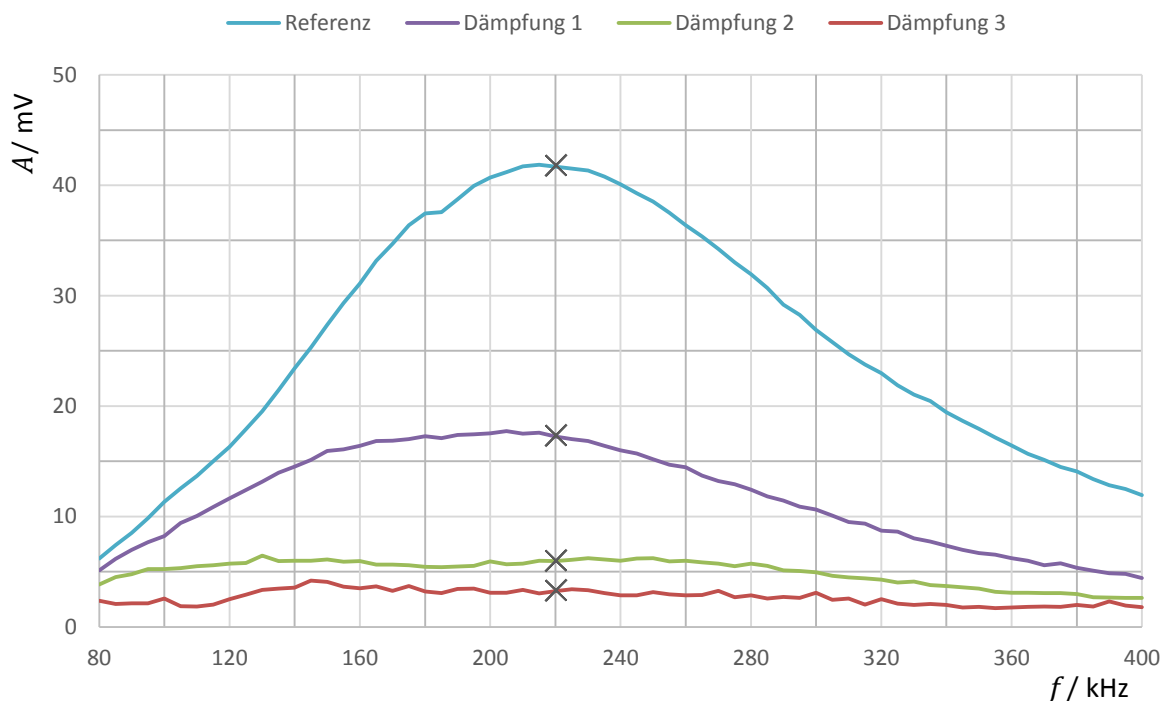


Abbildung 35: Maximale Amplitude des reflektierten S_0 -Wellenpaketes über der Anregungsfrequenz.

Die Amplitude der S_0 -Reflexion nimmt über den untersuchten Frequenzbereich stetig mit dem Abkleben der Kante ab. Der Verlauf von Dämpfung 1, bei der jeweils ein Streifen Butyldichtband auf der Plattenoberseite und Plattenunterseite aufgebracht sind, hat einen Hochpunkt bei 205 kHz. Das Maximum ist im Vergleich zu der Referenzmessung mit einem Maximum bei 215 kHz verschoben. Das bedeutet, die Reflexion wird mit der Frequenz unterschiedlich effektiv unterdrückt und gerade bei höheren Frequenzen erfolgt die Abschwächung wirksamer. Dagegen haben Dämpfung 2 und Dämpfung 3 einen nahezu konstanten Verlauf. Bei Dämpfung 3 kann die Amplitude durchgehend auf einen Wert von $2,7 \text{ mV} \pm 0,7 \text{ mV}$ reduziert werden. Die mit einem Kreuz markierten Punkte, bei der Frequenz von 220 kHz, sind als maximale Amplitude in den Zeitverläufen aus Abbildung 33 wiederzufinden.

Fazit

In den Untersuchungen erweist sich das Abkleben der Kante mit Butyldichtband als eine wirksame Methode, mit der Kantenreflexionen gedämpft werden können. Die Amplitude von reflektierten Wellen fällt dabei am geringsten aus, wenn die Kante großflächig umschlossen ist. Die Bedämpfung ist in den Versuchen so stark, dass die Reflexion nicht mehr als ein separates Wellenpaket identifiziert werden kann. Die Reflexionsunterdrückung erweist sich für den S_0 -Mode als effektiv und temperaturstabil. Die Methode ist für die Untersuchungen mit Eis geeignet, um ein Zeitsignal aufzunehmen, das arm an Reflexionen ist und aus getrennten und damit einfach auszuwertenden Wellengruppen besteht. Allerdings nutzt der spätere Versuch mit Eis anstatt der runden Chip-Keramiken rechteckige *DuraAct-Flächenwandler* und auch die Ausbreitungsrichtung in der Platte liegt nicht in 90° -Richtung sondern bei 0° . Es ist denkbar, dass die S_0 -Wellen anders polarisiert sind und anders mit dem Dichtband interagieren. Es ist nicht gesichert, dass die Reflexionen genauso effektiv unterdrückt werden. Daher sollten Kantenreflexionen nicht gänzlich vernachlässigt werden, wenn die Wandler auf der Platte positioniert werden.

Ferner zeigt der Versuch ein anderes Ausbreitungsverhalten von Wellen im tiefgekühlten Zustand. Bemerkenswert ist, dass die Amplituden bei einem Temperatursprung von Raumtemperatur auf etwa -15°C um beinahe 50 % reduziert werden. In [53] wird ein Modell vorgestellt, dass den Temperatureinfluss anhand der temperaturabhängigen piezoelektrischen Koeffizienten als dominant beschreibt. Der Temperaturgang der hierfür relevanten d_{31} -Konstante ist dem Anhang D beigelegt. Die Änderungen in einem Temperaturbereich von 20°C bis -20°C sind mit $< 1\%$ sehr gering und können auch nach den Betrachtungen in [53] nicht zu einer Amplitudenreduktion von beinahe 50 % führen. Die Amplitudenreduktion muss daher auf einem anderen Mechanismus beruhen.

6.5. Anregung mittels Gleitsinus

Wie im Abschnitt Stand der Forschung erwähnt, wird in [49] ein Ansatz präsentiert, der die Anregung mit einem Gleitsinus nutzt, um Eis und die Eisdicke zu erfassen. Das Antwortsignal wird hinsichtlich zweier Aspekte ausgewertet. Erstens der maximalen Amplitude und zweitens dem Mittelwert, der aus dem Betrag aller Werte des Zeitsignals gebildet wird. Der Vorteil dieser Methode liegt in der einfachen Anwendung. Um die Ergebnisse aus [49] zu überprüfen wird die Steuerungsroutine in der Form abgeändert, dass der Funktionsgenerator einen Gleitsinus generiert und das vom Oszilloskop aufgezeichnete Empfängersignal auswertet.

Im Folgenden wird an der CFK-Platte, die an den Kanten mit *DuraAct-Flächenwandlern* bestückt ist, eine Anregung mit einem Gleitsinus vorgenommen. Der Gleitsinus durchfährt innerhalb einer halben Sekunde linear einen Frequenzbereich von 1 Hz bis 500 kHz. Die Spannung beträgt 10 Vpp. Das am Empfänger aufgenommene Zeitsignal besteht aus mehreren Millionen Wertepaaren, die in diesem Umfang nicht dargestellt werden können. Der Datenumfang wird in der Form reduziert, dass die blaue Kurve aus Abbildung 36 nur die Maximalwerte von dem Zeitsignal zeigt. Es handelt sich um eine einseitige Hüllkurve des Empfängersignals. Neben dem Zeitsignal ist sein Amplitudenspektrum in der Grafik

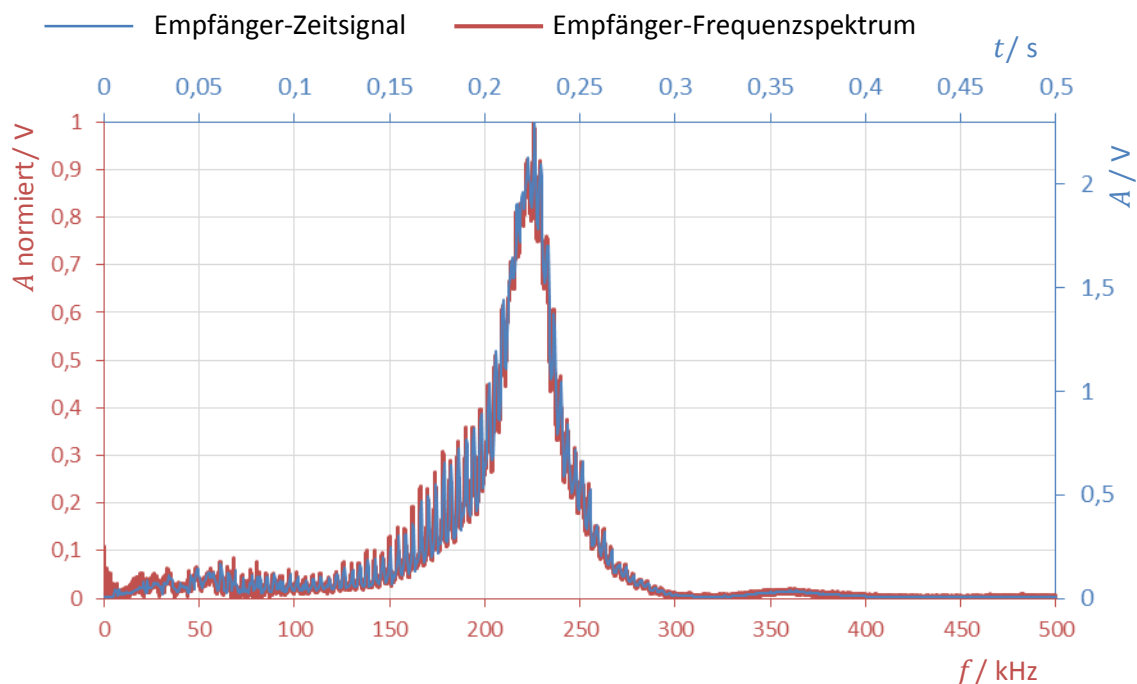


Abbildung 36: Zeitsignal am Empfänger und Frequenzspektrum des Empfängersignals und Anregung mit einem Gleitsinus.

dargestellt. Dabei ist die Zeitachse von 0 bis 0,5 s in der gleichen Weise skaliert wie der Frequenzbereich von 1 Hz bis 500 kHz, der innerhalb dieser Zeit durchlaufen wird. Das auf 1 V normierte Amplitudenspektrum ist so dargestellt, dass sein Maximum der maximalen Auslenkung im Zeitbereich von 2,3 V entspricht. Die beiden Verläufe sind deckungsgleich und sogar jedes lokale Maximum innerhalb der Kurvenäste ist identisch. Der Informationsgehalt aus der Frequenzanalyse entspricht exakt dem Zeitsignal. Weitere Untersuchungen ergeben,

dass sich der Verlauf unabhängig von der Zeit bildet, in der das Frequenzband durchlaufen wird. Eine statistische Auswertung zeigt, dass die gemessenen Zeitverläufe äußerst reproduzierbar sind. Die Standardabweichung bei einer Stichprobe von 20 aufeinander folgenden Messungen liegt bei 0,07 %. Das Zeitsignal als auch das Frequenzspektrum erreichen bei 0,226 s, beziehungsweise 226 kHz ein Maximum. Der Kurvenverlauf ist sehr ähnlich zu den im Vorfeld aufgenommenen Amplitudengängen (Abbildungen 26 und 30) und verläuft analog zu dem Quotienten aus einem Empfängerspektrum und einem Senderspektrum, wie es in Abbildung 24 dargestellt ist. All diese Verläufe besagen, wie effektiv bei der jeweiligen Frequenz Lambwellen angeregt werden. Im Kontrast zu einem Amplitudengang besitzt der Verlauf aus Abbildung 36 eine ganze Reihe an Nebenmaxima. Diese sind womöglich das Ergebnis von konstruktiven und destruktiven Überlagerungen, die systematisch auftreten, wenn mit einem Gleitsinus angeregt wird. Ungeachtet dessen kann mit einem Gleitsinus einfach bestimmt werden, bei welchen Frequenzen das Generieren von Lambwellen besonders wirksam ist. Die wirksame Lambwellenanregung ist eine wertvolle Information in der Auslegung von Sender-Empfänger-Netzwerken. In diesem Beispiel erfolgt der größte Energieeintrag in die Wellen bei 226 kHz.

6.6. Eisapplikation

Dieser Abschnitt untersucht drei verschiedene Möglichkeiten der Eisapplikation. Wie in Kapitel 4 angesprochen, werden das Aufsprühen von Wasser, ein schichtweises Auftragen und das Auffrieren innerhalb einer begrenzenden Form analysiert. Ein Vergleich zwischen den Methoden erfolgt dabei qualitativ und im Hinblick darauf, wie praktisch die Methode bei den späteren Versuchen angewendet werden kann. Die CFK-Platte ist horizontal in der Tiefkühlkammer gelagert und der Temperatur von -18 °C ausgesetzt. In den Versuchen wird ausschließlich Wasser verwendet, das nach VDE 0510 entmineralisiert ist. Die Tiefkühlkammer dient vorrangig als Lager für CFK-Prepregs. Für die Prepregs sind tiefe Temperaturen obligatorisch, um eine vorzeitige Reaktion zwischen Harz und Härter zu unterbinden. Zudem wirkt sich Feuchtigkeit empfindlich auf die späteren Eigenschaften der Verbundmaterialien aus und eine Kontamination der Prepregs mit Wasser oder Eis ist zu vermeiden.

Auffrieren am Stück

Auf der CFK-Platte bildet Butyldichtband eine geschlossene Berandung, in die Wasser gegossen werden kann. Auf der tiefgekühlten Platte wird in ein abgeklebtes Rechteck mit der Größe von $17\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ Wasser gefüllt. Die Füllhöhe beträgt etwa 2 mm . Abbildung 36 zeigt drei Momentaufnahmen des Gefrierprozesses. Der Phasenübergang von flüssig zu fest

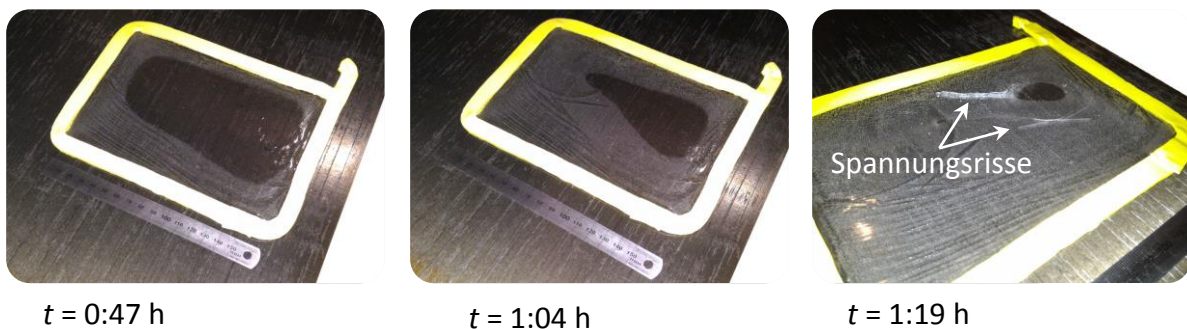


Abbildung 37: Momentaufnahmen im Gefrierprozess von Wasser.

tritt gleichzeitig mit einem Kontrastunterschied ein, der eine Folge von vielen kleinen Poren ist. Dadurch erscheinen die gefrorenen Bereiche heller. In den oben gezeigten Bildern ist zu sehen, wie der Gefrierprozess mit der Zeit von außen nach innen verläuft. Auffällig ist jedoch, dass der letzte noch flüssige Bereich nicht im Zentrum des Rechtecks liegt, sondern dezentral, in Richtung einer Ecke. Der Grund ist die Plattenausrichtung, sie liegt nicht in Waage, sondern ist leicht geneigt. In der Neigungsrichtung ist der Füllstand höher und das Gefrieren beansprucht mehr Zeit. Mit fortlaufender Zeit entstehen in dem Eis Spannungsrisse, die in der rechten Teilabbildung kenntlich gemacht sind. Nach etwa $1:30\text{ h}$ ist das Rechteck durchgehend gefroren. In einem abschließenden Schritt werden die Poren anhand von einem Foto stichprobenartig vermessen. Der durchschnittliche Porendurchmesser beträgt $0,4\text{ mm}$. Die Poren sind in der Erstarrungsrichtung oft länglich geformt und haben eine Länge von bis zu 5 mm .

Aufsprühen von Wasser

Für das Aufsprühen von Wasser wird ein Teil der Tiefkühlkammer mit Folie ausgekleidet, damit sichergestellt ist, dass kein Wasser oder Eis die lagernden Materialien kontaminiert. Das Wasser wird mit einer Blumenspritze aufgetragen. Die Blumenspritze hat einen Düsendurchmesser von 1 mm und ein kreisrundes Spritzbild. Die Tropfengröße variiert allerdings mit der Pumpgeschwindigkeit. Mit höherer Geschwindigkeit baut sich ein größerer Druck auf und die Zerstäubung ist feiner. Zudem ist der Tropfendurchmesser uneinheitlich und variiert von großen Tropfen mit einem Durchmesser im Millimeterbereich bis hin zu einem feinen Nebel. Eine quantitative Analyse der Tropfendurchmesser erfolgt nicht. In dem Versuch wird die Platte in Intervallen und aus verschiedenen Höhen besprüht. Die Sprühvorgänge erfolgen erst, wenn das Wasser auf der Platte weitestgehend gefroren ist. Mit einer großen Fallhöhe haben zumindest die kleineren Tropfen – so die Theorie – genug Zeit, um zu unterkühlen. Im Kontakt mit der CFK-Platte besteht so die Chance, dass Rau- oder Mischeis entsteht. Auf der CFK-Platte bildet sich jedoch vorrangig eine porenfreie Klareisschicht. Speziell bei einem geringen Sprühabstand entsteht ein Wasserfilm der eine homogene Eisschicht bildet. Bei größerem Sprühabstand bedeckt die Schicht großflächig die Platte und hat einen fließenden und schwachen Randabfall, der rau strukturiert ist. Die Versuche werden nicht fortgesetzt. Einerseits versprödet und bricht die Kunststofffolie im Zuge der geringen Temperaturen und andererseits erzeugt das Kühlaggregat eine Luftzirkulation, die den Wassernebel trotz der Folie auch in der restlichen Kammer verteilt.



Abbildung 38:
Blumenspritze für die
Wasservernebelung.

Schichtweises Auftragen

Vergleichbar mit der Eisaufbereitung einer Kunsteisbahn, wird ein Textil, das mit warmem Wasser getränkt ist, über die tiefgekühlte Platte gestrichen. Auf diese Weise soll Schicht um Schicht eine homogene Klareisschicht gebildet werden. Zwei verschieden harte Filze stehen für den Versuch bereit. Sie sind nach DIN 61200 als weich und als fest eingestuft. Die Filzstücke sind rechteckig und haben in etwa eine Kantenlänge von 13 cm x 8 cm x 0,4 cm. Warmes Wasser mit ca. 30 °C trinkt den Filz, bevor er in der Tiefkühlkammer über den zu vereisenden Bereich der Platte gezogen wird. Für die vollständige Benetzung muss der Filz einen Anpressdruck auf die Platte ausüben und auch die Vorschubgeschwindigkeit entscheidet über die Schichtdicke und Qualität. Der dünne Wasserfilm gefriert rasch und nach einigen Sekunden kann die nächste Applikation ausgeführt werden. Nichtsdestotrotz ist die Aufwachsgeschwindigkeit begrenzt. Sie wird durch die Filzkante limitiert, die mit der Platte in Kontakt steht und rasch an Temperatur verliert. Der Filz vereist oder droht festzufrieren. Daher wird jeweils nur eine Schicht aufgetragen, bis der Filz erneut mit warmem Wasser getränkt wird. So kann gewährleistet werden, dass die Wasserschicht das darunterliegende Eis antaut und beim Gefrieren einen festen Verbund eingeht. In der Praxis

erweist sich der harte Filz als geeigneter, da er den Druck gleichmäßiger verteilt als der weiche Filz und eine homogenere Wasserschicht hinterlässt. Abbildung 38 zeigt die mit dem harten Filz aufgebrachte Klareisschicht. Sie hat eine Dicke von ungefähr 0,3 mm und geht aus 10 Auftragszyklen hervor. Anhand der Lichtreflexionen ist sichtbar, dass die Schicht keine starken Oberflächenkrümmungen besitzt, sondern glatt und homogen ist. Die hellen und dunklen Bereiche auf der Eisoberfläche sind Spiegelungen aus der Umgebung. Die Breite der Eisschicht entspricht mit 13 cm genau der Breite der Filzkante. Der Übergang im Randbereich kann zudem manuell gut gesteuert werden, in dem die Schichten mit einem Parallelversatz zueinander aufgebracht werden.

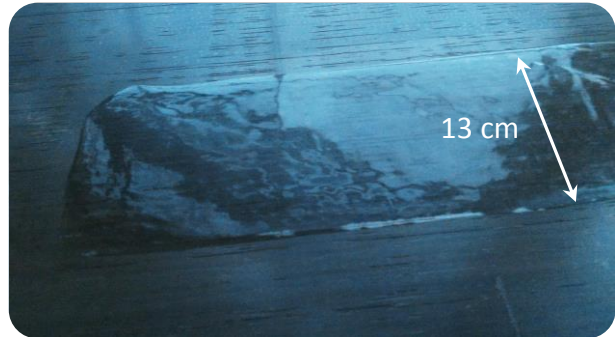


Abbildung 39: Schichtweise mit einem Filz aufgebrachte Klareisschicht.

Vergleich und Fazit

Das Gefrieren am Stück hat den Vorteil eines geringen Arbeitsaufwandes, zudem ist der zu vereisende Bereich exakt definiert. Allerdings lösen sich beim Gefrieren von Wasser die darin enthaltenen Gase und je nach Geschwindigkeit des Gefrierprozesses wird das Gas in Form von Blasen im Eis eingeschlossen. Diese Blasen verändern die mechanischen Eigenschaften. Das Eis wird durch die Kerbwirkung entfestigt und hat eine geringere Eigensteifigkeit gegenüber einer porenfreien Schicht. Die Eigenschaften des gegossenen Eises entsprechen nicht denen von Klareis, sondern sind strukturell dem Mischeis zuzuordnen. Der Durchmesser der Blasen liegt im Bereich von Millimetern und damit in derselben Größenordnung der Lambwellenlänge. Die Wellen interagieren daher voraussichtlich mit den Blasen und werden an ihnen gestreut. Im Vergleich zu porenfreiem Eis sinkt die Wellenamplitude. Ein weiterer Nachteil von gegossenen Eisschichten sind die abrupten Kanten, die nicht einem praxisnahen Eisaufbau entsprechen. Ebenso muss die Platte plan ausgerichtet sein, um einen homogenen Querschnitt im Eis zu gewährleisten. Eine Möglichkeit mit der die Poren reduziert werden können, liegt in der Entgasung von Wasser. Das Entgasen von Wasser, entweder im Vakuum oder durch Abkochen, verringert vorwiegend die Menge an gelöstem Sauerstoff und vermindert die Blasenbildung. Nichtsdestotrotz hat blockweise gefrorenes Eis Eigenspannungen, die oft zu Rissen führen. Natürlicherweise frieren bei der Eisbildung an Flugzeuge kleine Tropfen auf, die sich zu einer makroskopischen Eisschicht akkumulieren. Die Eisschichten sind daher weitestgehend spannungsfrei. Das Gießen von Wasser in eine Form ist ungeeignet, um die Eisbildung an einem Flugzeug unter Laborbedingungen nachzustellen.

Das Aufsprühen von Wasser ist prinzipiell gut geeignet, um spannungsarme und homogene Eisschichten zu erzeugen. Ein deutlicher Kontrast zu dem Gefrieren im Block liegt darin, dass eine aufgesprühte Eisschicht eine große undefinierte Fläche bedeckt und einen weiten Übergang zeigt, in dem das Eis ausdünnt. In der undefinierten Verteilung von Wasser liegt ein bedeutender Nachteil, da so in der Tiefkühlkammer lagernde Materialien mit Wasser

oder Eis kontaminiert werden. Die Methode kann daher nicht angewendet werden, wenngleich das Aufsprühen deutlich praxisorientierter ist als das Gefrieren im Block. Die Tropfengröße einer Blumenspritze ist zu groß für eine Rau- oder Mischeisbildung. Für die Erzeugung von Raueis ist anzunehmen, dass die Tropfengröße deutlich feiner sein muss. Dies kann beispielsweise mit Ultraschallverneblern erreicht werden, die unter anderem in Inhalationsgeräten eingesetzt werden und winzige Tropfen aus der Oberfläche lösen. Es entsteht ein Nebel der sich aus Tropfen mit einem Durchmesser von 2 bis 4 μm zusammensetzt.

Der Filz benetzt zuverlässig einen definierten Bereiche mit einer dünnen Wasserschicht, so dass lagenweise eine porenfreie und spannungsarme Klareisschicht entsteht. Im Vergleich zu dem Gefrieren im Block, kann auf diese Weise der Randabfall variabel gestaltet werden. Die Dickenzunahme pro Zyklus ist sehr gering und ermöglicht ein präzises Einstellen der Schichtdicke. Der Nachteil liegt jedoch in dem erhöhten Aufwand, der mit der Vielzahl von Applikationszyklen einhergeht. Diese sind jedoch notwendig, um eine ausreichend dicke Schicht zu bilden. Da sich das blockweise Gefrieren und das Aufsprühen nicht als tauglich erweisen, erfolgt die Eisbildung in den Experimenten lagenweise. Allgemein ist es jedoch schwierig die Schichtdicke zu messen. Das Eis ist im Zentrum der Platte lokalisiert und nur im Falle der gegossenen Eisschicht besitzt es eine Kante, an der beispielsweise mit einem Messschieber die Dicke erfasst werden könnte. Vor dem Hintergrund wird ein Versuch mit dem Filz unternommen, der zum Ziel hat, aus der Anzahl der einzelnen Applikationszyklen auf die Dicke zurückzuschließen. Zu diesem Zweck wird eine Eisschicht direkt im Randbereich appliziert, so dass mit einem Messschieber die Dicke der Platte inklusive der Eisschicht erfasst werden kann. Das verfügbare Messmittel erlaubt jedoch bestenfalls eine grobe Abschätzung mit einer Genauigkeit von etwa 0,5 mm. Die durchschnittliche Lagendicke von 30 μm ist damit nicht mehr als ein Schätzwert. Zudem variiert die Lagendicke wahrscheinlich mit den Parametern Applikationsgeschwindigkeit und Anpressdruck, welche im manuellen Betrieb nicht konstant gehalten werden können. Dem indirekten Messverfahren ist eine direkte Dickenmessung vorzuziehen. In den Vereisungsexperimenten wird ein Messstand aufgebaut, in dem die Dicke mit einer Messuhr bestimmt wird.

6.7. Zusammenfassung

Die Voruntersuchungen präsentieren zunächst den Messaufbau mit der Programmierung für eine automatisierte Messwertaufnahme. Der Aufbau ist ein wichtiges und zentrales Werkzeug dieser Arbeit, welches eine schnelle und automatische Datenerfassung ermöglicht. Das Programm beinhaltet zudem zusätzlich Funktionen, wie die Spektralanalyse von Messdaten. Mit diesem Werkzeug wird die Wellenausbreitung in der CFK-Platte untersucht. Die Versuche zeigen zunächst grundlegende Eigenschaften der Lambwellen, wie ihr dispersives Verhalten und den multimodalen Charakter. Es können zunächst nur die beiden fundamentalen Lambwellenmoden A_0 und S_0 angeregt werden. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass mit einer Eisschicht auf der Platte auch Moden höherer Ordnung angeregt werden können. Die Untersuchung zeigt drei Möglichkeiten auf, mit denen bestimmt werden kann, wie effektiv die Lambwellenanregung über der Frequenz ist. Die schnellste Methode nutzt einen linearen Gleitsinus als Anregungssignal. Wird die Zeit, in der die Anregung vonstattengeht durch die Frequenz ersetzt, so spiegelt die Hüllkurve von dem empfangenen Zeitsignal sogleich wider, wie wirksam Wellen generiert werden. Eine zweite Methode erzeugt einen deckungsgleichen Verlauf durch die Division zweier Frequenzspektren von einem Empfänger- und Sendersignal. Das Ergebnis ist unabhängig davon, unter welcher Anregungsfrequenz die Zeitsignale gewonnen werden, so lange eine signifikante Amplitude in den Signalen ausgewertet werden kann. Die letzte Methode ist die Aufzeichnung eines Amplitudenganges. Dies ist im Vergleich zu den anderen Methoden aufwändiger, allerdings kann die Amplitude auch separat für unterschiedliche Moden ausgewertet werden. Der Amplitudengang des A_0 -Modus validiert darüber hinaus die Berechnungen aus Kapitel 2.3.3., die eine effektive Anregung von Lambwellen mithilfe der Aktorlänge beschrieben.

Eine am Sender emittierte S_0 -Lambwellengruppe propagiert schnell durch die Struktur und kann am Empfänger problemlos aufgezeichnet und ausgewertet werden. Dagegen ist es eine Herausforderung, gezielt den A_0 -Mode auszuwerten. Denn dieser besitzt einerseits eine geringere Amplitude und breitet sich andererseits langsamer aus. Ein schnelles S_0 -Wellenpaket kann währenddessen mehrfach in der Platte hin und her reflektieren und am Empfänger mit dem direkt übertragenen A_0 -Wellenpaket zusammenfallen. Die A_0 -Wellengruppe kann in diesem Fall nur noch schwer identifiziert werden. Ein anderer Effekt, der die Interpretation der empfangenen Zeitsignale erschwert, ist die Dispersion. Ein Anregungssignal aus wenigen Perioden endet abrupt. Diese Unstetigkeit in dem Signal führt zu einem breiteren Frequenzgehalt. Das Spektrum des Anregungssignals ist aufgefächert und formt Nebenmaxima. Diese Nebenmaxima können in einem Bereich lokalisiert sein, in dem die Wellenanregung besonders effektiv ist. Die generierten Wellenpakete bestehen in diesem Fall gleichermaßen stark aus zwei verschiedenen Grundfrequenzen. Neben der Anregungsfrequenz ist dies die Eigenresonanzfrequenz, in der die Piezowandler nachschwingen. Die unterschiedlichen Frequenzen breiten sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus und die Wellenpakete „zerfließen“ – sie verhalten sich stark dispersiv. Die Intention ist es sowohl die Reflexionen zu unterdrücken, als auch die spektrale Bandbreite zu schmälern. Ein Umkleben der Kante mit einer viskoelastischen Klebmasse

dämpft effektiv die Kantenreflexion. Je großflächiger die Kante und der Randbereich beklebt sind, desto stärker werden Randreflexionen unterdrückt. Die spektrale Bandbreite kann auf zwei Wege beeinflusst werden. Eine höhere Anzahl an Perioden senkt die Bandbreite, damit gewinnen die Wellenpakete jedoch an Länge und die Trennschärfe zwischen den Paketen nimmt ab. Daher wird der Einfluss untersucht, den eine gefensterte Anregung auf die Wellenausbreitung nimmt. Ist das Anregungssignal mit einem Hanning-Fenster versehen, so wird die spektrale Bandbreite gemindert und das Signal umfasst stets nur einen schmalen Bereich um die Grundfrequenz. Die damit generierten Wellenpakete enthalten demzufolge vornehmlich eine Ausbreitungsgeschwindigkeit, sie „zerfließen“ nicht, sondern behalten ihre Form bei. Die gewonnenen Erkenntnisse, wie Kantenreflexionen unterdrückt werden und die Anregungsbandbreite begrenzt wird, fließen in die Versuche mit einer akkumulierten Eisschicht ein. Zuletzt werden verschiedene Methoden untersucht, mit denen eine Klareisschicht erzeugt werden kann. Die Methode der Wahl für die ausstehenden Untersuchungen, wie sich Lambwellen unter einer Klareisschicht verhalten ist die lagenweise Eisapplikation mit einem angefeuchteten Filz.

7. Untersuchungen

7.1. Präparation der Versuchsplatte

Bei der vorhandenen CFK-Platte, die mit den *DuraAct-Flächenwandlern* bestückt ist, sitzen die Wandler direkt an den Kanten. Bei dieser Anordnung besteht das Problem von störenden Kantenreflexionen, die nicht unterdrückt werden können und es erschweren, den A_0 -Lambwellenmode zu identifizieren und auszuwerten. Für die Experimente unter Eis wird daher eine baugleiche CFK-Platte in einer anderen Weise mit den *DuraAct-Flächenwandlern* bestückt. Die Idee ist es, den Abstand auf die Reflexionen abzustimmen, so dass die A_0 -Wellengruppe möglichst zwischen zwei S_0 -Reflexionen liegt. Vorrangig sollen die Reflexionen allerdings schon im Vorhinein durch das Abkleben der Kanten reduziert werden. Die Reflexionsunterdrückung erfordert einen ausreichenden Abstand der Wandler zu den Kanten, so dass diese umklebt und damit bedämpft werden können. Eine andere Idee besteht in der Applikation eines dritten Wandlers. Dieser wird auf der gegenüberliegenden Plattenseite deckungsgleich zu einem Wandler aufgeklebt. Eine solche Anordnung erlaubt, als Empfänger eine symmetrische Schwingung klar von einer antisymmetrischen Schwingung zu unterscheiden. Denn während das Signal bei einer symmetrischen Schwingung auf der Plattenober- und Unterseite identisch ist, liegt bei antisymmetrischen Schwingungen eine Phasendrehung von 180° vor (vgl. Abbildung 4a). Das Empfängersignal zeigt bei einer antisymmetrischen Schwingung also an einem Wandler einen Wellenberg, während auf der anderen Plattenseite simultan ein Wellental gemessen wird. Die Konfiguration kann ebenso für eine modenselektive Anregung genutzt werden. Ein phasengleiches Anregungssignal an beiden Wandlern generiert vorwiegend symmetrische Wellen und ein Anregungssignal, das 180° phasenverschoben zu dem anderen ist, regt verstärkt antisymmetrische Wellen an. In der Forschung ist die gezielte symmetrische und antisymmetrische Anregung mit einem Wandler auf der Ober- und Unterseite besonders attraktiv, da sich so die Analyse, wie Eis auf die einzelnen Moden wirkt, vereinfacht. Allerdings ist später, in der technischen Anwendung, eine beidseitige Applikation mit Piezowandlern nicht praktikabel.

Der Abstand zwischen den Wandlern muss mindestens so groß sein, dass sich die Wellengruppen einzelner Moden separieren. Für die korrekte Auslegung, in welcher Entfernung voneinander die Wandler positioniert werden können, erfolgt zunächst eine Abschätzung der Separationslänge zwischen einer A_0 - und S_0 -Wellengruppe nach der im Anhang A hergeleiteten Gleichung (11). Die Abschätzung nutzt die berechneten Gruppengeschwindigkeiten von A_0 und S_0 , die sich bei einer Eisdicke von 0,5 mm ergeben. Es wird die maximale berechnete Eisdicke von 0,5 mm herangezogen, da dort kleinere Differenzen in den Gruppengeschwindigkeiten als im unvereisten Fall vorliegen. Die Wellenpakete benötigen in diesem Fall eine längere Strecke bis sie getrennt sind. Im linken Teil von Abbildung 40 ist die Separationslänge zwischen den Wellenpaketen über der Anregungsfrequenz aufgetragen. Der Kurvenverlauf wird durch $1/f$ dominiert und fällt mit der Frequenz stetig ab. Zwischen den Kurven variiert der Parameter der Anregungsperioden. Proportional zu der Anzahl der Anregungsperioden steigt die Separationslänge. Ein anderes Auslegungskriterium betrifft die Reflexion. Nach Gleichung (12) trifft eine S_0 -Reflexion genau

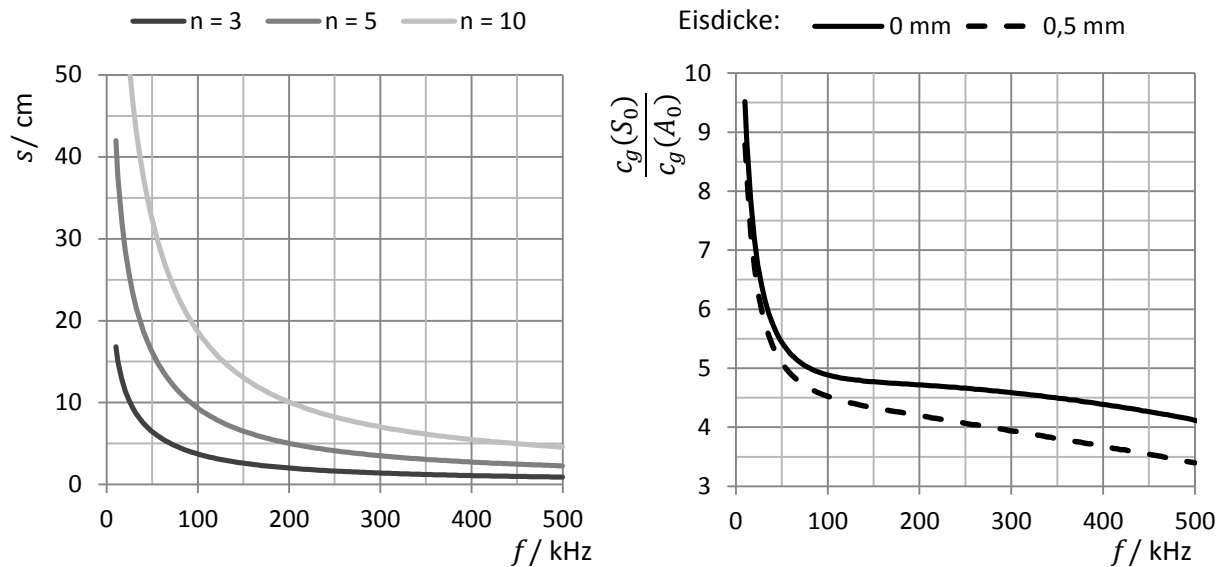


Abbildung 40: Links: Separationslänge zwischen einem A_0 - und einem S_0 -Wellenpaket für eine Anregungsdauer von n Perioden. Rechts: Quotient der Gruppengeschwindigkeiten von A_0 und S_0 für den Zustand ohne Eis und einer 0,5 mm dicken Eisschicht.

zeitgleich mit A_0 am Empfänger ein, wenn das Verhältnis der Gruppengeschwindigkeiten von S_0 zu A_0 dem Verhältnis der Übertragungswege entspricht. Der rechte Abbildungsteil zeigt den Quotienten der Gruppengeschwindigkeiten von S_0 zu A_0 für den Fall ohne Eis und mit einer 0,5 mm dicken Eisschicht. Der Quotient ist keineswegs konstant, sondern schwankt in dem relevanten Frequenzbereich von 20 bis 500 kHz stark. Innerhalb des Frequenzintervalls erreicht der Quotient Werte von 3,4 bis 7,2. Zusätzlich unterscheiden sich die Kurvenverläufe unter einer Eisanlagerung. Dahingegen ist das Verhältnis zwischen den Lauflängen konstant und wird mit der Applikation der Piezowandler festgelegt. Es ist daher nur für einen Bereich, also in einem spezifischen Intervall aus Frequenz und Eisdicke möglich, rein durch den Wandlerabstand sicherzustellen, dass keine S_0 -Reflexion das A_0 -Wellenpaket überlagert. Die Platte wird wie in Abbildung 41 dargestellt mit drei Piezowandlern beklebt. Der Abstand der Wandler zueinander und auch zu den Kanten beträgt $l \approx 29,3$ cm. Die nachfolgende Betrachtung erklärt, warum die Wandler auf diese symmetrische Weise appliziert sind. Dabei bildet beispielhaft der einzeln applizierte Wandler den Sender und die doppelseitig aufgebrachten Wandler die Empfänger. Zunächst erlaubt der Abstand von 29,3 cm bei fünf Anregungsperioden und ab einer Frequenz von 20 kHz, dass sich A_0 - und

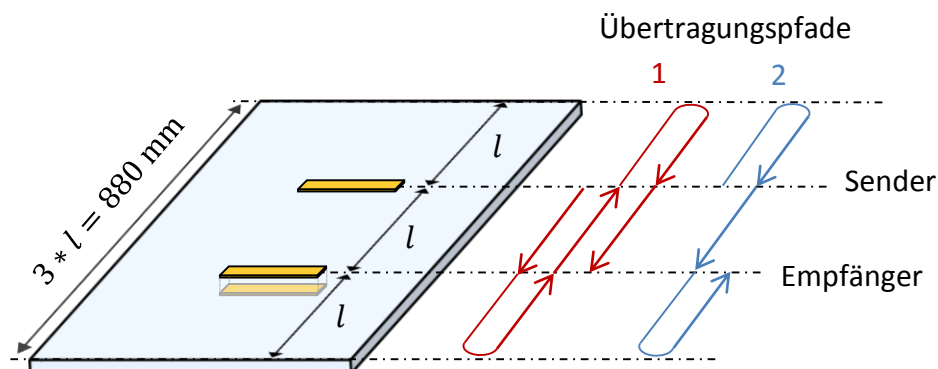


Abbildung 41: Anordnung der Piezowandler auf der CFK-Platte.

S_0 -Wellengruppen separieren (vgl. Abbildung 40 links). Der Sender emittiert sowohl Wellen in Richtung des Empfängers als auch entgegengesetzt, in die Richtung der Kante. Die beiden Fälle sind als die Übertragungspfade 1 und 2 in der Abbildung 41 markiert. Nach der Lauflänge von l treffen die Wellen von Übertragungspfad 1 auf den Empfänger. Die Wellen überlaufen den Empfänger, reflektieren an der unteren Kante und treffen nach einer Lauflänge von $3l$ erneut auf den Empfänger. Nach derselben Lauflänge von $3l$ trifft auch das Wellenpaket von Übertragungspfad 2 am Empfänger ein und es entsteht ein umso größeres Empfängersignal, da sich die Wellen konstruktiv überlagern. Das Verhältnis der Lauflänge von $3l$ zu dem direkten Übertragungsweg l beträgt 3. Im Vergleich mit dem rechten Teil von Abbildung 40 liegt der Quotient aus der Gruppengeschwindigkeit von S_0 zu A_0 stets oberhalb von 3. Das heißt, ein S_0 -Wellenpaket durchläuft $3l$, während das A_0 -Wellenpaket noch nicht den direkten Übertragungsweg mit der Länge von l zurückgelegt hat. Im Zeitsignal beginnt die S_0 -Reflexion also fortwährend vor dem A_0 -Wellenpaket. Der Abstand berücksichtigt weiterhin die zeitliche Ausdehnung der S_0 -Reflexion. Unter der Anregung mit fünf Perioden endet das reflektierte Wellenpaket daher bevor die A_0 -Gruppe eintrifft. Bei dem Übertragungsweg 2 trifft ein Wellenpaket nach einer Strecke von $5l$ am Empfänger ein. Die Lauflänge ist 5 mal so groß, wie der direkte Übertragungsweg. Die dargestellten Quotienten der Gruppengeschwindigkeiten von S_0 und A_0 (Abbildung 40 rechts) schneiden den Wert von 5, je nach Eisdicke, in einem Frequenzbereich von 50 bis 75 kHz. Das S_0 -Wellenpaket trifft hier zeitgleich mit A_0 am Empfänger ein. Allerdings stammen die S_0 -Wellen, die nach $5l$ am Empfänger eintreffen nur aus dem Übertragungspfad 2. Im Vergleich dazu treffen nach $3l$ die Reflexionen beider Übertragungspfade gleichzeitig am Empfänger ein. Nach $5l$ gibt es keine Überlagerung mit Wellen aus dem anderen Übertragungspfad und die Amplitude ist gegenüber der konstruktiven Überlagerung von Wellen aus beiden Übertragungspfaden halbiert. Zudem reflektieren die Wellen zweifach und mit einer Reflexionsunterdrückung ist es höchstwahrscheinlich möglich, die Wellen ausreichend zu dämpfen. Zusammenfassend verspricht die gewählte Konfiguration, dass die fundamentalen Lambwellenmoden separat am Empfänger aufgenommen und unterschieden werden können. Dies gelingt, da sich die Wellenpakete der Fundamentalmoden bei der Anregung von 5 Perioden separieren und der Aufbau so konzipiert ist, dass die erste und stärkste S_0 -Reflexion das A_0 -Wellenpaket nicht überlagert. Zuletzt kann mit dem dritten Wandler klar zwischen symmetrischen und antisymmetrischen Schwingungsformen unterschieden werden und auch eine selektive Anregung ist denkbar.

Applikation der Wandler

Das Verkleben der Piezowandler ist ein kritischer Prozessschritt und beeinflusst maßgeblich die Eigenschaften, wie die Resonanzfrequenz oder den Wirkungsgrad, mit dem Wellen in die Struktur eingeleitet werden. Die Dehnung des Piezowandlers wird durch Schub in die Platte übertragen. Für eine verlustfreie Kraftübertragung muss die Klebschicht möglichst schubsteif sein. Neben dem Klebstoff selbst, ein hochsteifes Harzsystem, ist dafür die Schichtdicke ausschlaggebend, die dünn und gleichmäßig verteilt sein sollte. Für ein fehlerfreies Ergebnis und einen homogenen Anpressdruck auf alle Wandler, erfolgt das Verkleben in einem

Vakuumverfahren unter Folie. Die einzelnen für das Verkleben notwendigen Prozessschritte, sind nachfolgend kurz erklärt. Für eine dünne und feste Verklebung ist es wichtig, dass die zu verklebenden Oberflächen aktiviert sind und einfach benetzt werden können. Die Oberflächenaktivierung erfolgt durch das Anrauen mit einem feinen Schleifpapier. Vor und nach dem Anrauen werden die zu verklebenden Flächen gründlich mit Isopropanol gereinigt. Im nächsten Prozess-

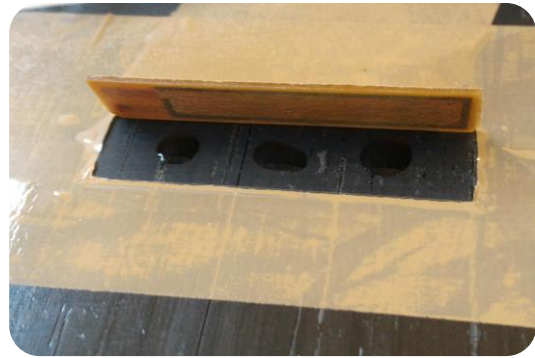


Abbildung 42: Verfahrensweise beim Verkleben der Piezowandler.

schritt können die Wandler zunächst trocken auf der Platte ausgerichtet und der Länge nach mit Paketklebeband fixiert werden. Um auf der Ober- und Unterseite die Wandler deckungsgleich anzubringen dienen Magnete als Markierung, die den Applikationsort durch die Platte hindurch auf die gegenüberliegende Seite projizieren. Wird das Klebeband an drei Seiten des Wandlers aufgetrennt, so lässt sich der Wandler hochklappen und gibt die Fügestelle frei (s. Abbildung 42). Nachdem die Klebefläche mit wenigen Tropfen des Harzsystems versehen ist, kann der Wandler zurück in seine Position gebracht werden. Überschüssiges Harz entweicht zu den Seiten und benetzt dort bloß das restliche Klebeband und nicht die CFK-Platte. Anschließend wird die Platte mit Vakuumfolie und Butyldichtband luftdicht verpackt und evakuiert. Dabei ist darauf zu achten, dass der Unterdruck an den Klebeflächen anliegt. Dafür wird aus Gewebe oder Vlies ein luftdurchlässiger Pfad gelegt, der vom Absaugort zu den Wandlern reicht. Das genutzte Harzsystem (*Sikomin SR 1710i mit SD 8824*) ist sechs Stunden dem Vakuum ausgesetzt und verweilt im Anschluss acht Stunden in einem Ofen bei 60°C. Das Tempern steigert den Vernetzungsgrad und verbessert die mechanischen Eigenschaften des Harzes.

Funktionsprüfung

Eine Messung überprüft die theoretischen Überlegungen. Die Platte ist hierfür bereits ringsherum mit Butyldichtband umklebt. Das Abkleben entspricht dem als Dämpfung 3 bezeichneten Zustand aus Abbildung 32. Der einzelne Wandler bildet den Sender und wird mit einer Spannung von 10 Vpp und 5 Hanning-gefensterten Anregungsperioden angesteuert. Die Anregungsfrequenz liegt exemplarisch bei 60 kHz. Abbildung 43 zeigt die Spannungs-Zeit-Verläufe an den beiden gegenüberliegenden und als Empfänger arbeitenden Wandlern. Nach 45 μ s beginnt das erste Wellenpaket. Die Signale an den beiden Empfängern verlaufen in Hinblick auf die Amplitude und die Phase identisch. Nach dem dreifachen der Zeit (135 μ s) trifft ein vergleichbares Wellenpaket ein, dessen Amplitude mit 20 mV halb so groß ist, wie die der ersten Wellengruppe. Nach 225 μ s erscheint eine dritte Wellengruppe in dem Empfängersignal. Sie ist durch eine 180° gedrehte Phasenbeziehung zwischen den Empfängersignalen auf der Plattenober- und Unterseite gekennzeichnet. Im Anfangsbereich des Paketes, von 225 bis etwa 280 μ s, liegt der Phasenversatz jedoch nicht streng bei 180°. Dies kann an den Schnittpunkten der beiden Kurven identifiziert werden, die hier nicht in den Nulldurchgängen liegen.

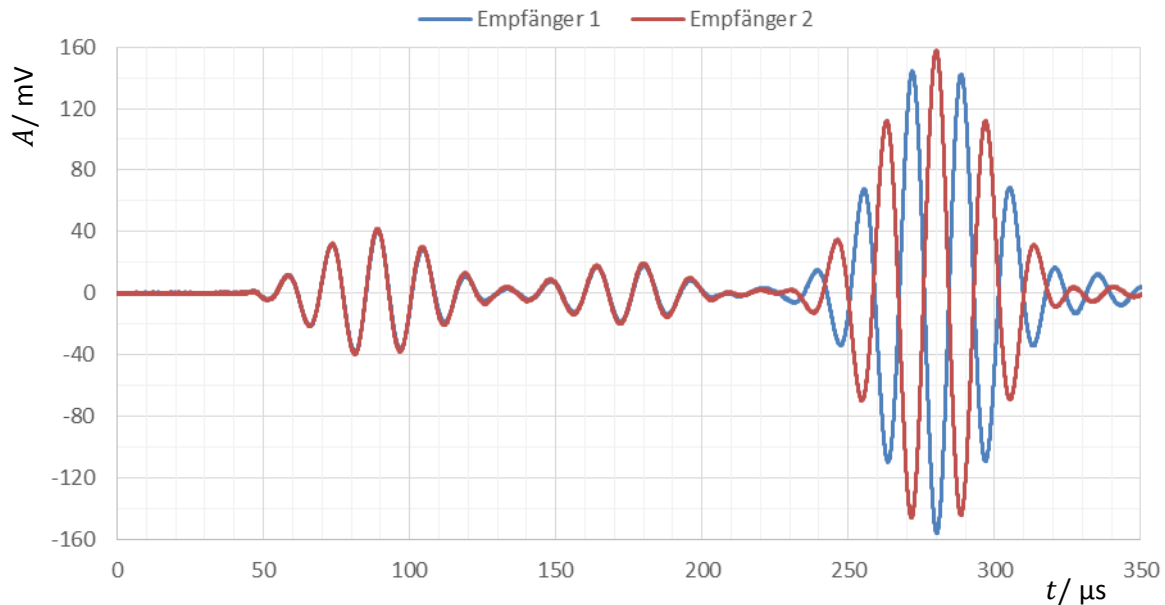


Abbildung 43: Zeitsignal an zwei wechselseitig applizierten Wandlern bei einer Anregungsfrequenz von 60 kHz.

Die ersten beiden Wellenpakete können anhand der deckungsgleichen Phasenbeziehung eindeutig einer symmetrischen Schwingung zugeordnet werden. Es handelt sich um das direkt übertragene S_0 -Lambwellenpaket und das reflektierte S_0 -Paket, das nach der dreifachen Lauflänge eintrifft. Trotz der Kantenbedämpfung ist das reflektierte Paket mit einer Amplitude von 20 mV noch klar ausgeprägt. Die identische Phase beider Empfängersignale bestätigt, dass die Wandler genau deckungsgleich appliziert sind. Ferner ist die Amplitude zwischen den Signalen dieselbe. Das heißt, die Wandler reagieren gleichermaßen sensitiv und es liegt kein relevanter Unterschied in der Verklebung vor. Der Phasenversatz in dem dritten Wellenpaket gibt zu erkennen, dass die Schwingung antisymmetrisch ist. Hier liegt der A_0 -Mode vor. Das Zeitsignal deckt sich mit der Erwartung, dass die erste S_0 -Reflexion gänzlich vor dem A_0 -Wellenpaket liegt und verifiziert die zuvor angestellten theoretischen Betrachtungen. Mit zwei Piezowandlern, die deckungsgleich auf den gegenüberliegenden Seiten der Platte verklebt sind und als Empfänger arbeiten, können Wellengruppen also klar als symmetrisch und antisymmetrisch identifiziert werden. Im Kontrast zu dem Vorversuch (6.4.) werden die Wellenreflexionen an den Kanten jedoch nicht so effektiv unterdrückt. Die zweifach reflektierten Wellen mit einer Lauflänge von $5l$ scheinen mit dem A_0 -Wellenpaket zu interferieren, da der Phasenunterschied zwischen den Signalen von 225 bis etwa 280 μs nicht streng 180° beträgt. Eine genauere Analyse, wie stark eine symmetrische Welle den A_0 -Mode überlagert, kann auf zwei Arten erfolgen. Einerseits können die symmetrischen Anteile rechnerisch von den antisymmetrischen getrennt werden und andererseits ist es möglich, die doppelseitig verklebten Wandler als Sender zu nutzen und so primär symmetrisch oder antisymmetrisch anzuregen. Bei einer Addition der beiden Signale aus Abbildung 43 wird die Amplitude von S_0 verdoppelt und der gegenphasige A_0 -Mode ausgelöscht. Umgekehrt ist es, wenn die Signale voneinander subtrahiert werden. In diesem Fall bleiben nur die A_0 -Anteile mit einer verdoppelten Amplitude übrig. Die Resultate der beiden Operationen sind in Abbildung 44 aufgetragen. Dieselben Graphen können auch mit einer doppelseitigen Anregung aufgenommen werden. In einer Messung liegt das

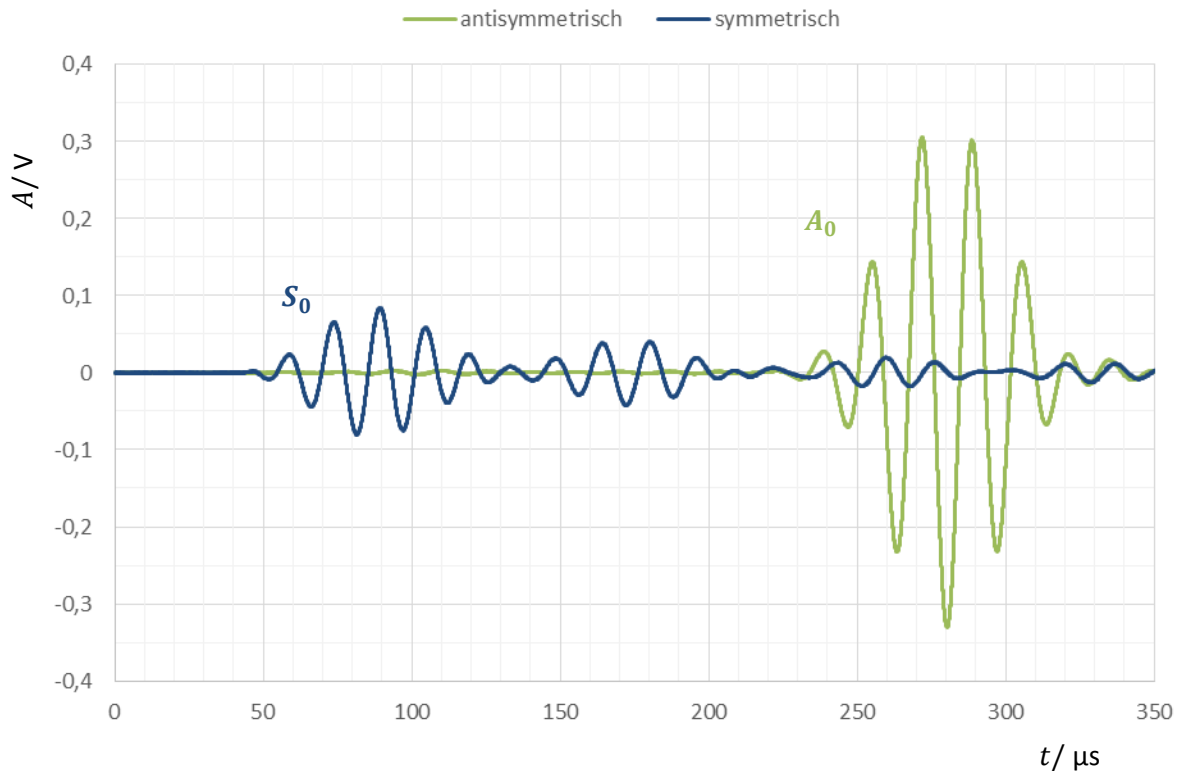


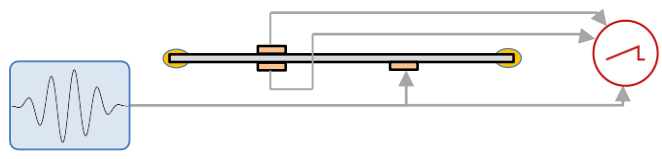
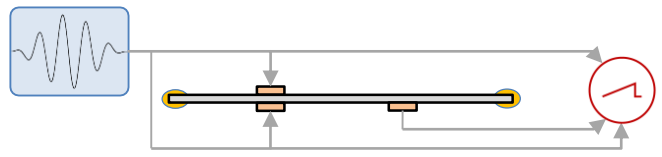
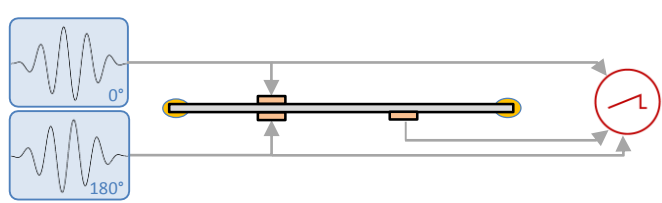
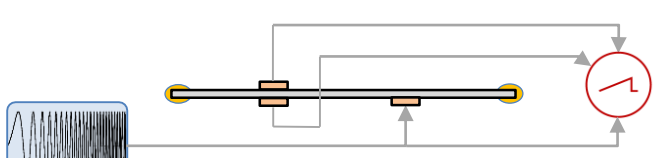






Abbildung 44: Trennung der symmetrischen und antisymmetrischen Schwingungsanteile.

Anregungssignal gleichzeitig an beiden Wandlern an – die Anregung ist symmetrisch. In der zweiten Messung erfolgt die Anregung antisymmetrisch. Die Sender sind in diesem Fall nicht mehr gemeinsam an einem Kanal des Funktionsgenerators angeschlossen, sondern belegen zwei separate Kanäle. Ein Sender wird mit dem normalen Anregungssignal gespeist, während an dem zweiten Kanal zeitgleich ein 180° phasengedrehtes Signal anliegt. Der Unterschied liegt darin, dass die Wellen bei der doppelseitigen Anregung eine doppelt so große Amplitude besitzen im Vergleich zu der einseitigen Anregung. Dagegen ist bei der einseitigen Anregung der Empfang doppelseitig und das Aufaddieren oder Subtrahieren der beiden Empfängersignale führt zu demselben Ergebnis aus Abbildung 44. Im Gegensatz zu dem Zeitverlauf aus Abbildung 43 können nun auch zweifelsfrei die höheren S_0 -Reflexionen bei $t = 225 \mu\text{s}$ und $t = 310 \mu\text{s}$ identifiziert werden. Sie zeigen, dass die A_0 -Gruppe trotz der Reflexionsunterdrückung überlagert wird. Die Gefahr einer unbemerkten Überlagerung liegt darin, dass die Amplitude der Wellengruppe verfälscht wird. Mit der verfälschten Amplitude kann sich zusätzlich das Maximum der Wellengruppe verschieben, und auch die Laufzeit, die sich an dem Maximum orientiert, beeinflussen. Die Problematik wird endgültig durch die doppelseitig applizierten Wandler umgangen. Beide gezeigten Methoden leisten gleichermaßen eine gute Trennung zwischen symmetrischen und antisymmetrischen Schwingungen. Der dritte aufgeklebte Piezowandler erweist sich als äußerst wertvoll, um die einzelnen Schwingungsmoden separat voneinander aufzunehmen. Nichtsdestotrotz sind auch die angestellten Überlegungen für den Wandlerabstand und das Dämpfen der Kantenreflexion wichtig, um ein definiertes, reflexionsarmes und einfach zu interpretierendes Zeitsignal zu erhalten.

7.2. Kontamination mit Eis

Die Versuche unter einer Klareisanlagerung setzen sich aus einer Reihe einzelner Messungen zusammen. Messdaten werden bei Raumtemperatur, im tiefgekühlten Zustand und schwerpunktmäßig bei verschiedenen dicken Klareisschichten erfasst. In jedem einzelnen dieser Zustände erfolgen alle in der nachstehenden Tabelle aufgeführten Messungen. Als Grundlage dient der in Kapitel 6.1. vorgestellte Aufbau, bestehend aus Funktionsgenerator, Oszilloskop und der rechnergestützten Ansteuerung.

Tabelle 2: Vier verschiedene Messungen, die für jeden Zustand aufgenommen werden.

Bezeichnung	Prinzipaufbau	Parameter
Einseitige Anregung (Burst)		Perioden: 5 Fenster: Hanning Amplitude: 10 Vpp Startfrequenz: 20 kHz Endfrequenz: 400 kHz Schrittweite: 5 kHz Mittelwert aus 20 Messungen pro Frequenzschritt
Symmetrische Anregung (Burst)		
Antisymmetrische Anregung (Burst)		
Gleitsinus		
Legende:		
Piezowandler:		Oszilloskop: 
Butyldichtband:		Anregungssignal: 
CFK-Platte:		
Elektrischer Signalweg:		

Während der Anregung mit den Burst-Signalen beschränkt sich die höchste Frequenz auf 400 kHz, da die Voruntersuchungen ab dieser Anregungsfrequenz keine auswertbaren Signale mehr zeigen (vgl. Abbildung 30). Dennoch werden sicherheitshalber und gerade bei dickeren Eisschichten auch exemplarisch höhere Frequenzen angeregt, für den Fall, dass dort höhere Moden auftreten. Der Gleitsinus geht hingegen bis zu einer Frequenz von 500 kHz. Dies liegt vordergründig an der Anregungsdauer von 0,5 s, die aus den Voruntersuchungen und aus [49] übernommen wird und direkt der Momentanfrequenz in MHz entspricht.

Aufbau zur Eisapplikation und Dickenmessung

Abbildung 45 zeigt den Versuchsaufbau, wie er für die gesamte Datenerfassung verwendet wird. Der Aufbau besteht aus zwei Teilen. Auf dem Tisch ist im Vordergrund die Messstation

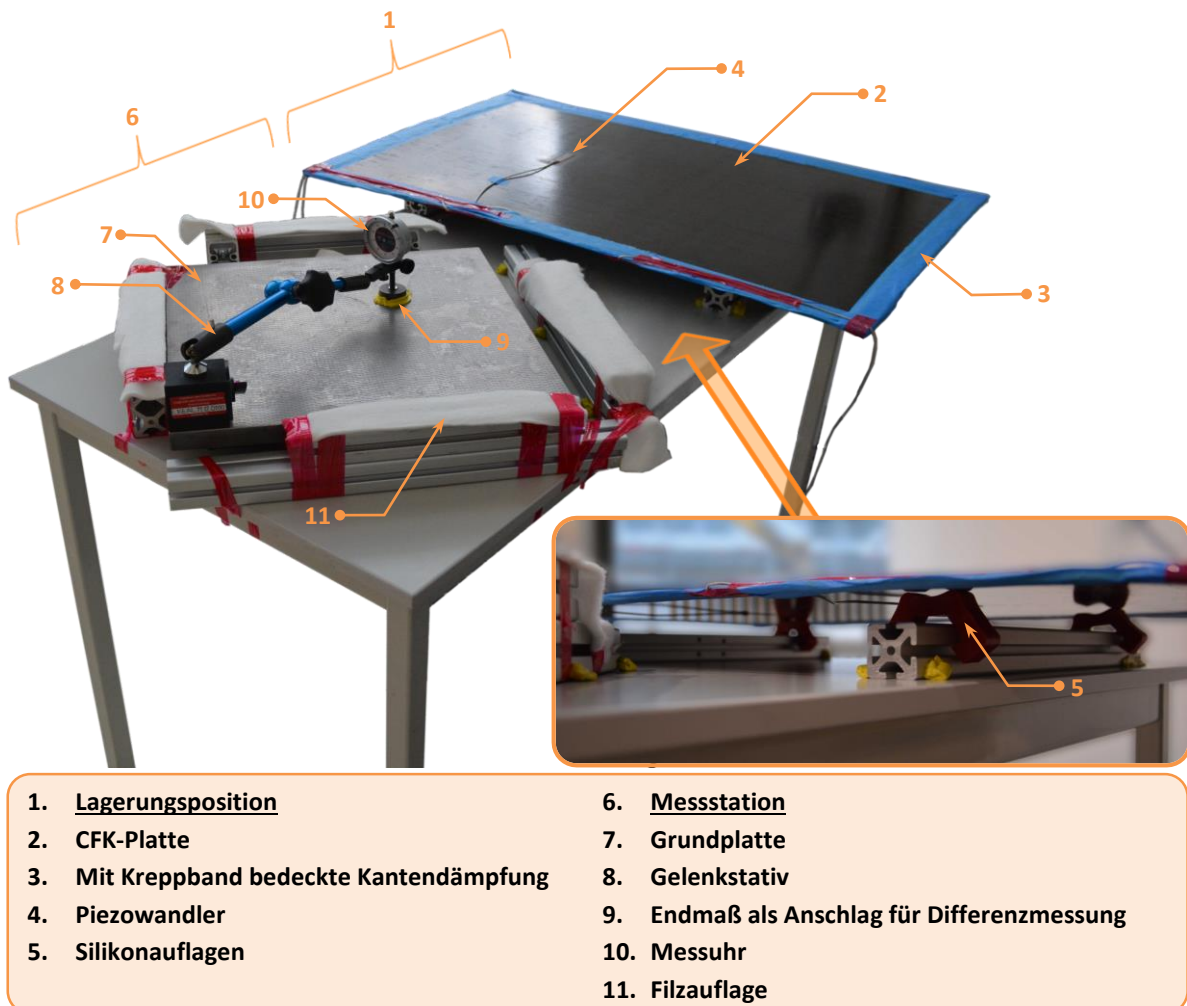


Abbildung 45: Aufbau für die Vereisungsversuche.

zu sehen, in der die Eisdicke erfasst wird. Im Hintergrund befindet sich die Lagerung, auf der die Platte während der Versuche mit den Lambwellen aufliegt. In der Lagerungsposition ist die CFK-Platte ähnlich wie in den Vorversuchen auf vier Silikonfüße gebettet, die außerhalb des direkten Übertragungsweges liegen. Der Kern der Messstation ist eine Messuhr, die eine Skalenteilung von 10 μm besitzt. Die Messuhr ist an einem magnetischen Gelenkstativ fixiert, das wiederum auf einer massiven Grundplatte sitzt. Die Messspitze der Uhr liegt nicht direkt auf der Grundplatte auf, stattdessen ist der Berührungspunkt durch ein Endmaß erhöht. Das Endmaß hat nur eine kleine Auflagefläche und ist auf der Grundplatte mit übrigem Butyldichtband gegen Verrutschen gesichert. Die Dicke eines Objektes kann an der Messstelle durch die Differenzlänge zum Endmaß bestimmt werden. Die Erhöhung durch das Endmaß ist wichtig, denn die Geometrie der Grundplatte ist zunächst unbekannt und könnte beispielsweise wellig sein. Auch die CFK-Platte, deren Dicke hier bestimmt werden soll, ist nicht zuletzt wegen ihrer Flexibilität nicht plan. Liegt die CFK-Platte also direkt und großflächig auf der Grundplatte auf, so ist nicht sichergestellt, dass die CFK-Platte in der

Achse der Messuhr auch ein Berührungspunkt mit der Grundplatte hat – die Messung wäre fehlerbehaftet. Die Messspitze der Uhr besteht aus einer Rubinkugel mit einem kleinen Radius. Da Eis eine geringe Härte besitzt, besteht die Gefahr, dass die Messspitze ein Stück weit in das Eis eindringt und eine geringere Schichtdicke, als die real vorhandene abgelesen wird. Um dies zu vermeiden wird die Messspitze gegen einen planen Teller mit einem Durchmesser von 5 mm getauscht, der die Messkraft der Uhr flächiger auf das Eis überträgt. Die Messuhr besitzt einen Messbereich von 13 mm und kann mit einem Magneten in der höchsten Position gehalten werden. Auf diese Weise wird an der Messstelle ein Spalt freigegeben, in den die CFK-Platte geschoben werden kann. Der Gelenkarm und die Grundplatte bilden ein starres Gestell, das die CFK-Platte c-förmig umfasst und eine Dickenmessung im Plattenzentrum erlaubt. Für möglichst wenig Biegung in der CFK-Platte, die das Eis brechen können, befinden sich Auflagen rings um die Grundplatte. Die Auflagen sind mit Filz bezogen und auf derselben Höhe wie das Endmaß an der Messstelle. Damit die CFK-Platte beim Hineinschieben in die Messstation nicht anhaftet, wird die Butylmasse an den Kanten mit Kreppband versehen. Ein Nachteil der gesamten Messmethode liegt darin, die Platte für jede Dickenmessung aus ihrer Lagerungsposition zu bewegen. Damit einher geht die Gefahr von Brüchen in der Eisschicht, die bereits durch leichte Biegungen in der Platte entstehen können. Eine Alternative geht von einer ortsfesten Platte aus. Demzufolge muss der Messaufbau beweglich sein. Das Magnetstativ mit der Messuhr kann zum Beispiel ausschließlich für die Dickenmessung aufgesetzt werden, so dass in der Zwischenzeit genug Platz zum Applizieren der Eisschicht besteht. Während sich die Lambwellen in der Struktur ausbreiten, darf der direkte Übertragungsweg jedoch nicht durch einen Steifigkeitssprung gestört sein. Wenn die CFK-Platte konstant auf dem Endmaß aufliegt, so treten an ihm Reflexionen auf. Ein Luftspalt zwischen dem Endmaß und der Plattenunterseite ist obligatorisch und muss bei der Dickenmessung beispielsweise durch das elastische Biegen der Platte überbrückt werden. Das Prinzip erweist sich jedoch nicht als tauglich, da die Positionierung der Messuhr nicht ausreichend reproduzierbar ist. Daher wird die oben beschriebene Messmethode mit einem stationären Messaufbau und der beweglichen Platte angewendet. Der gesamte Aufbau ist stabil auf einem Tisch angebracht und kann so komplett in die Tiefkühlkammer gestellt werden. Mit einem 10 mm dicken Parallel-Endmaß wird die Funktion des Messaufbaus geprüft. Bei der Umgebungstemperatur von 15,6 °C beträgt der Anzeigewert 9,94 mm. Eine Zweite Messung, nach dem der Aufbau eine Nacht in der Tiefkühlkammer bei -18 °C verweilt, ergibt 9,93 mm, wobei das Endmaß auch bei der zweiten Messung eine Temperatur von 15,6 °C besitzt. Die Messung ist hinreichend temperaturstabil, zeigt allerdings eine leichte systematische Abweichung zu dem Endmaß. Die Fertigungstoleranzen des Endmaßes sind nicht bekannt und es ist unsicher, ob die Abweichung der Messuhr oder der Maßverkörperung zuzuordnen ist. Nichtsdestotrotz wird die maximale Abweichung von 0,7 % als Fehler in den Dickenmessungen berücksichtigt.

Durchführung

Die erste Messreihe wird bei der Umgebungstemperatur von $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufgenommen. Die CFK-Platte befindet sich in der Lagerungsposition und alle in Tabelle 2 aufgeführten Messungen werden ausgeführt. Im Anschluss wird der Tisch mit dem Versuchsaufbau in die Kühlkammer gestellt. Die geschirmten Leitungen zu den drei Piezowandlern werden durch die Dichtung der Eingangstür nach außen gelegt, wo sie mit dem Funktionsgenerator und dem Oszilloskop verbunden sind. Ein Problem stellt die genaue Temperaturerfassung in der Tiefkühlkammer dar. Das verwendete Handgerät (PCE-T390) erfasst mit zwei Typ K Thermoelementen die Temperatur in einem Bereich von -100 bis über $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Allerdings ist das Gerät selber nicht für die tiefen Temperaturen ausgelegt und nach 10 Minuten in der Tiefkühlkammer funktionsuntüchtig. Innerhalb dieser Zeit sind auch die angezeigten Temperaturen nicht stabil und nehmen teilweise unrealistische Werte an. Der Grund liegt höchstwahrscheinlich in der internen Referenztemperatur. Diese Referenztemperatur wird an der Anschlussstelle des Sensors erhoben und ist die Voraussetzung für die Temperaturerfassung an der Sensorspitze. Nach dem Betreten der Tiefkühlkammer eilt die Referenztemperatur der eigentlichen Temperatur an der Anschlussstelle voraus oder nach und führt zu den fehlerhaften Messwerten. Damit diese Referenztemperatur konstant bleibt, liegt das Messgerät außerhalb der Kühlkammer und die Leitungen der Thermoelemente werden durch die Türdichtungen in das Kammerinnere geführt. Auf diese Weise wird die Temperatur allerdings nicht in unmittelbarer Nähe der CFK-Platte gemessen, sondern im Eingangsbereich der Kammer. An dieser Stelle sind die Temperaturschwankungen, durch das Öffnen der Tür bedeutend stärker und die Temperatur steigt von $-17,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf bis zu $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Temperatur der CFK-Platte ist mutmaßlich stabiler und wird im weiteren Verlauf der Arbeit mit der Nenntemperatur der Tiefkühlkammer von $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ angenommen. Nachdem der Versuchsaufbau über einen Zeitraum von 24 Stunden heruntergekühlt ist, wird nach Tabelle 2 die zweite Messreihe aufgenommen. Im weiteren Verlauf erzeugt ein Filz, analog zu den Beschreibungen in Kapitel 6.6. eine Klareisschicht auf der CFK-Platte. Die Eisschicht beginnt bei einem der doppelseitig applizierten Wandler und erstreckt sich auf einer Breite von 13 cm über die Platte. Der genaue Applikationsort ist in Abbildung 46 gekennzeichnet. Die Eisschicht bedeckt den direkten Übertragungsweg und geht sogar über den einseitig aufgeklebten Wandler, der sich auf

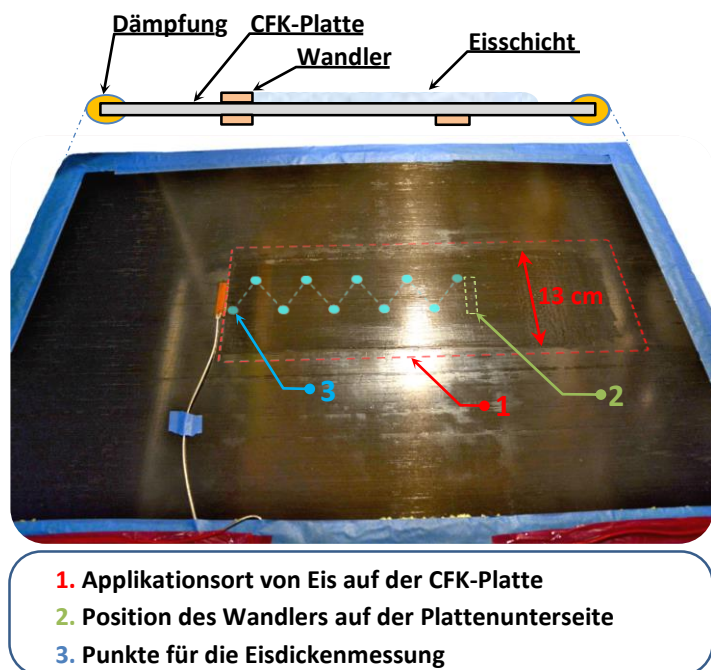


Abbildung 46: CFK-Platte mit einer dünnen Eisschicht.

der Plattenrückseite befindet hinaus (vgl. Abb. 46). Die Eisdicke wächst mit der Anzahl an Durchgängen, in denen der Filz die Oberfläche benetzt. Nach den ersten Zyklen, in denen lagenweise die Eisschicht wächst, wird die Platte in die Messstation geschoben, um an mehreren Punkten die Schichtdicke zu bestimmen. Es werden jeweils 10 Dickenwerte erfasst, die an den Ecken eines Zick-Zack-Musters liegen und sich entlang des direkten Übertragungspfades verteilen (vgl. Abb. 46). Ist die Schichtdicke aufgenommen und die CFK-Platte zurück in ihrer Lagerungsposition, so schließt sich eine Messreihe nach Tabelle 2 an. Mit dieser Herangehensweise werden Schritt für Schritt die Messreihen Nr. 3, 4, 5 und 6 bei verschiedenen dicken Eisschichten aufgenommen. Die einzelnen Vereisungszustände, bei denen die Ausbreitung von Lambwellen näher untersucht wird, sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die Schichtdicke ist als Mittelwert mit einer Standardabweichung angegeben. Die Betrachtung beschränkt sich auf eine Eisdicke von 0 bis 0,6 mm. Die nächst dickere Eisschicht kann nicht mehr fehlerfrei ausgewertet werden, da die Schicht während der Handhabung gebrochen ist. Die Eisschicht zeigt quer zur Wellenausbreitungsrichtung eine Reihe von Rissen. Die Rissbildung ist dennoch ein Phänomen, das auch in der praktischen Anwendung relevant ist und deshalb mit einer Messreihe (Nr. 7) berücksichtigt wird. Die Dickenmessung ereignet sich in diesem Fall jedoch nur an einem einzelnen Punkt, da mit zusätzlicher Bewegung die Gefahr weiterer Risse oder Delaminationen steigt. Die Dicke beträgt ~ 1 mm und da nur ein Messwert vorliegt entfällt eine statistische Fehlerbetrachtung. Abbildung 47 zeigt auf der linken Seite die Risse in der Eisschicht. Der rechte Abbildungsteil dokumentiert eine weitere und letzte Konfiguration, die in die Messungen einbezogen wird (Nr. 8). Die etwa 1 mm dicke und gerissene Eisschicht ist unter weiterer mechanischer Belastung

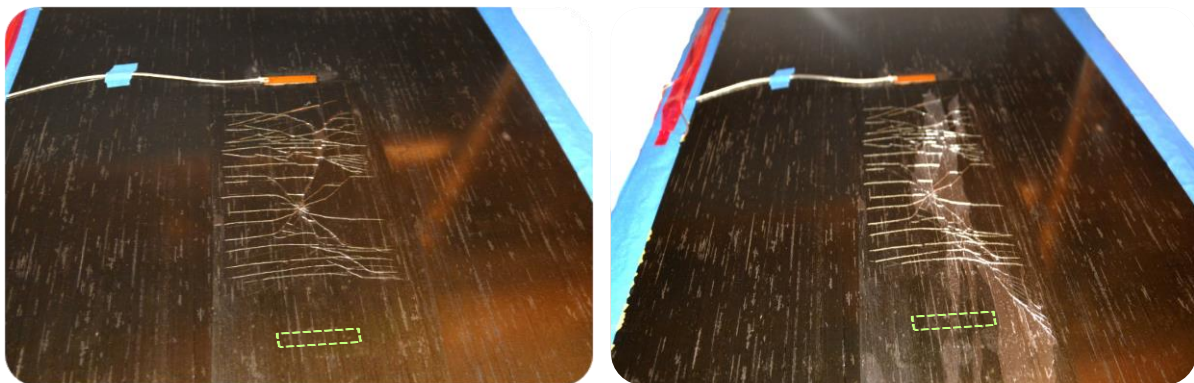


Abbildung 47: CFK-Platte mit etwa 1 mm dicker Eisschicht (die Wandlerposition auf der Plattenunterseite ist in grün markiert). Links: Querrisse in der Schicht. Recht: Risse und Delaminationen (helle Bereiche) in der Schicht.

teilweise delaminiert. Zusätzliche Risse sind bei der Belastung nicht entstanden. Die delaminierten Bereiche erscheinen in rechten Teil der Abbildung heller und können im Vergleich zu der linken Abbildung identifiziert werden. Die nachfolgende Tabelle 3 fasst chronologisch alle beschriebenen Konfigurationen zusammen, in denen jeweils eine Messreihe aufgenommen wird. Die Versuchsdurchführung bestätigt quantitativ, dass die lagenweise Eiserzeugung durch einen Filz, eine äußerst homogene Eisschicht hervorbringt. Das Vertrauensintervall der Eisdicke liegt im direkten Übertragungsweg konstant innerhalb von $60 \mu\text{m}$. Dabei wird jedoch die Rauigkeit der Eisschicht, die sichtbare Riefen in der

Tabelle 3: Überblick über die einzelnen Zustände, in denen Messungen (nach Tab. 2) erfolgen.

Nr.	Kurzbeschreibung	Eisdicke		Temperatur/ °C
		\bar{x}/mm	s_n/mm	
1	Referenz bei Raumtemperatur	0	-	15,6
2	Referenz tiefgefroren			~ -18
3	Stetig aufwachsende Eisschicht	0,14	0,03	
4		0,30		
5		0,48		
6		0,60		
7	Brüche in der Eisschicht (vgl. Abb. 47 links)	~ 1	-	
8	Brüche und Delamination (vgl. Abb. 47 rechts)			

Applikationsrichtung zeigt, vernachlässigt. Nicht zuletzt demonstriert die geringe und konstante Standardabweichung, dass die direkte Messmethode zuverlässig funktioniert. Zusammenfassend werden in verschiedenen Zuständen Messdaten über das Verhalten der Lambwellen gesammelt. In den Zuständen variiert jeweils ein Parameter, während alle anderen Parameter konstant gehalten werden. In den Messungen 1 und 2 unterscheidet sich alleine die Temperatur, so dass ihr Einfluss auf die Wellenausbreitung ausgewertet werden kann. Die Messungen 2 bis 6 beinhalten den Einfluss, den eine von 0 mm bis 0,6 mm wachsende Klareisschicht auf die Wellenausbreitung ausübt. In den Messungen 7 und 8 sind die Temperatur, sowie die Schichtdicke konstant und nur die Defekte innerhalb der Schicht variieren.

8. Ergebnisse

Das vorliegende Kapitel präsentiert die Ergebnisse aus den Untersuchungen. Die Auswertung der Burst-Signale basiert ausschließlich auf den Messdaten der doppelseitigen Anregung. Die doppelseitige Anregung hat den Vorteil, dass die generierten Lambwellen eine doppelt so große Amplitude gegenüber der einseitigen Anregung haben. Daher steigt das Signal-Rausch-Verhältnis. Zusätzlich lassen sich die Signale aus der doppelseitigen Anregung einfacher auswerten. Für A_0 und S_0 kann derselbe Algorithmus direkt die Amplitude und die Laufzeit erfassen. Die Signale aus der doppelseitigen Anregung werden trotzdem stichprobenartig mit denen aus der einseitigen Anregung verglichen. Diese stichprobenartige Kontrolle geschieht vor dem Hintergrund, dass an dem Übergang der Eisschicht zu einem der doppelseitig applizierten Wandler (vgl. Abb. 46) Reflexionen denkbar sind. In diesem Fall würden sich die Signale zwischen der einseitigen und doppelseitigen Anregung unterscheiden. Das Resultat ist jedoch, dass die Signale übereinstimmen - die Übertragungsrichtung hat keine Bedeutung für die Wellenausbreitung und es ist zulässig nur die doppelseitige Anregung auszuwerten, ohne Informationen zu verlieren.

8.1. Temperatureinfluss

Bereits innerhalb der Voruntersuchungen wurde über Auffälligkeiten berichtet, die in Messungen bei tiefen Temperaturen auftreten. Ein Lambwellenpaket nimmt hier stark in seiner Amplitude ab, wenn der Aufbau tiefen Temperaturen ausgesetzt ist. Die genauere Untersuchung des Temperatureinflusses ist wichtig für die Evaluation, ob die Wellenausbreitung ebenso stark thermisch beeinflusst wird, wie beispielsweise durch eine Eisanlagerung. Eine Temperaturüberwachung wäre dann notwendig, um die Einflüsse von Temperatur und Eis auseinanderzuhalten. Die Analyse greift auf die Messreihen zurück, deren Aufnahme im vorherigen Kapitel behandelt wird. Für die Auswertung dienen die Messreihen bei der Umgebungstemperatur von 15,6 °C und im tiefgefrorenen Zustand, bei etwa -18 °C. Die einzelnen Zeitverläufe, die in dem Frequenzintervall von 20 bis 400 kHz aufgenommen sind, werden hinsichtlich ihrer Amplitude und Laufzeit ausgewertet. Abschließend widmet sich die Untersuchung dem Vergleich von den Gleitsinus-Messungen.

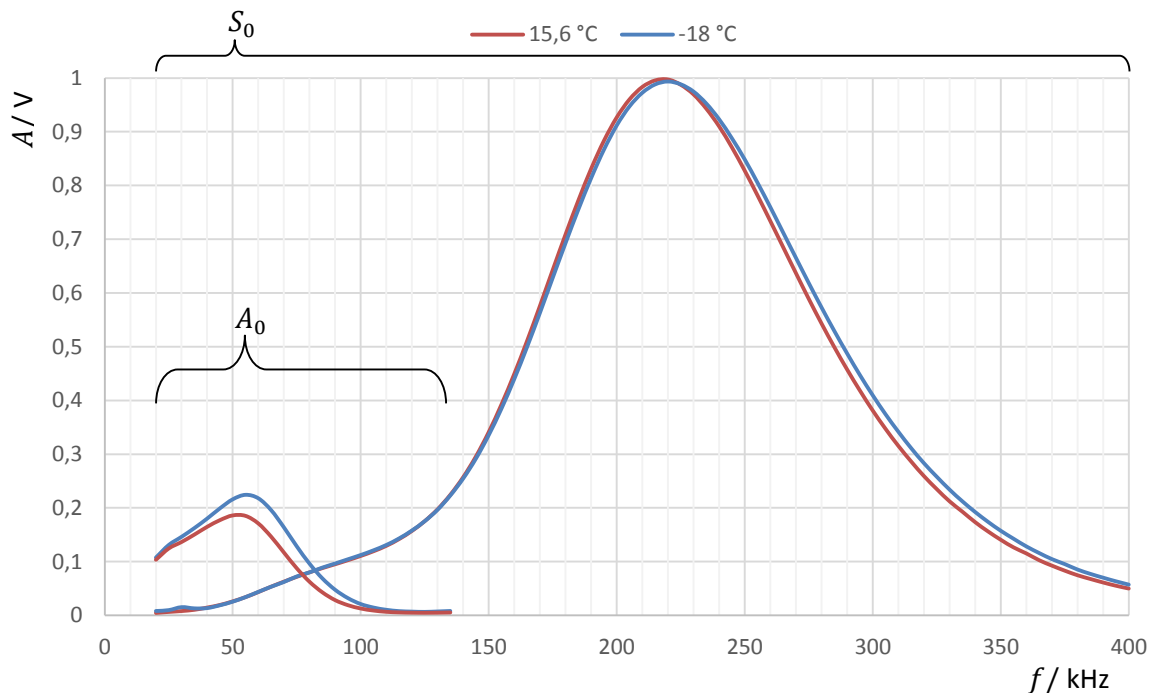


Abbildung 48: Temperaturvergleich der Amplitudengänge für A_0 und S_0 für 15,6 °C und -18 °C.

In der obenstehenden Abbildung sind die Amplitudengänge für die beiden Fundamentalmoden bei 15,6 °C und -18 °C aufgetragen. Offensichtlich reagiert der A_0 -Mode deutlich sensibler auf die Temperaturschwankung. Seine Amplitude steigt bei -18 °C im Vergleich zu 15,6 °C durchschnittlich um 25 %. S_0 wird hingegen sehr viel weniger beeinflusst, die Amplitude steigt im Mittel um 1,5 %. Das Maximum im Kurvenverlauf von A_0 liegt unter der Umgebungstemperatur von 15,6 °C bei 52,5 kHz. Der Hochpunkt wird mit sinkender Temperatur hin zu einer höheren Frequenz von 55,5 kHz verschoben. Die ermittelten Werte sind feiner angegeben als die Frequenzschrittweite von 5 kHz, was mit einer Interpolation zwischen den Punkten gelingt. Dagegen wird das Maximum von S_0 von 218 kHz um 2 kHz zu höheren Frequenzen verschoben. Die Verschiebung der S_0 -Kurven zueinander ist in dem fallenden Kurvenast am größten, das heißt, der Temperatureinfluss auf die S_0 -Amplitude ist

bei höheren Frequenzen stärker. In einem Frequenzbereich von 40 bis 150 kHz Verlaufen die Kurven dagegen deckungsgleich, hier scheint die Temperatur keinen Einfluss zu nehmen. Der allgemeine Trend bei dem Temperatursprung von 15,6 °C auf -18 °C sind steigende Amplituden und eine Verschiebung der Hochpunkte zu höheren Frequenzen. Der Anstieg fällt zwischen den Moden allerdings unterschiedlich stark aus.

Zur Berechnung der Gruppengeschwindigkeit wird die Lauflänge durch die Zeit dividiert, in der die Wellengruppe vom Sender zum Empfänger läuft. Dabei orientiert sich die Gruppengeschwindigkeit an den Maxima der Wellengruppen. Zu diesem Zweck berechnet eine programmierte Routine zunächst mithilfe einer Hilbert-Transformation die Einhüllende des Empfängersignales. Das Sendersignal wird in den Messungen meistens nicht in seinem vollen Ausschlag von 10 Vpp aufgezeichnet. Die Spannungsskala ist in der Regel geringer gewählt, da ansonsten zurück am Sender eintreffende Wellen nicht gut aufgelöst werden. Um das Maximum am Sender zu bestimmen, ist die komplette Signalaufzeichnung auch nicht vonnöten, da das Maximum stets nach genau 2,5 Perioden anliegt. Dagegen genügt es bei dem Empfängersignal im Allgemeinen nicht den Nulldurchgang nach 2,5 Perioden heranzuziehen, da sich die Wellen innerhalb der Gruppe infolge der Dispersion verschieben. Die Laufzeit erstreckt sich von dem Nulldurchgang des Sendersignals nach 2,5 Perioden bis zu dem Maximum der Hüllkurve am Empfänger. Das Prinzip ist in der nachstehenden Abbildung beispielhaft verdeutlicht. Dargestellt sind das Zeitsignal der symmetrischen Anregung (140 kHz), das Empfängersignal und seine Hüllkurve. Das Maximum der Hüllkurve und der Nulldurchgang zwischen denen die Laufzeit bestimmt wird, sind mit einem Kreuz gekennzeichnet.



Abbildung 49 :Prinzip der Laufzeitbestimmung.

Die Anwendung dieser Methode erfolgt ebenfalls automatisiert und ermöglicht so die einfache Analyse über die gesamte Frequenzbandbreite. Die ermittelten Laufzeiten werden über das Weg-Zeit-Gesetz direkt in die Gruppengeschwindigkeit umgerechnet und sind in Abbildung 50 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Gruppengeschwindigkeit bei 15,6 °C, sowie

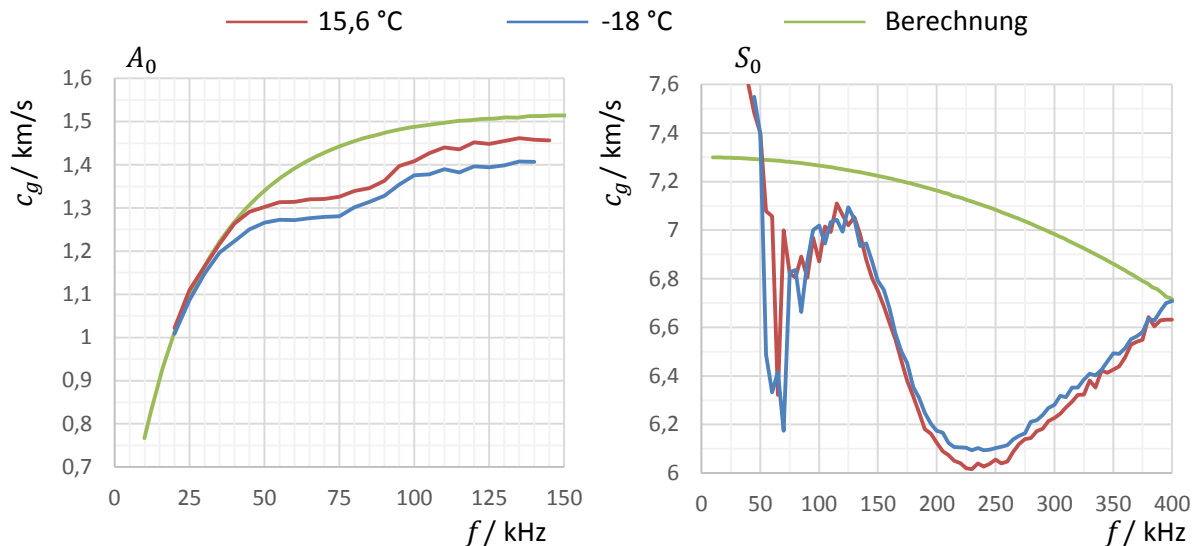


Abbildung 50: Gemessene Gruppengeschwindigkeit von A_0 (links) und S_0 (rechts) unter Temperatureinfluss und im Vergleich mit berechneten Lösungen.

bei -18 °C und vergleicht diese mit der berechneten Gruppengeschwindigkeit aus Kapitel 5, deren Parameter für Raumtemperatur gelten. In der linken Teilabbildung ist A_0 und in der rechten Teilabbildung S_0 gezeigt. Die Gruppengeschwindigkeiten von A_0 verlaufen von 20 kHz bis 30 kHz zunächst nahezu deckungsgleich, hiernach liegt jedoch ein Parallelversatz von etwa 0,05 km/s vor. Der Verlauf bei -18 °C liegt im Schnitt 3 % tiefer gegenüber dem bei Umgebungstemperatur. Dagegen steigt die Gruppengeschwindigkeit von S_0 bei -18 °C im Vergleich zu $15,6\text{ °C}$ an. Allerdings kann der Trend erst ab einer Frequenz von 130 kHz eindeutig identifiziert werden, da sich die Gruppengeschwindigkeit bei geringeren Frequenzen sprunghaft um bis zu 1,4 km/s ändert. In dem Bereich von 130 kHz bis 400 kHz wächst die Gruppengeschwindigkeit im kalten Zustand maximal 12 % und durchschnittlich um 0,8 % an. Die fundamentalen Lambwellenmoden ändern ihre Gruppengeschwindigkeit mit der Temperatur also entgegengesetzt. A_0 nimmt in seiner Geschwindigkeit im Mittel 3 % ab, während S_0 durchschnittlich um 0,8 % zunimmt.

Im Vergleich mit den berechneten Gruppengeschwindigkeiten ergibt sich für den A_0 -Mode bei Raumtemperatur in einem Bereich von 20 kHz bis etwa 45 kHz eine gute Übereinstimmung, anschließend driften die Verläufe auseinander. Die Abweichung ist bei 75 kHz mit 0,12 km/s am größten, die Messung weicht hier maximal 12 % von der Berechnung ab. Die Gruppengeschwindigkeit von S_0 stimmt in ihrem Verlauf nicht mit der stetig fallenden Kurve aus der Berechnung überein. Auffallend sind Fluktuationen von 20 bis 130 kHz in denen die Gruppengeschwindigkeit sprunghaft variiert. Es folgt ein lokales Minimum, bei der die relative Abweichung von der Messung zur Berechnung mit 15 % am größten ist. Ins Auge fällt obendrein, dass die Abweichung von der Messung zu der Berechnung stärker zu sein scheint, wenn in diesem Bereich auch die Amplitude groß ist. So liegt der Tiefpunkt im rechten Abbildungsteil gerade bei der Frequenz, in der S_0 seine maximale Amplitude hat (s. Abb. 48). Der letzte Auswertungsschritt geht auf die Zeitverläufe ein, die bei der Anregung mit dem Gleitsinus aufgezeichnet werden. Abbildung 51 zeigt für die Umgebungstemperatur und den tiefgefrorenen Zustand die Hüllkurven der Zeitsignale. Wie in den Amplitudengängen kann der Ausschlag bei niedrigen Frequenzen dem A_0 -Mode

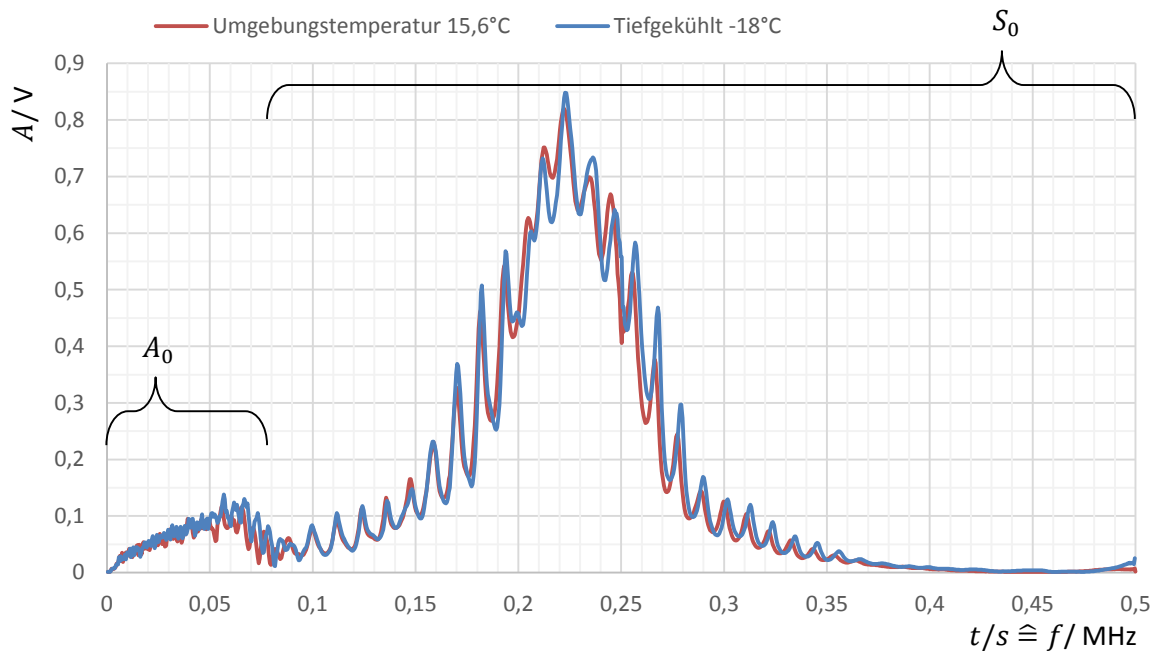


Abbildung 51: Hüllkurven der Antwortsignale unter Anregung mit einem Gleitsinus für die Messtemperaturen von 15,6 °C und -18 °C.

zugeordnet werden, während das Hauptmaximum durch S_0 entsteht. Bei S_0 verlaufen die Kurven qualitativ sehr ähnlich zu den Amplitudengängen aus Abbildung 48. Das heißt, der steigende Kurvenast ist bei beiden Temperaturen anfänglich deckungsgleich. Im fallenden Kurvenast liegt der tiefgekühlte Zustand bei geringfügig größeren Werten und ist zusätzlich leicht in Richtung von höheren Frequenzen verschoben. Auch der Verlauf von A_0 ist mit dem Amplitudengang aus Abbildung 51 vergleichbar. Nach einem linearen Anstieg bis etwa 55 kHz fallen die Kurven rasch ab, solange, bis bei etwa 80 kHz S_0 den Verlauf dominiert. Auch hier zeigt das Antwortsignal bei -18 °C eine höhere Amplitude im Vergleich zu der Messung bei 15,6 °C.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperatur einen messbaren Einfluss auf die Wellen ausübt. Zusammenfassend reagieren die fundamentalen Lambwellenmoden unterschiedlich stark in ihrer Amplitude und sogar verschieden gerichtet in ihrer Gruppengeschwindigkeit. Bei dem Temperatursprung von 15,6 °C auf -18 °C sinkt die Gruppengeschwindigkeit von A_0 im Schnitt 3%, wohingegen S_0 durchschnittlich 0,8 % in seiner Geschwindigkeit zunimmt. Die Amplitude von A_0 steigt um bis zu 25 %. Demgegenüber zeigt sich S_0 kaum temperaturempfindlich, seine Amplitude nimmt um 1,5 % zu. Wegen der großen Temperaturabhängigkeit der A_0 -Amplitude, ist eine Temperaturüberwachung empfehlenswert, um die Auswirkungen von Temperatur und Eisanlagerung auseinanderzuhalten. Eine gesicherte Aussage kann jedoch erst im Vergleich mit den Messungen unter Eis getroffen werden. Die Ergebnisse werden dahingehend in Kapitel 9 diskutiert.

8.2. Eiskontamination

Das Kapitel präsentiert die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit einer wachsenden Eisschicht auf der CFK-Platte. In den Unterpunkten werden separat die Amplitundenabschwächung, die Änderung der Dispersion und die Gleitsinusse thematisiert. Die Analyse nutzt als Referenz die Messreihe ohne akkumuliertes Eis bei -18 °C und vergleicht diese mit den Konfigurationen mit Eis. Der Zustand mit dem gerissenen und teilweise delaminierten Eis wird gesondert in dem letzten Unterpunkt abgehandelt. Eine Bewertung der Ergebnisse dahingehend, wie Eis die Wellenausbreitung beeinflusst und auf welche Weise die Eiserkennung am sinnvollsten ist, erfolgt in der Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 9.

8.2.1. Amplitudenabschwächung

Abbildung 52 zeigt oben den Amplitudengang von S_0 für die verschiedenen Eisdicken. Bereits eine flüchtige Inaugenscheinnahme der Kurvenschar verrät, dass die einzelnen Graphen sehr ähnlich verlaufen. Folglich reagiert die S_0 -Amplitude unempfindlich auf das Eis. Quantitativ

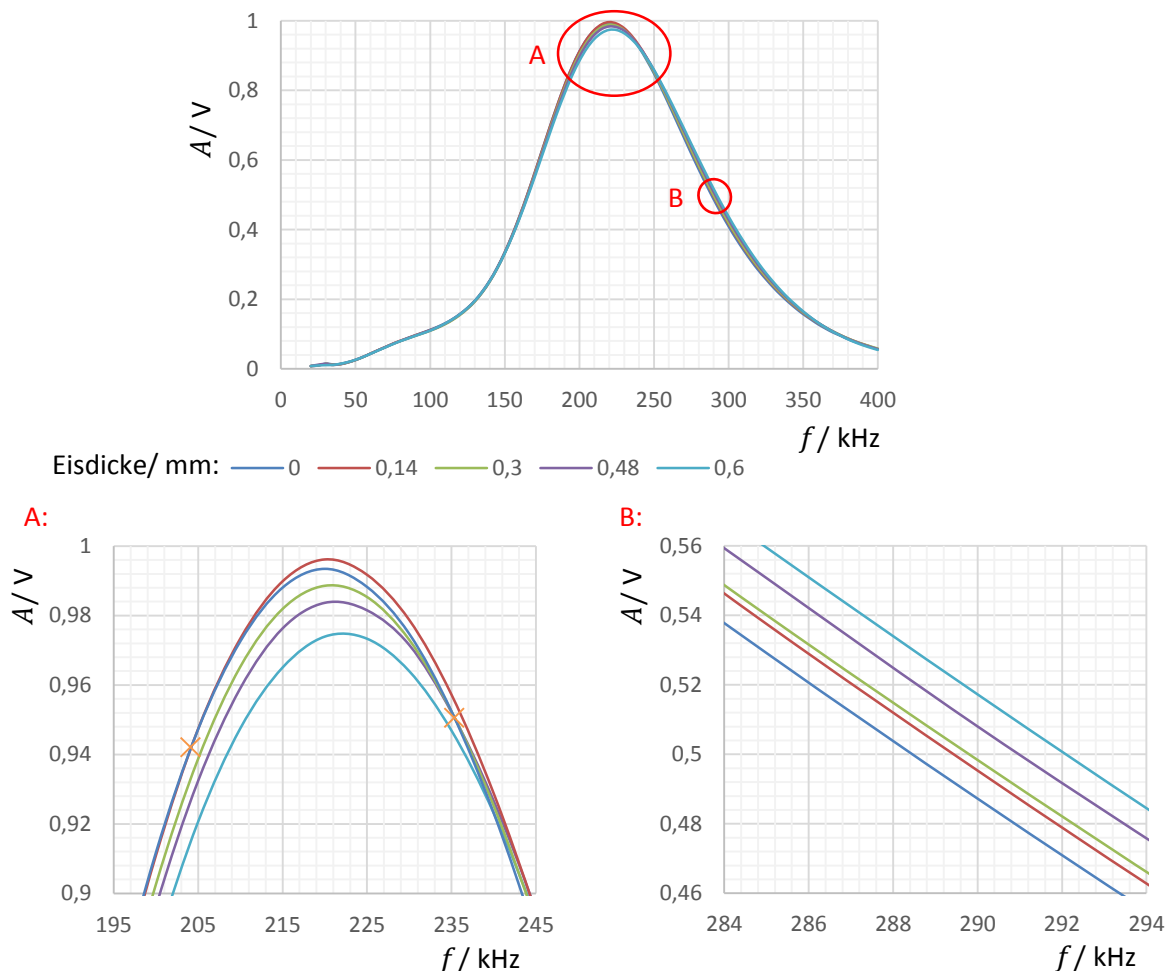


Abbildung 52: Amplitudengang von S_0 unter Einfluss einer wachsenden Eisschicht.

variiert die Amplitude von der Referenz ohne Eis zu dem Zustand mit einer 6 mm dicken Eisschicht um durchschnittlich 3 %. Um die einzelnen Kurven besser zu unterscheiden, vergrößern die Abbildungsteile A und B aussagekräftige Ausschnitte aus den Verläufen. In A wird der Bereich um das Maximum genauer gezeigt. Hier ist zu erkennen, dass die

Hochpunkte der Kurven nicht streng nach der Eisdicke gestaffelt sind. Denn die maximale Amplitude steigt bei einer anfänglichen Eisdicke von 0,14 mm zuerst an, bevor sie mit den höheren Dicken von 0,3 mm bis 0,6 mm stetig abnimmt. Weiterhin sind die einzelnen Kurven zueinander verschoben, so dass sie Schnittpunkte untereinander ausbilden. Zwei dieser Schnittpunkte sind in Teilabbildung A durch ein Kreuz markiert. In dem steigenden Kurvenast vor den Hochpunkten (< 200 kHz) verlaufen die Kurven annähernd parallel und sind sequentiell nach der Eisdicke angeordnet. In diesem Bereich sinkt die Amplitude zwischen den Kurven mit der Eisdicke. Allerdings bewegen sich die Differenzen zwischen den Kurven im niedrigen Millivolt-Bereich. Die Sensitivität gegenüber dem Eis ist also sehr gering und der Abschnitt unter 200 kHz wird deshalb nicht näher analysiert. Es folgt der Bereich um die Maxima, wo sich die Kurven an unterschiedlichen Punkten schneiden. Das heißt, zwischen den Punkten ist die Staffelung nach der Eisdicke aufgelöst. Hinter den Schnittpunkten sind die einzelnen Kurven wieder nach der Dicke angeordnet, nur diesmal in umgekehrter Reihenfolge. Die Teilabbildung B zeigt einen Ausschnitt aus dem fallenden Kurvenast, in dem die Amplitude mit der Eisschicht kontinuierlich anwächst. Das Verhalten liegt in einem weiten Bereich von 260 kHz bis 360 kHz vor. Für die beispielhafte Frequenz von 290 kHz sind in Abbildung 53 die Amplituden gegen die Eisdicke aufgetragen. Der Zusammenhang ist nahezu linear. Bei 0,6 mm wird im Vergleich zu dem eislosen Zustand eine Amplitudenzunahme von 30 mV gemessen. Die 30 mV repräsentieren zusätzlich die maximale Spannungsdifferenz, die durch das Eis innerhalb der gesamten Kurvenschar hervorgerufen wird.

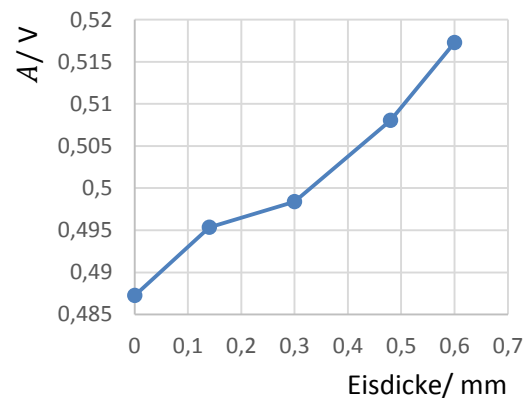


Abbildung 53: S_0 -Amplitude über der Eisdicke für eine Anregungsfrequenz von 290 kHz.

Abbildung 54 stellt den Amplitudengang von A_0 über der Anregungsfrequenz dar. Von 20 kHz bis 50 kHz zeigen die Kurven einen linearen Anstieg, sie verlaufen parallel mit einem

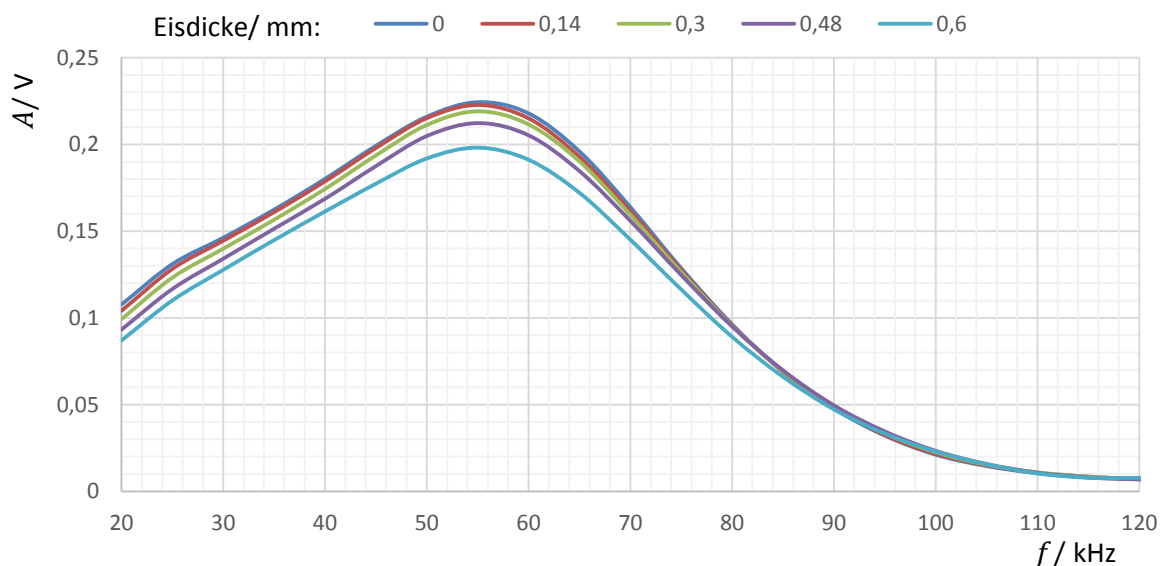


Abbildung 54: Amplitudengang von A_0 unter Einfluss einer wachsenden Klareisschicht.

Versatz zueinander. Die Kurven staffeln sich mit der Eisdicke hin zu niedrigeren Amplituden. Der Versatz zwischen den Kurve von 0 mm und 0,6 mm beträgt rund 20 mV. Es folgt das Maximum der Kurven, das im Gegensatz zu S_0 bei allen Dicken ortsfest bei der Frequenz von etwa 55 kHz auftritt. Bei 55 kHz ist auch die Änderung in der Amplitude am größten. An dieser Stelle nimmt die Amplitude von 0 mm hin zu 0,6 mm um 26 mV ab. Danach fallen die Kurven und nähern sich gegenseitig an, bis sie ab 90 kHz nahezu deckungsgleich sind. In dem Graphen aus Abbildung 55 sind für die exemplarische Anregungsfrequenz von 40 kHz die Amplituden über die verschiedenen Eisdicken aufgetragen. Im Gegensatz zu S_0 , wo die Amplituden in dem fallenden Kurvenast nahezu linear mit dem Eis ansteigt, zeigt der Graph für A_0 einen progressiven Abfall. Das Verhalten ist auf den Frequenzbereich von 20 kHz bis 50 kHz übertragbar, da die Kurven hier weitestgehend parallel liegen. Zusammenfassend kann man festhalten, dass die fundamentalen Lambwellenmoden A_0 und S_0 betragsmäßig mit 26 mV und 30 mV etwa gleichermaßen stark durch die maximal 0,6 mm dicke Eisschicht beeinflusst werden. Der Hauptunterschied liegt in der Abschwächung von A_0 über seinen gesamten Frequenzbereich, wohingegen S_0 nur bereichsweise abgeschwächt wird und im Durchschnitt sogar in seiner Amplitude zunimmt. Ansonsten konnten über den dargestellten Frequenzbereich hinaus keine höheren Moden identifiziert werden.

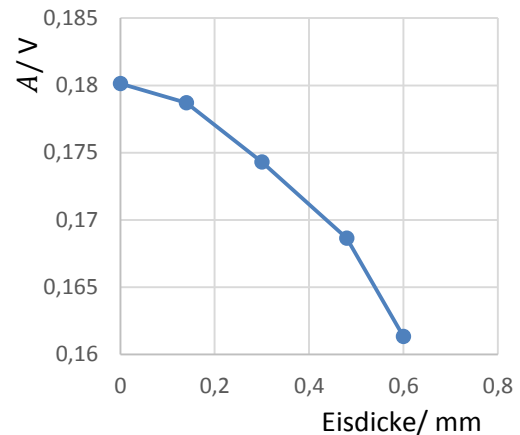


Abbildung 55: A_0 -Amplitude über der Eisdicke für eine Anregungsfrequenz von 40 kHz.

8.2.2. Dispersionsänderung

Die einzelnen, bei verschiedenen Eisdicken aufgenommenen Messreihen werden hinsichtlich der Gruppengeschwindigkeit von A_0 und S_0 untersucht. Die Analyse nutzt die in Kapitel 8.1. gezeigte Methode, die in eine Routine implementiert ist und die Laufzeit bestimmt. Nacheinander werden die Zeitverläufe von A_0 und S_0 untersucht und jeweils mit den im Vorfeld berechneten Ergebnissen verglichen. Abbildung 56 zeigt im oberen Teil pro Eisdicke jeweils eine A_0 -Gruppengeschwindigkeit über der Anregungsfrequenz. Der Übersichtlichkeit halber wird davon abgesehen, die Messdaten und die berechneten Kurven in einem Diagramm darzustellen. Auf der linken Seite sind die Gruppengeschwindigkeiten aus den Messungen aufgetragen und auf der rechten Seite befinden sich die berechneten Kurven aus Kapitel 5. Die aus den Messungen gewonnene Dispersionslinie für 0,6 mm Eis wird nur bis 120 kHz dargestellt. Die Ursache sind Unregelmäßigkeiten, die ab einer Frequenz von 120 kHz durch eine fehlerhafte Auswertung des Algorithmus entstehen. Die gemessenen Gruppengeschwindigkeiten liegen bis etwa 40 kHz sehr dicht beieinander, laufen jedoch mit zunehmender Frequenz auseinander und sind in einem Geschwindigkeitsintervall von etwa 0,05 km/s verteilt. Die 0,05 km/s entsprechen einer Änderung, die kleiner als 4 % ist. Der A_0 -Mode reagiert unempfindlich in seiner Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Kurven treten immer in derselben Reihenfolge auf. Von 0 mm bis 0,3 mm sinkt die Geschwindigkeit und

steigt bei den nächsten Eisdicken von 0,48 mm und 0,6 mm wieder an. Der Sachverhalt ist in der Teilabbildung unten links dargestellt, in der die Gruppengeschwindigkeit über der Eisdicke aufgetragen ist. Bei einer festen Anregungsfrequenz von beispielsweise 60, 80 oder 100 kHz sinkt die Gruppengeschwindigkeit zunächst mit der Eisdicke und steigt anschließend wieder an. In der rechten Spalte von Abbildung 56 sind dieselben Graphen für die numerisch

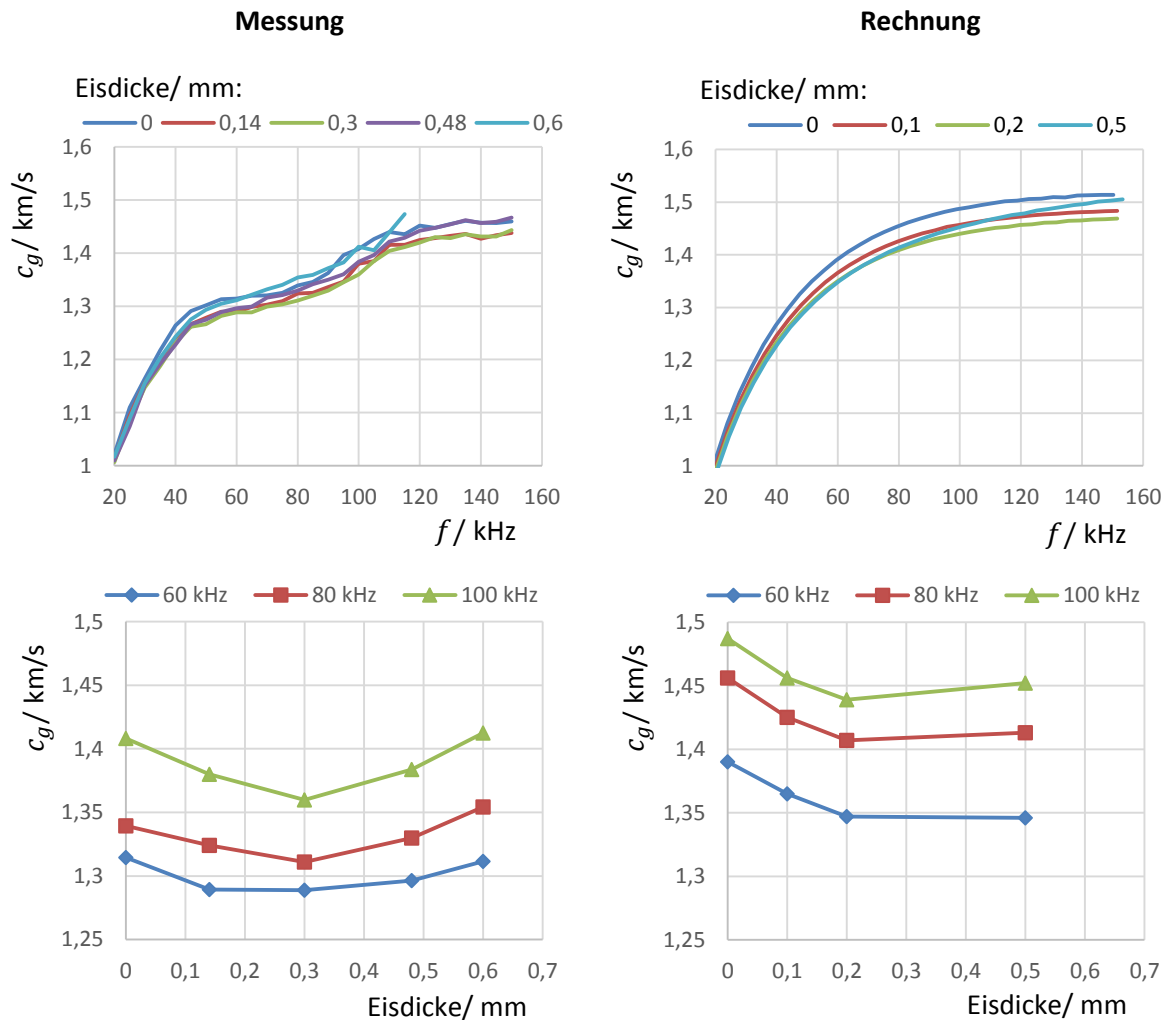


Abbildung 56: Gruppengeschwindigkeit von A_0 . Links: Messung. Rechts: Berechnung. Oben: Gruppengeschwindigkeit über der Anregungsfrequenz für verschiedene Eisdicken. Unten: Gruppengeschwindigkeit über der Eisdicke für verschiedene Frequenzen.

berechneten Werte aufgetragen. Die Anwendung derselben Skalierung ermöglicht den Vergleich zwischen der Messung und den errechneten Werten. Auf den ersten Blick verlaufen die Graphen von Messung und Berechnung gleichartig. Die Gruppengeschwindigkeiten sind in einem Intervall 20 kHz bis 45 kHz deckungsgleich und auch das Auffächern der Kurvenschar hat dieselbe Breite von maximal 0,05 km/s. Der Verlauf der Gruppengeschwindigkeiten unterscheidet sich jedoch leicht ab 45 kHz. Die Messung knickt an dieser Stelle geringfügig ab und verläuft unterhalb des berechneten Verlaufes. Die Abweichung zu der Rechnung beträgt hier maximal 15 %. Innerhalb der Schar sind die Kurven qualitativ ebenso vergleichbar angeordnet. Mit einer wachsenden Eisschicht nimmt die Gruppengeschwindigkeit ab, erreicht einen Tiefpunkt (s. Abb. 56 unten) und steigt daraufhin wieder an. In der Berechnung ist der Anstieg in der Gruppengeschwindigkeit

jedoch deutlich schwächer im Vergleich zur Messung. Nichtsdestotrotz zeigt die Messung eine hinlängliche Übereinstimmung zu den berechneten Kurven mit einer maximalen Abweichung von $< 15\%$.

Abbildung 57 zeigt für jede Eisdicke eine Kurve der Gruppengeschwindigkeit des symmetrischen Lambwellenmodes. Neben den fünf Dispersionslinien, die aus den Messdaten der verschiedenen Vereisungszustände gewonnenen werden, sind die im Vorfeld berechnete Gruppengeschwindigkeit von S_0 aufgetragen. Die gemessenen Kurven sind

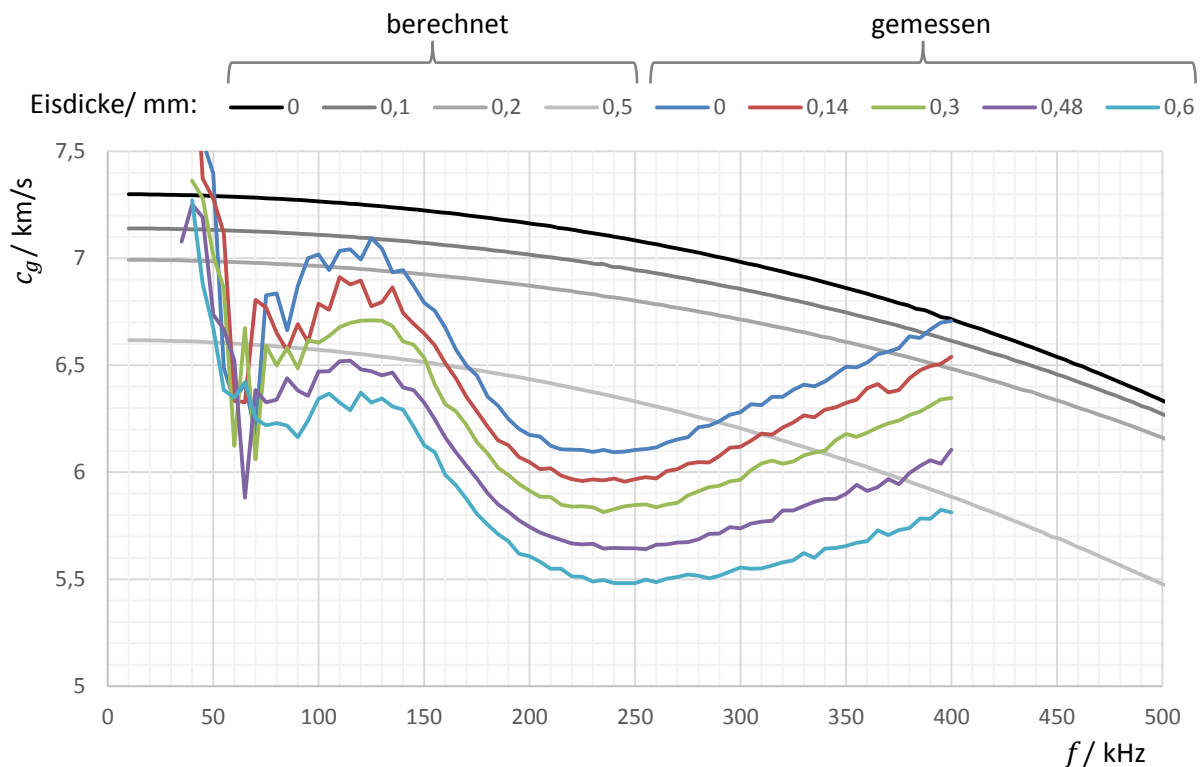


Abbildung 57: Gemessene Gruppengeschwindigkeit von S_0 unter einer Klareisanlagerung im Vergleich mit den berechneten Gruppengeschwindigkeiten.

annähernd parallel zueinander versetzt und nehmen mit der Eisschicht in ihrer Gruppengeschwindigkeit ab. Die Wellen reagieren auf die 0,6 mm starke Eisschicht mit einer Geschwindigkeitsreduktion von knapp 1 km/s. Das entspricht einer Änderung von bis zu 15 % und zeugt von einer empfindlichen Reaktion. Allen gemessenen Kurven ist eine Unstetigkeitsstelle im Anfangsbereich gemeinsam, in der die Werte stark fluktuieren. Der Kurvenverlauf von der Messung, mit ihren lokalen Minima, stimmt nur mäßig mit den stetig fallenden Verläufen aus der Berechnung überein. Trotz des unterschiedlichen Verlaufes, mit deutlichen Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Dispersionslinien, scheint sich innerhalb der Kurvenscharen die Gruppengeschwindigkeit gleichermaßen stark mit der Eisdicke zu ändern. Für einen zahlenmäßigen Vergleich stellt Abbildung 58 die Differenzen in der Gruppengeschwindigkeit über der Eisdicke dar. Der Graph beruht auf den Daten aus Abbildung 57. Für eine spezifische Frequenz ergeben sich hier Schnittpunkte mit den Kurven der jeweiligen Eisdicke. Die Geschwindigkeitsänderung zwischen den Punkten zu dem eislosen Zustand kann als Kurve über der Eisdicke aufgetragen werden, die für eine spezifische Frequenz gilt. Auf diese Weise entspringen alle Kurven dem Nullpunkt und die

Änderungen innerhalb der berechneten und gemessenen Scharen können miteinander verglichen werden. Das Diagramm enthält Kurven für Frequenzen von 50 bis 400 kHz. Die

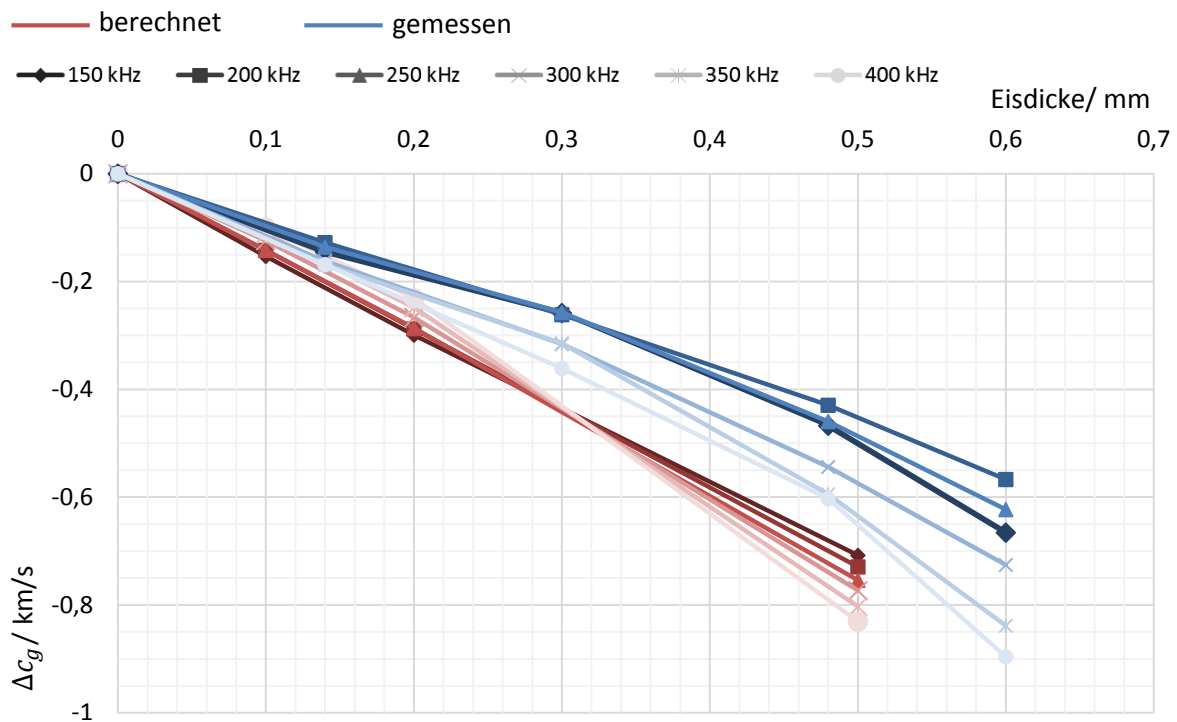


Abbildung 58: Änderung der Gruppengeschwindigkeit in Bezug zu dem eislosen Zustand über der Eisdicke. Vergleich zwischen Messung und Rechnung bei verschiedenen Anregungsfrequenzen.

Abbildung belegt den Eindruck mit Werten, dass sowohl die berechneten, als auch die gemessenen Gruppengeschwindigkeiten monoton fallen. Wie bereits im Kapitel 5 gezeigt fallen die Kurven aus der Berechnung bei niedrigen Frequenzen linear ab und zeigen für höhere Frequenzen eine leichte Rechtskrümmung. Die Streuung zwischen den Kurven ist gering, sie divergieren um maximal 0,12 km/s. Die mittlere als linear angenäherte Steigung beträgt -1,5 km/s pro mm Eis und schwankt innerhalb des betrachteten Frequenzbereiches mit einer Standardabweichung von 3%. Die gemessenen Kurven fallen weniger steil ab und sind mit bis zu 0,33 km/s weiter gestreut. Der Verlauf stimmt qualitativ durchaus mit der Berechnung überein, denn die Rechtskrümmung nimmt genauso bei höheren Frequenzen zu. Quantitativ betrachtet beträgt die mittlere lineare Steigung -1,13 km/s pro mm Eis und ist einer Standardabweichung von 16 % unterworfen.

Zusammenfassend variiert die Gruppengeschwindigkeit der fundamentalen Lambwellenmoden in unterschiedlicher Weise, wenn sich eine Eisschicht auf der Struktur bildet. Innerhalb des A_0 -Modes sind die Variationen in der Gruppengeschwindigkeit ungerichtet. Mit der Eisdicke nimmt die Geschwindigkeit erst ab und danach, für höhere Eisdicken wieder zu. Im Gegensatz dazu herrscht innerhalb des S_0 -Modes eine einseitig gerichtete Geschwindigkeitsänderung vor. Die Gruppengeschwindigkeit sinkt stetig mit der Eisdicke. Der größte Kontrast zwischen den Moden liegt darin, wie stark sich die Gruppengeschwindigkeit bei der maximalen Eisdicke ändert. Während S_0 um bis zu 1 km/s abnimmt, schwankt A_0 lediglich 0,05 km/s. Die gemessenen A_0 -Kurven sind hinsichtlich ihres äußeren Verlaufes, als auch der Anordnung untereinander gut mit den

Berechnungsergebnissen vergleichbar. Die gemessenen Dispersionslinien von S_0 stimmen in der Kurvenanordnung untereinander ebenfalls gut mit der Berechnung überein. Einzig der äußere Verlauf der S_0 -Kurven deckt sich qualitativ weniger gut mit den Berechnungen, wenngleich die maximale Abweichung zur Berechnung bei beiden Moden gleich groß ist und 15 % beträgt.

8.2.3. Gleitsinus

Nachstehend ist die Auswertung der Gleitsinus-Daten für die unterschiedlichen Eisdicken dokumentiert. Abbildung 59 zeigt im oberen Teil die einseitigen Hüllkurven der aufgenommenen Zeitsignale. Die Kurven folgen der bereits bekannten Anordnung mit einem geringen Ausschlag bei niedrigen Frequenzen, der dem A_0 -Mode zuzuschreiben ist und dem Hauptmaximum, der bei etwa 225 ms beziehungsweise 225 kHz auftritt und durch S_0 gebildet wird. Alle Zeitsignale, auch die unter der Eisschicht gewonnenen, entsprechen

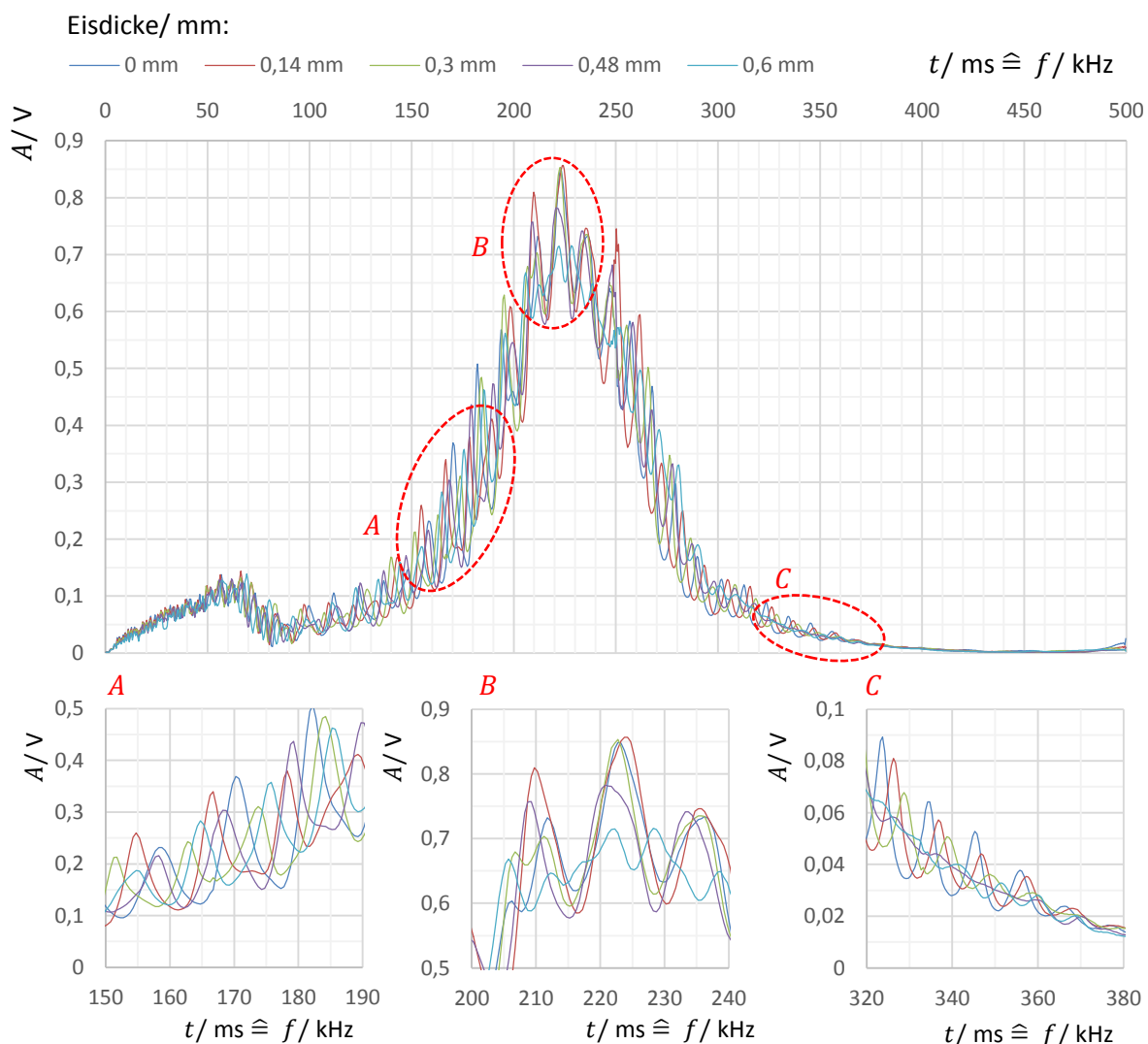


Abbildung 59: Zeitsignal nach Gleitsinus-Anregung unter einer Klareisschicht zunehmender Dicke.

dieser Grundkonstellation. In der vollständigen Darstellung kann zwischen den einzelnen Zeitsignalen nicht differenziert werden. Die Kurven scheinen ohne eine offensichtliche Systematik vorzuliegen und erinnern an ein Rauschen. Für eine nähere Begutachtung

vergrößern die Teilabbildungen A, B und C Ausschnitte aus dem oberen Graphen. Der Ausschnitt A hat einen repräsentativen Charakter und stellt exemplarisch einen Teil aus dem steigenden Ast der Verläufe dar. Die einzelnen lokalen Maxima und Minima sind von einer Kurve zu der nächsten stark verschoben und eine Zuordnung, ob und wohin sich ein Maximum mit der Eisdicke verschiebt ist nicht möglich. Zwischen den einzelnen Kurven sind die Abstufungen in der Amplitude und die Reihenfolge, in denen die Maxima nacheinander auftreten, scheinbar regellos. Die Teilabbildung B zeigt einerseits den maximalen Peak bei 225 kHz und andererseits das rechts-, sowie linksseitige Nebenmaximum bei etwa 210 kHz und 235 kHz. Dem globalen Maximum der Signale gilt besonderes Interesse, da es in der vorangegangenen Arbeit [49] als sensitiv gegenüber Eis beschrieben wird. Das Hauptmaximum, das vergrößert in Teilabbildung B dargestellt ist, als auch die beiden Nebenmaxima werden gesondert hinsichtlich ihrer Amplitude ausgewertet. Die Graphen in Abbildung 60 tragen die maximale Amplitude in dem jeweiligen Maximum über der Eisdicke

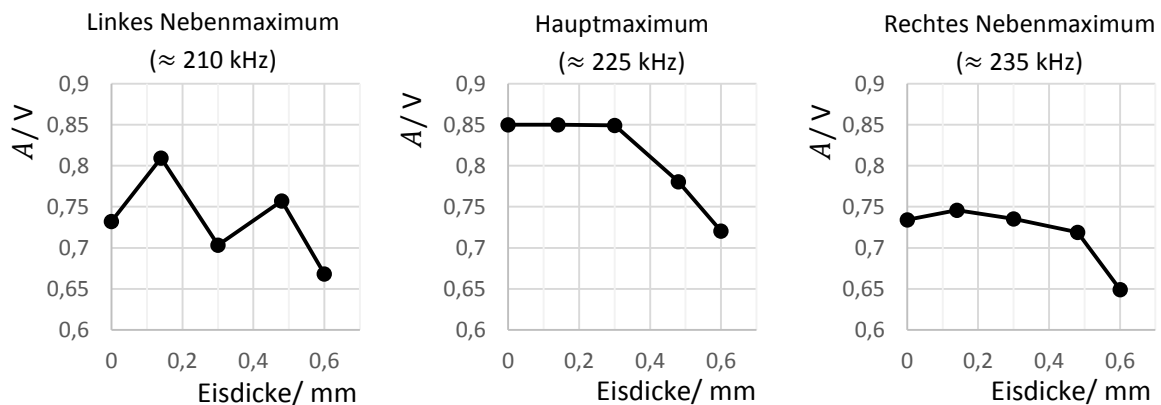


Abbildung 60: Amplitude des Hauptmaximums, sowie des linken und rechten Nebenmaximums über der Eisdicke.

auf. Das Hauptmaximum bleibt zunächst konstant auf 0,85 V, bis die Amplitude nach 0,3 mm nahezu linear abfällt. Dagegen schwankt die Amplitude im linken Nebenmaximum zwischen den einzelnen Messwerten deutlich hin und her. Das rechte Nebenmaximum verzeichnet bei der anfänglichen Dicke von 0,14 mm erst einen leichten Anstieg, fällt bis 0,48 mm langsam und danach schneller ab. Die Amplitudenänderung innerhalb der einzelnen Hochpunkte ist also deutlich verschieden voneinander. Eine weitere Auffälligkeit ist in dem Zeitsignal aus Abbildung 59 B zu sehen. Die Linie von 0,6 mm bildet in dichteren Abständen Hochpunkte, die den Eindruck vermitteln, als wäre der ursprüngliche Wellenberg, wie er bei niedrigeren Eisdicken zu sehen ist, durch eine destruktive Überlagerung zweigeteilt. Dieses Phänomen beeinflusst die ausgewertete Amplitude ebenso und trägt wahrscheinlich zu den voneinander abweichenden Verläufen in Abbildung 60 bei. Trotzdem kann in den Zeitsignalen auch eine klare Systematik identifiziert werden. Der Ausschnitt C aus Abbildung 59 vergrößert einen Teil des fallenden Kurvenastes zwischen 320 kHz und 380 kHz. Die einzelnen Maxima sind von einer Eisdicke zur anderen weniger stark verschoben und geben einen Trend zu erkennen. Die Maxima von 0 mm bis 0,3 mm nehmen mit der Eisdicke in ihrer Amplitude ab und werden stetig zu höheren Frequenzen hin verschoben. Die Amplitudenänderung beträgt maximal 20 mV. Bei den höheren Eisdicken von 0,48 mm und 0,6 mm sind die Amplituden der lokalen Maxima soweit reduziert, dass der Trend nicht

weiter festgestellt werden kann. Der letzte Auswertungsschritt orientiert sich wiederum an der vorangegangenen Arbeit [49], die den Mittelwert aus dem gesamten Zeitsignal bildet. Für die Signale aus Abbildung 59 liegt der Mittelwert aller Eisdicken durchschnittlich bei 92,6 mV und hat eine Standardabweichung von weniger als 0,3 %. Der Mittelwert ist äußerst konstant und zeigt keine signifikante Sensitivität gegenüber der Eisschicht.

Der Abschnitt analysiert die Empfängersignale, die nach der Anregung mit einem Gleitsinus bei verschiedenen dicken Eisschichten von 0 mm bis 0,6 mm erhoben werden. Zwischen den einzelnen Empfängersignalen liegt keine offensichtliche Ordnung vor. Die Kurven bilden viele lokale Maxima, die unterschiedlich auf das Eis reagieren. Innerhalb der Eisdicken gelingt es nicht ein deutliches Verhaltensmuster der Signale abzuleiten. Weder das Maximum noch der Mittelwert aus der einseitigen Hüllkurve lassen einen klaren Rückschluss auf die Eisschicht zu. Zwar sinkt das Hauptmaximum ab einer Eisdicke von 0,3 mm ab, es ist jedoch gewagt dies als Trend zu prognostizieren, da sich die angrenzenden Nebenmaxima im Vergleich dazu unsystematisch verhalten.

8.2.4. Bruch und Delamination

Der nächste Abschnitt präsentiert die Ergebnisse zu den zwei Konfigurationen, in denen eine etwa 1 mm starke Eisschicht erstens gebrochen ist und zweitens zusätzlich Delaminationen zeigt (vgl. Abb. 47). Die Analyse geht erneut auf die Amplitudengänge, die Dispersionsänderung und abschließend auf den Gleitsinus ein. Eine Herausforderung in der Auswertung stellen die geänderten Parameter dar. In den bisherigen Messungen wurde zwischen den Messungen stets nur ein Parameter geändert, wie beispielsweise die Temperatur oder die Eisdicke. Bei der gebrochenen Eisschicht ist nicht nur die Struktur des Eises geändert sondern als zweiter Parameter wächst die Schichtdicke von 0,6 mm auf nunmehr 1 mm an. Für eine isolierte Auswertung, welchen Einfluss alleine die Risse auf die Amplitude oder die Gruppengeschwindigkeit haben, fehlt demzufolge eine Referenz von derselben fehlerfreien und 1 mm dicken Eisschicht. Im Sinne einer Differenzmessung würde der konstante Parameter der Eisdicke zwischen den Messungen herausfallen. Ohne diese Referenz ist es nicht möglich eindeutig zu unterscheiden, wie stark einerseits die Risse und andererseits die Eisdicke die Amplitude oder die Dispersionseigenschaften beeinflussen. Der erste Auswertungsschritt konzentriert sich auf die Amplitudengänge. Die beiden Einflüsse von der Dicke und den Rissen können hier näherungsweise auseinandergehalten werden. Dazu dient das aus den vorangegangenen Versuchen gewonnene Wissen, wie sich die Amplitude mit einer zunehmenden Eisschicht verhält. Im Falle von A_0 sinkt die Amplitude beispielsweise leicht progressiv mit der Eisdicke (vgl. Abb. 55). Die Amplitudengänge ohne Eis und mit der 0,6 mm dicken Eisschicht werden in die Darstellung der Amplitudengänge einbezogen und vermitteln einen qualitativen Eindruck, wo die Linie einer 1 mm dicken und fehlerfreien Klareisschicht lokalisiert sein könnte. Quantitativ kann zwischen den Kurven in guter Näherung extrapoliert werden. Auf diese Weise wird die notwendige Referenz rekonstruiert. Abbildung 61 zeigt die Amplitudengänge von verschiedenen Messreihen, die nach A_0 und S_0 getrennt sind. Der Graph beinhaltet sowohl die Amplitudengänge für die gebrochene

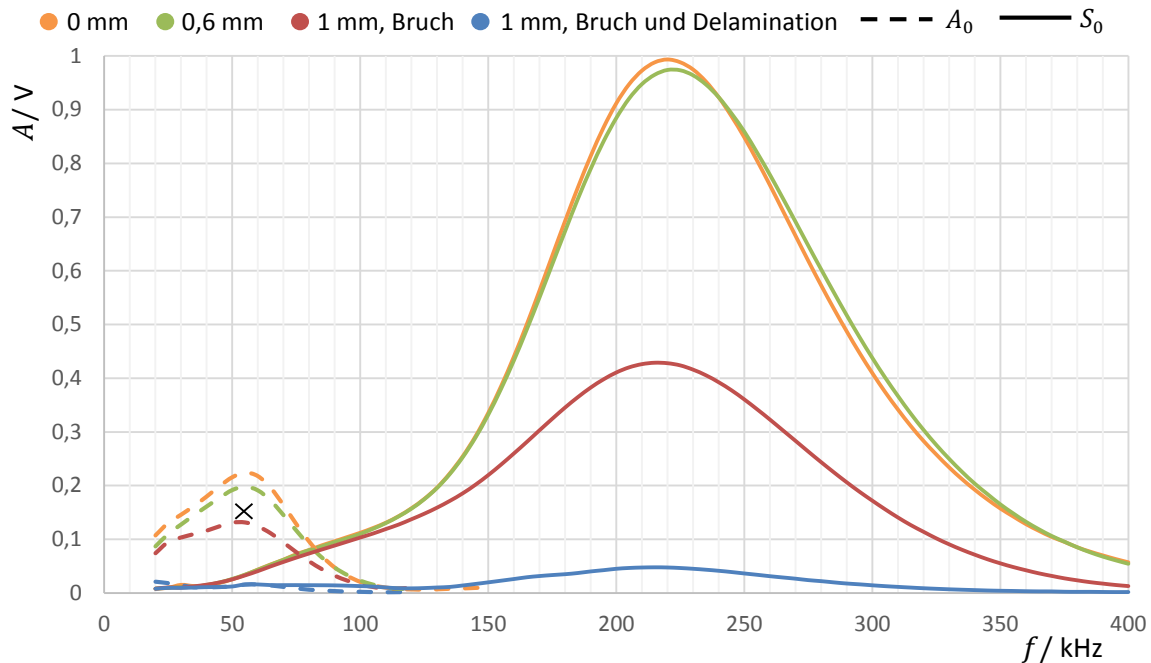


Abbildung 61: Amplitudengänge der fundamentalen Lambwellenmoden. Vergleich von den Zuständen ohne Eis, 0,6 mm Eis, 1 mm Eis mit Rissen und 1 mm Eis mit Rissen und Delaminationen.

Eisschicht, als auch für die gebrochene und delaminierte Eisschicht und stellt darüber hinaus die bereits bekannten Kurven ohne Eis (0 mm) und mit 0,6 mm Eis dar. Eine erste qualitative Begutachtung der Verläufe zeigt, dass die Amplitude bei der gebrochenen Schicht deutlich unterhalb der Kurven von 0 mm und 0,6 mm liegt. Mit einer Delamination folgt ein weiteres Absinken. Der Amplitudengang von A_0 erreicht sein Maximum unter der gebrochenen Eisschicht nach wie vor bei 55 kHz. Die Amplitude beträgt hier etwa 130 mV und ist gegenüber dem eislosen Zustand um 41 % herabgesetzt. Das Ziel besteht darin für diesen Punkt zu differenzieren, mit welchem Anteil die Eisdicke und mit welchem Anteil die Risse zu der Reduktion von 41 % beitragen. Dazu dient die Extrapolation mit einer quadratischen Funktion, die auch die geringeren und hier nicht dargestellten Eisdicken einbezieht. Mit der Extrapolation wird über den gesicherten Bereich von 0 bis 0,6 mm hinaus die Amplitude für einen Punkt von 1 mm bestimmt. Dieser rekonstruierte Punkt bildet die Referenz mit der das gebrochene Eis verglichen werden kann. An dieser Stelle wird jedoch nicht auf das genaue Vorgehen der Extrapolation eingegangen. Eine ausführliche Erklärung ist dem Anhang E beigelegt. Das Resultat ist der mit einem Kreuz markierte Punkt in Abbildung 61. An diesem Punkt von 146 mV ist die Amplitude unter einer fehlerfreien und 1 mm starken Klareisschicht zu erwarten. Das Maximum aus dem A_0 -Amplitudengang für das gebrochene Eis liegt 6 % niedriger als der eingezeichnete Punkt. Der eingezeichnete Punkt ist wiederum im Vergleich zu dem eislosen Zustand um 35 % reduziert. Die gesamte Amplitudenabschwächung von 41 % teilt sich also zu 35% und 6% auf. Die Eisdicke von 1 mm bewirkt eine Abschwächung von 35 % und den Rissen in der Eisschicht ist die übrige Abschwächung von 6 % zuzuordnen. Auch wenn das Ergebnis nicht gesichert ist, sind die Paritäten klar verteilt und die Risse reduzieren die Amplitude längst nicht so stark wie die 1 mm dicke Klareisschicht an sich. Treten zusätzlich Delaminationen in der Eisschicht auf, so sinkt die Amplitude weiter ab. Die Amplitude liegt konsequent unterhalb von 10 mV. Der Amplitudengang von S_0 erreicht unter

dem gebrochenen Eis ein Maximum von 0,43 V und ist in Relation zu dem eislosen Zustand um 57 % abgeschwächt. Im Vergleich zu den 57 % wird die maximale Amplitude bei 0,6 mm gerade einmal um 2% reduziert. Der Kontrast in der Abschwächung ist bereits rein visuell deutlich stärker als bei A_0 , da die Kurven weiter auseinander liegen. Das heißt der Einfluss von den Rissen auf die Amplitude ist bei dem S_0 -Lambwellenmode höher gewichtet. Die S_0 -Amplitude wird in erster Linie durch die Risse gesenkt, während die höhere Eisdicke zweitrangig ist. Auch bei S_0 bricht die Amplitude mit der delaminierten Schicht weiter ein und wird durchschnittlich um 78 % gemindert.

Die Amplitudengänge reagieren innerhalb der beiden Fundamentalmoden unterschiedlich auf Brüche in der Eisschicht. Der A_0 -Mode nimmt in einer Größenordnung von $< 10\%$ in seiner Amplitude ab, während S_0 mit einer deutlich Reduktion von $> 50\%$ reagiert. Hinsichtlich der Delaminationen verhalten sich A_0 und S_0 sehr ähnlich, ihre Amplitude wird drastisch reduziert.

Die nachfolgende Analyse widmet sich den Gruppengeschwindigkeiten. Abbildung 62 zeigt auf der linken Seite die Gruppengeschwindigkeit von A_0 . Neben den bekannten Verläufen von 0 mm und 0,6 mm, zeigt der Graph die Kurve von der 1 mm dicken und gebrochenen

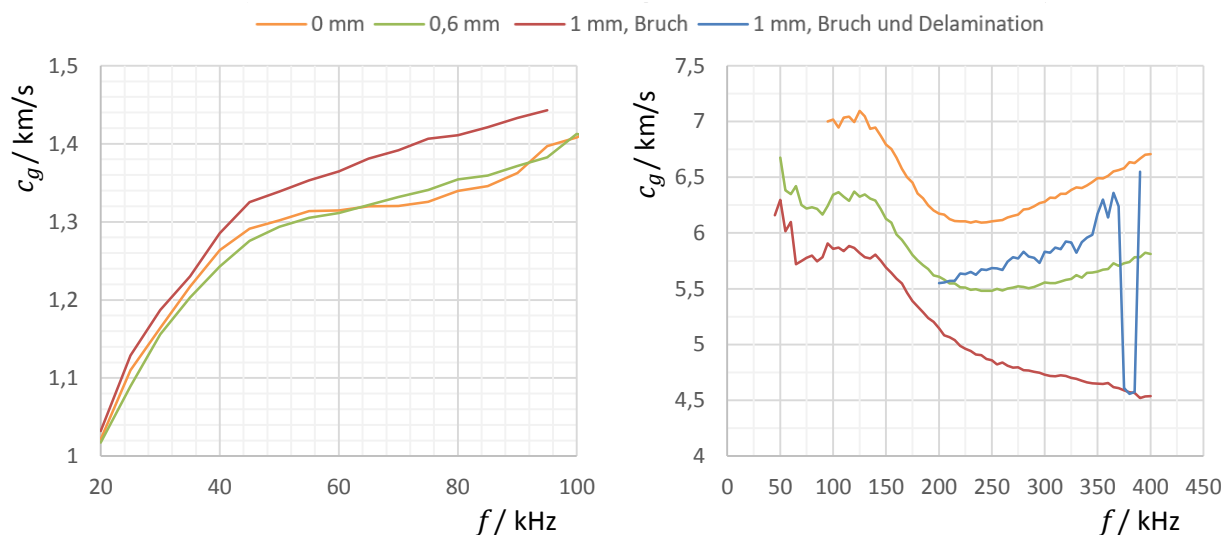


Abbildung 62: Gruppengeschwindigkeit von A_0 (links) und S_0 (rechts) für verschiedene Vereisungszustände.

Eisschicht. Die Gruppengeschwindigkeit von der zusätzlich delaminierten Schicht wird nicht dargestellt, da die Amplitude zu gering für eine Auswertung hinsichtlich der Laufzeit ist. Der rechte Graph enthält die S_0 -Gruppengeschwindigkeit. Auch für S_0 sind die Amplituden unter der delaminierten Schicht teilweise zu gering für eine Laufzeitbestimmung. Aus diesem Grund ist die Dispersionslinie für die delaminierte Eisschicht unvollständig dargestellt. In dem Graphen von A_0 ist zu sehen, dass die Kurve von dem gebrochenen Eis oberhalb der anderen Kurven liegt. Der Verlauf scheint den in 8.2.2. identifizierten Trend fortzusetzen. Der Trend besagt, dass die Gruppengeschwindigkeit bei geringen Eisdicken ($< 0,3$ mm) abnimmt und für steigenden Eisdicken anschließend wieder zunimmt. Bei S_0 verläuft die Dispersionslinie der gebrochenen Eisschicht unterhalb der Linien von 0 und 0,6 mm. Auch hier scheint der Verlauf mit dem Ergebnissen aus 8.2.2. übereinzustimmen. Diese Ergebnisse

zeigen nahezu linearen Abfall von der Gruppengeschwindigkeit, wenn die Eisdicke steigt. Bei hohen Frequenzen ist der Abfall weniger linear und erklärt warum die Dispersionslinien von 0 mm, 0,6 mm und der gebrochenen 1 mm Schicht auseinanderdivergieren. Diese qualitativen Beobachtungen werden nachfolgend überprüft. In dem Kapitel 8.2.2. werden die Dispersionsänderungen unter einer wachsenden Eisschicht für A_0 und S_0 untersucht. Die Auswertung präsentiert, wie stark die Gruppengeschwindigkeit mit der Eisschicht variiert. Die Darstellung geschieht anhand von Graphen, in denen für eine spezifische Frequenz die Gruppengeschwindigkeit bzw. deren Änderung über der Eisdicke von 0 bis 0,6 mm aufgetragen ist. Diese Graphen sind noch einmal in der untenstehenden Abbildung 63 dargestellt und werden um die 1 mm dicke und gerissene Eisschicht erweitert.

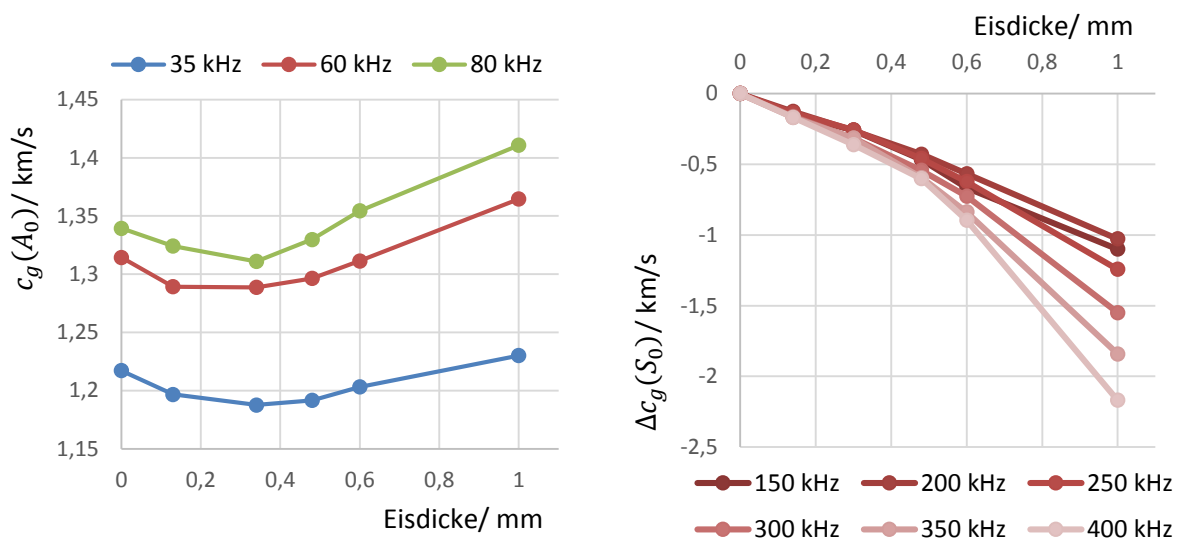


Abbildung 63: Erweiterung der Diagramme um einen Wert bei 1 mm. Links: Gruppengeschwindigkeit von A_0 über der Eisdicke. Rechts: Änderung der Gruppengeschwindigkeit von S_0 über der Eisdicke.

Die hinzugefügten Punkte bei der Dicke von 1 mm ergänzen die Kurven von A_0 im linken Teil, als auch die Kurven von S_0 im rechten Abbildungsteil passend. Diese Passgenauigkeit im Vergleich zu den defektfreien Schichtdicken legt den Schluss nahe, dass die Risse in der 1 mm dicken Eisschicht kaum einen Einfluss auf die Dispersion nehmen. Abschließend stellt der rechte Teil aus Abbildung 62 auch die Gruppengeschwindigkeit von der teilweise delaminierten Eisschicht dar. Die Dispersionslinie verläuft wieder bei einer höheren Gruppengeschwindigkeit und liegt parallel zu der Kurve ohne Eis. Sehr auffällig ist, dass die Kurve in einem schmalen Frequenzbereich von 380 bis 385 kHz zurück auf eine niedrige Gruppengeschwindigkeit fällt. Die Geschwindigkeit entspricht hier exakt der, die bei der gebrochenen Schicht gemessen wird.

Die Ergebnisse deuten stark darauf hin, dass Brüche in der Eisschicht kaum die Dispersionseigenschaften der fundamentalen Lambwellenmoden beeinflussen. Bei einer teilweise delaminierten Eisschicht ändert sich die Dispersion allerdings in Richtung des eislosen Zustandes.

Abschließend geht die Analyse oberflächlich auf die Zeitsignale ein, die nach der Anregung mit einem Gleitsinus gewonnen werden. In Abbildung 64 sind die einseitigen Hüllkurven von

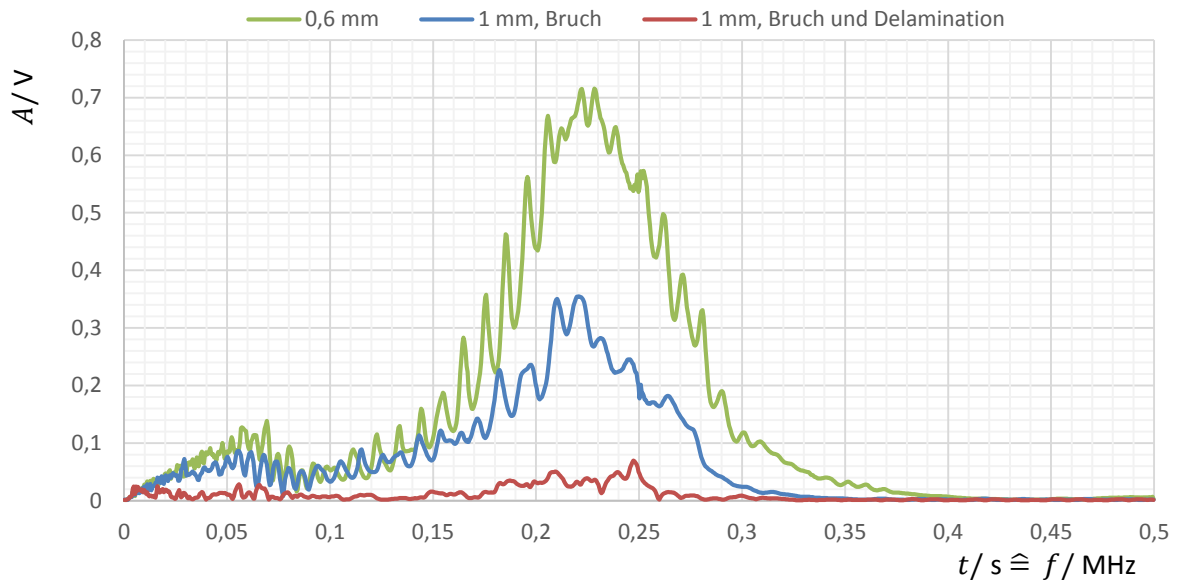


Abbildung 64: Zeitsignale nach der Anregung mit einem Gleitsinus für verschiedene Vereisungszustände.

drei Zeitsignale aufgetragen. Die Signale stammen aus den Vereisungszuständen mit der 0,6 mm dicken Schicht und mit der 1 mm dicken Schicht. Die 1 mm dicke Schicht ist im ersten Fall gebrochen und im zweiten Fall zusätzlich delaminiert. Der Übersichtlichkeit halber beherbergt das Diagramm nur drei Verläufe. Die Kurven verlaufen qualitativ genauso wie die eingangs gezeigten Amplitudengänge und daher wird auf eine genauere Beschreibung verzichtet. Ein Unterschied zu den Amplitudengängen liegt in dem zerklüfteten Verlauf mit den vielen lokalen Maxima. Aus dem vorangegangenen Kapitel geht hervor, dass die Reaktion der lokalen Maxima auf eine Eisschicht nicht zu prognostizieren ist. Die lokalen Maxima beinhalten also eine gewisse Unsicherheit. Der Gleitsinus gibt erst dann einen Eindruck, wie sich die Amplituden über der Frequenz verhält, wenn die gesamte Kurve stärker abgeschwächt wird als der Bereich, in dem die lokalen Maxima schwanken.

Es kann rekapituliert werden, dass die Amplitude der beiden Fundamentalmoden unterschiedlich auf Brüche in der Eisschicht reagiert. Der A_0 -Mode wird um $< 10\%$ abgeschwächt, während S_0 mit einer deutlichen Reduktion von $> 50\%$ reagiert. Bei zusätzlicher Delamination in der Eisschicht verhalten sich A_0 und S_0 sehr ähnlich, ihre Amplitude wird drastisch reduziert. Brüche in der Eisschicht beeinflussen kaum die Dispersionseigenschaften der fundamentalen Lambwellenmoden. Bei einer teilweise delaminierten Eisschicht ändert sich die Dispersion allerdings in Richtung des eislosen Zustandes.

9. Diskussion der Ergebnisse

Das folgende Kapitel diskutiert, inwieweit die gewonnenen Erkenntnisse die bisherige Forschung bestätigen oder ergänzen. Dafür werden die Ergebnisse im Kern zusammengefasst, evaluiert und mit denen anderer Forscher verglichen. Die Intention besteht darin zu vermitteln, wie die angestellten Untersuchungen das Forschungsgebiet der Eiserkennung durch geführte Wellen voranbringt. Nichtsdestotrotz sind die Ergebnisse in ihrer Aussagekraft gewissen Limitationen unterworfen, die ebenfalls kritisch diskutiert werden.

In dieser Arbeit wird systematisch das Verhalten der fundamentalen Lambwellenmoden in einer CFK-Platte untersucht. Das Augenmerk liegt darauf, wie sich das Übertragungsverhalten der Wellen unter einer dünnen Klareisschicht ändert und auf welche Weise die Wellen im Umkehrschluss für eine Eiserkennung genutzt werden können. Die Untersuchung geschieht vor dem Hintergrund, eine neue Methode zur Eisdendifikation in der Luftfahrt zu erforschen. Vor der Diskussion der Ergebnisse werden noch einmal kurz die Voraussetzungen der Untersuchung geschildert und inwiefern sich diese von dem Stand der Forschung absetzen. Im Vergleich zu dem bisherigen Forschungsstand beinhalten die Untersuchungen einige neuartige Aspekte. Bisherige Veröffentlichungen arbeiten hauptsächlich mit isotropen Materialien, da sich die Wellen hier weniger komplex verhalten und weitaus einfacher beschrieben werden können. Genauso verhält es sich mit den genutzten Wellen. Horizontalen Scherwellen werden in der Arbeit von Gao und Rose [47] eingesetzt. Die Ausbreitung dieser Wellen lässt sich insbesondere für isotropes Material einfach beschreiben und ist damit für grundlegende Untersuchungen gut geeignet. Im Hinblick auf ein System, das später beispielsweise an Flugzeugen in der Lage sein soll, Eis zu identifizieren, sind Scherwellen allerdings weniger geeignet. Der Grund dafür liegt in einer relativ aufwändigen Anregung der Wellen. Die genutzten Wandler haben selbst kaum den Forschungsstand überschritten. Im Blick auf das Material setzt die Luftfahrt zukünftig auf Verbundwerkstoffe. In diesem Anwendungsgebiet sind Forschungen an isotropen Aluminiumplatten daher nicht zeitgemäß. Die vorliegende Arbeit nutzt CFK-Platten, die stellvertretend für die Außenhaut eines Flugzeuges stehen. Die Anregung und der Empfang von Wellen erfolgt mit Piezowandlern. Die Kombination aus dem Material und der Art der Wellenanregung wird nur in [49] phänomenologisch im Hinblick auf die Eisidentifikation untersucht. Die vorliegende Arbeit untersucht daher gezielt, wie die Wellen durch das Eis beeinflusst werden und betrachtet neben dem S_0 -Lambwellenmode, wie bei Shoja et al. [48], auch den A_0 -Mode, die Amplitudenabschwächung der Moden und bezieht die gesamte Frequenzbandbreite ein, in der Wellen angeregt werden können.

Die folgende Diskussion der Ergebnisse ist in die drei wesentlichen Punkte der Amplitudenabschwächung, der Dispersionsänderung und der Untersuchung mit einem Gleitsinus unterteilt.

Amplitudenabschwächung

Die Amplitude von A_0 reagiert über seinen gesamten Frequenzbereich mit einer Abschwächung, wenn sich Eis auf der Struktur befindet. In den Versuchen beträgt die Amplitudenabnahme bis zu 13 % und ist für die Identifikation von Eis geeignet. Dagegen verschiebt sich in dem Amplitudengang von S_0 das Maximum mit der Eisdicke. Die Folge ist ein Bereich in dem die Amplitude mit der Eisdicke stetig steigt. Hier ist die Sensitivität im Verhältnis zu A_0 geringer, aber prinzipiell kann auch dieser Bereich für eine Eisdetektion genutzt werden. Während in den Patentschriften von Chamuel [40] und Liu et al. [43] explizit die Amplitudenreduktion von A_0 für den Gebrauch in einem Eissensor beschrieben wird, geht keine Publikation auf die Amplitudenabschwächung von S_0 ein. In der folgenden Tabelle ist die Amplitudenabschwächung der beiden Fundamentalmoden qualitativ und im Hinblick auf einige für die Eisdetektion relevante Kriterien gegenübergestellt.

Tabelle 4: Vergleich der Amplitudenabschwächung bei A_0 und S_0

Kriterium	A_0	S_0
Linearität	Eingeschränkt. Amplitudenabnahme ist progressiv zu der Eisdicke.	Gut.
Sensitivität	Gut (13 %).	Mäßig (6 %).
Nutzbarer Frequenzbereich	In einem breiten Frequenzbereich liegt dasselbe Verhalten vor.	Der nutzbare Bereich ist eingeschränkt und eine passende Frequenz muss erst ermittelt werden.
Anregung und Empfang mit Piezowandlern	Mit eingeschränkter Effizienz anregbar. Gefahr von S_0 -Überlagerungen.	Einfach und mit guter Effizienz anregbar. Einfach auszuwerten, da es stets das erstes Wellenpaket am Empfänger ist.

Ein nicht zu vernachlässigender Einflussfaktor auf die Amplitude ist die Temperatur. Durch einem Temperatursprung von 15,6 °C auf etwa -18 °C steigt die Amplitude von A_0 durchschnittlich um 25 % und ändert sich damit mehr als doppelt so stark, wie unter der moderaten Eisschicht von 0,6 mm. S_0 reagiert auf den Temperatursprung ebenso mit einem Anstieg. Die Amplitude wächst um 15 % und zeigt sich auch doppelt so empfindlich gegenüber der Temperatur, wie gegenüber der Eisschicht. Eine Temperaturüberwachung ist bei der Nutzung daher zwingend erforderlich. Die Ergebnisse stehen im Kontrast zu einer Beobachtung, die in den Voruntersuchungen dokumentiert ist. Hier nimmt die Amplitude von einem reflektierten S_0 -Wellenpaket bei einem vergleichbaren Temperatursprung nicht

zu, sondern stark ab. Der Hauptunterschied zwischen den Messungen liegt in der Verwendung von anderen Piezowandlern, deren Temperaturverhalten ist die reduzierte Amplitude zuzuschreiben. Es ist allerdings nicht das Ziel dieser Arbeit den Temperatureinfluss zu erforschen. Ein ausgiebiger Vergleich mit einem in der Literatur vorgestellten Modell [53], das den Temperatureinfluss auf die Piezowandler, die Klebschicht und die Dispersionseigenschaften der Struktur berücksichtigt entfällt. Eine Limitation der Arbeit liegt darin, dass die Ergebnisse der Amplitudengänge strenggenommen nur für die hier untersuchte Konfiguration gelten. Es ist nicht ausgeschlossen, dass die Amplitude bereits anders reagiert, wenn die Welle sich in einem anderen Winkel in der CFK-Platte ausbreitet. In [27] wird darauf eingegangen, dass sich der Polarisationswinkel einer Lambwelle mit der Ausbreitungsrichtung in der Verbundplatte ändert. Schwingt die Welle beispielsweise orthogonal zu der Plattenebene, so ist es denkbar, dass die Amplitude deutlich empfindlicher auf Eis reagiert, als wenn eine Welle vornehmlich Komponenten in der Plattenebene hat. Dies stellt einen interessanten Ansatz für Folgeuntersuchungen dar. Es sei noch einmal erwähnt, dass die vorliegende Arbeit die Kontamination mit Klareis untersucht und keine Abgrenzung zu anderen Kontaminationen auf der CFK-Platte erfolgt.

Dispersionsänderung

In Bezug auf die Dispersion reagiert die Gruppengeschwindigkeit von S_0 deutlich auf das Eis. Der Mode nimmt nahezu linear mit der Eisdicke in seiner Gruppengeschwindigkeit ab. Die Abnahme beläuft sich in den Versuchen bei einer 0,6 mm dicken Eisschicht auf bis zu 15 %. Dagegen sind die Änderungen innerhalb der Gruppengeschwindigkeit von A_0 deutlich geringer und darüber hinaus nicht linear. Zusätzlich ändert sich die Gruppengeschwindigkeit nicht nach einer Seite gerichtet. Das heißt, bei einer wachsenden Eisschicht sinkt zunächst die Gruppengeschwindigkeit von A_0 , erreicht einen Tiefpunkt und steigt anschließend wieder an. Im Gegensatz zu A_0 ist der S_0 -Mode wegen seiner guten Sensitivität und Linearität sehr attraktiv für eine Eisidentifikation. Die an der CFK-Platte gewonnenen Ergebnisse decken sich beispielsweise mit den Beobachtungen aus [48], in denen sich S_0 in einem GFK-Laminat in gleicher Weise sensitiv gegenüber Eis zeigt. Die in den Messungen ermittelten Gruppengeschwindigkeiten weichen von denen aus der numerischen Berechnung ab. Die Abweichung der gemessenen zu den berechneten Gruppengeschwindigkeiten beträgt bei A_0 und S_0 maximal 15 %. Die Änderungen, die sich in der Gruppengeschwindigkeit von einer Eisdicke zur nächsten ergeben, stimmen zwischen der Rechnung und der Messung allerdings deutlich besser überein. Dieser Sachverhalt spricht für eine systematische Abweichung, die beispielsweise der Messmethodik geschuldet sein könnte. Ein weiteres Indiz dafür, gibt der Vergleich mit der Literatur. Die Arbeiten von Szwieczek [27] und Raddatz [54] nutzten dieselbe Berechnungsvorschrift und erzielten an CFK-Platten jeweils eine deutlich bessere Übereinstimmung zu den Messergebnissen. Es Eine genauere Prüfung identifiziert im Nachhinein den Hauptgrund für die Abweichungen. Das Anregungssignal entspricht nicht gleich dem Signal der ausgesendeten Wellen. Dieses Verhalten ist beispielhaft in Abbildung 65 veranschaulicht. Für die Aufnahme werden die doppelseitig applizierten Wandler genutzt, wobei ein Wandler als Akteur und der

gegenüberliegende rein sensorisch arbeitet. Der Phasenversatz zwischen den Kurven entspricht dem Fehler, der in der Laufzeitbestimmung gemacht wird und so systematisch die Ergebnisse beeinträchtigt. Weitere Messungen, mit deren Hilfe der Fehler im Nachhinein womöglich herausgerechnet werden kann, werden im Zuge der begrenzten Bearbeitungszeit nicht angestellt. Die Fehlerkorrektur ist auch nicht nötig, denn untereinander sind die Messungen vergleichbar und zeigen deutlich, dass die Gruppengeschwindigkeit sensitiv gegenüber der Eisschicht ist. Um die absoluten Gruppengeschwindigkeiten zu bestimmen, empfiehlt sich ein Aufbau mit drei Piezowandlern. Ein Wandler agiert als Sender und zwei als Empfänger, zwischen denen die Laufzeit fehlerfrei ermittelt werden kann. Für die spätere Praxis genügt jedoch ein einfacher Aufbau mit einem Sender und einem Empfänger, da so bereits die relativen Änderungen zueinander genau bestimmt werden können. Zu erwähnen sind weitere Fehlermöglichkeiten, die ebenfalls zu einer Abweichung zwischen den Berechnungen und den Messungen beitragen können. Eine Möglichkeit für Abweichungen liegt in den Materialparametern. Insbesondere die Kennwerte von Eis haben eine große Bandbreite und sind sogar Alterungsprozessen unterworfen. Weiterhin trifft die Berechnung Annahmen, die nur in Näherung der Realität gerecht werden. So werden beispielsweise die einzelnen Laminatschichten homogenisiert und ein perfekter Verbund vorausgesetzt. Die Temperatur sollte auch im Falle der Gruppengeschwindigkeiten nicht vernachlässigt werden, denn die Temperatur übt einen deutlich messbaren Einfluss auf das Dispersionverhalten von S_0 aus. Die Größenordnung des Temperaturdrifts entspricht der Änderung, die eine Eisschicht hervorruft.

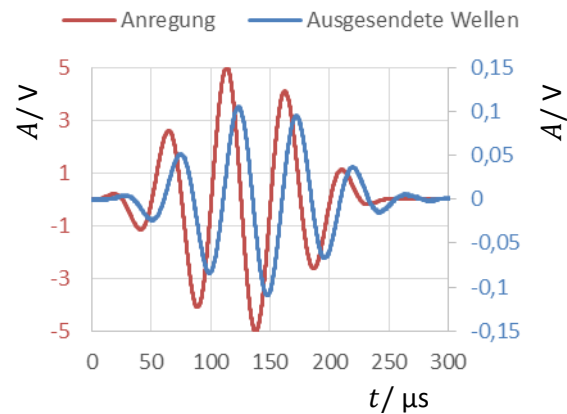


Abbildung 65: Versatz zwischen dem Anregungssignal und den ausgesendeten Wellen am Sender.

Gleitsinus

Der Reiz an der Messung mit einem Gleitsinus liegt in seiner Einfachheit. Genutzt wird die Einhüllende von dem Zeitsignal, das am Empfänger aufgenommen wird. Diese Kurve gibt bereits nach einer einzigen Messung einen Überblick, bei welchen Frequenzen die Anregung von Lambwellen besonders effektiv ist. Dieselbe Darstellung kann auch in Form von einem Amplitudengang erfolgen. Ein Amplitudengang ist zwar genauer und kann separat für die verschiedenen Lambwellenmoden erstellt werden, allerdings ist dafür eine Vielzahl von Messungen bei verschiedenen Frequenzen notwendig, die jeweils hinsichtlich ihrer Amplitude ausgewertet werden müssen. Gerade der Temperaturdrift von der Amplitude wird mit dem Gleitsinus sehr viel einfacher und schneller erfasst. Das Ergebnis deckt sich aber dennoch sehr gut mit einem aufwändig ermittelten Amplitudengang. Anders ist das Verhalten jedoch, wenn moderate Eisschichten den Übertragungspfad bedecken. Die Einhüllende von dem Zeitsignal hat ein charakteristisches Aussehen mit zahlreichen lokalen

Maxima. Diese überziehen den Verlauf ähnlich wie eine hochfrequente Modulation. Unter einer dünnen Eisschicht reagieren in erster Linie die vielen lokalen Maxima in einer Weise, in der keine Systematik festgestellt werden kann. Der Gleitsinus ist also zunächst nicht sensitiv für das Eis. Erst bei höheren Amplitudenabschwächungen, wenn der gesamte Verlauf stärker herabgesetzt wird als die lokalen Überhöhungen schwanken, liegt eine Sensitivität vor. Die gewonnenen Erkenntnisse ergänzen die Untersuchungen aus der Vorarbeit von Mendig et al. [49]. Das Antwortsignal wird in [49] hinsichtlich des globalen Maximums und der mittleren Amplitude ausgewertet. Beide Werte reagieren zunächst nicht auf dünne Eisschichten, nehmen ab einer gewissen Schichtdicke jedoch ab. Dieses Verhalten steht im Einklang mit den oben diskutierten Ergebnissen.

Bislang konzentriert sich die Diskussion einzig auf die fehlerfreie Klareisschicht. Darüber hinaus werden noch zwei Spezialfälle untersucht. In dem ersten Fall ist eine Eisschicht mit zahlreichen Rissen quer zur Ausbreitungsrichtung versehen und im zweiten Fall delaminiert die gerissene Eisschicht zusätzlich. Die Risse in einer Eisschicht beeinflussen nicht das Dispersionverhalten, führen aber zu einer deutlichen Amplitudenabnahme. In den Versuchen zeigt sich besonders die Amplitude von S_0 empfindlich gegenüber den Rissen und wird knapp 60 % abgeschwächt. Das Ergebnis gibt einen Hinweis darauf, wie anders strukturierte Eisschichten, also beispielsweise Mischeis oder Raueis vorwiegend auf die Amplitude wirken, anstatt auf die Dispersion und dementsprechend unterschieden werden können. Eine partiell delaminierte Eisschicht kann in der Praxis zum Beispiel nach einem mechanischen Enteisungsversuch auftreten. Dieser Zustand kann ebenfalls erkannt werden, da die Amplitude weiter abnimmt und die Dispersionseigenschaften zurück in Richtung des eislosen Zustandes wandern. Ein Erklärungsansatz für das Verhalten lautet wie folgt: Die Gruppengeschwindigkeit entspricht an den delaminierten Stellen weitestgehend dem eislosen Zustand, da die Eisschicht hier keinen Teil der Struktur darstellt und durch einen Luftspalt von der Platte getrennt ist. Die Gruppengeschwindigkeit ergibt sich als eine mittlere Gruppengeschwindigkeit, die sich anteilig aus den Geschwindigkeiten mit der Eisschicht und ohne Eisschicht zusammensetzt. Aus dem Grad, wie stark sich die Gruppengeschwindigkeit zurück in Richtung des eislosen Zustandes verschiebt, kann also vermutlich auf den Grad der Delamination geschlossen werden. Eine Hypothese für die stark abgeschwächte Amplitude ist, dass die Wellen an delaminierten Stellen daran gehindert werden zurück in die Platte zu transmittieren. Stattdessen werden sie vielfach in der Eisschicht reflektiert und kommen zum Erliegen. Selbst wenn die Wellen zurück in die Struktur koppeln, haben sie in der Eisschicht einer anderen Ausbreitungsgeschwindigkeit, so dass die Energie über einen längeren Weg verteilt wird und die Amplitude abnimmt.

Die Erwartung an die Lambwellen ist, dass diese mit Eis auf einer Struktur interagieren. Aus dem Empfängersignal einer Aktor-Sensor-Strecke können Rückschlüsse auf das Vorhandensein von Eis und die Eisdicke geschlossen werden. Diese Erwartung wird grundsätzlich bestätigt. Insbesondere die Gruppengeschwindigkeit von S_0 und die Amplitudenabschwächungen beider Fundamentalmoden sind bei verschiedenen Frequenzen mehr oder weniger empfindlich gegenüber Eis. Darüber hinaus zeigt die Kombination aus

den Geschwindigkeiten und Amplitudenabschwächungen Potential auch zwischen verschiedenen Vereisungszuständen zu differenzieren. Dahingehend sind weiterführende Untersuchungen anzustellen, denn die Lambwellen werden von etlichen Parametern teils sehr empfindlich beeinflusst. Einflussparameter sind neben dem Laminat an sich der Ausbreitungswinkel in dem Laminat, der Temperatureinfluss sowie die Kontamination mit verschiedenen Eisarten. Auch andere Stoffe können in der Luftfahrt die Außenhülle kontaminieren. Ein Beispiel sind Mischungen aus Glykol und Wasser, die für die Enteisung eingesetzt werden und auffrieren können. Ein weiterer Parameter ist der Ort, an dem Eis in dem Übertragungspfad lokalisiert ist. Im Hinblick auf den praktischen Einsatz sind die Lagerungsbedingungen und Versteifungselemente relevant. Dies sind einige Vorschläge für weiterführende Forschung, denen die vorliegende Arbeit als Orientierung dienen könnte.

10. Resümee

Innerhalb des Projektes Supercooled Large Droplet Icing (SuLaDI) forschen die Technische Universität Braunschweig und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt gemeinsam auf dem Gebiet der Flugzeugvereisung. Eine Schlüsselrolle kommt der Eiserkennung zu, denn sie wirkt sich direkt auf einen sicheren und effizienten Flugbetrieb aus. Für die Eiserkennung ist ein neuartiger Ansatz denkbar, bei dem Wellen nach dem Sender-Empfänger-Prinzip von einer Struktur geführt werden und mit Eis interagieren, das sich auf der Struktur befindet. Daraus folgt die Leitfrage der Arbeit, wie sich das Übertragungsverhalten der Wellen unter einer Klareisschicht ändert und auf welche Weise die Wellen im Umkehrschluss für eine Eiserkennung und Charakterisierung genutzt werden können. Genauer gesagt werden systematisch verschiedene Parameter aus dem Empfängersignal im Hinblick auf eine wachsende Klareisschicht analysiert. Zu diesem Zweck beschäftigt sich die Arbeit einerseits rechnerisch und andererseits experimentell mit der Anregung, Ausbreitung und dem Empfang von Lambwellen. Die Struktur, in der sich die Wellen ausbreiten besteht aus einer dünnen CFK-Platte, die eine Flugzeugaußenhaut repräsentiert. Piezowandler generieren und empfangen die Lambwellen in der Platte und vervollständigen die Aktor-Sensor-Strecke. Eine erste Untersuchungsmethode sind numerische Berechnungen. Es wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit von einzelnen Lambwellenmoden in dem CFK-Laminat berechnet. Die Ergebnisse sind Dispersionsdiagramme, in denen die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Moden in Abhängigkeit von einer wachsenden Eisschicht prognostiziert wird. Das Ergebnis besagt, dass die Moden grundsätzlich in ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit auf das Eis reagieren und für eine Eisidentifikation geeignet sind. Die anschließende Untersuchung priorisiert das grundlegende Verständnis von der Anregung und dem Empfang der Wellen. Das Verhalten der Wellen ist besonders bei Verbundmaterialien nicht intuitiv und die angestellten Voruntersuchungen bringen wichtige Erkenntnisse im Umgang mit der Aktor-Sensor-Strecke. Ein zentraler Punkt, der die umfangreiche Datenerfassung in den Untersuchungen erst ermöglicht, ist die Messtechnik, die computerisiert angesteuert wird und die zeitaufwändige manuelle Datenaufnahme in einer automatisierten Routine schnell abarbeitet. Erst nach den Voruntersuchungen kann mit den erworbenen Kompetenzen ein Modellversuch ausgelegt werden. Der Versuch dient der experimentellen Validierung der Berechnungsergebnisse und untersucht tiefgehend die Interaktionsmechanismen der Lambwellen mit einer wachsenden Klareisschicht.

Die in den Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse erlauben es, ausdifferenziert auf die eingangs gestellte Forschungsfrage zu antworten, wie sich das Übertragungsverhalten von Lambwellen unter einer Eisanlagerung ändert und so für die Eisdetektion und Dickenbestimmung genutzt werden kann. Die experimentellen Werte stimmen grundsätzlich gut mit den Berechnungen überein. Danach ist speziell die Ausbreitungsgeschwindigkeit des S_0 -Lambwellenmodes für die Identifikation und Dickenbestimmung attraktiv. Ferner werden die Amplituden der Wellen ausgewertet. Hier zeigen sich die beiden untersuchten Moden A_0 und S_0 sensitiv gegenüber der Schichtdicke. Allerdings ergeben sich in Bezug auf die praktische Anwendung einige Unterschiede, wie beispielsweise in der Linearität oder dem nutzbaren Frequenzbereich. Ferner zeigen Untersuchungen mit einer vielfach gebrochenen

Eisschicht, dass die Lambwellen auch Potential besitzen zwischen verschieden strukturierten Eisschichten zu unterscheiden. Nicht zuletzt stellt der Temperatureinfluss einen Parameter dar, der die Wellenausbreitung gleichermaßen stark beeinflusst, wie eine moderate Eisschicht. Die Temperatur ist daher unbedingt in den Untersuchungen zu berücksichtigen. Die vorliegende Arbeit führt in das umfangreiche und komplizierte Thema der Lambwellen ein und wie diese mit Diskontinuitäten wechselwirken. Es wird detailliert gezeigt, wie Lambwellen auf verschiedene Vereisungszustände reagieren und wie das Verhalten für die Detektion genutzt werden kann. Zusätzlich behandelt die Arbeit viele grundlegende Aspekte und stellt mit den beigefügten Programm-Routinen ein wertvolles Handwerkszeug, das weiteren Untersuchungen zugutekommt.

11. Darstellungsverzeichnis

Abbildung 1: Komponenten der Aktor-Sensor-Strecke nach [26, p. 7].	4
Abbildung 2: In einem Eiswindkanal (NASA <i>Icing Research Tunnel</i>) erzeugte Klareisanlagerung auf einem Rotorblatt [55].	7
Abbildung 3: Horizontal polarisierte Scherwelle in einer Platte [21].	9
Abbildung 4: a) Schematische Darstellung der Lambwellen-Grundmoden, symmetrisch (oben) und antisymmetrisch (unten) nach [21]. b) Dispersionsdiagramm einer Aluminiumplatte (Materialparameter in Anhang B).	10
Abbildung 5: Repräsentatives Dispersionsdiagramm horizontal polarisierter Scherwellen nach [7].	11
Abbildung 6: a) Achsdefinition, b) Longitudinaleffekt (d33 -Effekt), c) Transversaleffekt (d31 -Effekt), d) Schereffekt (d15 -Effekt) nach [56, p. 71].	16
Abbildung 7: Drei Anregungsvarianten von Plattenwellen: a) Normalprüfkopf aus der Ultraschallprüfung bestehend aus Piezoaktor (unten) und Dämpfungskörper (oben), b) verklebte Piezokeramik, c) Scherwellenprüfkopf aus der Ultraschallprüfung nach [35].	17
Abbildung 8: Piezo Konfigurationen: a) flächige elektrode [26], b) Multilayertechnologie [26], c) <i>DuraAct</i> -Piezokomposit nach [38].	18
Abbildung 9: Effektiven Lambwellenanregung an einem Piezoaktor.	20
Abbildung 10: Geometrisch bedingtes Modenübertragungsverhalten der fundamentalen Lambwellenmoden – normierte sensorseitige Spannungsantwort. Aktolänge: 10 mm. Material: Aluminium.	20
Abbildung 11: Zeitsignal und spektrale Analyse eines ungefensterten und Hanning-gefensterten Burst-Signals.	22
Abbildung 12: Äquivalente Reflexions-Lauflängen bei symmetrischer Anordnung.	29
Abbildung 13: Mit <i>Displam</i> berechnete Dispersionsdiagramme einer 1 mm dicken Aluminiumplatte: a) Rohdaten, b) Mit einem Sortieralgorithmus zugeordnete Dispersionslinien.	32
Abbildung 14: Dispersionsdiagramme der CFK-Platte ohne Eis: Phasengeschwindigkeiten (links) und Gruppengeschwindigkeiten (rechts), einschließlich Beispiel von verrauschten Ergebnissen anhand des S1 -Moden.	33
Abbildung 15: Phasengeschwindigkeiten der ersten drei symmetrischen Lambwellenmoden unter einer Klareissicht von 0 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,5 mm.	34
Abbildung 16: Phasengeschwindigkeiten der ersten vier antisymmetrischen Lambwellenmoden unter einer Klareisschicht von 0 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,5 mm.	35
Abbildung 17: Verschiebung der Grenzfrequenz von den Moden A1 , A2 und A3 über der Eisdicke.	35
Abbildung 18: Gruppengeschwindigkeiten der ersten drei symmetrischen Lambwellenmoden unter einer Klareisschicht von 0 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,5 mm.	36
Abbildung 19: Gruppengeschwindigkeit des S0 -Lambwellenmodes aufgetragen über der Eisdicke bei verschiedenen Frequenzen.	36

Abbildung 20: Gruppengeschwindigkeiten der ersten vier antisymmetrischen Lambwellenmoden unter einer Klareisschicht von 0 mm, 0,1 mm, 0,2 mm und 0,5 mm.	37
Abbildung 21: Prinzipaufbau der Messtechnik.	39
Abbildung 22: CFK-Platte mit zwei applizierten Wandlern und Lagerung auf vier weichen Silikonstützen.....	42
Abbildung 23: Zeitsignal von Sender und Empfänger bei einer Anregungsfrequenz von 150 kHz.	43
Abbildung 24: Normiertes Amplitudenspektrum der Zeitsignale am Sender und Empfänger.	44
Abbildung 25: Zeitsignal vom Empfänger bei einer Anregungsfrequenz von 55 kHz.....	45
Abbildung 26: Maximale Empfängeramplitude von A0 - und S0 -Wellenpaketen über der Anregungsfrequenz. Links, Darstellung der absoluten Spannung. Rechts, Normierte Darstellung und Vergleich zur Berechnung.	46
Abbildung 27: Normiertes Amplitudenspektrum des Empfängersignals bei der Anregung mit 500 kHz.	47
Abbildung 28: Vergleich der Signalverläufe am Sender unter Hanning-gefensterter und ungefensterter Anregung mit 5 Perioden bei 100 kHz (ab $t = 52 \mu s$ gilt die rechte Y-Achse).....	49
Abbildung 29: Vergleich zwischen gefensterter und ungefensterter Anregung. Links: Empfängersignal des S0 -Lambwellenpaketes. Rechts: Amplitudenspektrum des Empfängersignals.	50
Abbildung 30: Vergleich zwischen Hanning-gefensterter und ungefensterter Anregung: Maximale Amplitude des Empfängersignals über der Frequenz.	51
Abbildung 31: CFK-Platte mit Position der genutzten Chip-Keramik.....	53
Abbildung 32: Drei Stufen der Kantenabklebung mit Butyldichtband.	54
Abbildung 33: Zeitsignale an der Chip-Keramik unter der Anregungsfrequenz von 220 kHz bei zunehmendem Abkleben der nächstgelegenen Plattenkante mit Butyldichtband.....	55
Abbildung 34: Vergleich der Zeitsignale von Dämpfung 3 bei Raumtemperatur und bei circa -18 °C.	56
Abbildung 35: Maximale Amplitude des reflektierten S0 -Wellenpaketes über der Anregungsfrequenz.	57
Abbildung 36: Zeitsignal am Empfänger und Frequenzspektrum des Empfängersignals und Anregung mit einem Gleitsinus.	59
Abbildung 37: Momentaufnahmen im Gefrierprozess von Wasser.	61
Abbildung 38: Blumenspritze für die Wasservernebelung.	62
Abbildung 39: Schichtweise mit einem Filz aufgebraute Klareisschicht.	63
Abbildung 40: Links: Separationslänge zwischen einem A0 - und einem S0 -Wellenpaket für eine Anregungsdauer von n Perioden. Rechts: Quotient der Gruppengeschwindigkeiten von A0 und S0 für den Zustand ohne Eis und einer 0,5 mm dicken Eisschicht.	68
Abbildung 41: Anordnung der Piezowandler auf der CFK-Platte.....	68
Abbildung 42: Verfahrensweise beim Verkleben der Piezowandler.	70
Abbildung 43: Zeitsignal an zwei wechselseitig applizierten Wandlern bei einer Anregungsfrequenz von 60 kHz.....	71
Abbildung 44: Trennung der symmetrischen und antisymmetrischen Schwingungsanteile. .	72

Abbildung 45: Aufbau für die Vereisungsversuche.....	74
Abbildung 46: CFK-Platte mit einer dünnen Eisschicht.....	76
Abbildung 47: CFK-Platte mit etwa 1 mm dicker Eisschicht (die Wandlerposition auf der Plattenunterseite ist in grün markiert). Links: Querrisse in der Schicht. Recht: Risse und Delaminationen (helle Bereiche) in der Schicht.....	77
Abbildung 48: Temperaturvergleich der Amplitudengänge für A0 und S0 für 15,6 °C und -18 °C.....	79
Abbildung 49 :Prinzip der Laufzeitbestimmung.....	80
Abbildung 50: Gemessene Gruppengeschwindigkeit von A0 (links) und S0 (rechts) unter Temperatureinfluss und im Vergleich mit berechneten Lösungen.....	81
Abbildung 51: Hüllkurven der Antwortsignale unter Anregung mit einem Gleitsinus für die Messtemperaturen von 15,6 °C und -18 °C.....	82
Abbildung 52: Amplitudengang von S0 unter Einfluss einer wachsenden Klareisschicht.	83
Abbildung 53: S0 -Amplitude über der Eisdicke für eine Anregungsfrequenz von 290 kHz....	84
Abbildung 54: Amplitudengang von A0 unter Einfluss einer wachsenden Klareisschicht.....	84
Abbildung 55: A0 -Amplitude über der Eisdicke für eine Anregungsfrequenz von 40 kHz.....	85
Abbildung 56: Gruppengeschwindigkeit von A0 . Links: Messung. Rechts: Berechnung. Oben: Gruppengeschwindigkeit über der Anregungsfrequenz für verschiedene Eisdicken. Unten: Gruppengeschwindigkeit über der Eisdicke für verschiedene Frequenzen.	86
Abbildung 57: Gemessene Gruppengeschwindigkeit von S0 unter einer Klareisanlagerung im Vergleich mit den berechneten Gruppengeschwindigkeiten.....	87
Abbildung 58: Änderung der Gruppengeschwindigkeit in Bezug zu dem eislosen Zustand über der Eisdicke. Vergleich zwischen Messung und Rechnung bei verschiedenen Anregungsfrequenzen.	88
Abbildung 59: Zeitsignal nach Gleitsinus-Anregung unter einer Klareisschicht zunehmender Dicke.	89
Abbildung 60: Amplitude des Hauptmaximums, sowie des linken und rechten Nebenmaximums über der Eisdicke.	90
Abbildung 61: Amplitudengänge der fundamentalen Lambwellenmoden. Vergleich von den Zuständen ohne Eis, 0,6 mm Eis, 1 mm Eis mit Rissen und 1 mm Eis mit Rissen und Delaminationen.	92
Abbildung 62: Gruppengeschwindigkeit von A0 (links) und S0 (rechts) für verschiedene Vereisungszustände.....	93
Abbildung 63: Erweiterung der Diagramme um einen Wert bei 1 mm. Links: Gruppengeschwindigkeit von A0 über der Eisdicke. Rechts: Änderung der Gruppengeschwindigkeit von S0 über der Eisdicke.....	94
Abbildung 64: Zeitsignale nach der Anregung mit einem Gleitsinus für verschiedene Vereisungszustände.....	95
Abbildung 65: Versatz zwischen dem Anregungssignal und den ausgesendeten Wellen am Sender.....	99

12. Literaturverzeichnis

- [1] H. E. Addy, „Ice Accretions and Icing Effects for Modern Airfoils,“ NASA, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, 2000.
- [2] H. E. Addy, M. G. Potapczuk und D. W. Sheldon, „Modern Airfoil Ice Accretions,“ Lewis research Center Cleveland, Ohio, 1997.
- [3] National Transportation Safety Board, „Aircraft Accident Report - Air Florida, Inc., Boeing 737-222, N62-AF, Collision with 14th Street Bridge, Near Washington National Airport, Washington D.C., January 13. 1982.,“ Washington, D.C., 1982.
- [4] Office of The Federal Register, Band 1 von 14 CFR Aeronautics and Space, IntraWEB, LLC, 2014.
- [5] J. J. Reinmann, R. J. Shawn und W. A. Olsen, „NASA Lewis Research Center's Program on Icing Research,“ 1982.
- [6] „Aircraft Accident Report: In-flight icing encounter and loss of control, American eagle flight 4184,“ National Transportation Safety Board, Washington, D. C., 1996.
- [7] J. L. Rose, S. P. Pelts und J. Li, „Quantitative Guided Wave NDE,“ 15th World Conference on Non-Destructive Testing, 2000.
- [8] International Civil Aviation Organization, „Doc 9640-AN/940. MANUAL OF AIRCRAFT GROUND DE-ICING/ANTI-ICING OPERATIONS,“ SECOND EDITION - 2000.
- [9] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, „Chapter 15 - Ice and Rain Protection,“ in *Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe Volume 2*, 2012.
- [10] J. R. Jamieson und M. D. Ray, „Advanced warning ice detection system for aircraft“. USA Patent US 6819265 B2, 11 November 2004.
- [11] R. T. Lines, R. C. Savage und J. Cole, „Microwave icing avoidance system“. USA Patent US 6489915 B1, 3 Dezember 2002.
- [12] W. R. Sand und R. A. Kropfli, „Icing hazard detection for aircraft“. USA Patent US 5028929 A, 2 Juli 1991.
- [13] H. F. Pruett, „Aircraft Wing Inspection Light System“. USA Patent 5727863, 17 März 1998.

- [14] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, „Aircraft Ice Detectors and Related Technologies for Onground and Inflight Applications,“ Atlantic City, 1993.
- [15] M. Anderson und L. Meiners, „Electro-optic ice detection device“. USA Patent US 6425286 B1, 30 Juli 2002.
- [16] C. Barre, D. Lapeyronnie und G. Salaun, „Ice detection assembly installed on an aircraft“. USA Patent US 7000871 B2, 21 Februar 2006.
- [17] L. J. Runyan, T. A. Zierten, E. G. Hill und H. E. J. Addy, „fluids, Lewis icing research tunnel test of the aerodynamic effects of aircraft ground deicing/anti-icing,“ NASA Lewis Research Center; Cleveland, OH, United States, 1992.
- [18] R. W. Gent, N. P. Dart und J. T. Cansdale, „Aircraft Icing,“ *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Bd. Vol. 358, pp. 2873-2911, 15 November 2000.
- [19] European Aviation Safety Agency, „Notice of Proposed Amendment 2015-07, Use of comparative analysis when showing compliance,“ 2015.
- [20] European Aviation Safety Agency, „ED Decision 2016/010/R, Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25),“ 22 Juni 2016.
- [21] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer-Verlag, 2013.
- [22] C. J. Hellier, *Handbook Of Nondistructive Evaluation*, McGraw-Hill Professional, 2001.
- [23] H. Lamb, „On Waves in an Elastic Plate,“ *Proceeding of the Royal Society of London*, 1917.
- [24] I. A. Viktorov, *Reighleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications*, Plenum Press, 1967.
- [25] M. Young, *Optik, Laser, Wellenleiter*, Berlin Heidelberg: Springer, 1997.
- [26] D. Schmidt, „Modenselektive Übertragung von Lambwellen in Faserverbundstrukturen,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2014.
- [27] A. Szewieczek, „Simulativ-experimentelle Auslegungsmethodik für Sensornetzwerke einer strukturintegrierten Zustandsüberwachung,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Dissertation, Technische

Universität Braunschweig, 2016.

- [28] M. Calomfirescu, „Lamb Wave for Structural Health Monitoring in viscoelastic Composit Materials,“ Dissertation, Universität Bremen, 2008.
- [29] H. C. Kim und J. M. Park, „Ultrasonic Wave Propagation in Carbon Fiber-Reinforced Plastics,“ *Journal of Materials Science*, Bd. 34, Nr. 3, pp. 218-239, 2000.
- [30] D. Leduc, B. Morvan, P. Pareige und J.-L. Izbicki, „Mesurement of the effects of rough surfaces on Lamb waves propagation,“ *NDT & E International*, Bd. 37, Nr. 3, pp. 207-211, 2004.
- [31] C. Willberg, J. M. Vivar-Perez und U. Gabbert, „Lamb wave interactions with defects in homogenous plates,“ in *International Conference on Structural Engineering Dynamics*, Ericeira Portugal, 2009.
- [32] G. Mook, J. Pohl, C. Willberg und J. Simonin, „Ankopplung, Ausbreitung und Wechselwirkung von Lambwellen zur strukturierten bauteilüberwachung von Faserverbunden,“ in *10. Magdeburger Maschinenbau-Tage*, 2011.
- [33] H. Janocha, Unkonventionelle Akteure: Eine Einführung, 1. Auflage Hrsg., München: Oldnburger, 2010.
- [34] K. Ruschmeyer, Piezokeramik: Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen, Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 1995.
- [35] B. Köhler, F. Schubert, M. Kehlenbach und R. Bilgram, „Geführte Wellen in Plattenstrukturen und deren Wechselwirkung mit Strukturelementen und Defekten,“ in *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung E.V - Jahrestagung*, Salzburg, 2004.
- [36] B. Köhler, F. Schubert und B. Frankenstein, „Numerical and Experimental Ivestigation of Lamb Wave excitation, propagation and detection for SHM,“ in *Proc. of the 2nd European Conference on Structural Health Monitoring*, Munich/Germany, July 7-9, 2004.
- [37] B. Köhler, T. Gaul, U. Lieske und F. Schubert, „Shear horizontal piezoelectric fiber patch transducers (SH-PFP) for guided elastic wave applications,“ *NDT & E International*, Nr. 82, pp. 1-12, September 2016.
- [38] P. Wierach, „Entwicklung von Piezokompositen für adaptive Systeme,“ DLR-Forschungsbericht DLR-FB 2010-23, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2010.
- [39] S. Bhalla und C.-K. Soh, „Electro-Mechanical Impadance Technique for Structural Health Monitoring and Non-Destructive Evaluation,“ in *National Workshop on Structural Health*

Monitoring, Non-Destructive Evaluation and Retrofitting of Structures, Indian Institute of Technology Delhi, 2008.

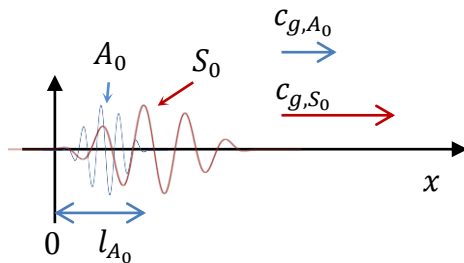
- [40] V. Giurgiutiu, „Tuned Lamb Wave Excitation and Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring,“ *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Bd. 16, Nr. 4, pp. 291-305, 2005.
- [41] J. R. Chamuel, „Ultrasonic aircraft ice detector using flexural waves“. USA Patent US 4461178 A, Prioritätsdatum: 3 August 1982.
- [42] R. D. Watkins, „Ice Detector“. USA Patent US 4604612 A, Priritätsdatum: 3 Aug 1982.
- [43] Y. Liu und L. C. Lynnworth, „Elastic wave sensing system“. USA Patent US 5456114 A, Prioritätsdatum: 23 April 1993.
- [44] J. L. Rose und A. B. Pilarski, „Contaminant detection system“. USA Patent US 5629485 A, Prioritätsdatum: 13 Dezember 1994.
- [45] M. Valenti, „Sonic Ice Detection,“ *Mechanical Engineering*, Nr. 118(1):10, Januar 1996.
- [46] M. T. Peterson, L. Nguyen, D. V. Edleman und J. F. Coffel, „The HALO System - Applying the "Safe Wing" Concept to Airline Operations in Ground Icing Conditions,“ *IEEE*, Nr. 0-7803-3050-119, pp. 152-157, 1995.
- [47] H. Gao und J. L. Rose, „Ice Detection and Classification on an Aircraft Wing with Ultrasonic Shear Horizontal Guided Waves,“ *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Bd. 2, Nr. 56, pp. 334-344, Februar 2009.
- [48] S. Shoja, V. Berbyuk und A. Boström, „Investigating the Application of Guided Wave Propagation for Ice Detection on Composite Materials,“ in *Proceeding of ICoEV 2015 International Conference on Engeneering Vibration*, Ljubljana, 7-10. September, 2015.
- [49] C. Mendig, M. Endres, H. Sommerwerk, J. Riemenschneider und H. P. Monner, „Eiserkennung durch Körperschallwellen,“ in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 2016.
- [50] P. D. Wilcox, „Lamb wave inspection of large structures using permanently attached tranceducers,“ Dissertation, University of London, 1998.
- [51] J. Baaran, „Grundlagenuntersuchung zur Ausbreitung von Lambwellen in Hybridlaminaten,“ DLR-Interner Bericht, IB 131-2010/45, DLR - Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 2010.
- [52] G. Mook, J. Pohl und Y. Simonin, „Lamb Wave Interactions in CFRP Plates,“ in *19th*

World Conference on Non-Destructive Testing, Munich, Germany, 2016.

- [53] F. L. di Scalea und S. Salamone, „Temperature effects in ultrasonic Lamb wave structural health monitoring systems“ *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 161 (2008); doi: 10.1121/1.2932071.
- [54] F. Raddatz, „Lokalisierung der Interaktionsorte von Lambwellen in komplexen Faserverbundstrukturen,“ Dissertation, TU-Braunschweig, 2016.
- [55] „National Aeronautics and Space Administration (NASA),“ [Online]. Available: http://www.aeronautics.nasa.gov/aavp/images/C95_03918.jpg. [Zugriff am 19 Oktober 2016].
- [56] T. Melz, „Entwicklung und Qualifikation modularer Satellitensysteme zur adaptiven Vibrationskompensation an mechanischen Kryokühlern,“ Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2002.

13. Anhang

A) Separationslänge von S_0 - und A_0 -Lambwellenpaketen



Separation liegt genau dann vor, wenn der Beginn des schneller propagierenden S_0 -Wellenpaketes auf dem Ende des A_0 -Wellenpaketes liegt:

$$c_{g,S_0} * t = l_{A_0} + c_{g,A_0} * t \quad (A1)$$

Mit

$$l_{A_0} = \frac{c_{g,A_0} * n}{f} \quad (A2)$$

ergibt sich die Separationslänge zu:

$$s = \frac{c_{g,A_0} * c_{g,S_0} * n}{f(c_{g,S_0} - c_{g,A_0})} \quad (A3)$$

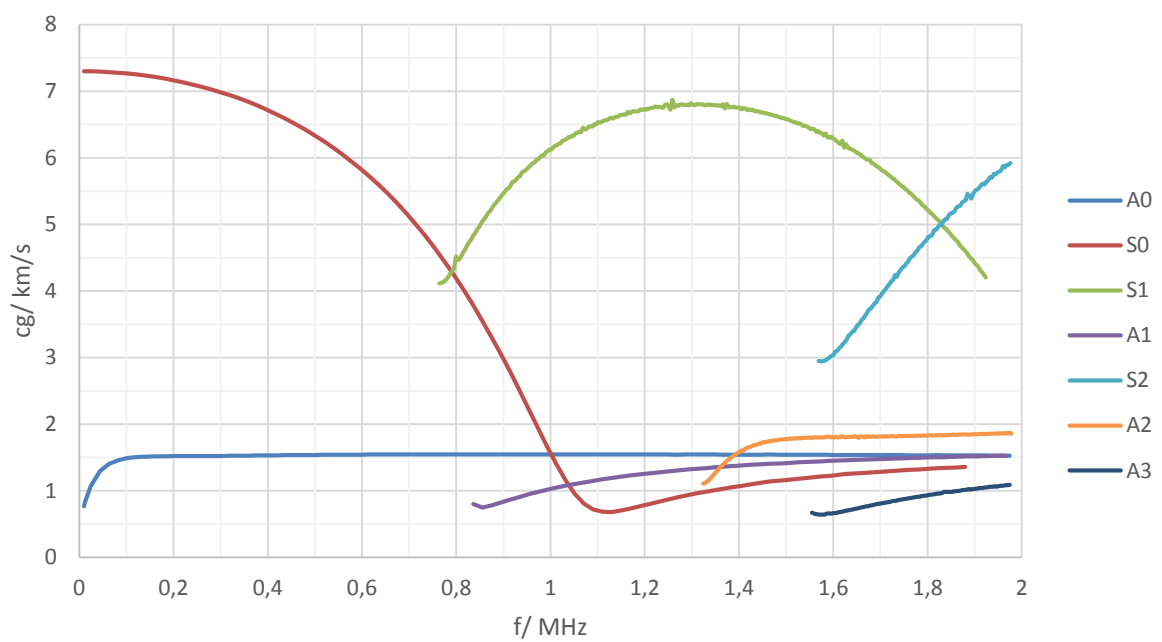
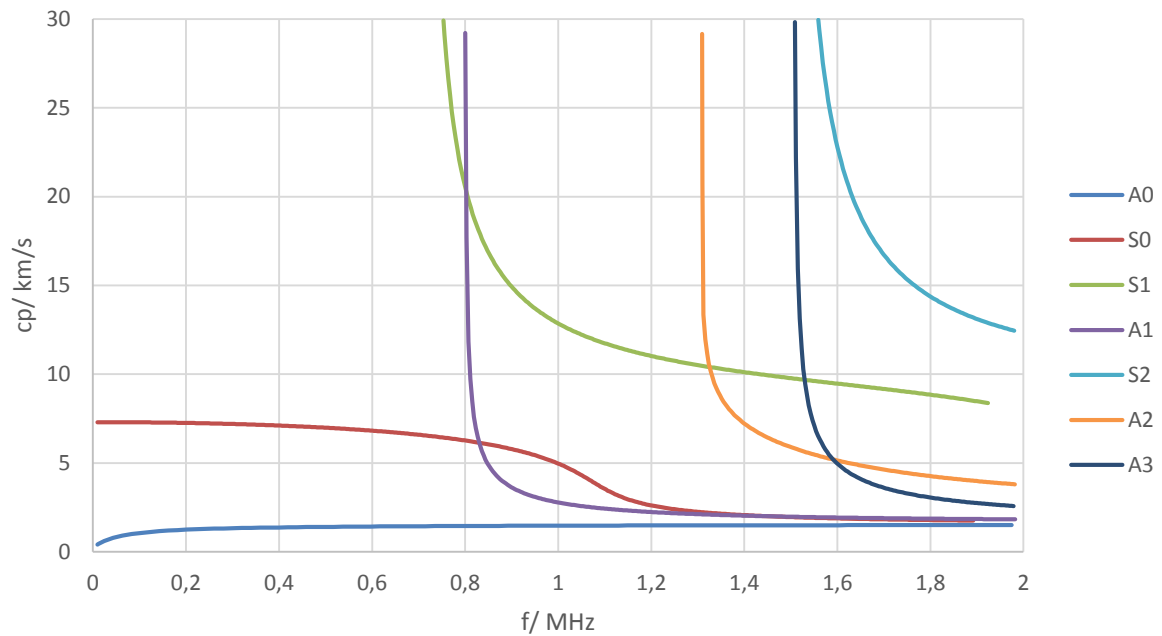
B) Materialparameter

Die Eisparameter stammen aus [47]. Bei den Materialparametern für das CFK-Pregpreg HexPly®M21/IMA-12K handelt es sich um DLR-interne Informationen. Die Bestimmung der Parameter ist in [54, p. 171 f] hinterlegt.

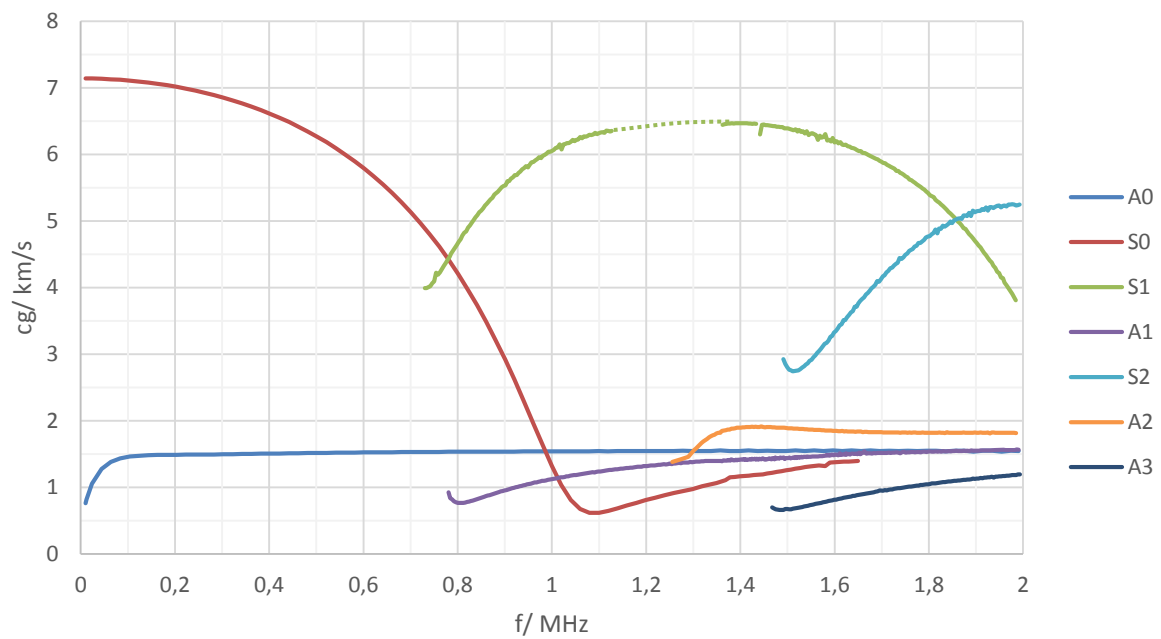
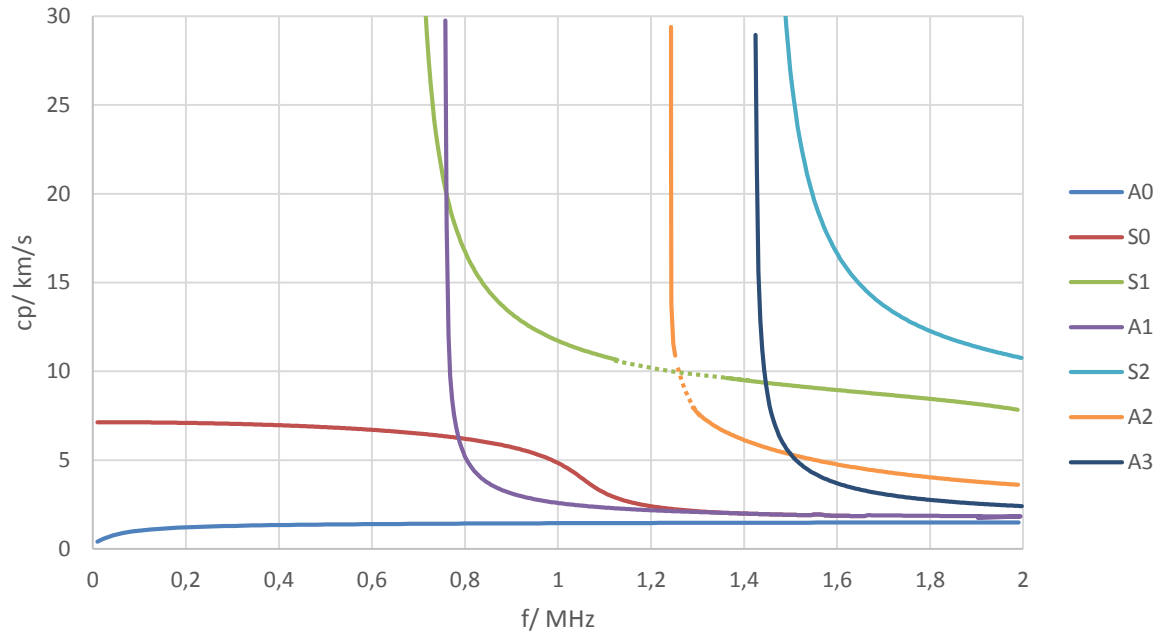
Material	$\rho / \text{g/cm}^3$	E / GPa	ν
Aluminium	2,7	70	0,34
Klareis	0,9	8,3	0,351
Mischeis	0,8	6,3	0.326
Raueis	0,6	2,5	0,282

C) Berechnete Dispersionsdiagramme der CFK-Platte

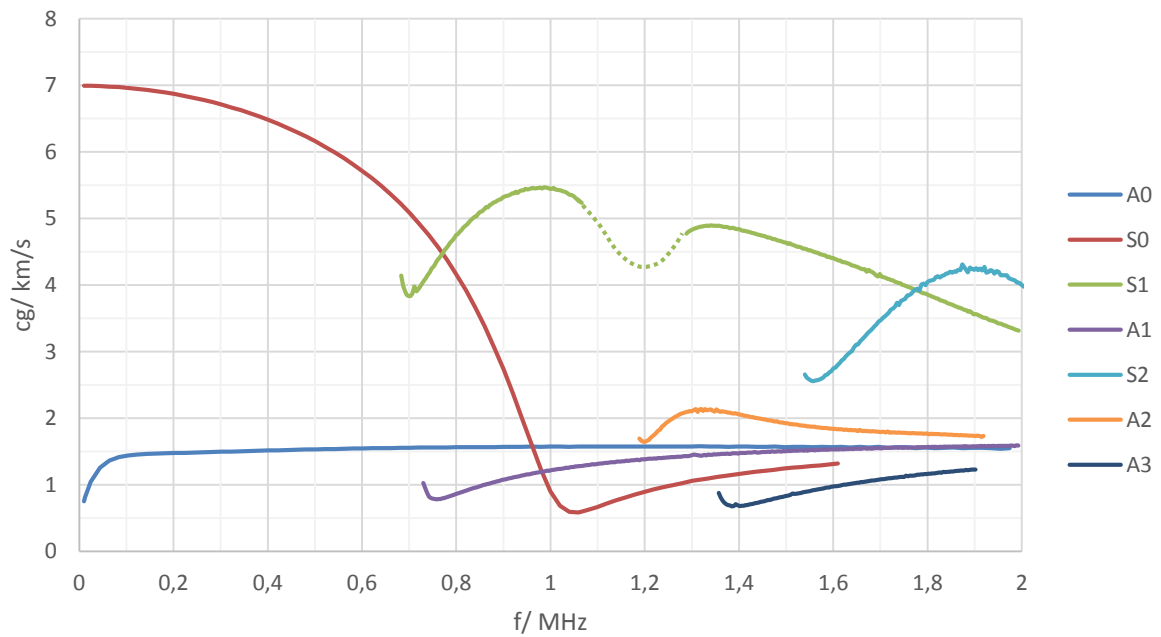
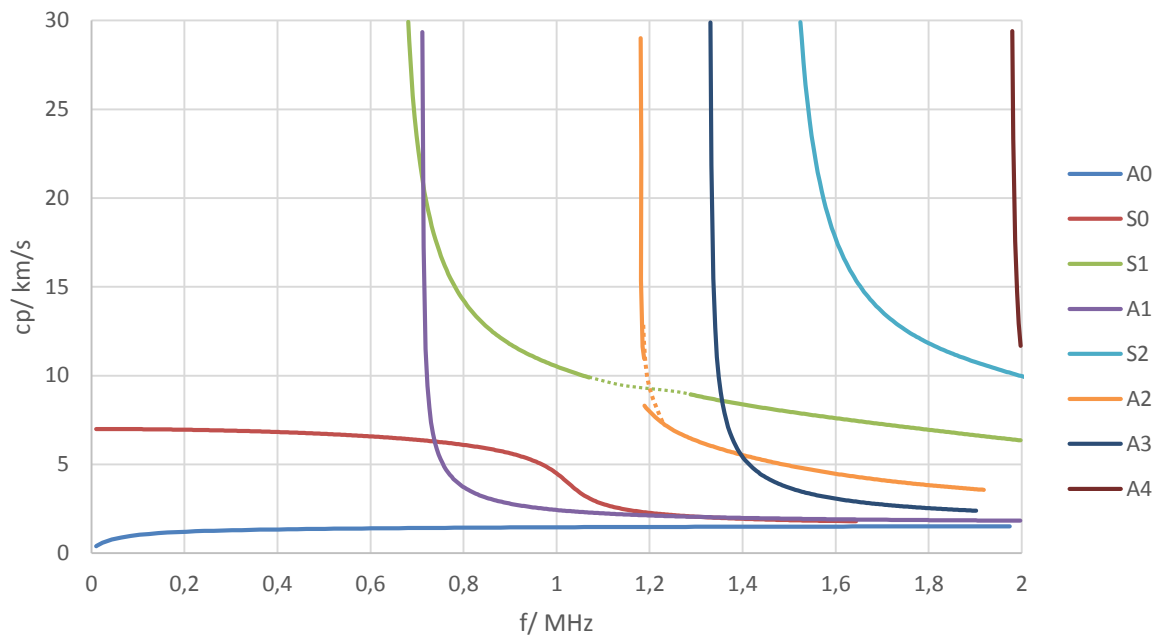
1. Dispersionsdiagramme ohne Eisenlagerung:



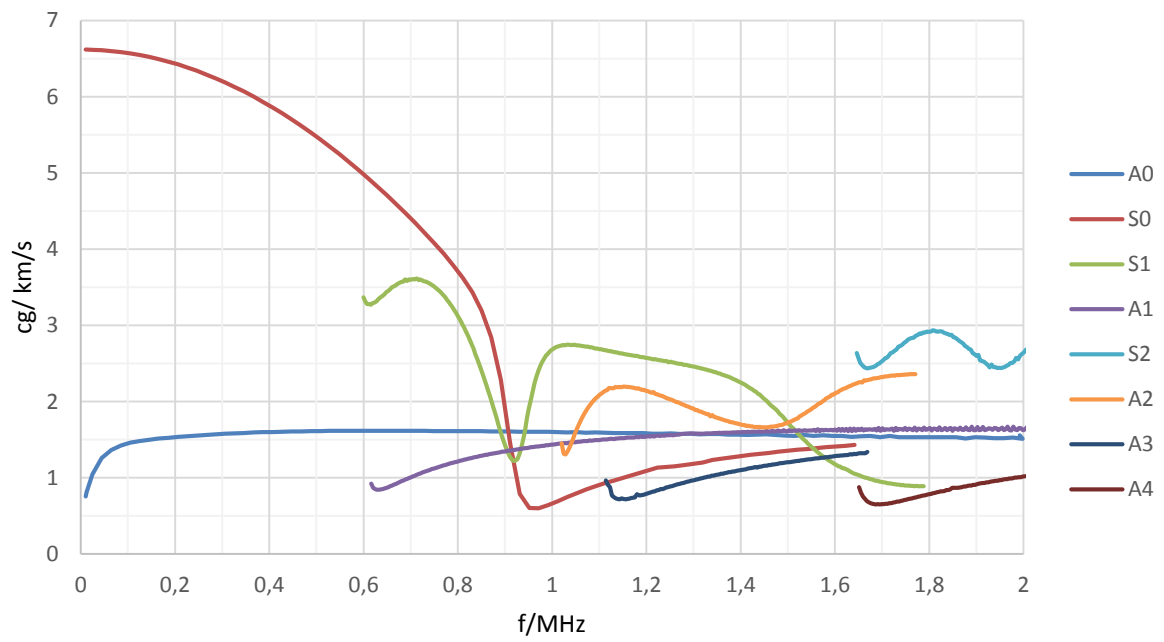
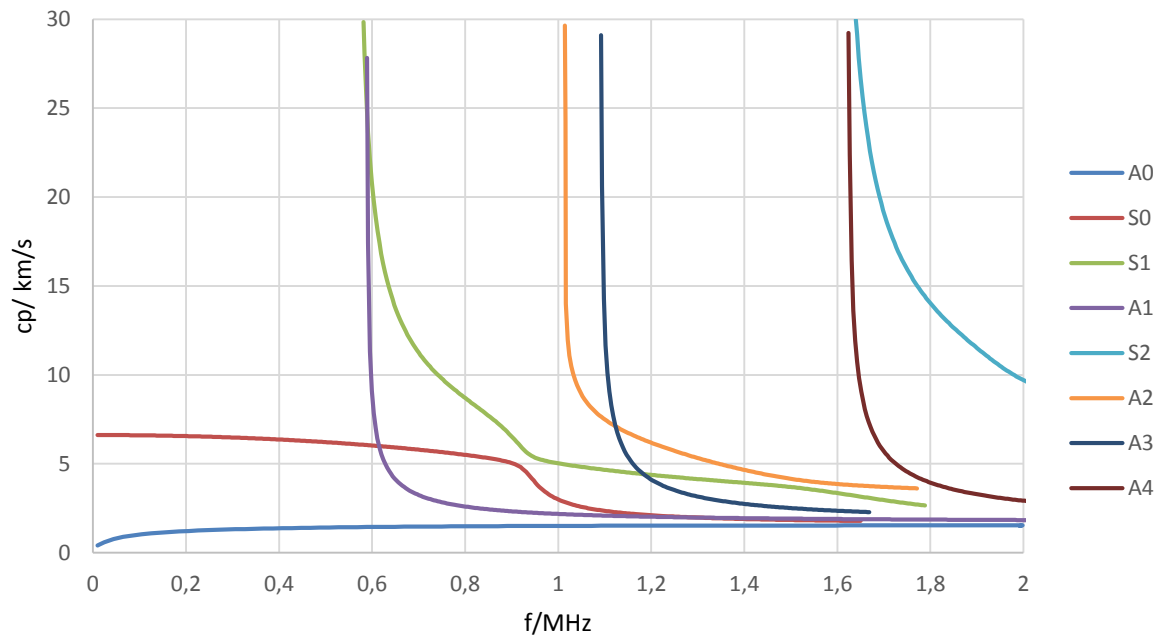
2. Dispersionsdiagramme mit 0,1 mm Klareis. Die gestrichelten Linien wurden manuell in Lücken der Kurvenverläufe gelegt. Hier ist die Zuordnung der Wertepaare zu den Dispersionsverläufen fehlgeschlagen.



3. Dispersionsdiagramme mit 0,2 mm Klareis. Die gestrichelten Linien wurden manuell in Lücken der Kurvenverläufe gelegt. Hier ist die Zuordnung der Wertepaare zu den Dispersionsverläufen fehlgeschlagen.

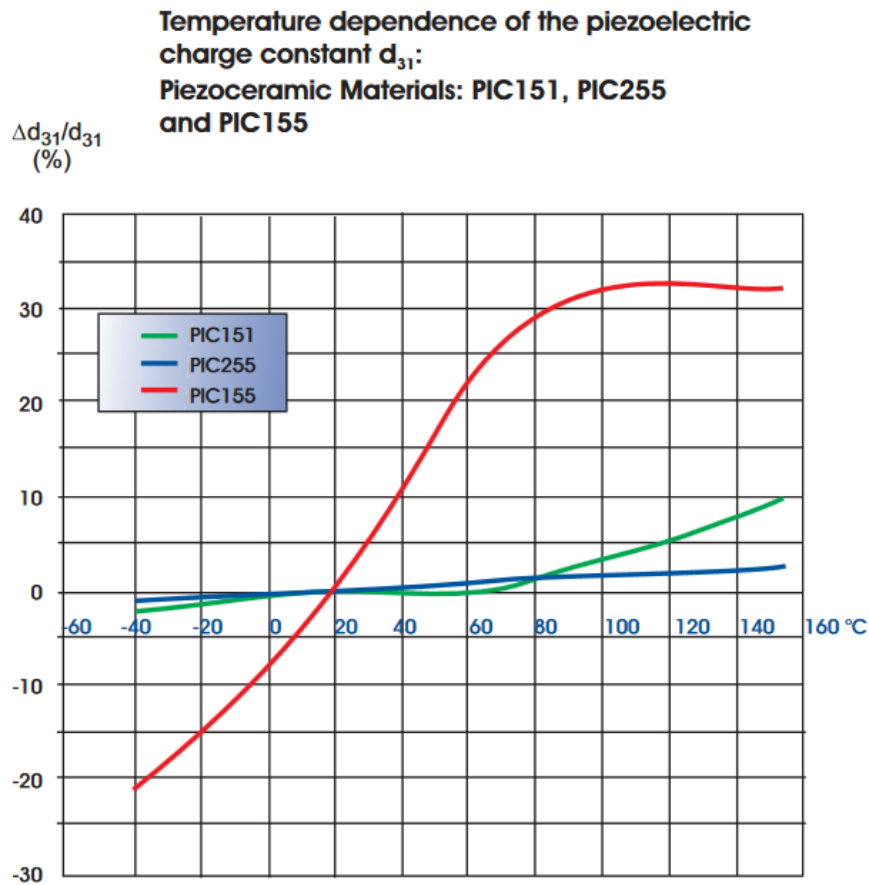


1. Dispersionsdiagramme mit 0,3 mm Klareis.



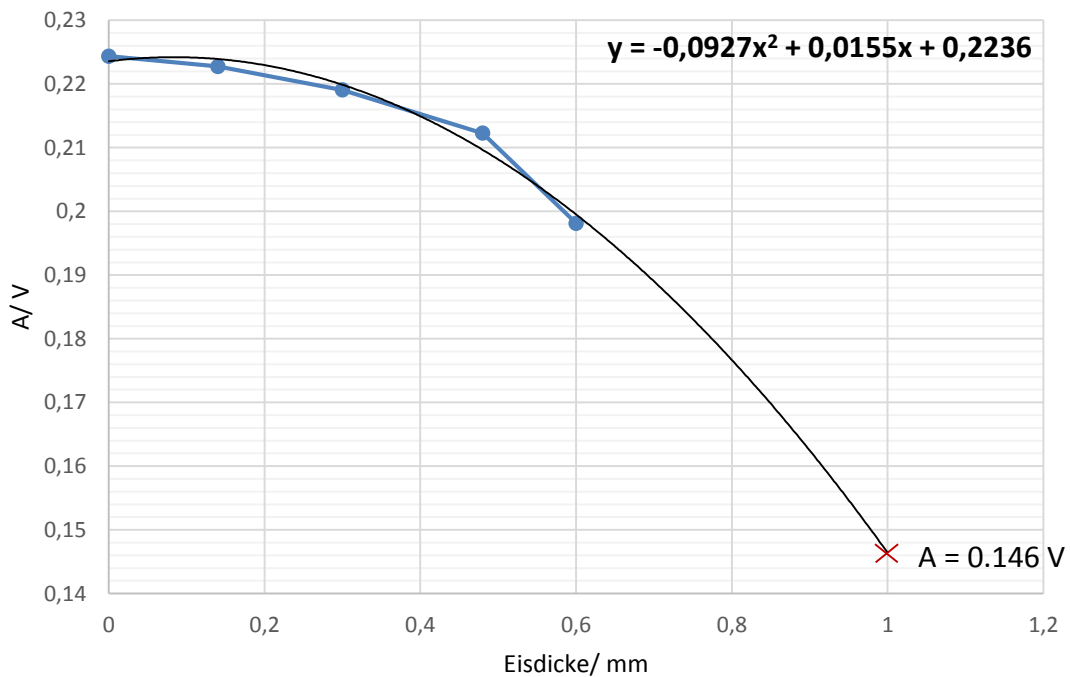
D) Temperatureinfluss auf die d_{31} -Konstante der Piezokeramik

Das gezeigte Diagramm entstammt einer Infobroschüre über die piezokeramischen Materialien die von *Pi Ceramic* produziert werden. Die *DuraAct-Flächenwandler* nutzen die Keramik PIC255, die in einem Relevanten Bereich von 20 °C bis –20 °C kaum einem Temperatureinfluss unterliegt.



E) Extrapolation für die Auswertung aus Kapitel 8.2.4.

Die Auswertung in 8.4.2. erfasst die Hochpunkte in den A_0 -Amplitudengängen. Die Hochpunktpunkte sind für die Klareisanlagerungen von 0 bis 0,6 mm bekannt, konnten für die Eisdicke von 1 mm jedoch nicht gemessen werden. Ziel ist es den Hochpunkt durch eine Extrapolation anzunähern. Bei der Frequenz von 55 kHz besitzen alle A_0 -Amplitudengänge ihren Hochpunkt. In dem untenstehenden Graph sind diese Hochpunkte über der Eisdicke aufgetragen. Über eine Regression nähert eine quadratische Funktion den Verlauf an und erlaubt die Abschätzung von Wertepaaren aus Eisdicke und Amplitude sogar über den gesicherten Bereich hinaus. Von Interesse ist der Wert bei einer Eisdicke von 1 mm. Der Wert an dieser Stelle repräsentiert die notwendige Referenz, mit der unterschieden werden kann, wie stark einerseits die Risse und andererseits die Eisdicke Einfluss auf die Amplitude nehmen (vgl. Kapitel 8.2.4.).



F) Digitaler Anhang
