

# Experimentelle Wellenfeldanalyse zum Dämpfungs- und Phasenverhalten piezoelektrisch angeregter Plattenstrukturen

Jens KATHOL<sup>1</sup>, Claus-Peter FRITZEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Siegen, Siegen

Kontakt E-Mail: jens.kathol@uni-siegen.de

**Kurzfassung.** Detektions- und Lokisationsalgorithmen auf der Basis des Laufzeitverhaltens von piezoelektrisch (aktiv) oder durch den Schaden selbst (passiv) angeregten Lamb-Wellen in Plattenstrukturen sind auf akkurate Kenntnisse über die Wellenausbreitung innerhalb der Platte sowie oft unerwünschten Vorgängen innerhalb der Messkette angewiesen. Zwischen der Generierung des elektrischen Signals, mit welchem der Aktor beaufschlagt wird, und der sich dadurch einstellenden Plattenschwingung tritt eine Veränderung des Signals in seiner Phasenlage und Amplitude auf. Diese Veränderung ist zum Teil dem inhomogenen Dehnungsfeld des piezoelektrischen Elements geschuldet. Ein weiterer Einflussfaktor stellt der Einschwingvorgang des lokalen Systems aus piezoelektrischem Element und der Platte dar. Durch diese Einflüsse lässt sich das Ausgangssignal nicht durch eine rückgewandte lineare Extrapolation der Plattenschwingung zum Mittelpunkt des Piezoelements mithilfe einer analytischen Lösung ermitteln. Ein ähnlicher Effekt tritt bei der Aufnahme der sich ausbreitenden Wellen im piezoelektrischen Sensor auf.

Diese Arbeit untersucht die Wellencharakteristik in Bezug auf das Dämpfungs- und Phasenverhalten sich ausbreitender Lamb-Wellen in Plattenstrukturen. Hierbei wird vorrangig Bezug auf Bereiche in lokaler Nähe zu den genutzten piezoelektrischen Elementen genommen, die eine Interaktion mit auftreffendem Körperschall hervorrufen. Zur Wellenfeldanalyse werden 3-dimensionale Daten eines Laser-Doppler-Vibrometers mit den Messungen herkömmlicher piezoelektrischer Messmethoden verglichen. Anschließend soll eine Analyse des Dämpfungsverhaltens bzw. des Energieverlusts innerhalb des kompletten Messstrangs durchgeführt werden. Eine Frequenzabhängigkeit der Dämpfung innerhalb der Platte, aber auch ein frequenzabhängiger Energieverlust bedingt durch den (inversen) piezoelektrischen Effekt ist dabei zu beachten. Des Weiteren ist eine Untersuchung des ebenfalls frequenzabhängigen Phasenverhaltens des Signals von seiner Generierung bis zur Messung am Sensor durchzuführen.

## 1. Einleitung

Die Überwachung von plattenförmigen Strukturen mithilfe aktiv angeregter Ultraschallwellen ist seit über einem Jahrzehnt Teil der Forschung und zum Teil schon in



der Anwendung an realen Strukturen angekommen. Aktiv angeregt werden sogenannte Lamb-Wellen [LAM17], welche sich in unterschiedlichen Moden in der Struktur ausbreiten können. Unterschieden werden sie dabei in symmetrische  $S_i$ -Moden und antisymmetrische  $A_i$ -Moden, welche jeweils durch ihre charakteristischen Bewegungsformen zur Mittelebene der Platte definiert sind. Der Index  $i = 0, 1, 2, \dots$  beschreibt dabei die Ordnungszahl der Schwingenspiele in Dickenrichtung der Platte. Die Schwingenergie kann dabei aktiv durch angesteuerte piezoelektrische Elemente (PWAS, piezoelectric wafer active sensor) [GIU08] oder auch durch thermische Anregung erfolgen. Für eine thermische Anregung bringt ein amplitudenmodulierter Laser die gewünschte Frequenz ein [SCR90], [PAR13]. Unter einer passiven Entstehung von Lamb-Wellen ist beispielsweise eine Schallausbreitung in plattenförmigen Strukturen bedingt durch Rissfortschritt oder sonstige schadens- und lastbedingte Bildung der Schwingenergie zu verstehen, welche allerdings in dieser Arbeit keine Berücksichtigung findet.

Vorteile der Laser-Methode gegenüber piezoelektrisch angeregten Wellen, sind gegeben durch eine kontaktlose, sowie sehr lokale Anregung der Schwingung. Vorteile auf der Seite der piezoelektrischen Elemente sind vor allem im Bereich der höheren eingebrachten Leistung und einem einfachen und günstigen Messaufbau zu finden. Ein großer Nachteil ist, neben der zusätzlich aufgebrachten Masse durch den PWAS an der Struktur, die durch die Geometrie des Aktors zwangsweise flächig angeregte Schwingung der Struktur. Wie schon von [GIU05] erwähnt, hat dabei die Geometrie des PWAS einen großen Einfluss auf die entstehende Amplitude der Schwingung der Struktur und somit auf die Qualität der einzelnen Messungen mit Bezug auf die Möglichkeit einer Schadensdetektion. Bedingt durch die räumlich endliche Ausdehnung des PWAS werden die unterschiedlichen Lamb-Wellen-Moden unterschiedlich stark angeregt. Sogenannte „Sweet Spots“ für die Amplitudenmaximierung sind für jede Lamb-Wellen-Mode zu verzeichnen und können auf die PWAS-Geometrie zurückgeführt werden. Die maximal mögliche Schwingamplitude wird dabei erreicht, wenn die Länge des PWAS der halben Wellenlänge des entsprechenden Lamb-Wellen-Mode entspricht [GIU05].

## **2. Wellenanalyse an piezoelektrisch angeregten Plattenstrukturen**

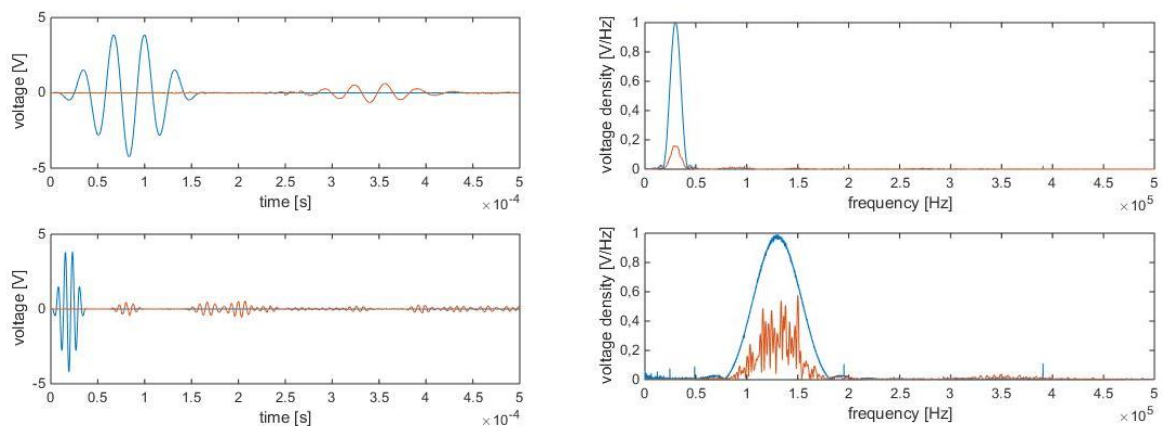
Zur Schadensdetektion an plattenförmigen Strukturen werden Lamb-Wellen genutzt, die mit möglichen Schäden in der Struktur interagieren. Zur Messung dieser Wellen werden aktive Elemente, sogenannte PWAS genutzt, welche als Sensor aber auch als Aktor in der Messkette fungieren können. Dabei wird in dieser Arbeit ein piezoelektrisches Element mit einer zeitvarianten Spannung beaufschlagt, was eine Ladungsverschiebung im Inneren des PWAS hervorruft. Genutzt wird ein Wellenburst, dessen Amplitude mit einem nachgeschalteten Verstärker verstärkt wurde. Bedingt durch diese Ladungsverschiebung stellt sich eine Verformung des Elements ein, was die Platte zum Schwingen bringt. Dieser Effekt wird inverser piezoelektrischer Effekt genannt und genutzt, wenn der PWAS als Aktor agiert. Zu einem genau umgekehrten Effekt, dem piezoelektrischen Effekt, kommt es, wenn der PWAS als Sensor eingesetzt wird. Die eintreffende Schallwelle in der Platte verformt das Element, was eine Ladungsverschiebung hervorruft, welche als abgegebene Spannung gemessen werden kann. Eine detailliertere Beschreibung dieses Effekts ist in

[MAR71], die Nutzung des Effekts in Bezug auf PWAS als Aktor und Sensor in [Giu08] zu finden.

Die Aussendung des Aktorsignals und die Messung der Antwort kann dabei mit einem oder mehreren PWAS durchgeführt werden, wobei in der untersuchten Anwendung Sensor und Aktor örtlich getrennt sind. Untersucht wurde eine 2 mm dicke Aluminiumplatte, welche mit kreisförmigen piezoelektrischen Elementen beklebt wurde.

Im Vergleich der unterschiedlichen Signale an Aktor und Sensor im Frequenz- und Zeitbereich fällt ein genereller Amplitudenunterschied zwischen den eingebrachten Signalen am Aktor (blau) und der Sensorantwort (rot) auf (Abb. 1). Ein weiterer zu beachtender Aspekt ist die augenscheinliche Frequenzabhängigkeit der Amplitudenabnahme im Frequenz- und Zeitbereich. Besitzt die Restamplitude der Schwingung bei 130 kHz noch ca. die Hälfte der Amplitude zu Beginn des Vorganges, ist es bei 30 kHz nur ca. ein Sechstel.

Eine generelle Differenz in der Höhe der Spektralen Dichte ist der Nutzung des Hann-Fensters geschuldet. Obwohl beide Signale am Aktor (blau) mit gleich großer Amplitude im Zeitbereich eingehen, ist durch Anregung eines breiteren Frequenzbandes bei 130 kHz eine geringere Energiedichte zu erwarten.



**Abb. 1:** Mit PWAS gemessene Signale, Aktor (blau) und Sensor (rot), bei unterschiedlichen Mittenfrequenzen, 30 kHz (oben), 130 kHz (unten), Zeitbereich (links), Frequenzbereich, normiert (rechts)

Dieses ist ebenfalls im Zeitsignal sichtbar, wobei das Amplitudenverhältnis zwischen Aktor und Sensor noch größer ausfällt und darauf schließen lässt, dass die Übertragungsfunktion zwischen Aktor und Sensor stark von der genutzten Mittenfrequenz abhängig ist. Trägt man alle maximalen Hüllkurvenamplituden der Sensorantworten der eingetroffenen Wellenbursts über der Frequenz auf (Abb. 2, oben links) und unterscheidet sie in ihrer Ausbreitungsmode (Abb. 2, oben rechts), zeigen sich Frequenzbereiche, in denen die Amplituden der eintreffenden Lamb-Wellen trotz gleich starker Anregung verstärkt hervortreten. Diese „Sweet Spots“ sind laut [GIU05] charakteristisch für die beiden untersuchten Lamb-Wellen-Moden und treten bei unterschiedlichen Frequenzen auf. Das Maximum der A<sub>0</sub>-Mode liegt demnach bei der Frequenz, dessen zugehörige Wellenlänge genau dem doppelten Durchmesser des PWAS entspricht. Mit den hier verwendeten Parametern der Platte und des PWAS sollte diese Frequenz bei 50 kHz liegen (siehe Abb. 2 unten rechts). Wie in Abb. 2 oben links allerdings zu sehen ist, liegt das Maximum der A<sub>0</sub>-Mode nicht bei dem erwarteten Wert, sondern mit 80 kHz etwas höher.

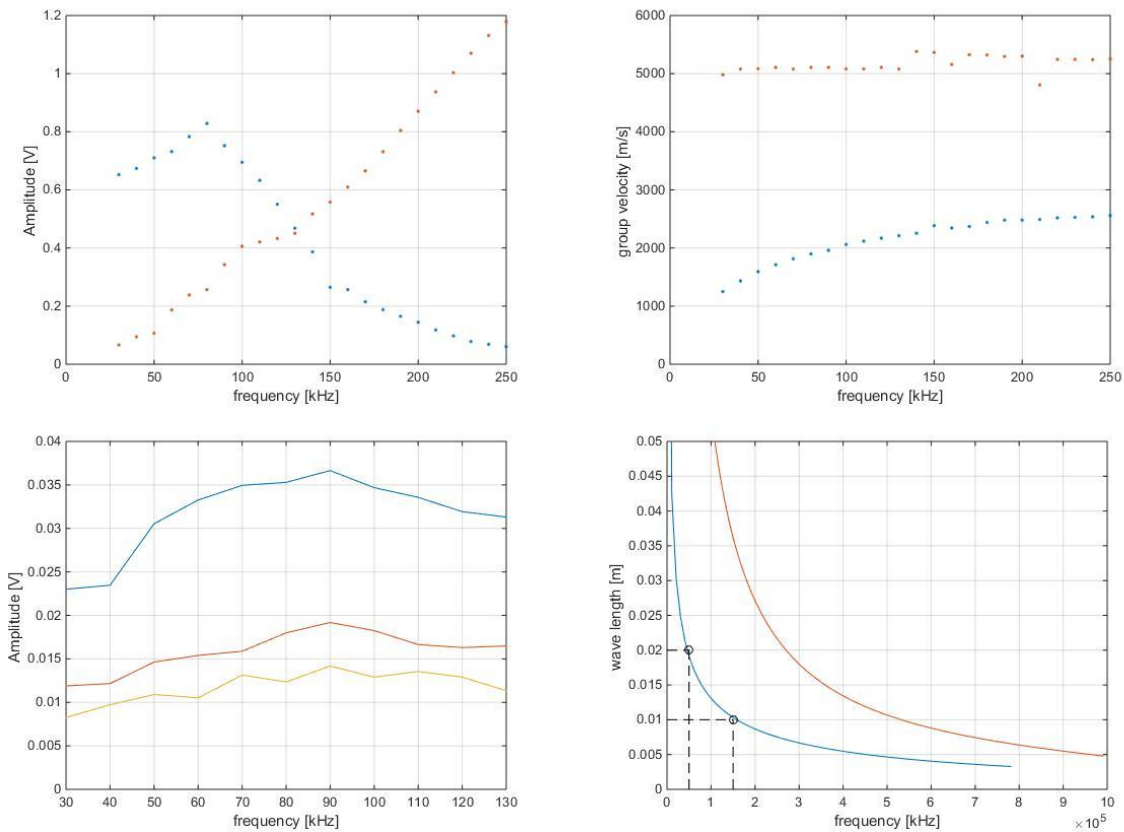
Im weiteren Verlauf der Wellenausbreitung des Bursts in der Platte (Abb. 2) ist ersichtlich, dass die größten Amplituden, gemessen mit einem 3D-Laser-Doppler-Vibrometer im kompletten Messweg bei 90 kHz zu finden sind. Gründe für diese Verschiebung zum erwarteten „Sweet Spot“ und zu den gemessenen Signalen am Sensor sind im weiteren Verlauf der Arbeit dargestellt.

Eine Absenkung der Amplitude kann während der Messung an unterschiedlichen Stellen in der Messkette durch Dämpfung oder Umwandlungsverlusten auftreten. In dieser Arbeit werden drei Bereiche der Messkette (vgl. [SCH11]) unterschieden:

Aktor: Signalausendung am Frequenzgenerator, Verstärkung, Ladungsverschiebung im Aktor und Einschwingvorgang des PWAS/Platte Systems zur Schallemission

Platte: Ausbreitung der Wellen in der Platte mit Dämpfung, Dispersion und Absorptionseffekte

Sensor: Einschwingvorgang des PWAS/Platte Systems zur Schalldetektion und Messung des Signals



**Abb. 2:** Sensorantwort der unterschiedlichen Lamb-Wellen-Moden in Abhängigkeit der Frequenz oben links, Gruppengeschwindigkeit der eintreffenden Wellen zur Unterscheidung der Wellenmoden oben rechts, Amplitude der Hüllkurven der Laser-Doppler-Vibrometermessungen in unterschiedlichen Abständen zum Aktor, Wellenlänge der beiden Grundmoden bei unterschiedlichen Frequenzen unten rechts,  $A_0$ -Mode (blau) und der  $S_0$ -Mode (rot)

Um eine detailliertere Analyse der Absenkung der Amplitude während der Messung zu erreichen, wurde der vollständige Weg zwischen Aktor und Sensor mit einem 3D-Laser-Doppler-Vibrometer (Polytec PSV-400-3D) vermessen. Die Rasterung der Messpunkte lag bei 1,1 mm bei einer Messlänge von 380 mm. Zur Veranschaulichung der Dämpfung in der Platte (2. Bereich) wurde das Abstandsgesetz für die Abnahme der Schallschnelle in Festkörpern herangezogen. Die jeweilige Schallschnelle  $v$  kann dabei nach einer bekannten

Schallpfadlänge  $d$  mit der Schallschnelle an anderer bekannter Stelle  $v_0$  verglichen werden. Dazu wird der Schallschnellenverlauf mit einer Exponentialfunktion nachgebildet, dessen Exponent ein konstanter Dämpfungsfaktor  $\alpha$  ist.

$$v = v_0 d^{-\alpha}$$

Untersucht wurde ein Bereich, welcher nicht mehr unter dem Einfluss der PWAS stand (Abb. 3, rote Fläche). Ebenfalls sind Überlagerungen von Wellenmoden mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten durch eine prinzipiell unendliche Platte vermieden worden.

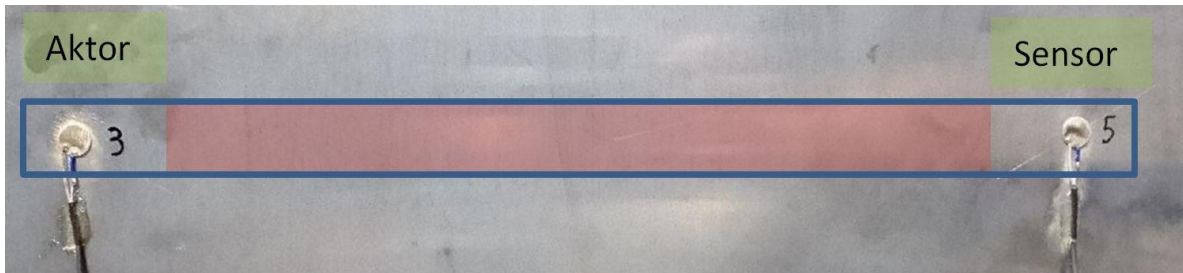


Abb. 3: Messaufbau mit Aktor und Sensor, der umrandete Bereich ist der Messbereich des 3D-LDV, die rote Fläche stellt den Bereich zur Messung der Plattendämpfung dar, PWAS-Mittelpunktabstand = 326,8 mm

Genutzt wurden hier die jeweiligen Maxima der Einhüllenden jedes Ortes bei jeder Mittenfrequenz, um die Rauscheinwirkung zu minimieren. Wird nun  $\alpha$  über die jeweilige Mittenfrequenz aufgetragen (Abb. 4), zeigt sich eine leichte Frequenzabhängigkeit des Dämpfungsfaktors, sowohl der  $A_0$ -Mode (blau) als auch der  $S_0$ -Mode (rot), in Falle der  $A_0$ -Mode leicht fallend mit steigender Frequenz. Der Dämpfungsfaktor der  $S_0$ -Mode wurde in Bereichen geringerer Frequenzen nicht ausgewertet, da die geringen Anregungsamplituden zu rauschbehaftet waren und keine nutzbaren Ergebnisse zeigten. Beide Kurvenverläufe zeigen allerdings, dass die Frequenzabhängigkeit, im Gegensatz zur frequenzabhängigen Amplitudenänderung der am PWAS gemessenen Signale (Abb. 2), nur schwach ausgeprägt ist. Bedingt durch diesen Vergleich ist anzunehmen, dass ein Großteil der Amplitudendifferenz im Aktor und Sensor, sprich während des Einschwingvorganges beim Emittieren und Detektieren der Schallwelle, auftritt.

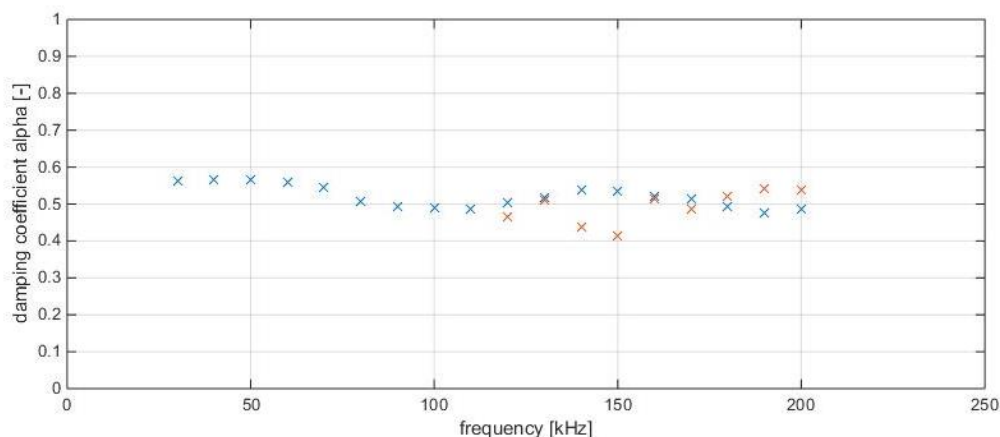
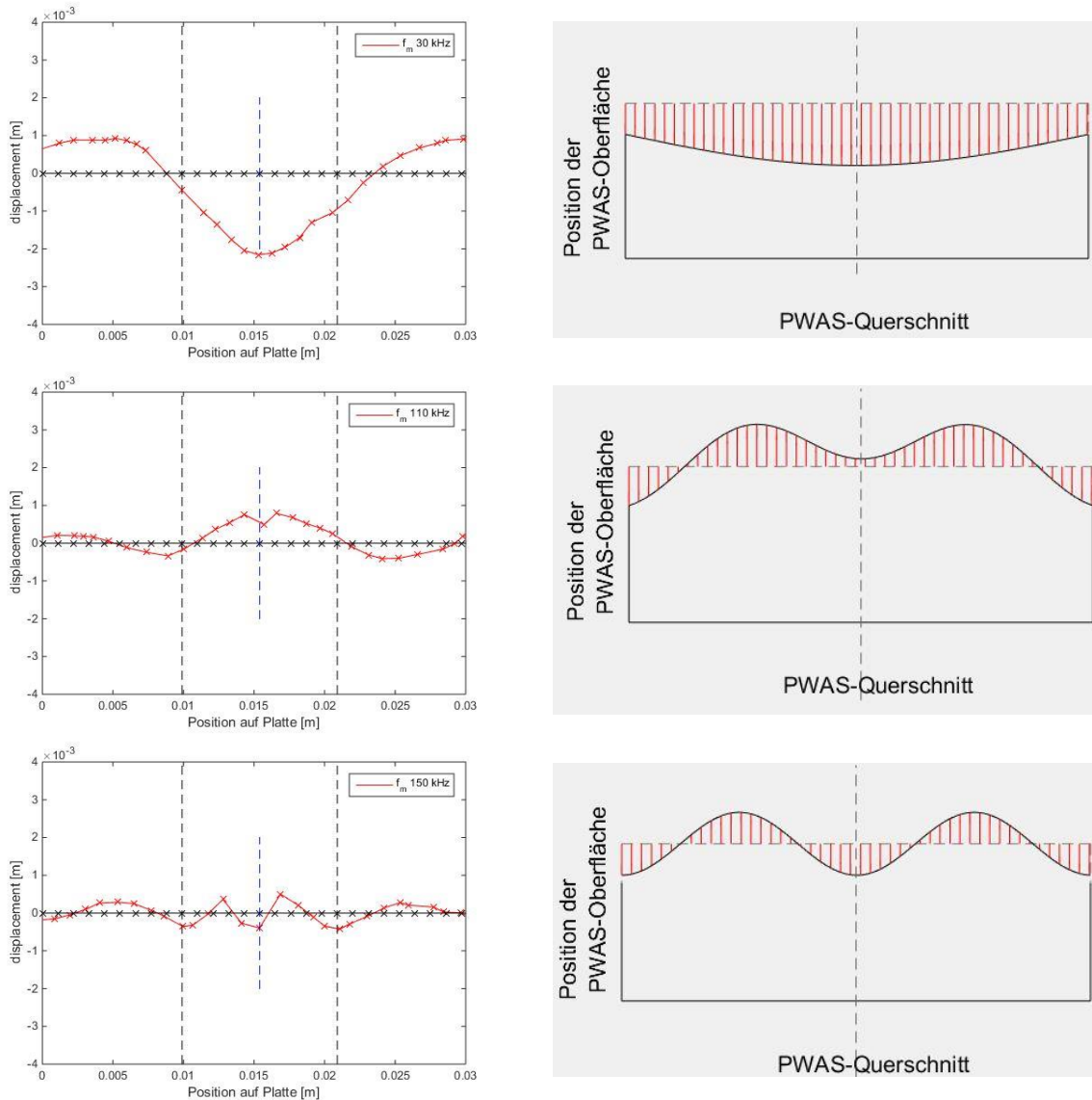


Abb. 4: Dämpfungsverhalten bei unterschiedlichen Mittenfrequenzen der  $A_0$ -Mode (blau) und der  $S_0$ -Mode (rot)

### 3. Untersuchung des Einschwingvorganges am PWAS

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, fällt der Dämpfung in der Platte in Bezug auf ihrer Frequenzabhängigkeit keine auffallende Beachtung zu. Da es allerdings, wie in Abb. 2 zu sehen ist, zu einer markanten Ausbildung der Amplitudenstärke bei bestimmten Frequenzbereichen kommt, werden in diesem Kapitel weitere Einflusskomponenten auf die Amplitude der Schwingung untersucht. An erster Stelle steht das Übertragungsverhalten der Kombination aus Piezoelement und Platte am Aktor sowie Sensor.



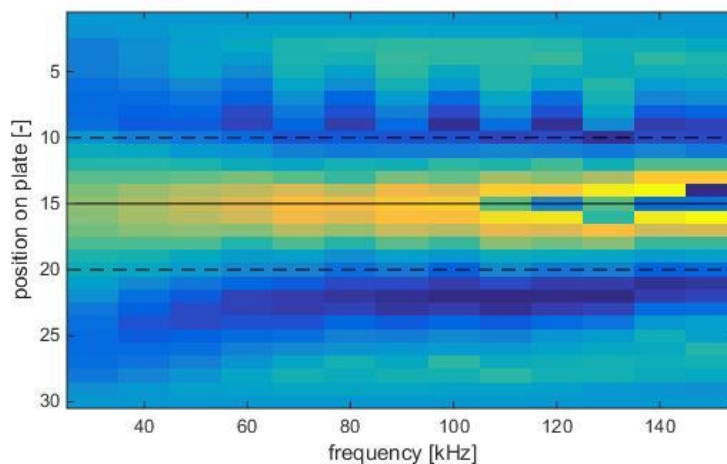
**Abb. 5:** Verformungsverhalten des PWAS-Aktors bei unterschiedlichen Frequenzen (30 kHz oben, 110 kHz Mitte, 150 kHz unten), Laser-Doppler-Vibrometer Messungen (links), Modell (rechts), schwarze Kreuze bzw. gestrichelte Linie bezeichnen die Ausgangsverformung, rote Linien rechts zeigen die Verschiebung der Modellpunkte während der Schwingung

Das piezoelektrische Element ist durch seine räumliche Ausdehnung als Bauteil mit finiter Geometrie zu sehen, was entsprechende Fragestellungen aufwirft. Die Anregung der Schwingung erfolgt nicht lokal an einem Punkt, sondern flächig, bzw. linienförmig, wenn die Struktur im Schnitt betrachtet wird (siehe Abb. 5). Dargestellt sind die Verschiebungen am PWAS und der näheren Umgebung, welche im Vergleich zur Geometrie des Piezoelements übertrieben dargestellt sind, um die Verformung anschaulich darzustellen. Zu sehen ist die maximale Verformung des Aktors bei einer Anregung von 30 kHz. Die

unterschiedlichen Verschiebungen der einzelnen Messpunkte in x-Richtung (in-plane) und in z-Richtung (out-of-plane) sind dabei stark von seiner Position auf dem PWAS und der anregenden Frequenz abhängig. Beide Komponenten ergänzen sich jedoch in den Schwingformen des PWAS und können gemeinsam untersucht werden.

Auf der rechten von Seite von Abb. 5 ist die Verformung des PWAS bei unterschiedlichen Mittenfrequenzen als Modell abgebildet. Bei 30 kHz bildet das piezoelektrische Element kein volles Schwingenspiel mit einem Offsetwert an den Rändern des Elements. Diesem Offset wird im Laufe der Untersuchung noch größeren Wert beigemessen, da er Aufschluss darüber gibt, inwiefern die PWAS-Geometrie mit der Plattenschwingung zusammenwirkt. Bei höheren Frequenzen, hier bspw. 150 kHz, ist ersichtlich, dass die Schwingung mit zwei kompletten Schwingenspielen beschrieben werden kann, die sich symmetrisch um den Aktormittelpunkt ausbreiten. Werden Schwingungen mit Mittenfrequenzen zwischen 30 kHz und 150 kHz untersucht, ist eine Mischform der beiden Wellenformen zu finden.

Zeigt man die Verschiebungen im Bereich des PWAS und näherer Umgebung mit allen genutzten Mittenfrequenzen ergibt sich (Abb. 6). Die Schwingformen des PWAS zeigen bei Frequenzen unter 100 kHz eine ähnliche Form, nämlich die mit einem einzelnen Wellenbauch. Bei höheren Frequenzen wird diese erste Schwingform mit der in Abb. 5 (unten) gezeigten zweiten Schwingform und überlagert.

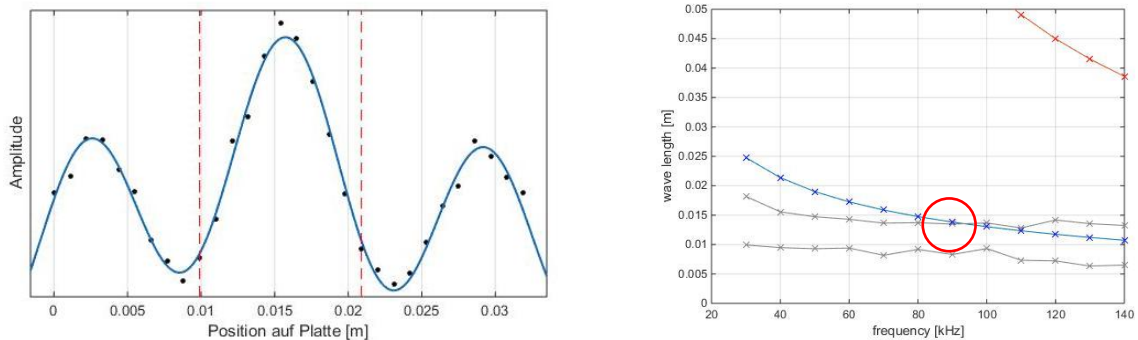


**Abb. 6:** Verformung des PWAS am jeweiligen Maximalpunkt des ausgesendeten Bursts am Aktor bei unterschiedlichen Frequenzen, schwarze gestrichelte Linien sind die Ränder des PWAS, schwarze durchgezogene Linie Mittelpunkt des PWAS, Messpunkte auf PWAS und in der näheren Umgebung

Der PWAS verhält sich demnach bei allen Frequenzen als eine in der Schnittebene zum PWAS-Mittelpunkt symmetrische Schallquelle (Abb. 7, links). Gut zu sehen ist, dass die Körpergrenzen des PWAS kein ganzes Schwingenspiel abdecken. Dieser Effekt ist mit dem oben erwähnten Offset der Verschiebung am PWAS-Rand verbunden. Die Verschiebungen des unvollständigen Schwingenspiels bewirken eine Verschiebung der Knotenpunkte der Schwingung, sowie eine Verschiebung der weiteren Wellenbäuche vom PWAS-Rand weiter in die Platte hinein. [GIU08] spricht dabei von einer effektiven Aktorlänge. Die Wellenlänge ist dementsprechend größer als durch die PWAS-Geometrie vorgegeben. Wird die Schwingform des PWAS-Platte-Systems mit einer Summe aus Sinus-Schwingungen nachmodelliert (Abb. 7, rechts), zeigen sich in dieser Summe dominante, wiederkehrende Wellenlängen (Abb. 7, rechts, grau). Diese besitzen wie erwartet bei einer Frequenz von 90

kHz eine Übereinstimmung mit der Wellenlänge der  $A_0$ -Mode der Plattenschwingung (blau). Diese Frequenz entspricht der Frequenz, welche die größte Amplitude innerhalb der Wellenausbreitung in der Platte besitzt, dem „Sweet Spot“ der  $A_0$ -Mode.

Diese dominanten Wellenlängen harmonisieren mit den charakteristischen Längen der oben erwähnten Schwingformen des PWAS, wobei die obere Kurve der ersten Schwingform und die untere Kurve der zweiten Schwingform entsprechen. Der Übergang der Schwingformen in Abb. 6 sowie auch der Schnittpunkt der Kurvenverläufe in Abb. 7 rechts (roter Kreis), findet im Bereich von 90-100 kHz statt. Das lässt darauf schließen, dass zur Anregung der Plattenschwingung immer auf die Schwingform mit der nächstliegenden kleineren Wellenlänge zur Plattenschwingung zurückgegriffen wird.



**Abb. 7: Schwingform des PWAS bei 40 kHz (gemessene Punkte schwarz, Ausgleichsfunktion blau), Grenzen des PWAS rote Linien (links), Vergleich der Wellenlänge der Plattenschwingung und der anregenden Schwingung (rechts, Plattenwellenlänge blau ( $A_0$ ) rot ( $S_0$ ), ermittelte Anregungswellenlänge grau)**

Vergleicht man die Messungen bei unterschiedlichen Frequenzen, zeigt sich eine immer stärkere Ausbildung der ersten Schwingform des PWAS(hier bei 90 kHz), bis eine Übereinstimmung der Wellenlängen vorliegt. Darüber hinaus wird die Schwingung dominierend mit der zweiten Schwingform ausgeführt (siehe Abb. 5). Auffällig ist die Übereinstimmung des Amplitudenmaximums der  $A_0$ -Mode bei 90 kHz (Abb. 2) und der maximal ausgebildeten ersten Schwingform des PWAS bei gleicher Frequenz. Daraus ist abzuleiten, dass diese Schwingformen die Anregung der  $A_0$ -Mode unterstützt und maximiert, solange die Wellenlänge der zu erregenden Mode kleiner ist, als die Wellenlänge der Plattenschwingung. Vor dem Grenzübergang befindet sich der Punkt maximaler Wellenanregung.

Bei höheren Frequenzen scheint diese Wellenform keinen Einfluss mehr auf die Anregung der  $A_0$ -Mode zu haben, wohingegen sich die Schwingform mit kürzerer Wellenlänge (zweite Form Abb. 5) stärker in den Fokus drängt. Mit den gegebenen Kurvenverläufen ist ein zweiter Schnittpunkt der Wellenlänge der  $A_0$ -Mode mit einer der modellierten Wellenlängen zu erwarten. Verbunden damit ist ein zweiter „Sweet Spot“ Amplitude der  $A_0$ -Mode. Gleichzeitig ist bei höheren Frequenzen ebenfalls eine Überschneidung der Wellenlänge der  $S_0$ -Mode mit einer der Vergleichskurven zu erwarten, was die Ergebnisse aus Abb. 2 oben links widerspiegeln, wobei das Maximum der  $S_0$ -Mode bei höheren Frequenzen zu suchen ist, als in dem untersuchten Frequenzbereich. Dieser Verlauf der  $S_0$ -Mode ist ebenfalls in [GIU08] dargestellt.

Zusammenfassend sei festgestellt, dass eine maximale Einbringung der Schwingenergie für die  $A_0$ - und  $S_0$ -Mode durch eine Übereinstimmung der Wellenlänge der Plattenschwingung und der dominanten Schwingform des PWAS ausschlaggebend ist.



Diese ist nicht alleine durch die Geometrie des PWAS zu bestimmen, da eine Interaktion mit der aufgeklebten Platte zu jeder Zeit stattfindet. Deshalb wird von einer effektiven Aktorlänge (hier Aktordurchmesser) gesprochen, welche für eine optimale Energieeinbringung ausgelegt werden kann. Der effektive Aktordurchmesser beträgt bei der genutzten Konfiguration 13,68 mm für die  $A_0$ -Mode. Zum Vergleich beträgt der reale Aktordurchmesser 10 mm. Laut [GIU08] haben Randeffekte des PWAS wie der Schubübertragung und Diffusionseffekte Einfluss auf den effektiven Aktordurchmesser.

#### **4. Anregung außerhalb der „Sweet Spots“ mit geringerer Frequenz**

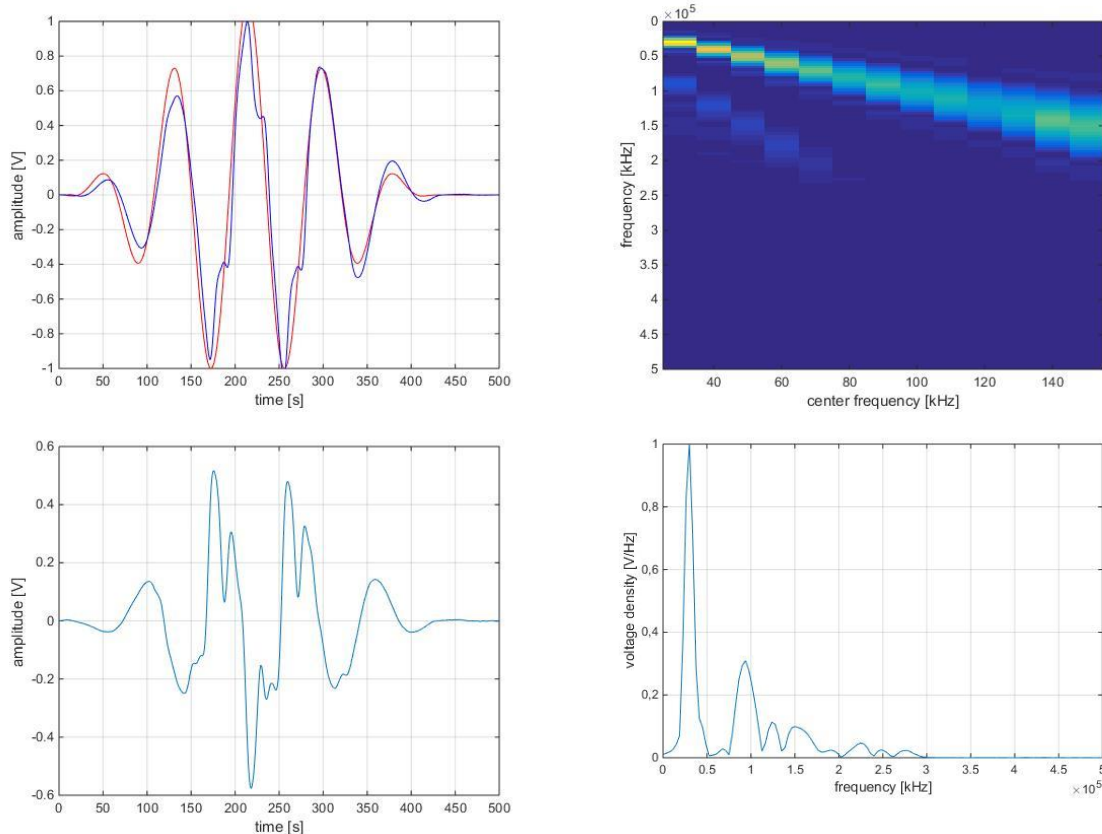
Die Anregung der Platte in den „Sweet Spots“ wurde im vorherigen Kapitel beschrieben. Wird die Platte nun mit einer von der optimalen Frequenz verschiedenen Frequenz angeregt, wird keine maximale Amplitude der Plattenschwingung erreicht. Der zugrundeliegende Mechanismus wurde im vorigen Kapitel erklärt. Wie beschrieben findet eine Interaktion der Platte mit dem PWAS statt. Der PWAS wird mit einer definierten Spannung beaufschlagt und bringt mit seiner Verformung Schwingenergie in die Platte ein. Dieser Effekt wird beim Aktor und Sensor jeweils invers benutzt.

Stimmt die halbe Wellenlänge der Platte mit der effektiven Aktorlänge überein, stellt sich eine Art Verstärkung oder Resonanz ein, da beide Schwingungen eine gleiche Phasenlage besitzen und positiv interferieren. Wird die Platte jedoch mit einer Frequenz angeregt, welche sich unterhalb der „Sweet Spot“-Frequenz befindet, überlagern sich die anregende Schwingung und die Plattenschwingung ebenfalls, können dabei aber positive wie negative Interferenzen ausbilden. Wie in Abb. 8 oben links sichtbar, weicht die im PWAS-Mittelpunkt gemessene Burstform der Schwinggeschwindigkeit von der in den PWAS eingegebenen Form (Abb. 1, oben) ab. Dies ist durch die erwähnte Überlagerung zu erklären. Überführt man nun alle Zeitsignale im PWAS-Mittelpunkt in den Frequenzbereich, zeigt sich, dass zusätzlich zur gewählten Mittenfrequenz und ihren Nebenkeulen ein weiteres Frequenzband mit dem Dreifachen der Mittenfrequenz erscheint (Abb. 8 oben rechts). Dieses zweite Nebenband der Anregung ist bedingt durch die nicht übereinstimmende Wellenlänge der anregenden Schwingung und der Plattenschwingung, sodass eine Differenz in der lokalen Phasenlage entsteht.

Verglichen werden nun Schwinggeschwindigkeit im PWAS-Mittelpunkt über der Zeit und das vorgegebene Signal des Frequenzgenerators. Beide sind zum Vergleich normiert und in ihrer Phasendifferenz bereinigt. Zu Beginn eines Bursts zeigt die Kurve der normierten Schwinggeschwindigkeit (Abb. 8, oben rechts, blau) einen ähnlichen Verlauf wie die des eingebrachten Spannungssignals (rot), wenn auch mit geringerer Amplitude. Ab dem vierten Wellenpeak verlässt die Verformungskurve allerdings abrupt die vorgegebene Bahn der eingebrachten Spannung. Dies ist damit zu erklären, dass der PWAS von einer weiteren Kraft verformt bzw. beschleunigt wurde, die in diesem PWAS-Platte-System nur durch die harmonische Schwingung der Platte zu erbringen ist.

Bildet man die Differenz der beiden Signale zeigt sich, dass am Differenzsignal (Abb. 8, unten links) eine Überlagerung der Grundfrequenz und der dritte Harmonische der Grundfrequenz vorliegt. Im Frequenzbereich (Abb. 8, unten rechts) ist dies noch deutlicher zum Ausdruck gebracht, wobei noch weitere Anteile entsprechend höherer Harmonischer zu finden sind. Dieser Mechanismus ist verbunden mit der unterschiedlichen Wellenlänge

der Plattenschwingung und der effektiven PWAS-Länge und damit für entsprechende Frequenzbänder unvermeidlich. Er tritt bei Anregung mit geringerer Frequenz als der „Sweet Spot“-Frequenz des PWAS-Platte-Systems auf. Oberhalb dieser Grenzfrequenz ist diese Nebenkeule nicht mehr aufzufinden oder geht im allgemeinen Messrauschen unter, was nahelegt, den gewählten Frequenzbereich der Mittenfrequenz oberhalb des „Sweet Spots“ anzusiedeln, um unerwünschte Nebenbänder in der Anregung zu vermeiden.



**Abb. 8:** Ungewollte Anregung einer Harmonischen des Grundsignals durch Differenzen in der Wellenlänge der Plattenschwingung und der effektiven PWAS-Länge, Abweichung der Schwinggeschwindigkeit von der Anregung (oben links), Entstehung eines Nebenfrequenzbandes (oben rechts) mit dreifacher Frequenz, Differenzsignal der Funktionen aus Abb. 7 oben links (unten links), Frequenzspektrum des Differenzsignals, normiert (unten rechts)

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das Schwingverhalten einer piezoelektrisch angeregten Plattenschwingung untersucht. Bestandteile waren dabei die Messungen der Spannungsverläufe an Aktor sowie Sensor, als auch eine Überwachung der Schwingungen in der Platte und auf den PWAS mithilfe eines 3D-Laser-Doppler-Vibrometers, um den Einfluss der Platte und der piezoelektrischen Elemente auf die Schwingamplituden zu untersuchen. Gezeigt wurde eine stark frequenzabhängige Ausbreitung der Welle zwischen Aktor und Sensor. Geringen Einfluss hatte dabei die Dämpfung innerhalb der Plattenstruktur, sodass der Fokus dieser Arbeit vor allem auf die Anregung der Schwingung am Aktor gelegt wurde. Hier wurde aufgezeigt, dass bedingt durch die charakteristische Baugröße des Aktors eine signifikante Frequenzabhängigkeit im Verhältnis der anregenden Amplitude am Frequenzgenerator und der gemessenen Plattenschwingung besteht. Dieses bewirkt eine Generierung sogenannter „Sweet Spots“, in denen eine Anregung der Schwingung der Struktur einzelner Lamb-Wellen-Moden optimal stattfinden kann. Die

Schwingform des PWAS kann dabei in unterschiedliche Formen unterteilt werden, welche bei entsprechenden Frequenzen und damit Wellenlängen verstärkt oder vermindert zur Anregung genutzt werden. Diese Schwingformen kann die Anregung entsprechender Moden begünstigen. Zuletzt ist gezeigt worden, dass eine Anregung unterhalb der zum „Sweet Spot“ gehörenden Frequenz, eine Stimulation höherer Harmonischen zur Auswirkung hat. In Zukunft ist zu untersuchen, ob durch eine geschickte Wahl des Anregungssignals eine Anregung dieser Harmonischen unterbunden werden kann.

## 6. Quellen

- [SCR90] Scruby, C.B.; Drain L.E.: Laser Ultrasonics Techniques and Applications, Hilger (1990)
- [PAR13] Park, B; Sohn H.; Yuem C.-M.; Truong T.C.: Laser ultrasonic imaging and damage detection for a rotating structure, Structural Health Monitoring (2013)
- [LAM17] Lamb, H.: On waves in an elastic plate, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, Band 93, Nr. 648 (1917)
- [GIU05] Giurgiutiu, V: Tuned Lamb Wave Excitation and Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring, Journal of Intelligent Material Systems and Structures (2005)
- [MAR71] Martin, R.M.: Piezoelectricity, Physical Review B (1972)
- [SCH11] Schubert, K., Block, T.B.; Hermann A.S.: Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Lamb-Wellen in viskoelastischen Faserverbundwerkstoffen, DGZfP-Jahrestagung (2011)
- [GIU08] Giurgiutiu, V: Structural Health Monitoring, Academic press (2008)