

# Flächige Analyse der Ausbreitung von Lamb-Wellen an gekrümmten, anisotropen Strukturen

Florian RADDATZ \*, Wolfgang HILLGER \*\*, Daniel SCHMIDT \*\*\*,  
Artur SZEWIECZEK \*\*\*, Peter WIERACH \*\*\*, Michael SINAPIUS \*\*\*\*

\* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Sportallee 54, 22335 Hamburg,  
Florian.Raddatz@dlr.de

\*\* Ingenieurbüro Dr. Hillger, Wilhelm-Raabe-Weg 13, 38110 Braunschweig

\*\*\* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

\*\*\*\* Institut für Adaptronik und Funktionsintegration (iAF), TU Braunschweig,  
Langer Kamp 6, 38106 Braunschweig

**Kurzfassung.** Die zerstörungsfreie Prüfung und Überwachung komplexer Faserverbundstrukturen mit Lamb-Wellen erfordert eine umfassende Berücksichtigung der Probengeometrie, der lokalen, richtungsabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten für jeden Wellenmode und der strukturell bedingten Einflüsse auf die Wellenausbreitung im unbeschädigten Bauteil. Nachfolgend werden insbesondere die Einflüsse auf die Laufzeit von Lamb-Wellen verdeutlicht und es wird gezeigt, wie mit Hilfe eines speziellen 3D-Vibrometrie-Systems auch punktuell Wellenmoden identifiziert werden können. Aus den gewonnenen Messdaten lassen sich die Laufzeit der Wellenmoden und deren Ausbreitungsrichtung in einem komplexen Bauteil bestimmen und zur Schadenslokalisierung nutzen.

## Einführung

Verfolgt man die konstruktive Entwicklung moderner Flugzeuge, ist festzustellen, dass die Möglichkeiten des metallischen Leichtbaus weitestgehend ausgeschöpft sind. Stattdessen werden immer mehr Komponenten aus leichteren und dennoch steiferen Faserverbundstrukturen hergestellt. Hierbei kommen überwiegend kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zum Einsatz. Diese fanden zunächst in sekundären Strukturelementen und Steuerflächen Verwendung. Heute gehören u.a. Seitenleitwerke, Steuerflächen, Druckschotte und Radome aus faserverstärkten Kunststoffen zum Standard jedes neuen Flugzeuges. Im Zuge dieser fortschreitenden Entwicklung steigt nicht nur der Anteil von Faserverbundwerkstoffen an der Gesamtstruktur, sondern auch die Größe und Komplexität der Bauteile.

Im Rahmen der Fertigung lassen sich diese Bauteile häufig noch automatisiert prüfen, wenn auch mit hohem Aufwand [1]. Sobald sie jedoch untrennbarer Bestandteil eines Flugzeuges sind, entziehen sie sich der automatisierten zerstörungsfreien Prüfung auf



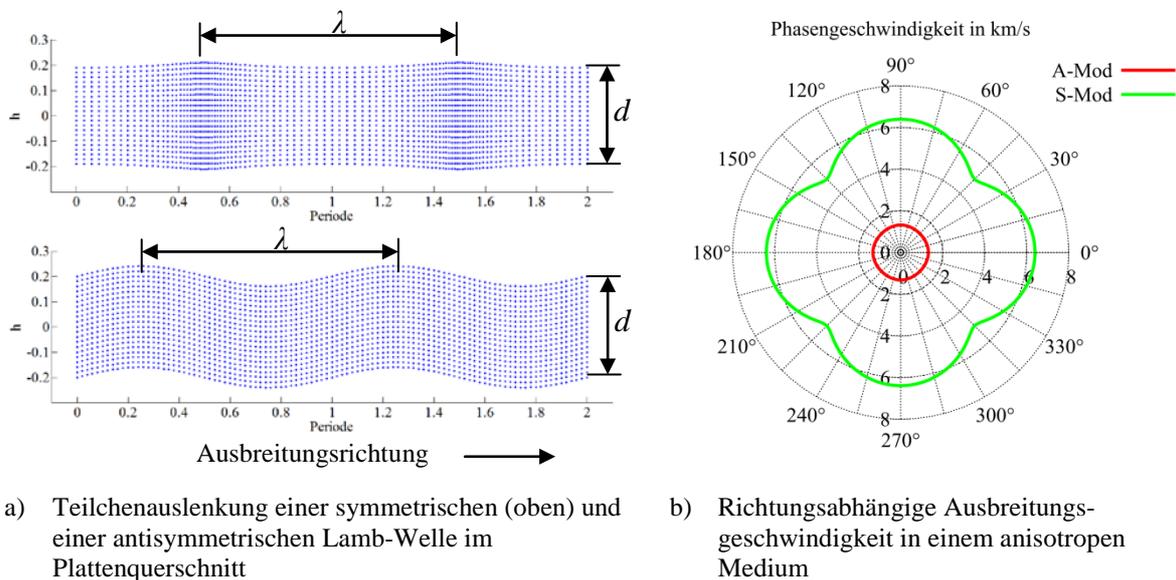
Grund ihrer eingeschränkten Zugänglichkeit und ihrer Größe. Daher bleibt nur die manuelle Prüfung mit handgeführten Geräten. Lässt sich der zu prüfende Bereich nicht deutlich einschränken, ist diese Methode sehr zeit- und arbeitsintensiv. Die Interpretation der Messergebnisse muss direkt durch erfahrenes Personal durchgeführt werden. Dies wirkt sich sowohl auf die Fehleranfälligkeit der Prüfung als auch auf die Qualität der Dokumentation negativ aus.

Eine Alternative zu konventionellen, manuellen Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung stellt die Prüfung und Überwachung von Strukturen mittels geführter Wellen dar. Diese ermöglichen bei punktueller Sensorapplikation potentiell die Erfassung großer Bauteilbereiche und die Lokalisierung von Schäden. Zudem bietet die permanente Installation eines Sensornetzwerkes die Möglichkeit, Strukturen auch außerhalb der üblichen Wartungsintervalle automatisch auf Schäden zu überwachen und diese frühzeitig zu erkennen.

Nachfolgend wird erläutert, welche Aspekte im Zusammenhang mit der Ausbreitung geführter Wellen in komplexen Strukturen zu beachten sind und wie geeignete Messtechnik und Auswertalgorithmen zur Lösung der bestehenden Probleme beitragen können.

## 1. Lamb-Wellen in einfachen Strukturen

Als Lamb-Wellen werden Schallwellen bezeichnet, die sich in dünnwandigen Strukturen parallel zur Oberfläche ausbreiten. Die Wandstärke  $d$  der Struktur ist in der Regel deutlich kleiner als die Wellenlänge  $\lambda$ .

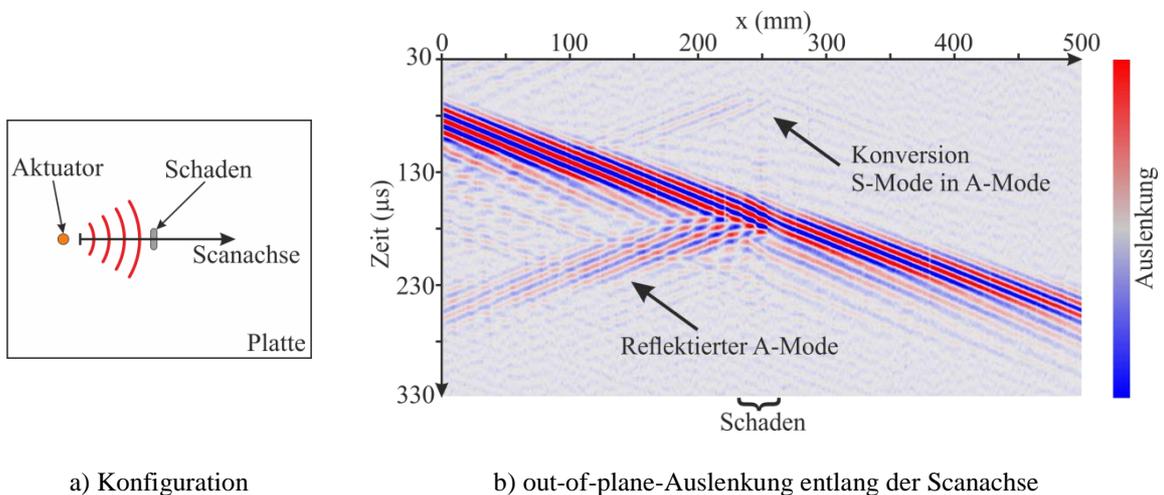


**Abb. 1:** Ausbreitung symmetrischer und antisymmetrischer Lamb-Wellen

Lamb-Wellen können in verschiedenen Wellenmoden auftreten. In Abb. 1a) ist schematisch die Teilchenauslenkung im Querschnitt einer Platte beim Durchlaufen einer symmetrischen (S-Mode) und einer antisymmetrischen (A-Mode) Lamb-Welle dargestellt. Der S-Mode zeichnet sich durch Teilchenschwingungen parallel zur Oberfläche (in-plane) und zur Ausbreitungsrichtung aus. Infolge der lokalen Verdichtungen und Verdünnungen entstehen periodische Druckspannungen im Material. Teilchenauslenkungen senkrecht zur Oberfläche (out-of-plane) der Platte treten nur als Folge der Querkontraktion auf. In

antisymmetrischen Wellen hingegen erfolgt die Teilchenschwingung vorrangig out-of-plane und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Es treten lokale Schubspannungen auf. In der Regel treten bei einer Anregung mit einer einzigen Frequenz stets beide Wellenmoden gleichzeitig auf. Sie unterscheiden sich in ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit auch in der Wellenlänge. Antisymmetrische Wellen breiten sich stets langsamer aus als symmetrische Wellen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt im Wesentlichen von der Steifigkeit des Materials ab und ist in anisotropen Faserverbundwerkstoffen somit richtungsabhängig. Abb. 1b) verdeutlicht dies beispielhaft. Neben den beschriebenen Wellenmoden existieren weitere Moden, teils höherer Ordnung. Diese werden hier jedoch nicht weiter betrachtet.

Ähnlich wie bei der konventionellen Ultraschallprüfung lassen sich auch bei Lamb-Wellen Interaktionen mit Unstetigkeiten im Material beobachten. Dabei können nicht nur klassische Effekte, wie Reflexion, Brechung, Dämpfung und Abschattung auftreten, sondern auch Umwandlungen der möglichen Wellenmoden ineinander. Als häufigster Schadensindikator dient die Umwandlung des symmetrischen Wellenmodes in den antisymmetrischen Mode.



a) Konfiguration

b) out-of-plane-Auslenkung entlang der Scanachse

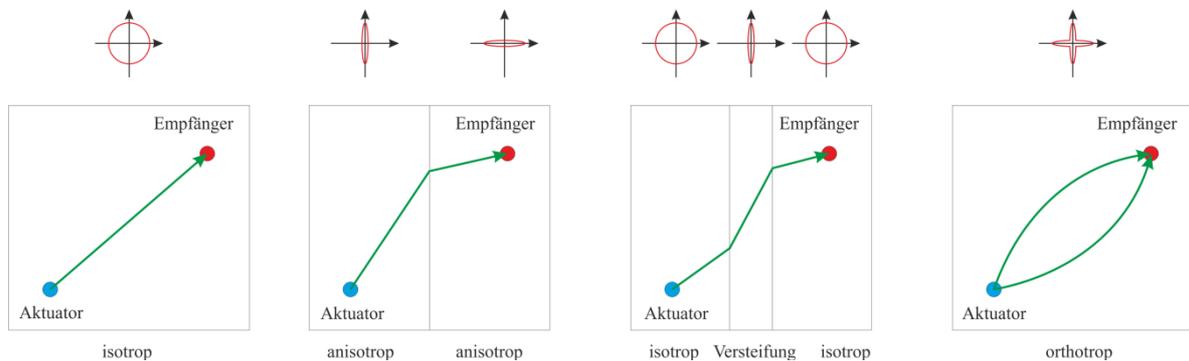
**Abb. 2:** Modenkonzersion und Reflexion an einer Flachbodenbohrung

In Abb. 2a) ist die Konfiguration eines Messaufbaus dargestellt. Auf einer ebenen, quasiisotropen Platte befindet sich ein Aktuator, welcher Lamb-Wellen anregt. Entlang der Scanachse, wird der zeitliche Verlauf der Auslenkung der Probenoberfläche gemessen. Dieser ist in Abb. 2b) dargestellt. Aufgrund der geringen Amplituden des symmetrischen Modes ist in dieser Darstellung nur der A-Mode zu erkennen, welcher vom Aktuator ausgeht und sich in positiver x-Richtung ausbreitet. Unter der Annahme eines (quasi-) isotropen Mediums und dass die Scanachse durch den Aktuator verläuft, lassen sich aus der Darstellung die Gruppen- und Phasengeschwindigkeit des A-Modes bestimmen. Vor dem Eintreffen dieses primären A-Modes ist mittig in der Darstellung ein weiterer A-Mode sichtbar. Dieser entsteht durch die Konversion des S-Modes an der Schadstelle. Aus diesem frühen Auftreten lässt sich auf eine strukturelle Unstetigkeit schließen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich der vom Aktuator ausgehende A-Mode innerhalb der Schadstelle nicht nur langsamer ausbreitet, sondern auch an dieser reflektiert wird.

## 2. Lamb-Wellen in komplexen Strukturen

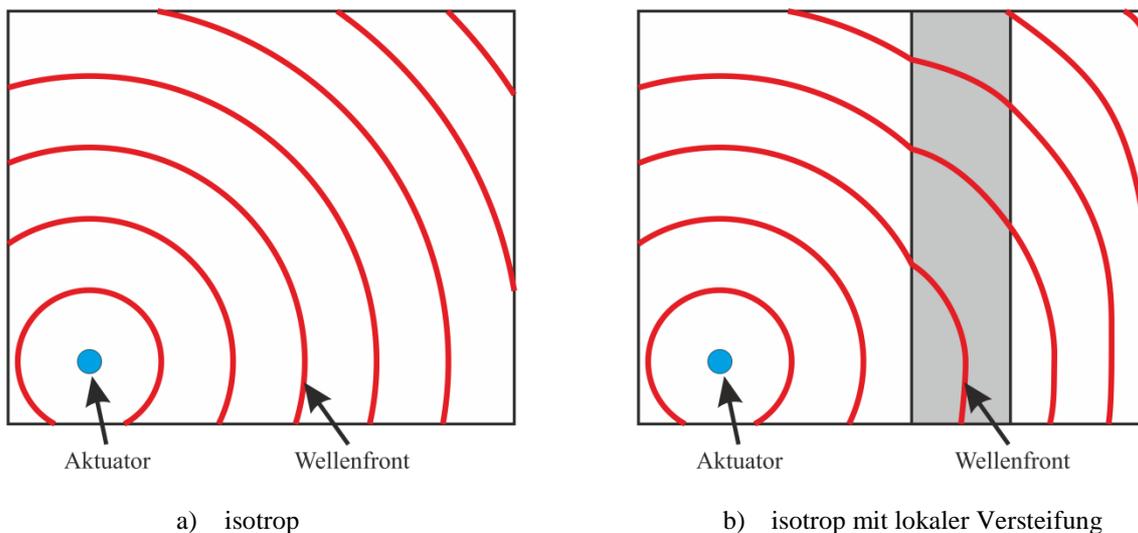
Bisher wurde nur die Ausbreitung von Lamb-Wellen in einfachen Strukturen betrachtet. Für den Übergang zur praktischen Anwendung muss der Einfluss komplexerer Strukturen auf die Wellenausbreitung berücksichtigt werden.

In diesem Zusammenhang werden unter komplexen Strukturen vor allem Bauteile mit (mehrfachen) Krümmungen, Materialkombinationen und Versteifungen verstanden, wie sie im Flugzeugbau häufig zu finden sind. Die Kombination verschiedener Materialien betrifft nicht nur Verbindungen zwischen Metallen und Faserverbundwerkstoffen, sondern auch Sandwich-Bereiche und Änderungen des Laminataufbaus innerhalb des Bauteils. Die Präsenz dieser Komponenten führt dazu, dass auch im unbeschädigten Bauteil Interaktionen der Wellen mit Steifigkeitssprüngen auftreten. Zudem ändern sich mit der lokalen Steifigkeit auch die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wellenmoden.



**Abb. 3:** Pfade kürzester Laufzeit in Medien mit lokal unterschiedlichen Steifigkeiten

Betrachtet man den Pfad, den ein Punkt auf einer Wellenfront zwischen einem Aktuator und einem Empfänger zurücklegt, so ist dies stets der schnellste Pfad. Abb. 3 verdeutlicht schematisch, wie sich dieser Pfad ändert, wenn ein Bauteil lokal unterschiedliche Steifigkeiten aufweist. Die Diagramme stellen die richtungsabhängige Geschwindigkeit im jeweiligen Bereich dar. Hier wird deutlich, dass eine geradlinige Ausbreitung nur für den isotropen Fall ohne lokale Steifigkeitsänderungen zutrifft.



a) isotrop

b) isotrop mit lokaler Versteifung

**Abb. 4:** Verzerrung der Wellenfront infolge lokal variierender Steifigkeiten

Die unmittelbare Folge dieser Pfadänderung ist eine Verzerrung der sich ausbreitenden Wellenfront. Dies ist in Abb. 4 am Beispiel einer isotropen Platte mit einer lokalen Versteifung dargestellt. In Folge der höheren Steifigkeit innerhalb des grau markierten Bereiches breitet sich die Welle dort mit einer höheren Geschwindigkeit aus. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lamb-Wellen bei einer Frequenz nicht nur abhängig von der Steifigkeit, sondern auch von der Materialdicke ist, können derartige Verzerrungen ebenfalls durch Dickensprünge hervorgerufen werden, auch wenn auf beiden Seiten des Sprunges vergleichbare Steifigkeiten vorliegen.

### 3. Flächige Detektion von Lamb-Wellen mittels 3D-Vibrometrie

Aufgrund der komplexen Wellenausbreitung in realen Bauteilen können viele Methoden zur Auswertung nicht mehr uneingeschränkt eingesetzt werden. Dies ist insbesondere dann problematisch, wenn zur Erfassung des Wellenfeldes ein Messverfahren verwendet wird, welches nur out-of-plane-Schwingungen erfasst, z.B. einfache Vibrometrie-Messungen oder Messungen mit luftgekoppelten Ultraschallwandlern. Da sich aus dem Zeitsignal in einem Punkt nicht eindeutig bestimmen lässt, welcher Wellenmode zu welcher Zeit auftritt, werden hier häufig B-Bilder (siehe Abb. 2) erstellt. Die Wellenmoden werden anschließend anhand der im B-Bild ermittelten Geschwindigkeiten identifiziert. Die Erstellung eines B-Bildes setzt jedoch voraus, dass die Wellenausbreitung geradlinig erfolgt. Dies kann in komplexen Strukturen jedoch nicht gewährleistet werden. Es ist daher erforderlich ein Messverfahren zu nutzen, welches punktuelle Aussagen darüber ermöglicht, welcher Wellenmode zu jedem Zeitpunkt vorliegt.

Eine Lösung für diese Aufgabe stellt die 3D-Vibrometrie dar. Hierbei handelt es sich um eine optische Schwingungsmessung auf der Bauteiloberfläche mit Hilfe eines Laser-Vibrometers. Am DLR wurde hierzu ein Messsystem entwickelt, welches auf die speziellen Anforderungen der hochaufgelösten, flächigen und dreidimensionalen Erfassung von Lamb-Wellen an gekrümmten Strukturen abgestimmt ist. Die Grundlage bildet ein modulares Ultraschallsystem (Dr. Hillger USPC4000 AirTech+), welches ursprünglich für die bildgebende Prüfung mit luftgekoppelten Ultraschallwandlern entwickelt wurde. Die integrierte Hochfrequenz-Ultraschalltechnik ermöglicht in Kombination mit einem mobilen Manipulator auch herkömmliche, bildgebende Impuls-Echo-Prüfungen [2]. Der integrierte Verstärker zur Prüfung mit luftgekoppelten Sensoren lässt sich direkt für die Anregung von Lamb-Wellen mit einem Piezo-Aktuator verwenden. An Stelle eines Ultraschallsensors wird zur Erfassung der Lamb-Wellen ein eigens entwickeltes Sensorsystem verwendet. Der schematische Aufbau ist in Abb. 5 dargestellt.

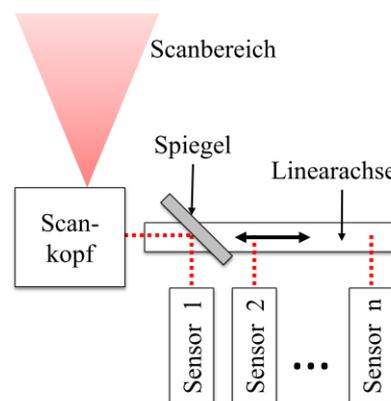


Abb. 5: Schematischer Aufbau des Sensorsystems

Das System ermöglicht eine variable Anordnung mehrerer optischer Sensoren. Hierzu zählen vor Allem ein Einpunkt-Vibrometer und ein Laser-Distanz-Sensor. Ein Spiegel auf einer Linearachse wird vor den zu verwendenden Sensor gefahren und leitet den Messstrahl in einen 2D-Scankopf. Dieser ermöglicht eine schnelle und genaue Abtastung des Messfeldes und erlaubt somit auch hochaufgelöste, flächige Messungen. Mit Hilfe des Distanzsensors lässt sich die Probengeometrie erfassen, was insbesondere für komplexe und gekrümmte Strukturen von Bedeutung ist. Somit sind auch die relative Lage der Probe zum Messsystem und die Ausrichtung des Messvektors an jedem Punkt bekannt. Die Erfassung der Lamb-Wellen erfolgt mit einem Laser-Vibrometer. Dieses detektiert an jedem Punkt den zeitlichen Verlauf der Auslenkung der Probenoberfläche parallel zum Messstrahl und gibt diesen als Spannung aus. Zur Datenerfassung lässt sich das Vibrometer daher direkt an das Ultraschallsystem anbinden. Der schematische Aufbau des Messsystems und die Interaktionen der Komponenten sind in Abb. 6 dargestellt.

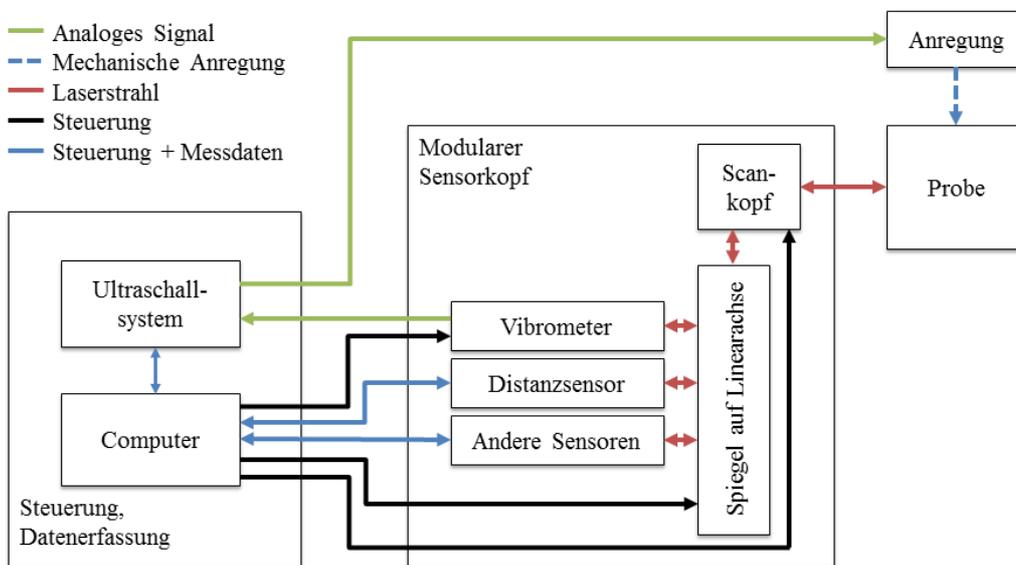


Abb. 6: Schematischer Aufbau des Messsystems

Die Eigenschaft des Vibrometers, stets Schwingungen parallel zum Messstrahl zu detektieren, lässt sich zur Bestimmung der räumlichen Auslenkung eines Punktes nutzen. Hierzu ist es erforderlich, dieselbe Messung an jedem Punkt aus drei räumlich unabhängigen Richtungen durchzuführen, wie in Abb. 7a) dargestellt [3].

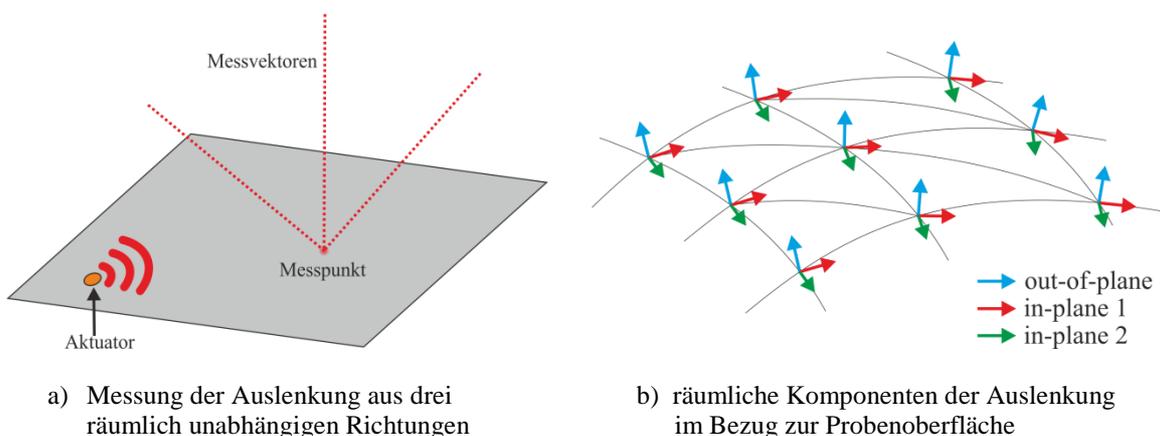
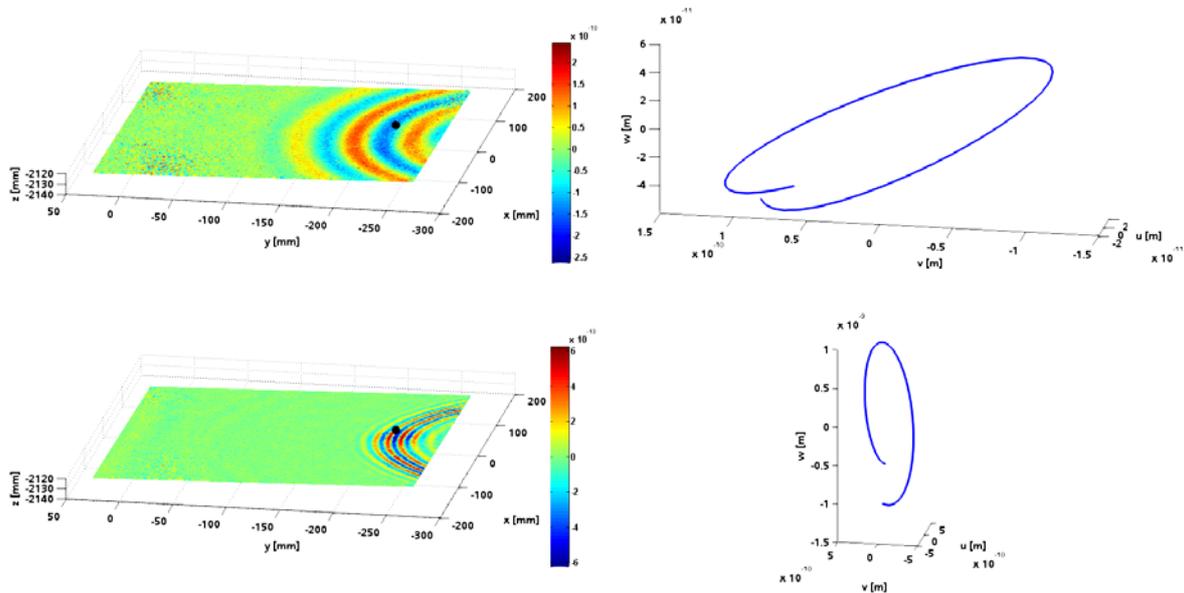


Abb. 7: 3D-Vibrometrie an gekrümmten Strukturen

Zur Bestimmung der räumlichen Auslenkung eines Punktes sind, wie in Abb. 7 dargestellt, drei Messungen aus unterschiedlichen Richtungen erforderlich. Da die Richtungen der Messvektoren bekannt sind, können die gemessenen Auslenkungen orthogonalisiert und in Bezug zur Probenoberfläche gebracht werden. Dabei ist es unerheblich, ob die Probe eben oder (mehrfach) gekrümmt ist. In Abb. 8 sind beispielhaft die in-plane-Auslenkung und die räumliche Trajektorie eines Punktes auf einer Platte beim Durchlaufen des S- und A-Modes dargestellt.

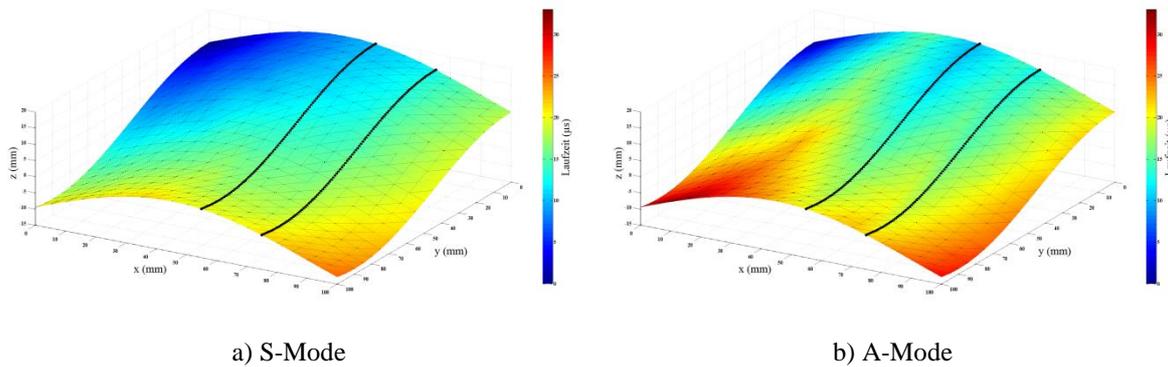


**Abb. 8:** Momentaufnahme der in-plane-Auslenkung und räumliche Trajektorie über eine Periode für S-Mode (oben) und A-Mode (unten) in einer Platte

Die Darstellungen verdeutlichen die näherungsweise elliptischen Bahnen, auf denen sich ein Punkt auf der Probenoberfläche beim Durchlaufen einer Lamb-Welle bewegt. Aus der räumlichen Lage dieser Ellipsen lässt sich bestimmen, welcher Wellenmode zu jedem Zeitpunkt vorliegt und in welche Richtung sich dieser ausbreitet. Somit lassen sich auch die Laufzeiten und die lokalen Geschwindigkeiten für jeden Punkt und jeden Wellenmode ermitteln. Eine noch präzisere Bestimmung der Ausbreitungsrichtung in einem Punkt lässt sich unter Einbeziehung zweier weiterer Messpunkte in unmittelbarer Nachbarschaft erreichen. [4]

#### 4. Schadenslokalisierung

Mit den aus der 3D-Vibrometrie gewonnenen Daten ist es möglich, auch auf komplexen, gekrümmten Bauteilen die Laufzeit eines Wellenmodes ausgehend von einem beliebigen Punkt näherungsweise zu bestimmen. Dabei werden sowohl die lokalen, richtungsabhängigen Geschwindigkeiten, als auch spezielle, lokale Effekte, z.B. Modenumwandlungen an Steifigkeitssprüngen, berücksichtigt.



**Abb. 9:** Laufzeiten in einer mehrfach gekrümmten Struktur mit Modenumwandlung

Die Laufzeiten für den symmetrischen und antisymmetrischen Wellenmode sind in Abb. 9 beispielhaft für eine fiktive, mehrfach gekrümmte Platte dargestellt. Die schwarzen Linien repräsentieren den Übergang zu einem Bereich höherer Steifigkeit. Bei genauer Betrachtung lässt sich bereits anhand der Laufzeiten des S-Modes der Einfluss des Bereiches höherer Steifigkeit erkennen. Noch deutlicher wirkt sich die Konversion des S-Modes in den A-Mode entlang der Steifigkeitssprünge aus. Die berechnete Laufzeit gilt jeweils für das erste Eintreffen eines Wellenmodes, unabhängig davon, ob dieser vom Aktuator angeregt wird oder durch Modenkonversion entsteht. Aufgrund der Modenkonversion entspricht die Laufzeit des A-Modes an den Steifigkeitssprüngen der des eintreffenden S-Modes.

Mit einer derartigen Laufzeitbetrachtung lassen sich somit Steifigkeitssprünge im Bauteil berücksichtigen. In weiteren Schritten wird auf Grundlage dieser Laufzeitberechnungen eine SAFT-Rekonstruktion für Lamb-Wellen entwickelt, die eine präzise Schadenslokalisierung auch in komplexen Strukturen erlaubt. Das Verfahren eignet sich nicht nur für vollflächige Untersuchungen von Lamb-Wellen, sondern lässt sich ebenfalls als Grundlage für eine genaue Schadenslokalisierung in einem Structural-Health-Monitoring(SHM)-Netzwerk mit nur wenigen Sensoren nutzen. Liegen hinreichend genaue Materialdaten vor, erlaubt der Algorithmus zur Laufzeitberechnung auch die Bestimmung von Erfassungsbereichen einzelner Sensoren und Sensornetzwerke und kann so zu einer automatisierten, optimalen Netzwerkauslegung beitragen.

## Referenzen

- [1] OSTER, R.: *Herausforderungen an die ZfP bei Ihrer Anwendung an Faserverbundbauteilen*; DACH-Jahrestagung, 2012, Graz
- [2] BÜHLING, L. – *USPC 5000 – ein neues Prüfsystem für Health-Monitoring und bildgebende Ultraschallprüftechnik*, DGZfP-Jahrestagung, 2007, Fürth
- [3] KIM, D.: *An Algorithm for 3D Vibration Measurement Using One Laser Scanning Vibrometer*; 6<sup>th</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring, 2012, Dresden
- [4] NAKATANI, H.: *Difficulties Associated with the Acoustic Source Localization in Anisotropic Plates and its Solution*, IWSHM, 2013, Palo Alto