

Schwingungsshearografie unter Ausnutzung der lokalen Defektresonanz

Marc KREUTZBRUCK¹, Nikolai GULNIZKIJ¹, Gerhard BUSSE¹, Igor SOLODOV¹
¹ Universität Stuttgart, Stuttgart

Kurzfassung. Die optisch angeregte Lock-In Shearografie (OLS) ist für die schnelle und einseitige zerstörungsfreie Prüfung an großflächigen Bauteilen ausgelegt. Hierbei wird mittels eines aufgeweiteten Laserstrahls die Oberflächenverformung bei Kräfteintrag vermessen. Routinedurchführungen sind oftmals als zu lang und als noch nicht zufriedenstellend bewertet. Aus diesem Grund wird auch die ultraschallbasierte Shearografie angewandt, bei der über eine Sonotrode große Leistung in das Bauteil eingekoppelt wird. Delaminationen und Rissen reiben aufgrund der starken Schwingung aneinander und rufen somit eine lokale Erwärmung hervor. Da die Wärme durch den Leistungsschall direkt am Defekt erzeugt wird, verringern sich die Messzeiten gegenüber der OLS etwa um einen Faktor 5. Aufgrund der sehr hohen Leistung der Sonotrode, wäre es wünschenswert den Energieeintrag zu reduzieren und bestenfalls nur am Ort des Defektes zu generieren. Hierzu bietet sich mit der lokalen Defektresonanz (LDR) ein jüngst vorgeschlagenes Verfahren an, welches im vorliegenden Beitrag erstmals mit der Shearografie kombiniert wird. Hierbei wird davon ausgegangen, dass ein Defekt mit seinem angrenzenden Werkstoffbereich mechanisch veränderte Schwingungseigenschaften besitzt. Es zeigt sich, dass die typischen Defekte bei ihrer Resonanzfrequenz mit sehr hohen Amplituden zu schwingen beginnen. Es reicht daher aus auch mit geringen Schallenergien von einigen mW anzuregen, um Temperaturänderungen von einigen Kelvin an der Defektoberfläche innerhalb des Bauteils zu erzeugen. Es kann also auf den Einsatz einer Sonotrode verzichtet und handelsübliche Piezowandler eingesetzt werden. Die LDR-basierte Shearografie (LDRS) kann auch in wenigen Sekunden durchgeführt werden und zeichnet sich durch ihre Defektselektivität und einfache Interpretation der Anzeigen aus. Im praktischen Einsatz wird das Bauteil mit Frequenzen im Bereich von 30 kHz-50 kHz angeregt und die Bauteiloberfläche als live-Video beobachtet. Wir berichten in vergleichenden Messungen über die erzielbaren Nachweisempfindlichkeiten der OLS und der LDRS, sowie über die Rahmenbedingungen für einen praktischen Einsatz. Hierbei stellen wir Prüfergebnisse von Luftfahrtkomponenten sowie die Detektion von Ermüdungserscheinungen in Form von Mikrorissen vor.

1. Einführung

Die Anregung und Wechselwirkung von Werkstoff-schädigungen mit Ultraschall wurde in zahlreichen Versuchen mit dem optischen Messverfahren Vibrometrie erfolgreich erprobt und untersucht [5]. Die exakte Bestimmung der Resonanzfrequenzen konnte bis weit ausschließlich mit der Vibrometrie bestimmt werden. Mit dem Speckle Interferometrischen-Verfahren Shearografie soll durch Anregung von Ultraschall ebenfalls die LDR-Frequenzen aufgefunden werden, um somit Defekte schnell und zuverlässig nachweisen zu können. Es soll zusätzlich bei der Defekterkennung des bildgebenden

Verfahrens-Shearografie die Grenzen der Nachweisbarkeit von Defekten betrachtet werden. Dazu werden vorzugs-weise Delaminationen an Faserverbund-Kunststoffen untersucht.

1.1 Vibrometrie

Die Vibrometrie ist ein scannendes Verfahren zur berührungslosen Erfassung von Schwingungen an Objektoberflächen. Dabei wird eine Probe mit einem Sinussignal angeregt und die Objektoberfläche mit einem Laser-Vibrometer, punktwise, abgescannt (Bild 1). Messtechnisch werden Auslenkungen oder Geschwindigkeiten des einzelnen Pixels auf der Oberfläche erfasst.

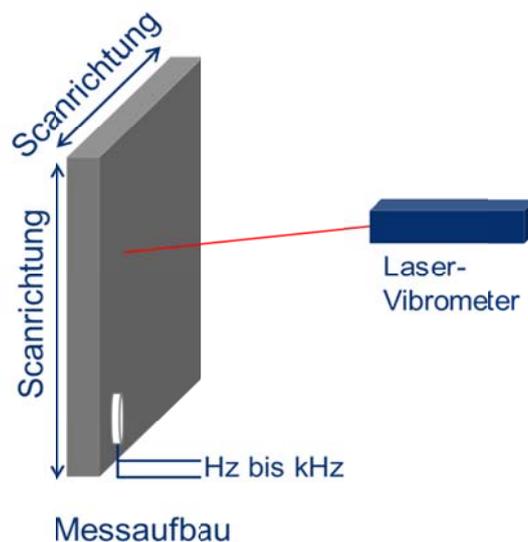


Bild 1: Schematische Darstellung der Vibrometrie- Messung an einer Objektoberfläche.

Wie in Bild 1 dargestellt wird mittels eines Piezo-Signalgebers das Objekt in Schwingung gebracht. Damit kommt es zur Frequenzverschiebung des reflektierten Laserstrahls (Doppler-Effekt). Dieser Objektstrahl wird in einem optischen Interferometer mit einem Referenzstrahl überlagert. Die Änderung der Intensitätsverteilung aufgrund der Überlagerung von zwei Laserstrahlen, führt zu einer Intensitätsänderung, die mit einem Fotodetektor detektiert wird. [1]

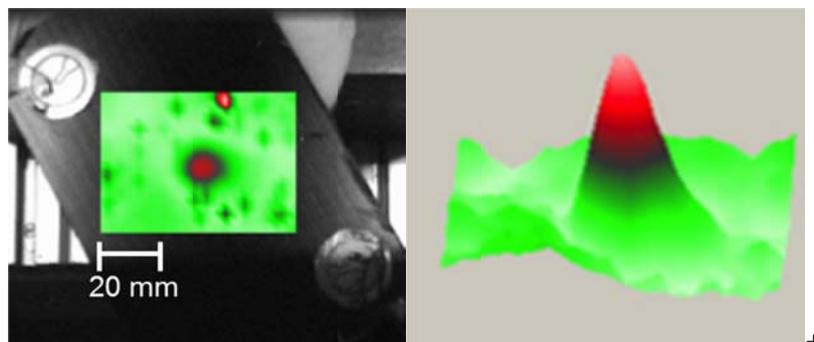


Bild 2: Ergebnisse einer Vibrometrie-Messung an einer 40 J CFK-Impact Platte. Links: Sicht von oben. Rechts: 3D-Darstellung.

Die Vibrometrie erfasst damit die Schwingung der einzelnen Bereiche der Objektoberfläche und kann lokale Abweichungen mit Schwingungsamplitude auf der unteren Nanometerskala nachweisen. Defekte wie Delaminationen und Risse führen zu

einer Abweichung der Schwingungsamplitude. Somit werden Defekte durch eine Änderung der lokalen Schwingungs-amplitude nachgewiesen. Dieses schwingungsanfällige Verfahren ist in Inline Prozessen schwer einsetzbar und durch seinen scann Modus auch zeitaufwendig. Ein nicht spannendes, schnelles und für Messungen an großen Flächen ausgelegtes Verfahren ist die Shearografie. Dieses Verfahren ist robust gegenüber äußeren Störungen und findet seit langem Einsatz in Inline Prozessen.

1.2 Shearografie

Das Speckle-Interferometrische Verfahren Shearographie wird zur berührungslosen Messung des Verformungsgradienten an Objekten eingesetzt. Dazu wird die Objektoberfläche mit aufgeweitetem kohärentem und monochromatischem Laserlicht beleuchtet. An optisch rauen Oberflächen wird das Laserlicht gestreut und scheinbar bilden sich auf der Objektoberfläche feinkörnige Flecken (Speckle) aus. Dieses Fleckenmuster wird als Speckle-Muster bezeichnet. Das entstandene Speckle-Muster entspricht einem Finger-abdruck der Objektoberfläche und ändert sich mit der Verformung dieser. Das Speckle-Muster des Objekts wird durch einen speziellen optischen Aufbau auf einer CCD-Kamera abgebildet. Der Aufbau einer Shearografie-Kamera wird in Bild 3 dargestellt.

Der optische Aufbau besteht aus einem Strahlenteiler, welcher den Objektstrahl in zwei Teilstrahlen aufspaltet. Einer der Teilstrahlen wird an einem Spiegel total-reflektiert und gelangt durch denselben Strahlenteiler zur Detektoroberfläche der CCD-Kamera. Auf der Rückseite dieses Spiegels ist ein Piezoelement zur Phasenschiebung des Lichts angebracht. [2]

Der zweite Teilstrahl gelangt an einen weiteren Spiegel, der in jede beliebige Richtung, in einem beliebigen Winkel, verstellbar bzw. verkipptbar ist. An diesem Spiegel wird der Teilstrahl ebenfalls reflektiert und gelangt durch denselben Strahlenteiler auf die Detektoroberfläche der CCD-Kamera. Durch die Verkipfung des zweiten Spiegels um einen definierten Winkel, wird der Teilstrahl gegen das nicht verkippte Bild geschert. Mit diesem Aufbau kann der Gradient der Verformung bestimmt werden. Zur Beobachtung des Verformungsgradienten wird das Speckle-Muster der Objektoberfläche im unbelasteten Referenzzustand (Gleichgewichtszustand) vom belasteten Zustand subtrahiert. Bei Überlagerung zweier geringfügig veränderter Speckle-Muster entstehen Streifen (Moire-Streifen). Das Streifenmuster enthält Informationen über die Objektverformung.

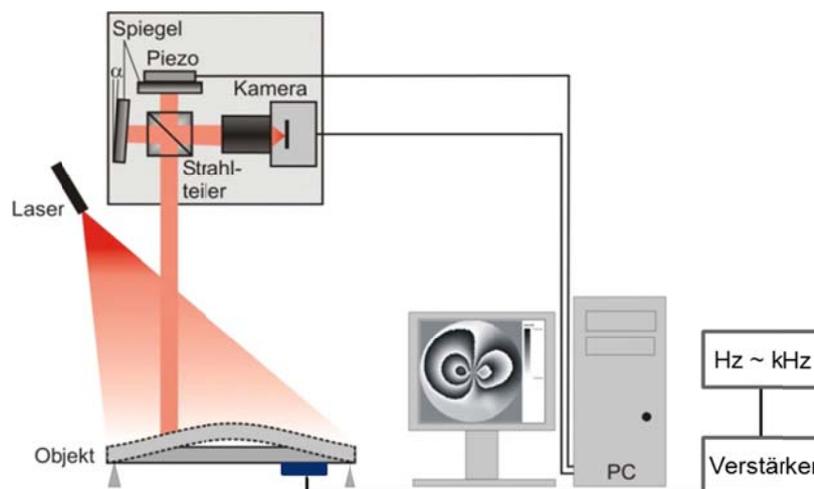


Bild 3: Schematische Darstellung der Shearografie. Durch Hinzufügen von Komponente wie Frequenzgenerator, Verstärker und Vakuums-Shaker kann das Objekt mittels Ultraschall angeregt werden.

Es existiert eine Vielzahl von externen Anregungsquellen wie Erwärmung durch Halogenstrahler, Druck, mechanische Belastung, Induktion, etc. mit denen das Objekt aus seinem Gleichgewichtszustand (Referenzzustand) ausgelenkt werden kann.[3] Diese Anregungsmethoden sind häufig Zeitaufwendig oder Energieintensiv. Als Vergleich werden in Bild 4 Ergebnisse aus drei Messungen mit drei verschiedenen Anregungsquellen, an einem CFK-Rohr, gezeigt.

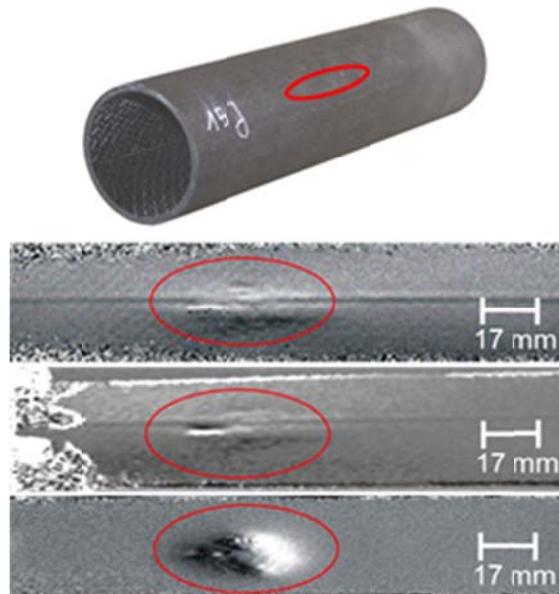


Bild 4: a) CFK-Rohr ($d = 51$ mm, $l = 220$ mm und 3 mm Wanddicke) mit einem 15 J Impact. b) optische Anregung (2000 Watt und $t_p = 120$ s), c) induktive Anregung (2000 Watt und $t_p = 120$ s), d) Anregung mittels Leistungsumschall (300 Watt und $t_p = 30$ s)

Im Vergleich zur optischen und induktiven Anregung zeigt die Anregung mittels Leistungsumschall eine hohe Defektselektivität sowie deutlich kürzere Prüfzeiten (t_p). Die Einkopplung des Burst-Signals kann zur Schädigung und sogar zur Zerstörung des Bauteils führen.

Zusätzlich gibt es eine weitere Anregungsmethode die von der Anregung mit Leistungsumschall abgegrenzt werden soll. Bei der Ultraschallangeregten-Shearografie wird ein Sinussignal in das Prüfobjekt eingekoppelt. Das Objekt wird aus seinem Gleichgewichtszustand ausgelenkt. Zeitgleich wird die schwingende Oberfläche des Objekts, mit einer Shearografie-Kamera, beobachtet. Der Messaufbau ist in Bild 3 dargestellt. Bei dieser Anregungsmethode wird eine Leistung von 24 Watt in das Prüfobjekt eingekoppelt. Dabei kann zur Einkopplung des Ultraschalls ein Piezosignalgeber oder ein Vakuum-Shaker verwendet werden.

Im Weiteren wird ausschließlich die Anregung mittels Ultraschall (24 W) betrachtet.

1.3 Lokale Defektresonanz

Die Lokale Defektresonanz (LDR) basiert auf der Annahme, dass Defekte, verursacht beim Herstellungsprozess oder während des Betriebs, zu einer lokalen Änderung der Materialkennwerte des Objekts führen. Dabei ist eine lokale Steifigkeitsabnahme maßgebend für die Ausbildung lokaler resonanter Schwingungen.

Es wird davon ausgegangen, dass die LDR-Grundfrequenz eines Defektes, durch Einführen einer effektiven Steifigkeit und Masse, bestimmt werden kann. Die LDR soll am einfachsten Beispiel einer Sacklochbohrung in einer PMMA-Platte betrachtet werden.

Dabei wird ein Zusammenhang zwischen kinetischen- und potentialen Schwingungsenergie des Restmaterials der Sacklochbohrung betrachtet. Die Geometrie wie der Durchmesser a und die Restwanddicke h der Sacklochbohrung, gehen in die Berechnung mit ein. Damit wird für eine kreisförmige Sacklochbohrung folgender Ausdruck hergeleitet. [5]

$$f_0 \approx 1,6 h \sqrt{\frac{E}{12 \rho (1 - \nu^2) a^4}} \quad (1)$$

Mit Gleichung (1) kann die LDR-Grundfrequenz an einem einfachen Defekt, einer Sacklochbohrung in PMMA, berechnet werden. Vollständigkeitshalber soll erwähnt werden, dass sich lokale Defektresonanzen höherer Schwingungsordnung mit steigenden Anregungsfrequenzen ausbilden und somit als LDR höherer Ordnung bezeichnet werden.

2. Bestimmung der LDR

Zur Bestimmung der LDR-Grundfrequenz mittels Shearografie eignen sich Sacklochbohrungen in Probenkörpern aus PMMA. In Bild 5 wird eine schematische Darstellung der PMMA-Proben gezeigt.



Bild 5: Zum besseren Verständnis wird eine Skizze einer PMMA-Probe gezeigt. Oben ist die Probe in Draufsicht und unten im Querschnitt dargestellt.

Bei der Probenherstellung wurde einseitig Material aus den Platten, jeweils eine Kreisfläche mit 20 mm Durchmesser, ausgefräst. Die Restwanddicke wurde dabei zwischen 0,85 mm bis 2 mm variiert. Der Ultraschall wurde mittels eines Piezoelements auf der Probe mit Epoxidharz fixiert und die LDR-Grundfrequenz der einzelnen Sacklochbohrungen bestimmt. Die Ergebnisse aus dieser Messung, sowie die berechnete LDR, sind in Bild 6 dargestellt.

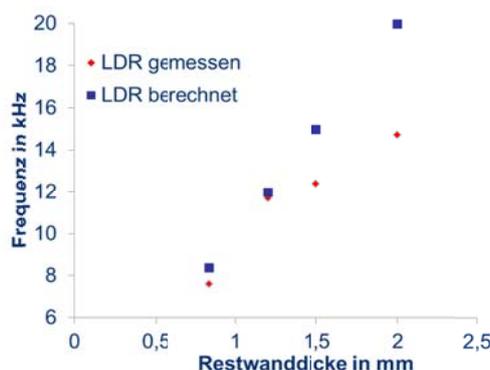


Bild 6: Aufgetragen sind die ermittelten und die berechneten Grundfrequenzen der lokalen Defektresonanzen in Abhängigkeit der Restwanddicken.

Für die berechnete und gemessene LDR ist ein Anstieg der Resonanzfrequenzen, in Abhängigkeit von den Restwanddicken, zu erkennen. Lediglich bei Restwanddicken über 1 mm weichen die ermittelten Resonanzfrequenzen von den berechneten Frequenzen ab. Diese Ergebnisse liegen in guter Übereinstimmung mit der Näherung (1).

Da sich das mathematische Modell ausschließlich auf LDR-Grundfrequenzen beschränkt, sollen im weiteren Verlauf die lokalen Defektresonanzen höherer Ordnung bestimmt und diese mittels eines Vibrometers gegengeprüft werden. Dazu wird eine CFK-Probe mit künstlich eingebrachten Delaminationen untersucht. Der Ultraschall wird hierbei mittels eines Vakuum-Shakers in die Probe eingekoppelt. Dabei wird eine Gesamtleistung von 24 Watt in das Bauteil eingebracht. Mit dieser Anregungsquelle werden die Resonanzfrequenzen der Delaminationen mittels Shearografie bestimmt und anschließend mit den Ergebnissen aus der Vibrometrie verglichen. In Bild 7 wird eine CFK-Probe gezeigt welche mit der Shearografie und Vibrometrie geprüft wird.

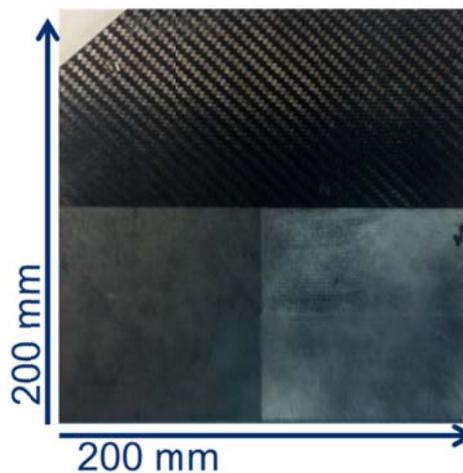


Bild 7: Zeigt eine CFK-Probe mit Delaminationen in verschiedenen Tiefenlagen. Die Probendicke beträgt 6,2 mm.

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse werden, wie in Bild 8 angeordnet, zuerst die Ergebnisse aus der Vibrometrie und anschließend die Ergebnisse aus der Shearografie gezeigt.

Die in Bild 8 dargestellten Ergebnisse zeigen bei der Vibrometrie die schwingende Delamination in der Draufsicht (out-of-plane) als einfache Beule. Es handelt sich dabei um die Grundresonanzfrequenz. Die Shearografie-Kamera stellt diese Grundschiwingung bzw. die Ableitung der Verformung als Schmetterlingsmuster dar.

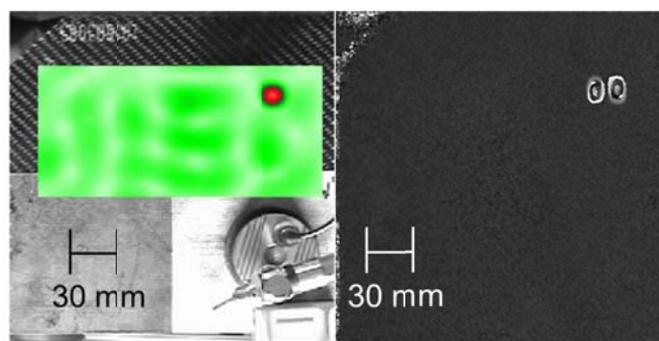


Bild 8: Links sind die Ergebnisse aus der Vibrometrie bei 19,2 kHz und rechts die Ergebnisse aus der Shearografie bei 18,7 kHz dargestellt.

Des Weiteren ist eine Frequenzabweichung von 500 Hz zwischen den bestimmten lokalen Defektresonanzen zu sehen. Diese Frequenzabweichung kann damit erklärt werden, dass die Anregungsquelle (Vakuum-Shaker) bei der Shearografie auf der Rückseite der Probe angebracht, hingegen bei der Messung mit der Vibrometrie auf der Vorderseite, angebracht wurde.

Mit steigenden Anregungsfrequenzen bilden sich im Bereich der Delamination lokale Defektresonanzen höherer Ordnung aus, welche die rechteckige Geometrie der Delamination wiedergeben. Das Ergebnis einer lokalen Defektresonanz höherer Ordnung wird in Bild 9 gezeigt.

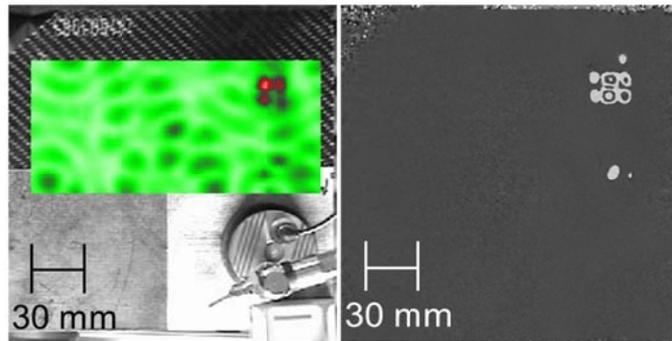


Bild 9: Links sind die Ergebnisse aus der Vibrometrie bei 43 kHz und rechts die Ergebnisse aus der Shearografie bei 44 kHz dargestellt.

Die in Bild 10 dargestellten Ergebnisse zeigen Messungen auf der Rückseite der CFK-Probe. Bei einer bestimmten Frequenz können am Probekörper drei Delaminationen simultan angeregt werden. Für die obere Delamination ist eine komplexe Schwingung zusehen, welchen kein regelmäßiges Muster mehr zugeordnet werden kann. Die Delamination in der Mitte entspricht einem Schwingungsmuster der oberen Delamination bei 44 kHz und das Schwingungsmuster der unteren Delamination entspricht hierbei einer Schwingung erster höherer Ordnung.

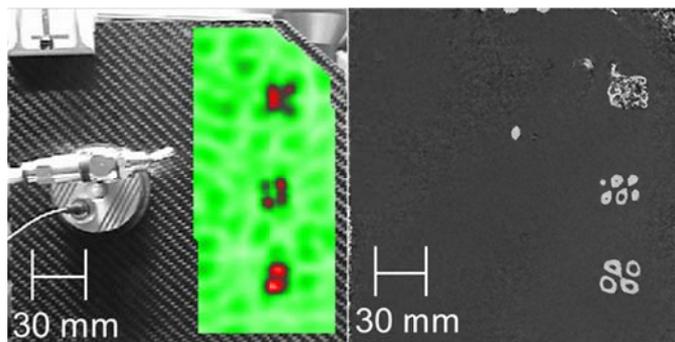


Bild 10: Gezeigt sind die Ergebnisse aus einer Messung auf der Rückseite der CFK-Probe. Links sind die Ergebnisse aus der Vibrometrie bei 49,2 kHz und rechts die Ergebnisse aus der Shearografie bei 49,2 kHz dargestellt.

Die mit der Shearografie bestimmten lokalen Defektresonanzen konnten mittels Vibrometrie bestätigt werden. Da die Anregung mittels Ultraschall eine selektive Defektanregung ermöglicht, soll das Signal-Rausch-Verhältnis eingehender betrachtet und mit den Ergebnissen aus der optisch angeregten Shearografie verglichen werden.

2.1 Lokale Defektoresonanz und Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)

Zur Bestimmung des SNR wird eine Kupfermeshplatte mit 12 Delaminationen, wie in Bild 11 Schematisch dargestellt, geprüft.

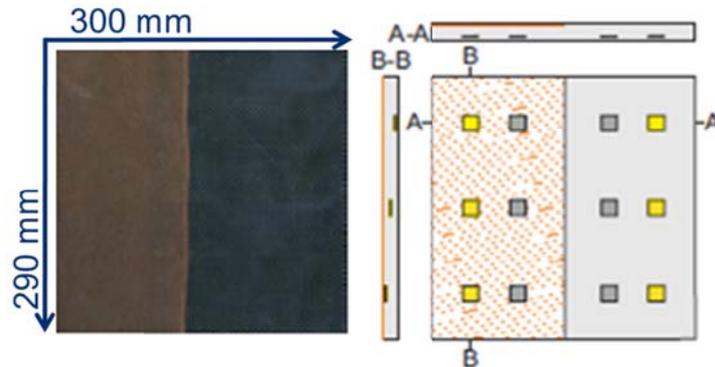


Bild 11: Links ist ein Foto der zu untersuchenden Kupfermeshplatte dargestellt. Rechts wird schematisch die Defektverteilung in der Probe gezeigt. Die Probe hat eine Dicke von 4 mm und die Delaminationen entsprechen einer Fläche von 25x25 mm². Teflon (gelb), Aluminium (grau)

In Bild 12 sind die Ergebnisse aus der Messung mittels Shearografie dargestellt. Es wurde entlang eines Bereichs das Signal aufgezeichnet und als Diagramm in Bild 13 dargestellt.

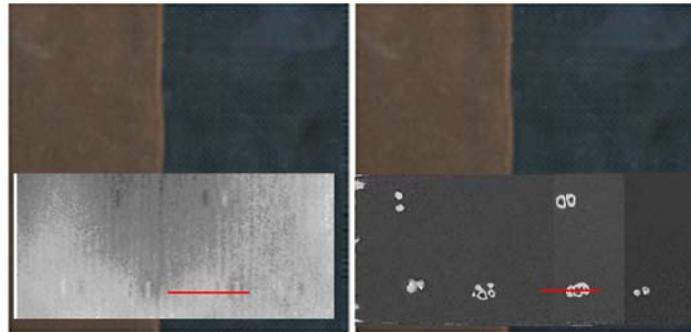


Bild 12: Auf der linken Seite sind die Ergebnisse aus der optisch angeregten Shearografie dargestellt. Bei der Ultraschallanregung (rechts) wurden die Delaminationen bei verschiedenen Frequenzen selektiv angeregt. Zur anschaulichen Darstellung wurden die Ergebnisse aus den Messungen zu einem Gesamtbild zusammengefasst.

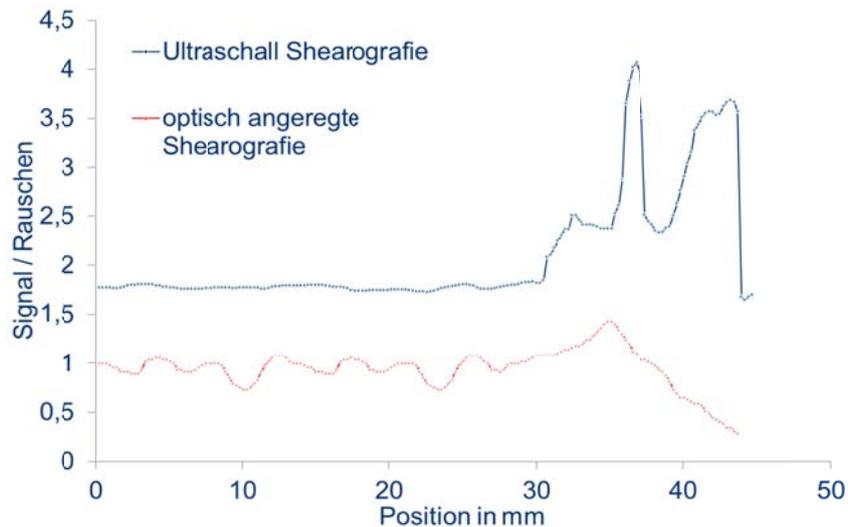


Bild 13: Dargestellt wird das Signal-Rausch-Verhältnis an derselben Position der Probe, entlang der roten Linie.

Deutlich ist eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses um den Faktor 3 zu erkennen. Durch die selektive Defektanregung kann es zu keiner Vollkörperverformung und somit zu keiner Überlagerung mit Defektverformungen kommen.

Die verbesserte Defektselektivität kann an Messungen an einem Realbauteil mit zwei verschiedenen Anregungsquellen gezeigt werden. Die Ergebnisse aus beiden Messungen sind in Bild 14 dargestellt.

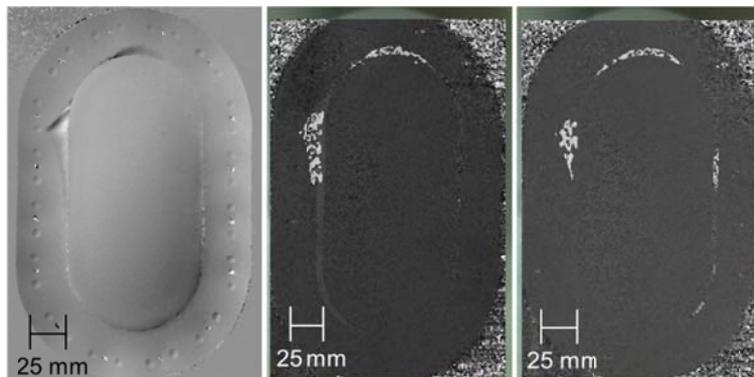


Bild 14: Dargestellt sind die Ergebnisse aus der Messung an einer CFK-Abdeckung einer Wartungsklappe eines Airbus 330.

Bei der optischen Anregung ist die Delamination gut zuerkennen (Bild 14: links). Bei der Ultraschallangeregt Shearografie (30,2 kHz) ist derselbe Defektbereich zuerkennen (Bild 14: Mitte) sowie ein Riss welcher mittels optischer Anregung nicht direkt auffällt. Im rechten Bild (Bild 14) sind bei einer Frequenz von 43,3 kHz einzelne schwingende Bereiche zuerkennen welche in der optisch angeregten Shearografie nicht zu erkennen sind. Diesen schwingenden Bereichen können eindeutig Rissen zugeordnet werden.

3. Zusammenfassung

Die LDR zeichnet sich durch kurze Messzeiten und durch ihre Defektselektivität aus. Die zur Defektanregung benötigte Energie, kann im Vergleich zu anderen Anregungsmethoden, aufgrund des Resonanzeffektes um einen Faktor 10 bis 80, reduziert werden. Artefakte

können somit deutlich reduziert werden. Des Weiteren kann die Ultraschall-Shearografie die Prüfzeiten um einen Faktor 5 verkürzen. Die Ergebnisse lassen sich mit den Ergebnissen aus der Vibrometrie vergleichen und reproduzieren.

4. Ausblick

Die Bestimmung der Schwingungsamplitude eines Defekts soll in Abhängigkeit seiner Anregungsfrequenz und Anregungsamplitude bestimmt werden. Zusätzlich soll ein möglicher Zusammenhang zwischen der Anregungsfrequenz und der Tiefenlage von Delaminationen untersucht werden.

Referenzen

- [1] SOLODOV, I., Nonclassical acoustic nonlinearity: Nonlinear vibrations vs nonlinear waves, Proceedings of International Congress on Sound and Vibration 18, Rio de Janeiro, Brasil, 10-14 July, (2011)
- [2] Gerhard, H., Entwicklung und Erprobung neuer dynamischer Speckle-Verfahren für die zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung, Diss. (2007)
- [3] MENNER, P., Zerstörungsfreie Prüfung von modernen Werkstoffen mit dynamischen Shearografie-Verfahren, Diss. (2013)
- [4] MENNER, P., RIEGERT, G.; BUSSE, G.: ZfP an CFK mit wirbelstromangeregter Lockin-Thermografie und Lockin-Shearografie, Carbon Composites e.V., Augsburg
- [5] SOLODOV, I., BAI, Y., BEKGULYAN, S., BUSSE, G., A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultra-sonic nondestructive testing, Applied Physics Letters, 99, 211911, (2011)