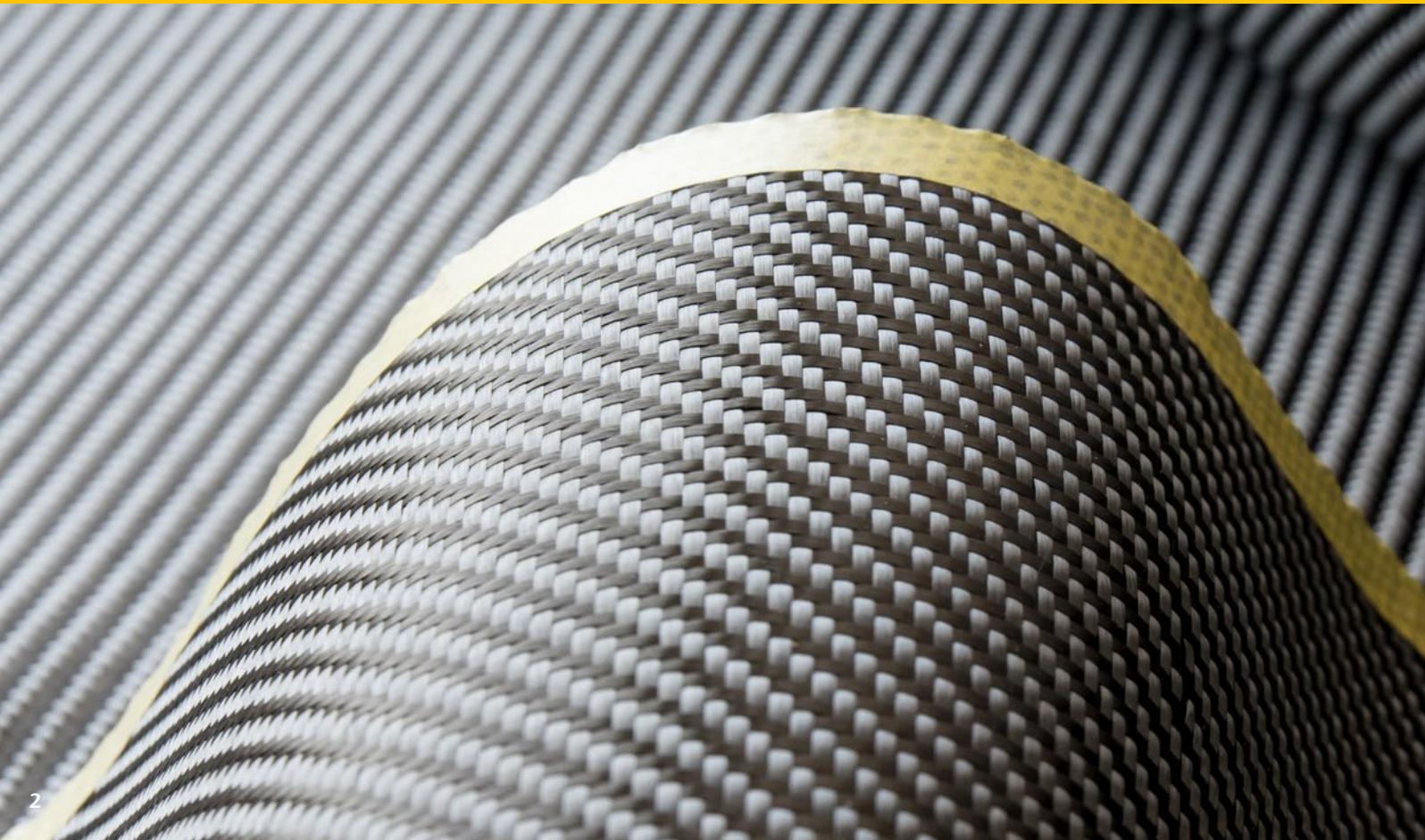


# Strukturüberwachung mit Lamb-Wellen-Tests

Defekte Erkennen per Scanning-Laservibrometrie  
Applikationsnote



Strukturschäden in Bauteilen, die von außen unsichtbar sind, werden durch ihre Interaktion mit Ultraschallwellen detektierbar. Dies kann zur integrierten Bauteilüberwachung – Structural Health Monitoring (SHM) – eingesetzt werden. Die Ausbreitung der Wellen und ihre Wechselwirkung mit den Defekten lässt sich berührungslos, vollflächig und mit hoher Präzision mittels Scanning-Laservibrometrie messen und darstellen.



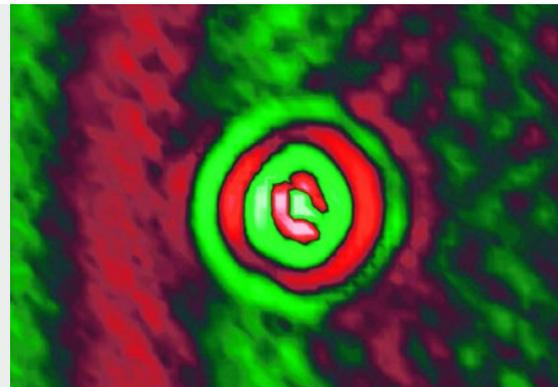
# Scanning-Laservibrometrie zur integrierten Bauteilüberwachung mit Hilfe von Ultraschalloberflächenwellen

Dieser Artikel beschreibt kurz die Grundlagen der verwendeten Ultraschallwellen, sogenannter Lamb-Wellen, sowie der 3D-Scanning-Laservibrometrie. Der Hauptteil stellt Messergebnisse dar, die mit dieser Technik erzielt wurden, sowohl bezüglich der Ausbreitung der Wellen als auch ihrer Interaktion mit Defekten.

## Lamb-Wellen zur Defekterkennung

Eine Standardmethode zur Detektion von Defekten in sicherheitskritischen Bauteilen ist das Abscannen der Platten mit Ultraschalltransducern. Dieses Verfahren benötigt jedoch in der Regel entweder Sender und

Empfänger auf gegenüberliegenden Seiten der Platte oder, im sogenannten Rückwandeckverfahren, eine Ankopplung des Transducers beispielsweise mit Hilfe von Wasser. In vielen Fällen ist der Zeitaufwand zu hoch. Eine alternative Methode ist die Beobachtung der Ausbreitung von geführten Wellen in der Platte und ihrer Interaktion mit Defekten. In dünnwandigen tragenden Bauteilen, früher fast ausschließlich Bleche, heute verstärkt kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffplatten (CFK), breiten Wellen sich als Biege- und Kompressionswellen innerhalb der Platte aus.



**1**  
*Modenkonzentration von symmetrischen in antisymmetrische Lamb-Wellen an einem Struktur-schaden*

## 2

Biege- und Kompressionswellen in Aluminiumplatte über 250 mm; wahre Plattendicke: 1 mm; wahre Schwingungsamplituden: unter 100 nm

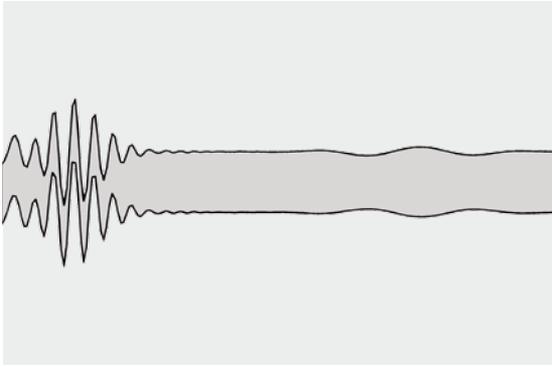


Bild 2 zeigt schematisch einen Profilschnitt durch Gruppen von Biege- und Kompressionswellen in Aluminium. Unabhängig davon, ob ein Werkstofffehler oder Struktur Schaden sich auf der unzugänglichen Rückseite oder mitten im Material befindet, wird eine Welle, die sich auf der zugänglichen Vorderseite beobachten lässt, mit ihm interagieren und damit ihr sichtbares Verhalten ändern.

Eine Möglichkeit, Defekte während des realen Einsatzes im Feld zu beobachten, beispielsweise in Panels während des Fluges, ist der Einbau von piezobasierten Sensor-Aktor-Netzwerken. Aus den Sensorsignalen kann auf den Zustand des Bauteils geschlossen werden. Um diese punktuell erfassten Signale fachkundig auswerten zu können, muss in der vorangehenden Forschungs- und Entwicklungsphase das Verhalten der Wellen (quasi-) kontinuierlich über Fläche und Zeit beobachtet werden. Nur so lässt sich ein Einblick in die komplexen physikalischen Vorgänge gewinnen.

Dies ist mittels Scanning-Laservibrometrie einfach und effektiv durchführbar. Des Weiteren sind die gängigen Schwingungsamplituden im zwei- bis knapp dreistelligen Nanometerbereich sowie Anregungsfrequenzen bis hin zu einigen hundert Kilohertz problemlos realisierbar. Die Scanning-Laservibrometrie kann also sehr gut zur Auslegung solcher Piezo-Sensornetzwerke verwendet werden. Darüber hinaus stellt sie eine eigenständige Methode zur Defekterkennung in solchen Fällen dar, in denen klassische Ultraschall-Transducer-Verfahren nicht praktikabel sind.

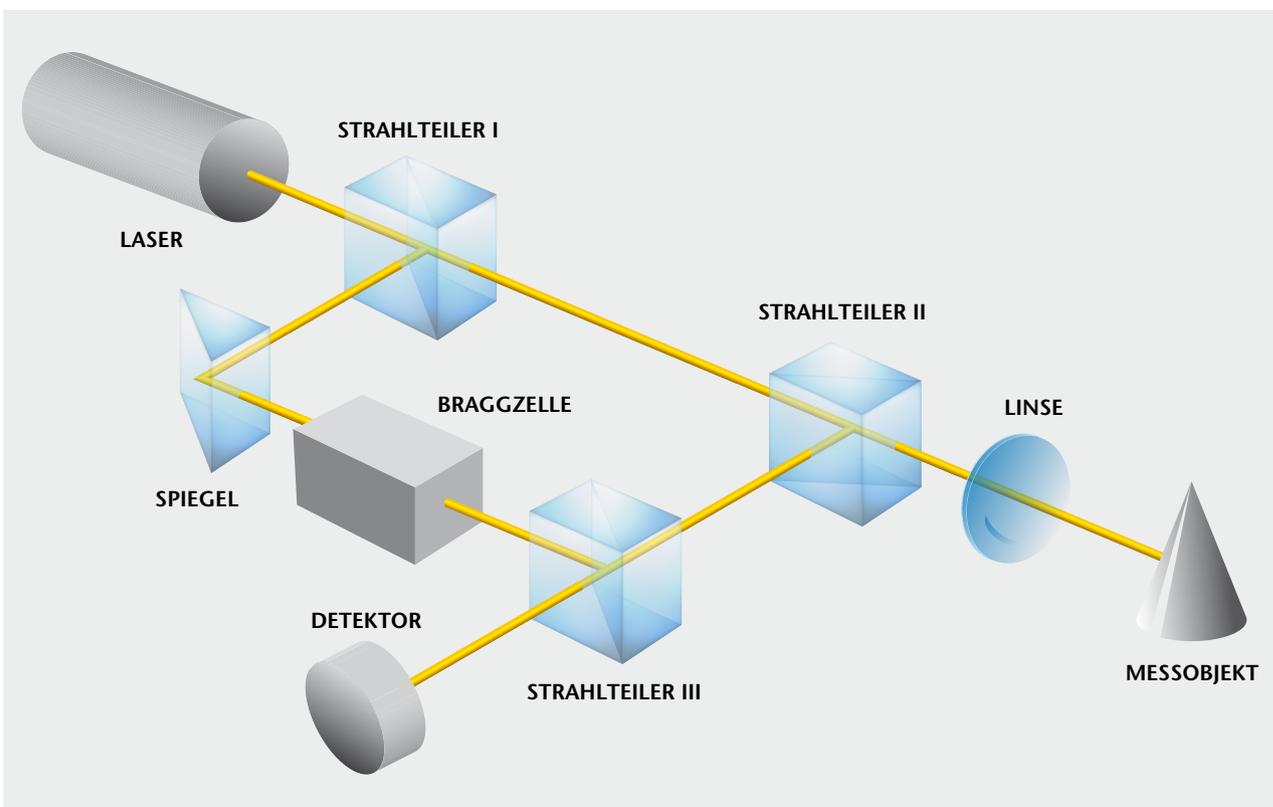
### 3D-Scanning-Laservibrometrie

Ein 3D-Scanning Vibrometer ist ein Messsystem zur berührungslosen und rückwirkungsfreien Erfassung von dreidimensionalen Schwingungen mechanischer Strukturen.

Das Verfahren basiert auf dem optischen Dopplereffekt, der besagt, dass Lichtwellen bei der Streuung an bewegten Oberflächen eine bewegungsabhängige Änderung ihrer Schwingungsfrequenz erfahren. Die Frequenzänderung ist direkt proportional zum Momentanwert der Schwinggeschwindigkeit und kann trotz ihres bemerkenswert kleinen Relativwertes von weniger als  $10^{-8}$  mit interferometrischen Verfahren extrem genau bestimmt werden. Hierzu wird im Inneren des Vibrometers das zurückgestreute Laserlicht mit einem definiert in der Frequenz verschobenen Referenzstrahl verglichen (Heterodynverfahren, Bild 3). Lediglich die Geschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung hat Einfluss auf die Doppler-Frequenzverschiebung.

## 3

Optischer Aufbau eines Laservibrometers



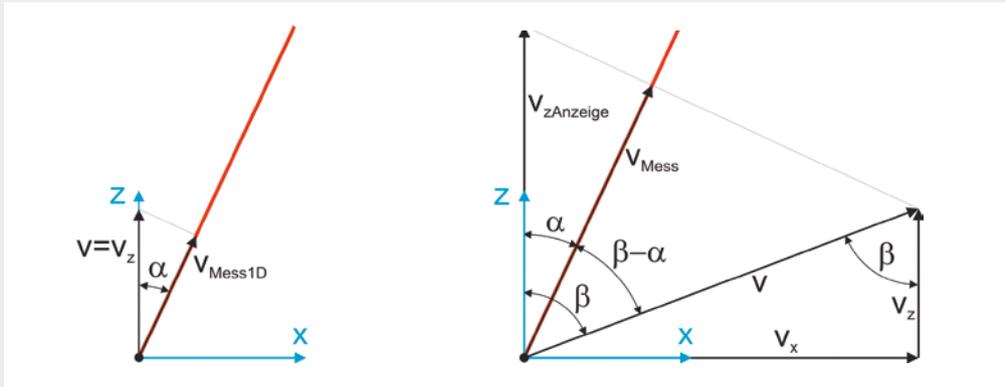
#### 4

Ein 3D-Scanning Vibrometer detektiert vollflächig sowohl Out-of-Plane als auch In-Plane Bewegungen



Deshalb wird hier zur vollständigen Erfassung des Geschwindigkeitsvektors im Messpunkt das 3D-Scanning Vibrometer (Bild 4) eingesetzt, welches mit drei unabhängigen, aus verschiedenen Raumrichtungen messenden Laserstrahlen die Bewegung des Messpunktes vollständig erfasst. Neben dem Hauptanwendungsfeld von Laservibrometern, der Schwingungsanalyse im FFT-Betrieb, bietet sich die Zeitmessung zur Wellenbeobachtung an: Ist die Wiederholbarkeit des Experiments mit gleichen Ausgangsgrößen gewährleistet, wird für jeden Punkt des Scanrasters ein identisches Burstsinal zur Wellenanregung auf den Aktor gebracht und das Experiment wird für jeden Punkt unabhängig erneut durchgeführt. Damit die Einzelmessungen zueinander in korrektem Bezug stehen, muss der zeitliche Abstand zwischen Messbeginn und Anregung jedes Mal gleich getriggert sein, weil keine Übertragungsfunktionen gebildet werden. Dafür ist jedoch das Abspeichern eines Referenzsignals nicht zwingend erforderlich.

Bei der Laservibrometrie wird durch das Scanraster der Ort diskretisiert, während das Zeitsignal quasikontinuierlich aufgenommen wird. Damit unterscheidet sich das Verfahren grundsätzlich beispielsweise von Holografie und ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), bei denen der Ort quasikontinuierlich über die Beobachtungsfläche, der zeitliche Verlauf hingegen in diskreten Schritten erfasst wird. Durch das automatisierte Scannen reicht bei der Vibrometrie jedoch ein einziges Setup aus, um den vollständigen Datensatz in Ort und Zeit zu erfassen.



**1D-Scanning-Laservibrometrie:  
 Beobachtung schiefwinkliger Schwingungen**

1D-Scanning-Systeme setzen eindimensionale Schwingungen in Richtung der nicht ausgelenkten Laserachse voraus (zumeist die z-Achse). In dem Fall hat der Geschwindigkeitsvektor eines Scanpunktes nur die Komponente  $v_z = v$  (siehe Bild 5 links).

Vibrometer messen grundsätzlich die Geschwindigkeitskomponente in Richtung der Laserachse, weshalb die Messgröße  $v_{\text{Mess1D}}$  durch den Kosinus des Auslenkungswinkels  $\alpha$  zu teilen ist, um die Schwinggeschwindigkeit  $v_z$  zu erhalten:

$$v_z = \frac{v_{\text{Mess1D}}}{\cos \alpha}$$

Finden die Schwingungen, wie im Falle von Lamb-Wellen, nicht mehr eindimensional in z-Richtung statt, kann dies durch die Winkelkorrektur seitens der PSV (Polytec Scanning Vibrometer) Software nicht kompensiert werden. Der Geschwindigkeitsvektor  $v$  eines Scanpunktes ist dann um den Winkel  $\beta$  von der z-Achse weggedreht, die vom Vibrometer erfasste Schwingung ist weiterhin die Komponente parallel zur Laserachse, in diesem Fall  $v_{\text{Mess}}$ .

Bild 5 rechts gibt Aufschluss über die geometrischen Beziehungen:

$$v_{\text{Mess}} = v \cos(\beta - \alpha)$$

Die Winkelkorrektur der Software korrigiert über

$$v_{z\text{Anzeige}} = \frac{v_{\text{Mess}}}{\cos \alpha}$$

den Auslenkungswinkel des Lasers, nach der kartesischen Zerlegung von  $v$  ergibt sich

$$v_z = v \cos \beta$$

Der Fehlerfaktor beträgt demnach

$$\frac{v_{z\text{Anzeige}}}{v_z} = \frac{v \cos(\beta - \alpha)}{v \cos \alpha \cdot v \cos \beta} = \tan \alpha \tan \beta + 1$$

Findet also eine reine z-Schwingung statt ( $\beta = 0$ ) oder steht der Laserstrahl genau normal auf der Oberfläche ( $\alpha = 0$ ), entsteht kein Fehler. Geht mindestens einer der Winkel gegen  $90^\circ$ , wird der Fehler unendlich groß. Bei PSV-Systemen ist der Laser um zwei Raumachsen je  $20^\circ$  schwenkbar, woraus sich ein maximaler Winkel von  $\alpha = \tan^{-1}(\sqrt{2} \tan 20^\circ) = 27,24^\circ$  ergibt.

Für verschiedene Werte von  $\beta$  ( $0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, 80^\circ, 89^\circ$ ) ist der genannte Fehlerfaktor über den für  $\alpha$  gültigen Bereich in Bild 6 blau aufgetragen.

Zusätzlich in rot gezeigt wird der Fehlerfaktor

$$\frac{v_{\text{Mess}}}{v_z} = \frac{\cos(\beta - \alpha)}{\cos \beta}$$

der sich bei deaktivierter Winkelkorrektur in der Datenerfassungssoftware ergibt. Für  $\beta = 0^\circ$  entsteht hier erst ein Fehlerfaktor  $< 1$ , ansonsten fällt der Fehler zumeist etwas kleiner aus als bei aktiver Winkelkorrektur. Eine quantitative Auswertung der Daten bleibt jedoch hinfällig.

Der Fehler wirkt sich bei rein qualitativen Untersuchungen mit 1D-Vibrometern produktiv aus, wenn er den Signal-Rausch-Abstand der Out-of-Plane-Amplituden symmetrischer Lamb-Wellen vergrößert. Quantitative Untersuchungen erfordern jedoch ein 3D-Messsystem oder können mit 1D-Technik nur punktweise bei oberflächennormal gerichtetem Laserstrahl durchgeführt werden.

## Ultraschallwellen in Platten: Theorie der Lamb-Wellen

Wie eingangs erwähnt, breiten Wellen in Platten sich in Form von Biege- und Kompressionswellen aus (Scherwellen in der Plattenebene werden hier nicht berücksichtigt). Horace Lamb<sup>1</sup> leitete 1917 als Erster eine analytische Lösung der Navier-Laméschen Differentialgleichung

$$(\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) + \mu \nabla \cdot (\nabla \vec{u}) = \rho \ddot{\vec{u}}$$

für ein von zwei planaren Flächen begrenztes, homogenes, isotropes, ideal elastisches Kontinuum her, also für Wellen beispielsweise in Blechplatten. Die Lösung, Rayleigh-Lamb-Frequenzgleichung genannt,

$$\frac{\tan pd}{\tan qd} = \left( \frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2 pq} \right)^{\pm 1}$$

$$\text{mit } p = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_t^2} - k^2} \text{ und } q = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_l^2} - k^2}$$

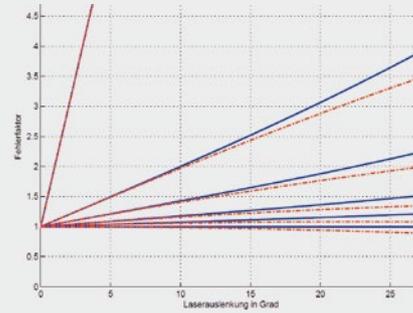
wobei (Kreis-)Wellenzahl  $k = \frac{\omega}{c}$

$$c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \text{ und } c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

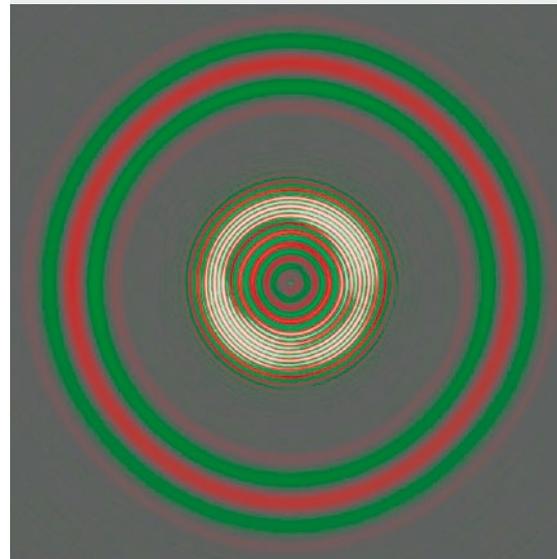
mit  $\lambda$  und  $\mu$  als den bekannten Lamé-Konstanten (zu ermitteln aus E-Modul und Poissonzahl) sowie  $\rho$  als Dichte des Werkstoffs, gibt Aufschluss über das Dispersionsverhalten, sprich die Frequenzabhängigkeit der Phasengeschwindigkeit  $c$ , der behandelten Wellen sowie deren Multimodalität: Für jede Anregungsfrequenz gibt es mindestens zwei Lösungen der Gleichung und damit mindestens zwei auftretende Wellenmoden. Die ersten beiden Lösungen werden fundamentale Moden,  $S_0$ - und  $A_0$ -Mode, genannt und treten für jedes  $f$  bzw.  $\omega > 0$  auf. Sie sind in der numerischen Auswertung der Gleichung in Bild 7 unten fett dargestellt. Die durchgezogenen Linien stellen Phasengeschwindigkeiten von symmetrischen Lamb-Wellen (Kompressionswellen) dar, welche aus der Gleichung mit dem Exponenten +1 errechnet wurden, strichpunktiert dargestellt sind die antisymmetrischen Moden (Biegewellen), die mit dem Exponenten -1 errechnet wurden.

Bei der Abbildung solcher Dispersionsdiagramme ist es üblich (wie hier geschehen), Phasengeschwindigkeiten über das Frequenz-Dicken-Produkt der Platte aufzutragen, damit ein Diagramm für beliebige Plattendicken gültig ist.

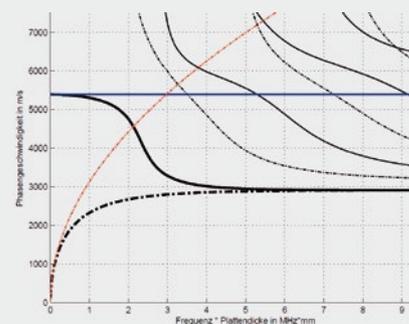
Umfassendere Erläuterungen zur Theorie der Lamb-Wellen finden sich z. B. in Structural Health Monitoring von Victor Giurgiutiu<sup>2</sup>.



**6**  
Fehlerfaktor für Out-of-Plane-Amplituden bei 1D-Scanning schiefwinkliger Schwingungen:  $\beta = 0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, 80^\circ, 89^\circ$  (steigende Kurvensteilheit) für aktive (blau) und inaktive Winkelkorrektur (rot)



**7**  
Oben: Ausbreitung von symmetrischen (außen) und anti-symmetrischen (innen) Lamb-Wellen in einer Aluminiumplatte. Unten: Dispersion von Lamb-Wellen in einer Aluminiumplatte. Durchgezogene Linien: Symmetrische Moden; strichpunktiert: Antisymmetrische Moden; fett: Fundamentale Moden, Blau: Kompressionswellen nach Scheibentheorie, Rot: Biegewellen nach Kirchhoff-Theorie

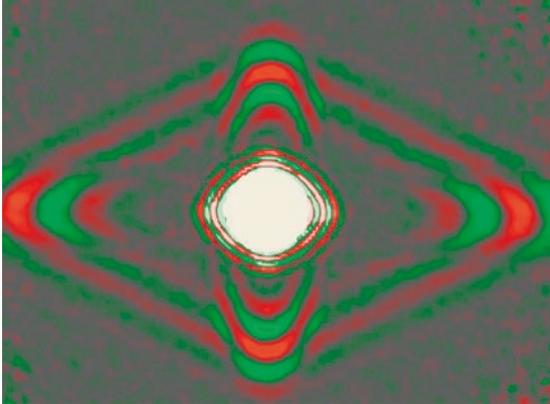


<sup>1</sup> Sir Horace Lamb, engl. Mathematiker und Physiker, 29.11.1849 – 4.12.1934

<sup>2</sup> Giurgiutiu, Victor: Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors.

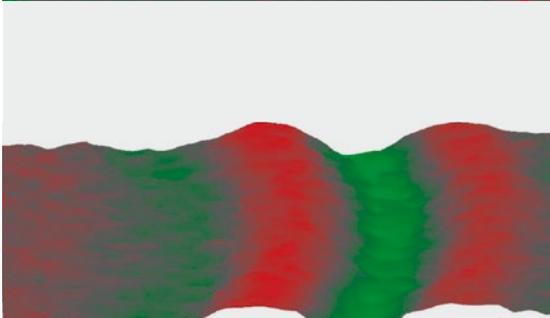
8

Ausbreitung von Kompressionswellen in einer stark anisotropen CFK-Platte



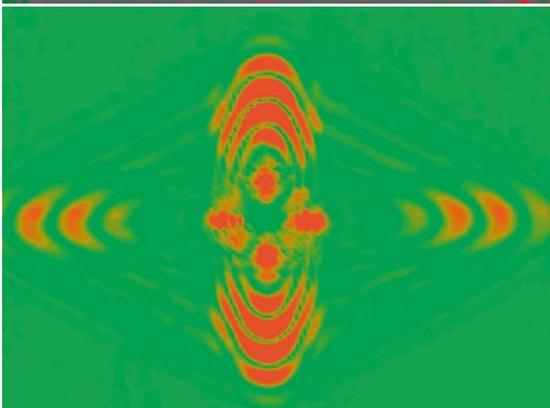
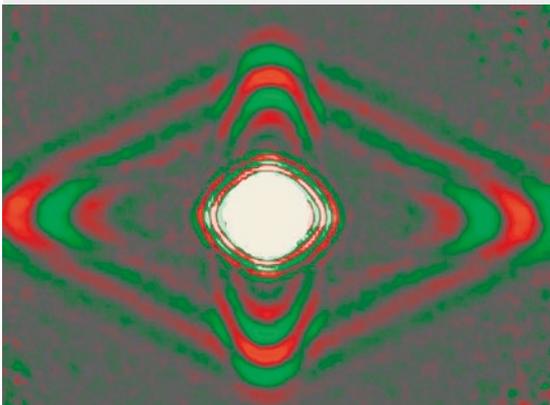
9

Symmetrische (Kompressions-) Wellenfronten mit stark überhöht dargestellter Amplitude aus 1D-Messung



10

1D- (Out-of-Plane, oben) und 3D-Messdaten (alle drei Bewegungskomponenten x, y und z, unten) von Kompressionswellen in einer anisotropen Platte



Neben der exakten Beschreibung als Lamb-Wellen aus der Mathematik der Kontinuumsmechanik heraus lassen sich Kompressions- und BiegeWellen auch aus vereinfachten Plattentheorien herleiten. Die so gewonnenen Ergebnisse decken sich bei kleinen Frequenzen mit denen aus der Theorie der Lamb-Wellen, darüber hinaus führen die Vereinfachungen jedoch zu enormen Fehlern: Die nicht dispersive Kompressionsplattenwellengeschwindigkeit (rote Kurve) aus der Scheibentheorie

$$C_L = \sqrt{\frac{1}{1-\nu^2} \frac{E}{\rho}}$$

entspricht der  $S_0$ -Phasengeschwindigkeit und die Biegeplattenwellengeschwindigkeit (blaue Kurve) aus der Kirchhoffschen Plattentheorie

$$C_F = \sqrt[4]{\frac{D}{\rho h}} \sqrt{\omega} = \sqrt[4]{\frac{E}{12 \rho (1 - \nu^2)}} \sqrt{\omega} h$$

der  $A_0$ -Phasengeschwindigkeit. Das Diagramm gibt Aufschluss über Deckung und Abweichung.

Bild 7 oben zeigt das Out-of-Plane-Verschiebungsfeld aus einer 1D-Messung von Lamb-Wellen ( $S_0$ - und  $A_0$ -Moden) in einer Aluminiumplatte nach einer Burst-Anregung durch einen piezokeramischen Aktor in der Mitte.

### Theorie der Ultraschallwellen in Faserverbundplatten

Die Lamb-Wellen-Theorie gilt nur unter den folgenden Einschränkungen:

- Ideale Elastizität,
- Homogenität und
- Isotropie.

Ideale Elastizität kann (im technisch relevanten Frequenzbereich) für Faser-Kunststoffverbunde auf Basis duroplastischer Matrixwerkstoffe in guter Näherung angenommen werden. Bei Werkstoffen mit großer innerer Dämpfung muss diese Vereinfachung wegfallen. Homogenität gilt für Faserverbunde per definitionem so wenig wie Isotropie. Die Anisotropie der Elastizitätskennwerte führt zu unterschiedlich starken Abweichungen der Wellenfronten von der Kreisform.

Auch numerische Berechnungsverfahren wie die Finite-Elemente-Methode stoßen bei der Vorhersage des Ausbreitungs- und Interaktionsverhaltens der Wellen schnell an Grenzen: Das realitätsnahe Modellieren einzelner Kohlenstofffasern wäre mit nicht hinnehmbarem Aufwand verbunden, jede Vereinfachung bedarf jedoch der experimentellen Validierung ihrer Zulässigkeit. Daher sind Messungen zum Erstellen eines Modells der Ausbreitung von Lamb-Wellen unerlässlich.

Bild 8 zeigt exemplarisch die Ausbreitung einer Kompressionswelle ( $S_0$ -Lamb-Welle) in einer stark anisotropen Faserverbundplatte. Aufgenommen wurde der Datensatz mit einem 1D-Scanning-Vibrometer. Angeregt wurde die Welle durch ein sinusförmiges Burst-Signal auf einem piezokeramischen Aktor in der Plattenmitte. Durch den Unterschied in der Phasengeschwindigkeit der beiden hierbei angeregten fundamentalen Wellenmoden trennen sich die Wellengruppen voneinander und können einzeln beobachtet werden. Die Mitte ist wegen der Amplitudenüberhöhung in unmittelbarer Aktornähe ausgespart.

### 3D-Scanning-Vibrometrie zur Wellenbeobachtung

Die Schwingungsamplituden von Lamb-Wellen sind klein: Wenige hundert Nanometer bei Wellenlängen im Millimeterbis zweistelligen Zentimeterbereich. Um die Wellen bequem visualisieren zu können, werden die Amplituden wie in Bild 9 stark überhöht dargestellt. Eine solche räumliche Visualisierung ist für eindimensionale Messdaten problemlos, bei räumlicher Bewegung und starken In-Plane-Komponenten können sich die Bewegungsbahnen unterschiedlicher schwingender Punkte in der Animation jedoch durchdringen und so ein stark verfälschtes Verzerrungsprofil suggerieren.

Daher ist es ratsam, die gewonnenen Daten aus 3D-Scans entweder nach der Farbpalette zu beurteilen und auf die geometrische Animation zumindest weitgehend zu verzichten, oder die drei Schwingungsrichtungen getrennt eindimensional zu visualisieren. Bild 10 zeigt erneut die Ausbreitung symmetrischer Wellen in einer anisotropen Platte aus Bild 8, diesmal werden jedoch Ergebnisse aus 1D- (links) und 3D-Messungen (rechts) gegenübergestellt. In den Darstellungen ist derselbe Ausschnitt des gleichen Experiments zu sehen. Im dreidimensionalen Darstellungsraum kann die Software einer Amplitude aber im Allgemeinen kein eindeutiges Vorzeichen zuordnen, weshalb die Farbpalette sich

nur über die vorzeichenlosen Beträge der Amplituden erstreckt. Links gelten grün und rot also für negative und positive Amplituden, während rechts grün für Stillstand und rot für hohe Amplitude mit beliebigem Vorzeichen steht. Deshalb erscheint rechts die Wellenlänge halbiert, was es bei der Auswertung zu bedenken gilt.

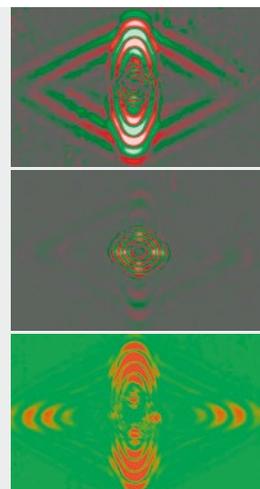
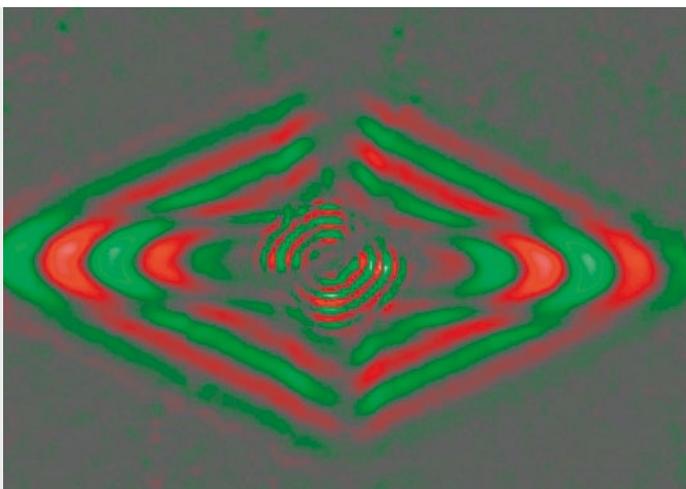
Im Folgenden werden alle eindimensionalen Darstellungen in grün-schwarz-rot und alle mehrdimensionalen Darstellungen in grün-rot visualisiert.

Bei Experimenten an (ebenen) CFK-Platten liegt es nahe, die Messoberfläche in die x-y-Ebene sowie die x- und y-Achsen des softwareseitigen kartesischen Koordinatensystems in die Hauptachsen des Faserverbunds zu legen, wie im vorliegenden Fall geschehen. So können in simpler Weise die In-Plane- und Out-of-Plane-Amplitudenkomponenten angezeigt werden.

Bild 11 zeigt das bereits bekannte Experiment in seine Bewegungskomponenten zerlegt:

- In-Plane, x-Komponente
- In-Plane, y-Komponente
- Out-of-Plane, z-Komponente
- In-Plane, x-y-Komponenten

Es ist ersichtlich, dass die Kompressionswellen hauptsächlich Schwingungen in der Plattenebene erzeugen und hierbei der bedeutendste Anteil der Schwingungen in Ausbreitungsrichtung erfolgt. Out-of-Plane sind bei gleicher Skalierung nur leichte Schatten erkennbar. In der Plattenmitte ist in den z-Amplituden die sich langsamer ausbreitende antisymmetrische Biegebewelle zu erkennen. Ihr Bewegungsanteil ist Out-of-Plane größer als In-Plane. Diese Aussage gilt jedoch nur bis zu gewissen Grenzfrequenzen, bei denen sich der Sachverhalt umkehrt und welche in anisotropen Werkstoffen winkelabhängig sind: Das Verhältnis aus Biege- und Längssteifigkeit der Platte, beides anisotropiebedingt richtungsabhängige Werte, hat Einfluss auf die Grenzfrequenz.



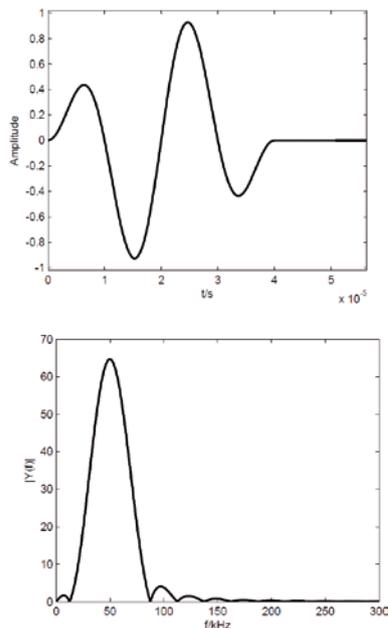
**11**  
Amplituden in x- (links), y- (rechts oben), z- (mitte) und x+y-Richtung (rechts unten)

## Detektion von Strukturschäden durch Welleninteraktion

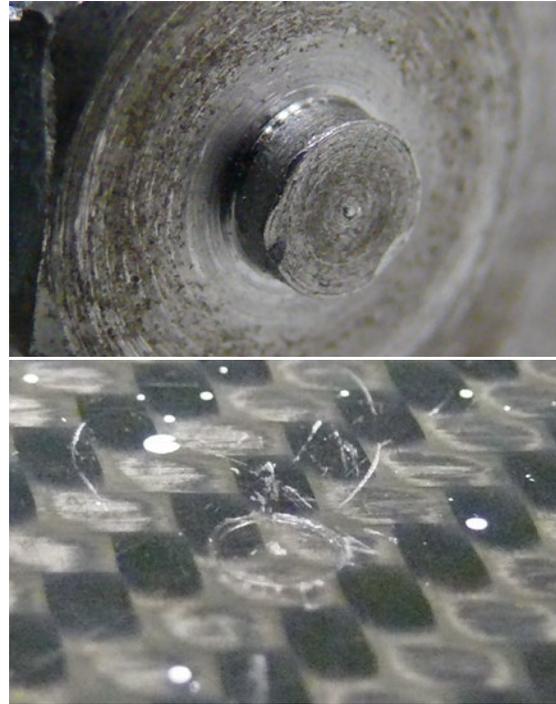
Wie eingangs erwähnt sind Strukturschäden und Werkstofffehler häufig von außen unsichtbar. Ein wichtiges Beispiel hierfür ist der Impactschaden an CFK-Strukturen, der sich oft in Form von Delaminationen, also Ablösen der einzelnen Laminatschichten voneinander, äußert.

### Experiment zur Schadensdetektion

An einer ungeschädigten, quasiisotrop geschichteten CFK-Platte werden 3D-Messungen zur Gewinnung von Referenzdaten durchgeführt. Die Anregung erfolgt durch ein sinusfenestertes Burstsignal  $v = \sin(\omega t) * \sin(\frac{1}{4}\omega t)$  über zwei Perioden Sinus auf einem piezokeramischen Wafer; die Messungen finden im Zeitbereich statt. Bild 12 zeigt das Signal und sein Amplitudenspektrum. Durch die Fensterung werden die unerwünschten Nebenmaxima im Spektrum verkleinert. Das Experiment wird für unterschiedliche Anregungsfrequenzen wiederholt. Zunächst läuft jeweils eine Gruppe Kompressionswellen durch den Beobachtungsbereich, anschließend aufgrund der geringeren Phasengeschwindigkeit eine Gruppe BiegeWellen. Zur Einleitung eines Impactschadens wird ein Fallhammer mit einer kinetischen Energie von 2,5 J und einer kreisrunden Aufprallfläche von 12,5 mm<sup>2</sup> (Bild 13 oben) auf die Rückseite der Platte geschlagen. Dabei entsteht auf der Oberfläche ein Eindruck von 0,05 mm Tiefe (Bild 13 unten).



**12**  
Anregungssignal im Zeitbereich (oben) und zugehöriges Amplitudenspektrum (unten)



**13**  
Oben: Stirnfläche des Fallhammers. Unten: Eindruck nach dem Impact mit 2,5 J

Die bereits durchgeführten Messungen werden unter gleichen Bedingungen nach der Schädigung wiederholt. Bild 14 zeigt einen Schnappschuss des Out-of-Plane-Geschwindigkeitsfeldes im Beobachtungsbereich vor (links) und nach (rechts) dem Impactereignis. Beispielfür wurde hier die 50 kHz-Anregung herangezogen.

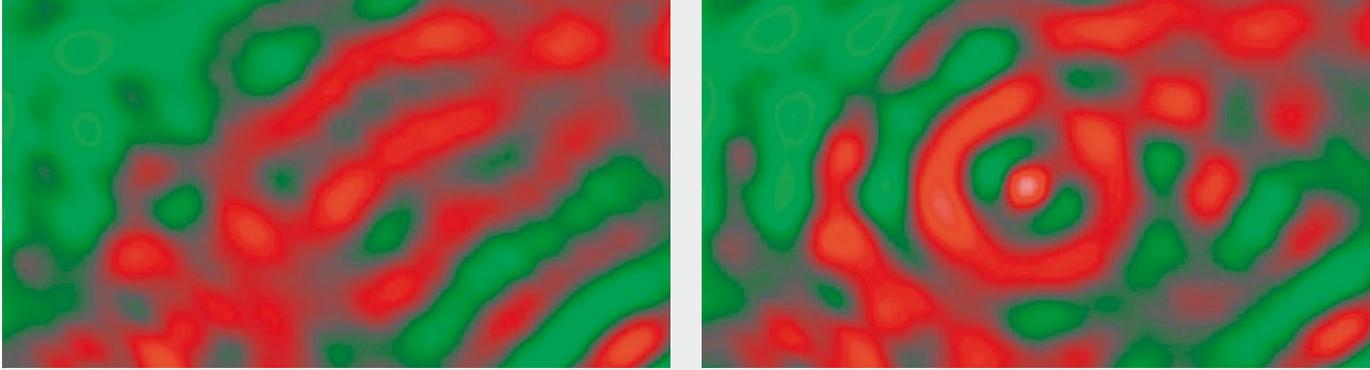
Im Schnappschuss unten ist der Defekt durch die kreisförmigen Sekundärwellen schwach erkennbar. Mit dem Signalprozessor (Softwareoption ab PSV 8.7) oder via MATLAB wird die Differenz der beiden Datensätze gebildet. Bild 15 links enthält nur die Out-of-Plane-Komponente, mittig nur In-Plane und rechts werden alle Schwingungsrichtungen gleichzeitig angezeigt.

Die Differenzdaten geben eindeutigen Aufschluss über die Position des Strukturschadens. Hierbei ist die Beobachtung von Out-of-Plane-Schwingungen offenbar zielführender als von In-Plane-Schwingungen.

In den Standbildern nicht zu sehen ist der Umstand, dass nicht nur nach Durchlaufen der primären  $S_0$ -Gruppe (Bild 16 oben), sondern auch nach der  $A_0$ -Gruppe (Bild 16 unten) um den Schaden herum neue BiegeWellen entstanden sind. Nach der Differenzenbildung (Bild 15) zeigen sich größere Sekundärwellen jedoch für die primäre  $A_0$ -Gruppe.

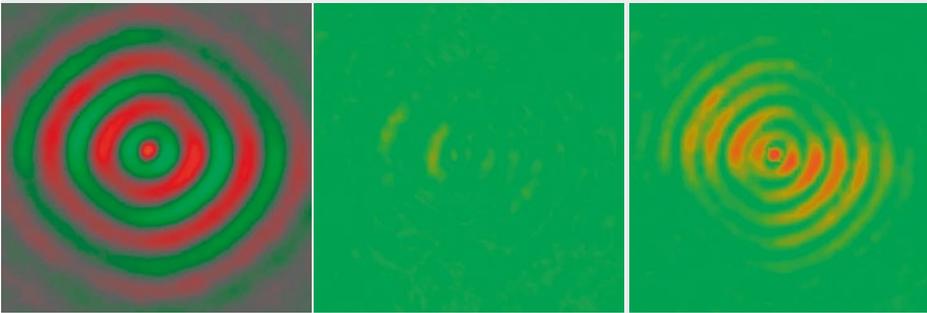
14

Out-of-Plane-Geschwindigkeitsfeld vor (links) und nach (rechts) dem Impact



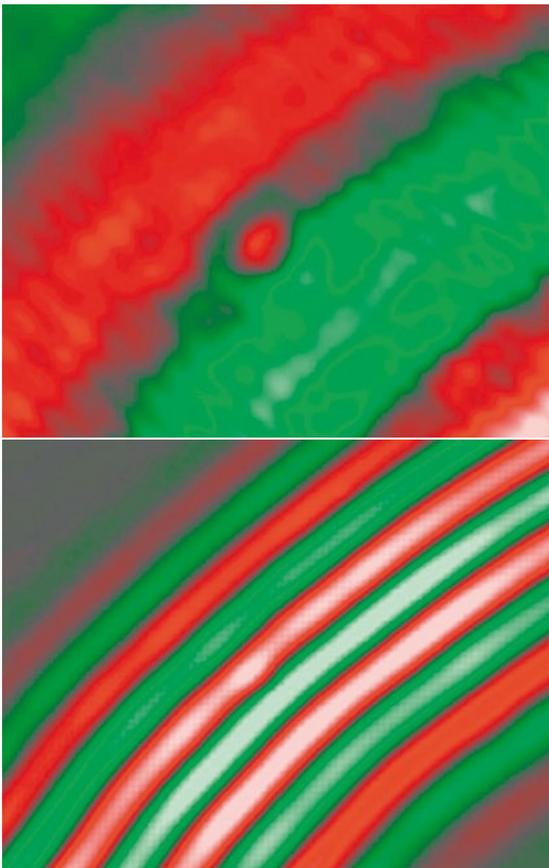
15

Differenzdaten: Links: Out-of-Plane; Mitte: In-Plane; Rechts: alle Komponenten



16

Primäre Kompressionswellen (oben) und Biege wellen (unten) im Messfeld nach Impact bei 50 kHz (Out-of-Plane-Geschwindigkeitsfelder)



#### Fazit

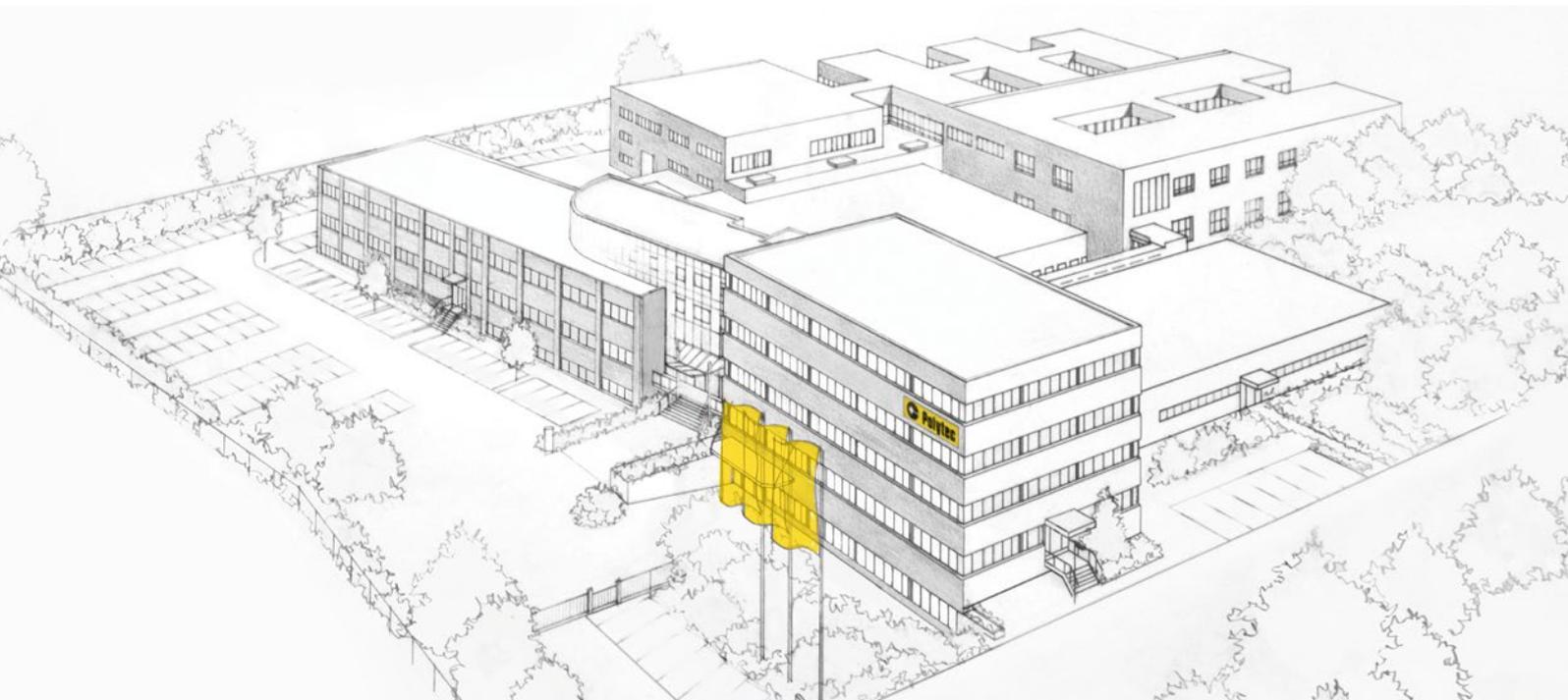
Die Beobachtung von Lamb-Wellen-Ausbreitung mittels Scanning-Laservibrometrie ist ein vielversprechendes Werkzeug zur Schadensdetektion in Plattenstrukturen. Die Messung ermöglicht die Beobachtung von sowohl Kompressions- als auch Biege wellen. Die Ausbreitung des gesamten Wellenfeldes wird sichtbar gemacht und erlaubt Rückschlüsse auf die Strukturbeschaffenheit. Systematische Fehler, die mit 1D-Messtechnik immer entstehen, können zum Erlangen präziser Ergebnisse durch Einsatz von 3D-Messtechnik umgangen werden.

Defekte werden durch Störungen im Wellenfeld, hauptsächlich in Form von Sekundärwellen, sichtbar. Mit dieser Methode können also Defekte in Proben detektiert werden, die mit klassischer Ultraschallprüfung nicht oder nur mit erhöhtem Aufwand untersuchbar sind.

#### Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Mirko Nikolaj Neumann und Prof. Dr.-Ing. Rolf Lammering, Institut für Mechanik, Helmut-Schmidt-Universität – Universität der Bundeswehr Hamburg

Dr. Jochen Schell und Dr. Reinhard Behrendt, Polytec GmbH



**Polytec GmbH**  
 Polytec-Platz 1-7  
 76337 Waldbronn  
 Tel. +49 7243 604-0  
 info@polytec.de

**Polytec GmbH**  
**Vertriebs- und**  
**Beratungsbüro**  
 Schwarzschildstraße 1  
 12489 Berlin  
 Tel. +49 30 6392-5140



**Polytec, Inc. (USA)**  
 North American  
 Headquarters  
 16400 Bake Parkway  
 Suites 150 & 200  
 Irvine, CA 92618  
 Tel. +1 949 943-3033  
 info@polytec.com

**Central Office**  
 1046 Baker Road  
 Dexter, MI 48130  
 Tel. +1 734 253-9428

**East Coast Office**  
 1 Cabot Road  
 Suites 101 & 102  
 Hudson, MA 01749  
 Tel. +1 508 417-1040



**Polytec Ltd.**  
**(Great Britain)**  
 Lambda House  
 Batford Mill  
 Harpenden, Herts AL5 5BZ  
 Tel. +44 1582 711670  
 info@polytec-ltd.co.uk

**Polytec France S.A.S.**  
 Technosud II  
 Bâtiment A  
 99, Rue Pierre Semard  
 92320 Châtillon  
 Tel. +33 1 496569-00  
 info@polytec.fr



**Polytec Japan**  
 Arena Tower, 13th floor  
 3-1-9, Shinyokohama  
 Kohoku-ku, Yokohama-shi  
 Kanagawa 222-0033  
 Tel. +81 45 478-6980  
 info@polytec.co.jp

**Polytec South-East Asia**  
**Pte Ltd**  
 Blk 4010 Ang Mo Kio Ave 10  
 #06-06 TechPlace 1  
 Singapore 569626  
 Tel. +65 64510886  
 info@polytec-sea.com



**Polytec China Ltd.**  
 Room 402, Tower B  
 Minmetals Plaza  
 No. 5 Chaoyang North Ave  
 Dongcheng District  
 100010 Beijing  
 Tel. +86 10 65682591  
 info-cn@polytec.com