

Fehlstellendetektion in plattenförmigen Kompositen mittels Kombination von Lamb-Wellen-Anregung und Shearografie

Wassili BUERAKOV¹, Michael SCHUTH¹, Martin SPIES²

¹ Hochschule Trier, ² Fraunhofer IZFP

Kontakt E-Mail: wa.buerakov@web.de

Kurzfassung

Eines der wohl wichtigsten Einsatzgebiete der Speckle-Messtechnik stellt die Detektion von verborgenen Fehlstellen dar. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird auf die Detektion von inneren Defekten mittels der elastischen Wellen in Form von Lamb-Wellen eingegangen. Diese Belastungsart ist noch weitestgehend unerforscht, insbesondere in Verbindung mit der Shearografie. Die zur Erfassung von Lamb-Wellen verwendete räumliche Phasenschiebung basiert auf der Fourier-Transformation (FFT) von Interferogrammen und anschließender Separierung von Nutzinformationen im Spektral-Bereich. Außerdem werden experimentell ermittelte Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

1. Einführung

Das Streben der Menschheit, die Grenzen der Physik auszureizen, lässt die Anforderungen an Konstruktionen und Maschinen immer weiter wachsen. Außerdem werden die Anforderungen auch wegen der Umweltschonung zusätzlich erhöht. Maschinen und Konstruktionen sollen aus diesem Grund immer effizienter werden. Ein möglicher Lösungsweg besteht in der Einführung von neuen innovativen Werkstoffen. Die Luftfahrt zeigt deutlich, dass beispielsweise ein verstärkter Einsatz von Kohlefaser-Verbundwerkstoffen (CFK) eine vielversprechende Zukunftstechnologie darstellt. Bereits jetzt bestehen neue Flugzeugtypen zu mehr als 50% aus CFK. Dieser Trend ist bereits in der Automobilindustrie ebenfalls zu beobachten. Die Automobilkonzerne setzen immer mehr auf Leichtbaukonzepte. Einen wichtigen Beitrag zur zerstörungsfreien Prüfung von solchen Werkstoffen kann das interferometrische Messverfahren die ESPSI (Elektronische Speckle-Pattern-Shearing- Interferometrie) leisten. Im Folgenden wird dieses Verfahren als Shearografie (ESPSI) bezeichnet.

Die ersten Veröffentlichungen zur Messung der ersten Ableitung der Messobjektverformung mit Hilfe der Shearografie gehen auf Leendertz und Butters aus den Jahren 1970 bis 1973 zurück [1]. Der veröffentlichte Aufbau war jedoch nicht praktikabel. Die wohl wichtigste Weiterentwicklung der Shearografie gelang 1975 dem Wissenschaftler Hung [2]. In einer Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten wurde die Shearografie weiterentwickelt. Dabei wurde unter anderem die Phasenschiebung zwecks quantitativer

Auswertung eingeführt. Außerdem erfolgte der Übergang zu der digitalen Aufnahme und der digitalen Auswertung der interferometrischen Informationen [3, 4].

Es wurde in den letzten Jahrzehnten neben der weit verbreiteten zeitlichen Phasenschiebung eine ganze Reihe an neuen Verfahren entwickelt [6, 13]. Die im Rahmen dieser Veröffentlichung verwendete Methode der räumlichen Phasenschiebung, die auf der Fourier-Transformation basiert, wurde erstmals im Jahre 1982 in [14] veröffentlicht. Dieses Verfahren der Phasenschiebung beruht auf der in der Signalübertragung entwickelten Frequenzträgermethode. Die weiterentwickelte räumliche Phasenschiebung eignet sich für alle Messungen, die mit Hilfe der klassischen Speckle-Messtechniken denkbar sind. Insbesondere im Rahmen der experimentellen Modalanalyse bzw. bei dynamischen Belastungen bietet diese Methode der räumlichen Phasenschiebung erhebliche Vorteile. Insbesondere unter rauen Industriebedingungen erleichtert die räumliche Phasenschiebung das Erfassen und Auswerten der Verformungen und Dehnungen erheblich.

Die Entdeckung von Lamb-Wellen gelang im Jahre 1917 Horace Lamb [9]. Die Nutzung der geführten Wellen zur Detektion von Fehlstellen erfolgte zunächst mittels der Laser-Vibrometrie [7, 8]. Die bildgebende Ultraschallprüfung ist ebenfalls eine der Möglichkeiten zum Visualisieren von Lamb-Wellen [7]. Auch die Shearografie kann in Verbindung mit dieser Anregungsart zur Detektion von Fehlstellen unter Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera [10] bzw. einer gepulsten Messobjektbeleuchtung eingesetzt werden [11]. Bisher ist diese Kombination lediglich in einigen wenigen Forschungsarbeiten zu finden. Der wichtigste Grund dafür liegt in der komplexen Visualisierung von Lamb-Wellen. Der zweite Grund liegt in der Notwendigkeit der Verwendung von teuren Komponenten zur Visualisierung und Erzeugung von elastischen Wellen.

2. Theoretische Grundlagen

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird insbesondere auf die Grundlagen der Shearografie, basierend auf der räumlichen Phasenschiebung und Anwendung dieser bei der Detektion von Fehlstellen mittels der elastischen Wellen, eingegangen.

2.1 Räumliche Phasenschiebung

In Abbildung 1 ist der weiterentwickelte, shearografische Messaufbau, basierend auf der räumlichen Phasenschiebung, dargestellt. Vor dem Michelson-Interferometer wird eine Raumblende platziert. Die Oberfläche des Messobjektes wird mit einem aufgeweiteten Laserstrahl (beispielsweise eines Nd:YAG-Lasers, 150mW, 520 nm) beleuchtet. Das von der Oberfläche des Prüflings diffus reflektierte Laserlicht gelangt durch die Raumblende zum Interferometer. Ein Strahlteiler bewirkt die Entstehung von zwei Wellenfronten. Einer der beiden Spiegel im Michelson-Interferometer hat einen kleinen Winkel zum Strahlteiler. Das führt dazu, dass die beiden reflektierten Wellenfronten einen gewissen Versatz zueinander haben. Dieser Versatz wird als Shear-Betrag bezeichnet. Von der Kamera werden dadurch zwei geringfügig gegeneinander verschobene Bilder der Oberfläche des Messobjektes registriert.

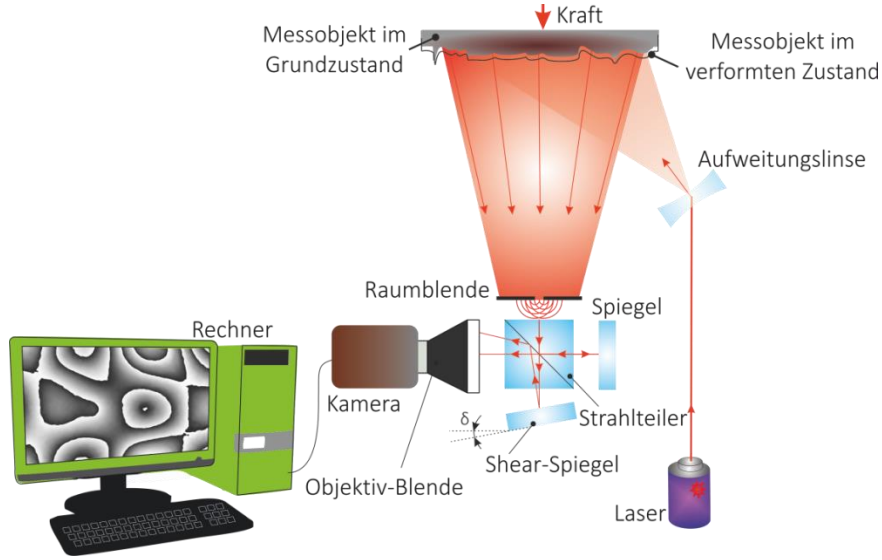


Abb. 1. Schematische Darstellung des Prinzips der Out-of-Plane-Shearografie mittels der räumlichen Phasenschiebung

Von der Kamera wird die Intensität I registriert, die im Falle der Interferometrie wie folgt beschrieben werden kann:

$$I = 2I_0 (1 + \gamma \cos \varphi) \quad (1)$$

wobei I_0 die Hintergrundintensität, γ die Modulation des Interferenzterms und φ die zufällige Phase bezeichnen. Die resultierende, von der Kamera aufgenommene Wellenfront setzt sich aus zwei Teilwellen zusammen. Die beiden Teilwellen ergeben sich im Falle der Shearografie auf Grund der Vershearung. Die Gleichung (1) ist wegen der Modulation der Wellenfront anzupassen, da zusätzlich die von der Raumblende verursachte Trägerfrequenz ($2\pi f_0 x$) eingeführt werden soll [16], somit:

$$I = 2I_0 (1 + \gamma \cos(\varphi + 2\pi f_0 x)), \quad (2)$$

$$\text{mit } f_0 = \frac{\sin \delta_w}{\lambda} \quad (3)$$

wobei f_0 die Trägerfrequenz $[1/m]$ und x den Raumkoeffizient, der sich aus der Vershearung in x -Richtung (analog zur Zeit t im Ortsraum) ergibt, bezeichnen. Mit f_0 wird die Trägerfrequenz angegeben [16, 17]. Die Gleichung (3) enthält folgende Größen: δ_w Shearwinkel des Spiegels aus dem Michelson-Interferometer und λ die Wellenlänge des verwendeten Lasers. Die Gleichung (2) kann mit Hilfe der Euler-Formel in die Exponentialform überführt werden, so dass folgender Ausdruck entsteht:

$$I = 2I_0 + 2I_0 \left(e^{i\varphi} \left(e^{i2\pi f_0 x} \right) + e^{-i\varphi} \left(e^{-i2\pi f_0 x} \right) \right). \quad (4)$$

$$\text{Mit } k_F = 2I_0 \gamma \cdot e^{i\varphi}, k_F^* = 2I_0 \gamma \cdot e^{-i\varphi}, I = b, a_F = 2I_0 \quad (5)$$

$$\text{erhält man die Gleichung: } b_F(x, y) = a_F(x, y) + k_F(x, y) \cdot e^{i2\pi f_0 x} + k_F^*(x, y) \cdot e^{-i2\pi f_0 x}. \quad (6)$$

Die Gleichung (6) kann mittels der FFT in den Frequenzbereich transformiert werden:

$$B_F(f_G, y) = A_F(f_G, y) + K_F(f_G - f_0, y) + K_F^*(f_G + f_0, y). \quad (7)$$

Die Grundfrequenz f_G der Hintergrundstrahlung, die von der Nutzinformation (Phase) zu separieren ist, kann wie folgt berechnet werden [16]:

$$f_G = \frac{D}{2\lambda z_B} \quad (8)$$

wobei mit D der Durchmesser einer kreisrunden Raumblyende bzw. die Breite einer Spaltblyende und z_B die Brennweite des verwendeten Objektivs angegeben werden. Aus den Gleichungen (3) und (8) ist ersichtlich, dass im praktischen Einsatz vor allem der Shearbetrag und der Durchmesser der Blyende für die Justage des Messgerätes wichtig sind. Man erkennt außerdem, dass es nun mit Hilfe der Trägerfrequenz möglich ist, die Informationen zu separieren (siehe Abbildung 2).

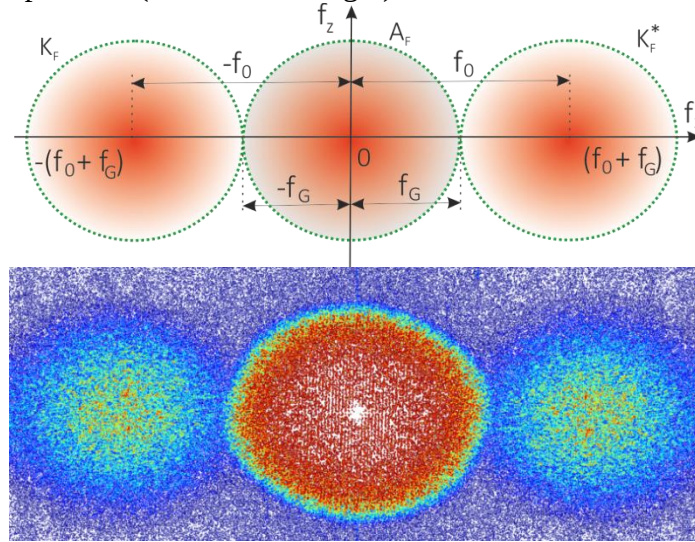


Abb. 2. 2D-Spektrogramm einer kreisrunden Blyende in schematischer Darstellung (oben) und gemessenes Spektrum einer runden Blyende (unten)

Auf Grund einer geeigneten Einstellung des Messgerätes sind in der Abbildung 2 drei Bereiche deutlich erkennbar. Im Zentrum des Spektrums befindet sich die Hintergrundintensität $A_F(f_G, y)$. Links bzw. rechts davon sind $K_F(f_G - f_0, y)$ und $K_F^*(f_G + f_0, y)$. Diese beiden Terme enthalten die gesuchte Phaseninformation. Nun kann aus dem kompletten Spektrum der Bereich mit den Phaseninformationen mittels eines Bandpassfilters separiert werden. Nur dieser Bereich wird für die weitere Auswertung benötigt. Nach der Bandpassfilterung erfolgt die inverse Fourier-Transformation der Gleichung (7). Dabei ist zu beachten, dass entweder K_F oder K_F^* rücktransformiert wird:

$$b_F(x, y) = k_F(x, y). \quad (9)$$

Die weitere Verarbeitung der Daten findet wieder im Ortsraum statt. Zum Berechnen der relativen Phase wird die in vielen Bereichen der Technik angewandte Formel zum Berechnen des Phasenwinkels verwendet:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}(k_F(x, y))}{\text{Re}(k_F(x, y))}. \quad (10)$$

„Im“ und „Re“ bezeichnen den Imaginär- bzw. den Realteil von $k_F(x, y)$. Nach dem Belasten des Messobjektes wird die Messung wiederholt. Es wird also noch eine Aufnahme des Messobjektes vorgenommen und die Phase $\varphi'(x, y)$ berechnet. Die relative Phasendifferenz Δ wird mit Hilfe einer einfachen Subtraktion ermittelt: $\Delta = \varphi - \varphi'$. Nun können sowohl Dehnungen, als auch Verformungen anhand der relativen Phasenänderung bestimmt werden.

2.2 Geführte Plattenwellen zum Nachweis von verborgenen Defekten

Geführte Plattenwellen werden als Lamb-Wellen bezeichnet. Die Lamb-Wellen sind eine Überlagerung aus Kompressions- bzw. Druckwellen und zur Platte vertikalen Scherwellen. Die beiden Wellenarten sind in der Abbildung 3 dargestellt.

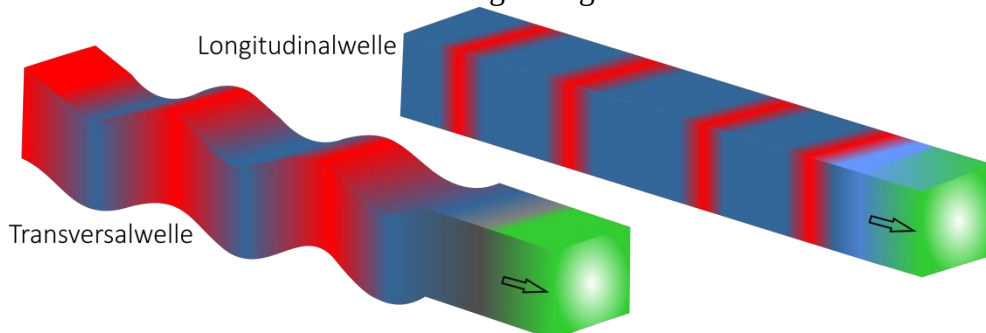


Abb. 3. Zwei grundsätzliche Wellentypen, links: Scher-, Transversal- oder auch als Schubwelle bezeichnet; rechts: Druck-, Längs- oder Longitudinalwelle genannt

Zur interferometrischen Visualisierung von Lamb-Wellen mittels der Shearografie ist der Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera oder einer stroboskopischen Ausleuchtung des Messobjektes nötig. Dies begründet sich darin, dass die geführten Wellen eine ziemlich hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit haben und mit einer handelsüblichen Industriekamera nicht erfasst werden können.

Zur Anregung von Lamb-Wellen existieren eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden. Die wohl einfachste und deshalb auch weit verbreitete Möglichkeit stellt die Verwendung eines piezokeramischen Shakers (PZT) dar. Es werden aber auch oftmals sogenannte Dicken- bzw. Scherschwinger verwendet [17]. Diese Methoden ermöglichen jedoch lediglich eine breitbandige Anregung von verschiedenen Wellenarten. Zur selektiven Anregung von Lamb-Wellen werden Keilwandler eingesetzt. Der Keilwandler besteht aus einem Dickenschwinger, der auf einem keilförmigen Körper angebracht wird [18]. Eine weitere Möglichkeit der gezielten Anregung von Lamb- bzw. Rayleigh-Wellen stellen die Kammwandler dar [5]. Auf einem ähnlichen Funktionsprinzip basieren die Integral- und Einphasenschwinger. Fokussierte Laser sind ebenfalls in der Lage, bei einer impulsartigen Energiefreisetzung geführte Wellen entstehen zu lassen [17]. Bei shearografischen Untersuchungen wird eine größere Amplitude der resultierenden, elastischen Welle benötigt. Je nach Bauteileigenschaften und der Dicke der zu untersuchenden Platte reichen die dünnen Piezoscheiben oftmals nicht mehr aus, deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit ein Piezoshaker mit verschiedenen Aufsätzen eingesetzt.

Der shearografische Messaufbau ist bei Untersuchungen mittels der Lamb-Wellen etwas komplexer als bei den klassischen Messungen (siehe Abbildung 4), da zusätzlich ein Frequenzgenerator und ein Triggersystem für die stroboskopische Messobjekt-Beleuchtung erforderlich sind. Mittels des Frequenzgenerators wird die Anregungsfrequenz eingestellt. Die Anregung ist zusätzlich mit der Laserbeleuchtung durch ein Triggersystem zu synchronisieren, so dass vom Messsystem ein quasi-statischer Zustand erfasst wird.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lamb-Wellen ist eine Funktion der Anregungsfrequenz und der Plattendicke. Ebenfalls von der Frequenz hängen die Wellenamplitude und die erzeugte Wellenlänge ab. Im niedrigen Frequenzbereich (unterhalb von 100 kHz) ist die Geschwindigkeit der elastischen Wellen verhältnismäßig gering. Zu beachten ist außerdem, dass bei niedrigen Anregungsfrequenzen lediglich 2 Lamb-Wellenmoden (A_0 und S_0) vorkommen. Deshalb findet die Erzeugung von geführten Wellen bevorzugt in diesem Frequenzbereich statt.

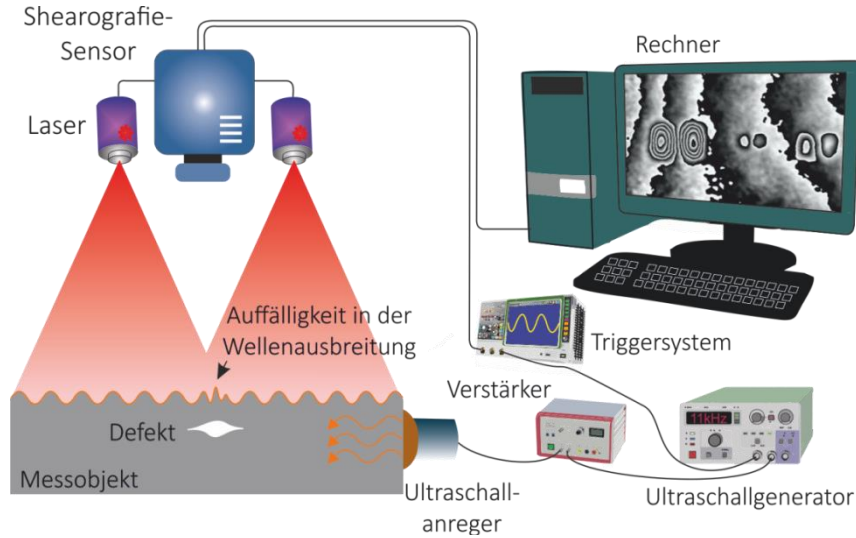


Abb. 4. Schematische Darstellung des Prinzips der Ultraschallanregung mittels Lamb-Wellen zur Detektion von Fehlstellen mittels der Shearografie

Einen bedeutenden Beitrag zur Entwicklung der Theorie der Lamb-Wellen-Erzeugung und Wellen-Ausbreitung in isotropischen Platten-Strukturen leistete im Jahre 1967 Igor Viktorov [5]. Eine anschauliche Herleitung der Wellen-Gleichungen wurde von Giurgiutiu im Jahre 2005 präsentiert [15]. Die Lamb-Wellen entstehen aus der konstruktiven Überlagerung von akustischen, mehrfach reflektierten Volumenwellen in einer Plattenstruktur [17]. Den Ausgangspunkt stellen die elastischen Potentiale Φ_{El} und Ψ_{El} , der transversalen und der longitudinalen Schallwellen, der Platte dar, also

$$\frac{\partial^2 \Phi_{El}}{dx^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{El}}{dy^2} + \frac{\omega^2}{c_s^2} \Phi_{El} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_{El}}{dx^2} + \frac{\partial^2 \Psi_{El}}{dy^2} + \frac{\omega^2}{c_p^2} \Psi_{El} = 0. \quad (12)$$

Die Gleichungen (11) und (12) enthalten folgende physikalischen Größen: c_s Geschwindigkeit der Scher- oder Sekundärwelle, c_p Geschwindigkeit der Druckwelle, ω Winkelfrequenz, x Ausbreitungsrichtung und y Koordinate in Dickenrichtung der Platte. Nach der Einführung von Lamé-Konstanten λ_L und μ_L , Material-Dichte ρ , Wellenzahl ξ und einigen mathematischen Umformungen, die beispielsweise in [15] nachvollzogen werden können, werden die charakteristischen Gleichungen für die symmetrische und antisymmetrische Lamb-Wellen wie folgt formuliert:

$$D_S = (\xi^2 - k_2^2)^2 \cos(k_1 d_{/2}) \sin(k_2 d_{/2}) + 4\xi^2 k_1 k_2 \sin(k_1 d_{/2}) \cos(k_2 d_{/2}) = 0, \quad (13)$$

$$D_A = (\xi^2 - k_2^2)^2 \sin(k_1 d_{/2}) \cos(k_2 d_{/2}) + 4\xi^2 k_1 k_2 \cos(k_1 d_{/2}) \sin(k_2 d_{/2}) = 0. \quad (14)$$

Dabei stehen D_S für eine symmetrische Lamb-Welle und D_A für eine antisymmetrische Lamb-Welle. Mit $d_{/2}$ wird die halbe Dicke der Platte berücksichtigt. Die beiden letzten Gleichungen können in eine kompaktere Form überführt werden. Diese Gleichung wird auch als Rayleigh–Lamb-Gleichung bezeichnet [12] und wie folgt berechnet:

$$\frac{\tan(k_1 d_{/2})}{\tan(k_2 d_{/2})} = - \left[\frac{4\xi^2 k_1 k_2}{(\xi^2 - k_2^2)^2} \right]^{\pm 1}. \quad (15)$$

Mit ± 1 wird angegeben, ob es sich um eine symmetrische $+1$ bzw. antisymmetrische -1 Lamb-Welle handelt. Die symmetrischen Moden werden üblicherweise mit $S_0, S_1, S_2, \dots$ und die antisymmetrischen mit $A_0, A_1, A_2, \dots$ gekennzeichnet. Dadurch, dass die Koeffizienten k_1, k_2 eine Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit ω und somit der Frequenz zeigen, sind die Lösungen der Gleichung (15) dispersiv. Dieser Umstand ist die Ursache für die Ausbreitung von Lamb-Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen und unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Wegen der zweidimensionalen Ausbreitung der Lamb-Wellen und der messbaren Wechselwirkung mit den Fehlstellen ist diese Wellenart für die Strukturüberwachung grundsätzlich gut geeignet (siehe Abbildung 5).

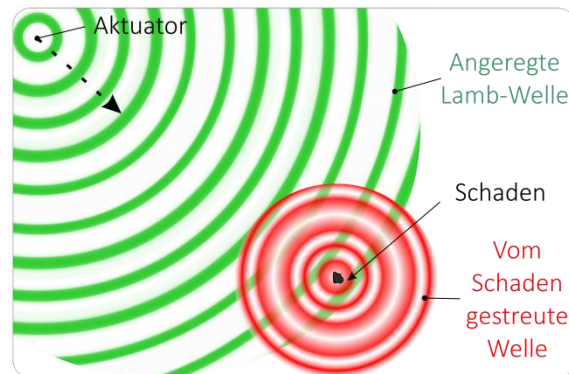


Abb. 5. Schematische Darstellung der Streuung von elastischen Wellen an einem Defekt

3. Experimentelle Messergebnisse

Bei dünnen Platten, die insbesondere aus Metall sind, ist die Struktur-Dämpfung sehr gering, so dass wegen den Randreflexionen außer einem komplexen Interferenzmuster nichts zu erkennen ist. Zum Nachweis von Defekten sollen deshalb weitere Maßnahmen getroffen werden, um die unerwünschten Reflexionen von Lamb-Wellen an den Rändern des Messobjektes zu verhindern bzw. zu minimieren. Der Einsatz einer Knetmasse oder von Silikon ist eine der Möglichkeiten zur effektiven Reduzierung von Randreflexionen (siehe Abbildung 6). Die Knetmasse oder Silikon wird dabei entlang der sich in der Nähe der Anregung befindlichen Ränder aufgetragen. Alternativ zu der beschriebenen Methode können Hochgeschwindigkeitskameras eingesetzt werden, um in definierten Zeitabständen die Ausbreitung der Wellen zu erfassen und somit die Fehlstellen noch vor dem Erreichen des Bauteilrandes durch die Lamb-Wellen zu lokalisieren.

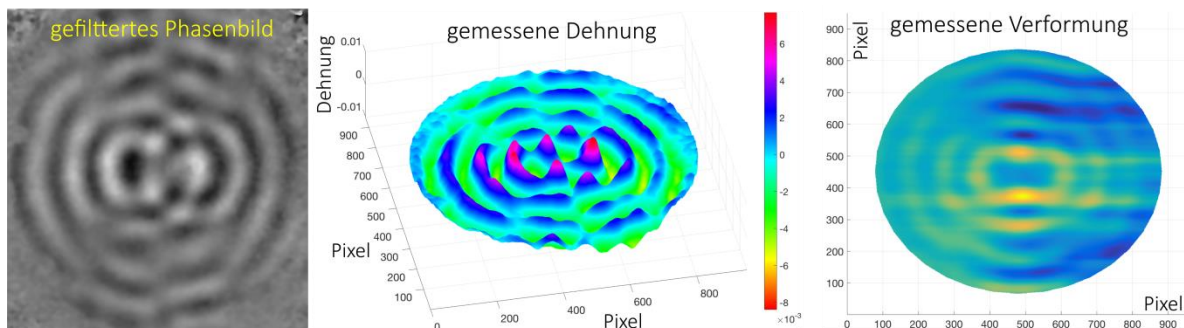


Abb. 6. Lamb-Wellen-Ausbreitung in einer Aluminiumplatte nach Abschwächung von Rand-Reflexionen mittels der Knetmasse (gemessen mittel der Shearografie)

Die Detektion von Fehlstellen mittels elastischer Wellen ist nicht neu und wird seit einigen Jahrzehnten in der zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt. Die Visualisierung der Oberflächenwellen erfolgt in der Regel mit Hilfe der Laservibrometer, da diese

flächendeckend, berührungslos und hinreichend schnell messen können. Außerdem können Verformungsamplituden unter einem Nanometer erfasst werden.

Die shearografische Fehlerdetektion mittels Lamb-Wellen ist noch wenig erforscht, es existieren lediglich einige wenige Ansätze [17]. Die Besonderheit des im Rahmen dieser Arbeit benutzten Ansatzes besteht darin, dass ein shearografischer Sensor basierend auf der räumlichen Phasenschiebung und stroboskopischer Beleuchtung, also in Kombination mit einer handelsüblichen CCD-Kamera, zur Visualisierung von Lamb-Wellen eingesetzt wird.

Die Hauptschwierigkeit der shearografischen Untersuchungen mittels der Lamb-Wellen besteht darin, wie bereits angedeutet, dass die Amplituden der Oberflächenwellen lediglich einige Hundert Nanometer betragen. Die maximalen Amplituden werden im tiefen MHz – Bereich (bis ca. 0,1MHz) erzeugt. Außerdem ist die Deutung der Ergebnisse nicht immer einfach, wenn es vor allem zu Reflexionen an den Rändern der zu untersuchenden Platte und somit zu mehrmaligen Überlagerungen von Lamb-Wellen kommt.

Im Folgenden werden Ergebnisse der Untersuchung einer CFK-Platte mit einer Dicke von 5mm diskutiert. Es wird eine Stelle mit zwei präparierten Rissen untersucht. Einer der Risse hat einen Durchbruch nach außen und stellt somit einen großen, signifikanten Fehler dar (siehe Abbildung 7). Der zweite Einschnitt hat eine Tiefe von 2,5mm und eine Länge von 20mm. Die Anregung erfolgt zwischen den beiden Fehlstellen mit einem Piezoshaker. Der präparierte Riss mit dem Durchbruch nach außen ist besonders deutlich im Phasenbild zu erkennen, da dieser die Ausbreitung von Wellen in die vom Aktor entgegengesetzte Richtung komplett unterbindet. Dies ist auf eine Totalreflexion von Lamb-Wellen an den Rändern des Einschnittes zurück zu führen. Der Einschnitt ohne den Durchbruch nach außen ist ebenfalls zu detektieren. Dieser ist dadurch zu erkennen, dass die Amplituden der elastischen Wellen nach dem Passieren dieses Risses um ein Vielfaches abgeschwächt werden. Der Einschnitt ist also groß bzw. tief genug, um das ungestörte Ausbreiten von Lamb-Wellen in der CFK-Platte zu beeinflussen.

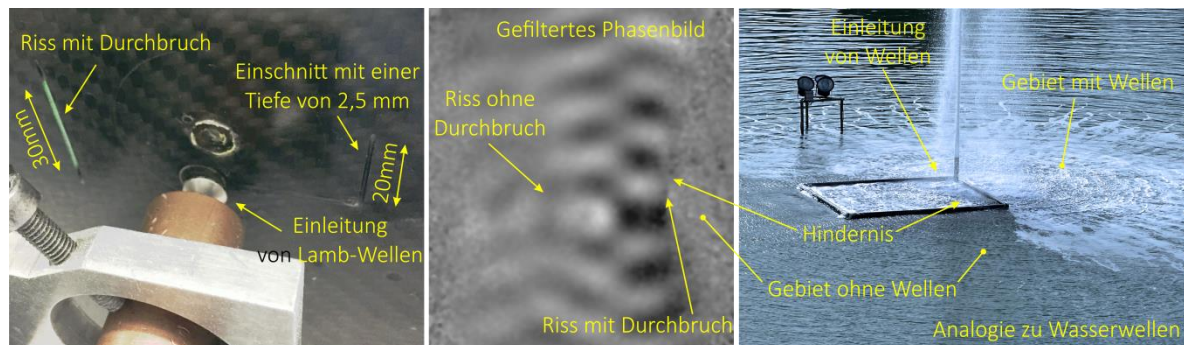


Abb. 7. Messaufbau (links) und Ergebnisse (in der Mitte) der shearografischen Fehlstellendetektion (Shearbetrag 20mm) in einer CFK-Platte mittels der Lamb-Wellen (angeregt mit 31,4 kHz) und Analogie zu einer Wasserfontäne mit einem Hindernis (rechts)

4. Fazit

Der realisierte shearografische Messaufbau in Verbindung mit der räumlichen Phasenschiebung, stroboskopischer Beleuchtung und einer Messobjektanregung mittels der elastischen Wellen ermöglicht eine zuverlässige Detektion von verschiedenen Fehlstellen in unterschiedlichen Materialien. Die physikalische Natur der Lamb-Wellen setzt jedoch einen plattenförmigen Aufbau der zu prüfenden Struktur voraus.

Die Detektion von mittelgroßen Defekten (von 10mm bis 40mm) gelingt mit einer hohen Zuverlässigkeit. Detektion von kleineren Fehlstellen (unter 10mm) ist jedoch schwierig, da entsprechend eine noch kleinere Wellenlänge der Lamb-Wellen erzeugt und visualisiert werden muss, damit es zur Wechselwirkung der elastischen Welle mit dem

Defekt kommt. Eine kürzere Wellenlänge kann bei höheren Anregungsfrequenzen erzeugt werden. Dabei nimmt jedoch die Amplitude der elastischen Welle ab, so dass diese mit der Shearografie nicht mehr erfasst werden kann. Die Sensitivität der Shearografie kann mit Hilfe des Shearbetrages zwar in gewissen Grenzen eingestellt werden, dies ist jedoch oftmals nicht mehr ausreichend, um oberhalb von 100kHz die Lambwellen zuverlässig zu visualisieren.

Diese Methode der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung bietet noch sehr viel Potential, insbesondere bei der Fehlstellendetektion in plattenförmigen Kompositwerkstoffen und hat gegenüber den anderen Verfahren durchaus Vorteile. Hierzu zählen die einfache Deutung der Ergebnisse, die relativ einfache Realisierung der Anregung und eine anschaulich visualisierbare Wechselwirkung der Wellen mit Defekten. Anhand der Interaktion der Lamb-Wellen mit der Fehlstelle ist es außerdem möglich, Rückschlüsse auf die Form und die Tiefe des Defektes zu ziehen.

Referenzen

- [1] Leendertz, J. A.; Butters, J. N.: An Image Shearing Speckle Pattern Interferometer for Measuring Bending Moments, *J. Phys. E., Sci. Instr.* 6, Seiten 1107-1110, 1973
- [2] Hung, Y. Y.: Speckle-Shearing Interferometric Technique: a Full-Field Strain Gauge, *Applied Optics*, Vol.14, No. 3, Seiten 678-622, 1975
- [3] Schuth, M.: Aufbau und Anwendung der Shearografie als praxisgerechtes, optisches Prüf- und Messverfahren zur Dehnungsanalyse, Dissertation, Universität Kassel, 1995
- [4] Yang, L.: Grundlagen und Anwendungen der Phasenschiebe-Shearografie zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und Schwingungsanalyse, Dissertation, Universität Kassel, 1997
- [5] Viktorov, I. A.: Rayleigh and Lamb Waves, Springer Verlag, 2013
- [6] Millerd, J.; Brock, N.; Hayes, J.; North-Morris, M.; Novak, M.; Wyant, J.: Pixelated Phase-Mask Dynamic Interferometer, *Proc. of SPIE Vol. 5531*, Seiten 304-314, 2004
- [7] Schmitt, M.: Detektion von Schichtbelegungen innerhalb von flüssigkeitsgefüllten Rohren und Behältnissen durch Modenkomb. von Lambw., Dissertation, Universität Freiburg, 2012
- [8] Köhler, B.: Geführte Wellen in Plattenstrukturen und deren Wechselwirkung mit Strukturelementen und Defekten, DACH - Jahrestagung, 2004
- [9] Schubert, K. J.: Beitrag zur Strukturzustandsüber. von faserverstärkten Kunststoffen mit Lamb-Wellen unter veränd. Umgebungsbed., Dissertation, Universität Bremen, 2013
- [10] Focke, O.; Hildebrand, A.; Kopylow, C.: Inspection of Laser Generated Lamb Waves Using Shearographic Interferometry, 1st International Symposium, 2008
- [11] Gordon, G. A.; Bard, A.; Wu, S.: Wide-Area Imaging of Ultrasonic Fields by Digital Phase-Stepping Shearography, *Review of Progress*, Vol. 17, 1998
- [12] Su, Z.; Ye, L.: Identification of Damage Using Lamb Waves, from Fundamentals to Applications, Springer Verlag, 2009
- [13] Habersack, C.: Die holographische Modalanalyse, Dissertation, Universität Stuttgart, 2005
- [14] Takeda, M.; Kobayashi, I. H.: Fourier-Transform Method of Fringe Pattern Analysis for Computer-Based Topography and Interferometry *J. Opt. Soc. Am.* 72 156-9, 1982
- [15] Giurgiutiu, V.: Tuned Lamb Wave Excitation and Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring, *Journal of Intelligent Material*, Vol. 16, 2005
- [16] Xie, X.; Yang, L.; Xu, N.; Chen, X.: Michelson Interferometer Based Spatial Phase Shift Shearography, *Applied Optics* Vol. 52, No. 17, 2013
- [17] Focke, O.; Hildebrand, A.; Kopylow, C.: Inspection of Laser Generated Lamb Waves Using Shearographic Interferometry, 1st Intern. Symposium on Laser Ultrasonics: Science, 2008
- [18] Lindner, G.: Sensors and Actuators Based on Surface Acoustic Waves Propagating Along Solid-Liquid Interfaces, *Journal of Physics D: Applied Physics* 41.12, 2008