

Anwendung der Shearografie für die schnelle Prüfung von Bauteilen aus der Massenproduktion

Jessica PLASSMANN¹, Ann-Kathrin BÖMKES¹, Christopher PETRY¹,
Michael SCHUTH¹

¹ Hochschule Trier, Technikum OGKB, Trier

Kontakt E-Mail: boemkesa@hochschule-trier.de

Kurzfassung. Das optisch-interferometrische Messverfahren der Shearografie ist eine anerkannte zerstörungsfreie Prüfmethode, die derweilen vor allem in der Prototypenentwicklung der Luft- und Raumfahrt eingesetzt wird. Messobjekte werden mit kohärentem Laserlicht beleuchtet und durch Shear-Optiken mittels Kamerabildaufnahme erfasst. Dabei werden bei geringster Anregung des Messobjektes Deformationen im Sub-Mikrometer Bereich sichtbar. Anomalien in diesem Deformationsverhalten lassen auf Materialfehler schließen.

Durch die neuartige Methode des räumlichen Phasenschiebens bei der Shearogramm-Berechnung lässt sich die Verfahrensrobustheit z. T. enorm steigern. Nach dem aktuellen Stand der Technik mit zeitlichem Phasenschieben sind typischerweise 8 Bildaufnahmen je Messung notwendig. Beim räumlichen Phasenschieben sind es lediglich 2, wodurch Messungen im Kameravideotakt durchführbar sind. Störungen wie Schwingungen führen so nur noch in geringem Maße zur Dekorrelation bei der Messung. Zudem werden durch den Einsatz dynamischer Anregungsverfahren sehr schnelle Prüfungen realisierbar.

In unserem Paper zeigen wir die Anwendung der neuen Technik für günstige Bauteile, die z. T. in der Massenfertigung produziert werden. Die Shearografie mit räumlichem Phasenschieben bietet durch ihre Robustheit und Echtzeitfähigkeit eine praxismgerechte und wirtschaftliche ZfP-Lösung für bisher nicht berücksichtigte, potenzielle Materialfehler in solchen Bauteilen.

Einführung

Bislang etablierte sich die Shearografie unter Verwendung der zeitlichen Phasenschiebe-Methode vor allem durch ihre Materialunabhängigkeit und die damit einhergehende Eignung zur Prüfung komplexer Bauteile aus innovativen Hybridwerkstoffen. Mit der verwendeten Methode zur Berechnung der Phaseninformation ging jedoch auch einher, dass Messungen unter teilweise erheblichem Aufwand zur Robustifizierung des Verfahrens durchgeführt werden konnten. Entsprechend begrenzt waren demnach die Anwendungsgebiete, und Verwendung fand das Verfahren überwiegend in der Luft- und Raumfahrt.

Aufbauend auf die Forschung zur Weiterentwicklung der Shearografie mit räumlichem Phasenschieben [1] soll nun die Eignung des Verfahrens unter Verwendung dieser neuartigen Methode für die schnelle und günstige Prüfung von Serienbauteilen aufgezeigt werden.



1. Setup: Shearografie mit räumlichem Phasenschieben

Für die Auswertung eines Shearogramms wird die Phaseninformationen des Specklemusters benötigt. Beim zeitlichen Phasenschieben wird sie aus mindestens drei, aber typischerweise vier Bildaufnahmen pro Bauteilzustand bestimmt. Im Gegensatz dazu ermöglicht das räumliche Phasenschieben die Informationsgewinnung aus je einer Aufnahme. Da hiermit Messungen im Videotakt der Kamera möglich werden, erhöht sich die Robustheit gegen Umgebungsstörungen wie beispielsweise Schwingungen enorm. Weiterhin eröffnet dies auch die Möglichkeit der Verwendung hochdynamischer Anregungsverfahren, was die Dauer einer Messung verringern kann. Damit wird die Shearografie echtzeitfähig, was sie für die Bauteilprüfung in der Serie prädestiniert.

Im Technikum für optische Messtechnik, Gerätebau, Konstruktion und Bauteiloptimierung an der Hochschule Trier wurde ein Messaufbau vorbereitet, welcher die shearografische Messung mit räumlichem Phasenschieben ermöglicht. Im nachfolgenden Kapitel werden Ergebnisse verschiedener Messreihen vorgestellt, um die Anwendung und die Einsatzgebiete der Shearografie insbesondere für die Prüfung günstiger Serienbauteile aufzuzeigen.

2. Messreihen/Anwendung

Es wurden Bauteile unterschiedlicher Geometrien aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK), Propylen-Dien Kautschuk (EPDM) und Kunstleder untersucht.

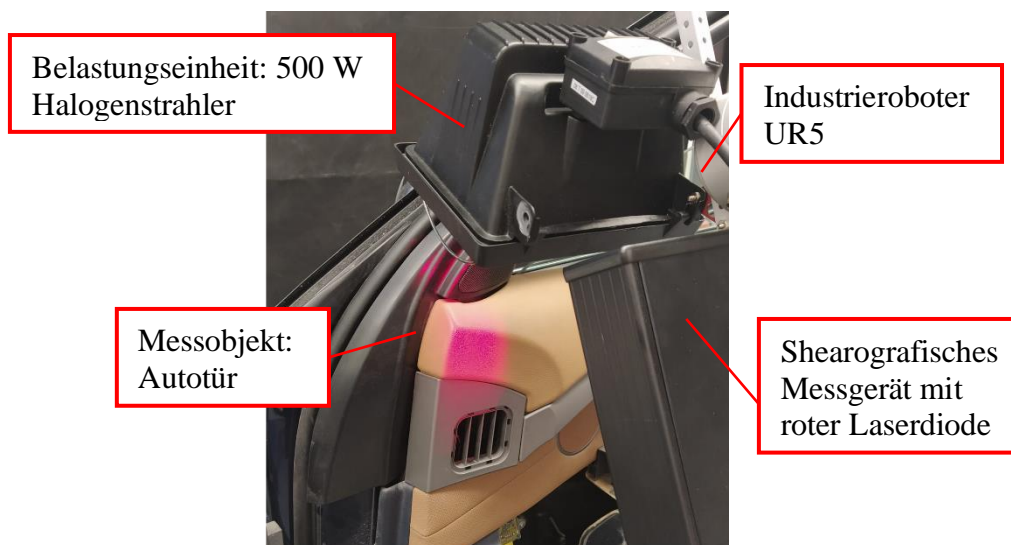


Abb. 1. Darstellung des Messaufbaus am Beispiel von Messreihe 3: PKW-Tür. Als Belastungseinheit wird ein Halogenstrahler mit 500 Watt gewählt, welcher sich oberhalb des shearografischen Messgeräts befand. Das Messgerät wird mit einer roten Laserdiode mit der Wellenlänge 658 nm betrieben und gemeinsam mit der Belastungseinheit über den Industrieroboter UR 5 von Universal Robots verfahren.

2.1. Automatisierte Prüfung eines Kühlmittelschlauchs mit Riss

Durch die Steigerung der Verfahrensrobustheit und Schnelligkeit bietet sich die Shearografie mit räumlichem Phasenschieben für die automatisierte Bauteilprüfung in Serie an. Um dies zu verdeutlichen, wurde der Messaufbau um den Industrieroboter UR5 von Universal Robots erweitert. Als Prüfteil wird ein Schlauch aus Äthylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) mit einem Außendurchmesser von 25 mm und einem Innendurchmesser von 18 mm gewählt, wie er üblicherweise für die Leitung von Kühlstoffen genutzt wird. Auch wenn der Schlauch über eine matte, nur leicht glänzende Oberfläche verfügt, so sind dessen dunkle Farbe und starke Wölbung für optische Vermessungen kritisch. Die Belichtungszeit beträgt ca. 0,5 Sekunden, was relativ lange ist aufgrund der augensicheren, schwachen Laserklasse 1 Laserbeleuchtung. Für die Prüfung wird der Schlauch mit einem Riss versehen.



Abb. 2. Messreihe 1: Kühlmittelschlauch mit vergrößerter Detaildarstellung der Fehlstelle

Der verwendete Messaufbau erfasst eine Messfläche von 65 mm x 40 mm in einem Abstand von 300 mm vom Bauteil. Der Shearbetrag in x-Richtung beträgt 2 mm. Weiterhin wird ein Winkel von ca. 25° zwischen Schlauchachse und Messgerät eingestellt, um die Aufnahme von Reflexen ausgehend von der leicht glänzenden Bauteiloberfläche zu verringern. Um den Verlust von Informationen im Randbereich des Messergebnisses zu vermeiden, wird der Industrieroboter in x-Richtung für jede Aufnahme um lediglich 60 mm verfahren. Die Überlappung der Messflächen führt zu einer geschlossenen Prüffläche. Eine einseitige Prüfung eines Schlauchs von 1 m Länge benötigt demnach 17 Aufnahmen.

Für jeden Messvorgang wurde ein Referenzbild aufgenommen und daraufhin 0,5 Sekunden lang mit der Belastungseinheit, einem 500 W Halogenstrahler, erwärmt. Es handelt sich um eine thermische „Single Burst“ Anregung. Im unmittelbaren Anschluss an die Erwärmung werden mehrere Aufnahmen des belasteten Bauteils erzeugt. Somit ist es möglich, sowohl den Aufwärm-/ als auch den Abkühlprozess zu untersuchen.

Beide Prozesse führen zu ähnlich aussagekräftigen Ergebnissen für das gewählte Bauteil. Allerdings kann die Prüfung im Aufwärmprozess schneller erfolgen, da hier das Referenzbild vor der thermischen Belastung mit den Aufnahmen unmittelbar nach der Belastung verrechnet wird. Für die Betrachtung des Abkühlprozesses werden stattdessen die Aufnahmen nach der Belastung miteinander verrechnet. Aufgrund der natürlichen Konvexion bei der Abkühlung vergeht längere Zeit, bis sich eine aussagekräftige Verformung einstellt. Im Durchschnitt zeigte sich über mehrere Messversuche hinweg ein Indikator für den 15 mm langen Riss während des Aufwärmprozesses bereits nach ca. 0,5 Sekunden. Ein vergleichbarer Indikator kann bei der Untersuchung des Abkühlens nach ca. 3,5 Sekunden erreicht werden.

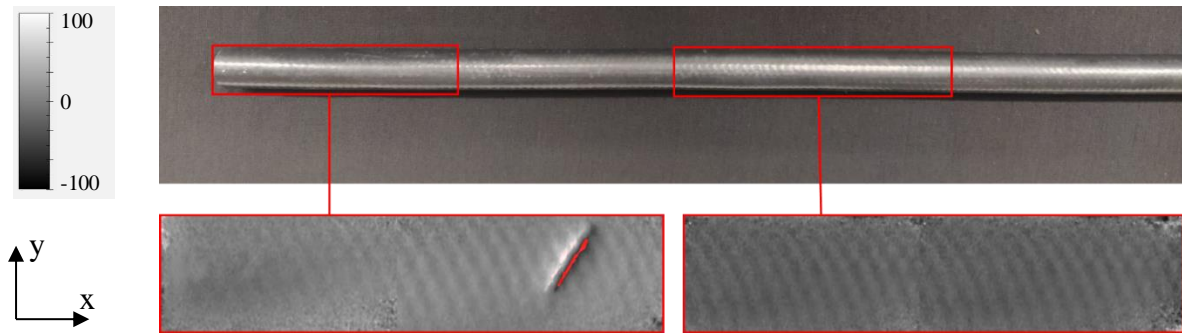


Abb. 3. Ergebnisse von Messreihe 1, Angaben in Microstrain, oben: Kühlmittelschlauch, linke Detailansicht: Detektion der Fehlstelle (Riss, diagonal) durch Indikator ab betragsmäßig 66 Microstrain, rechte Detailansicht: Faserstruktur des Messobjekts

Neben dem Indikator für den Riss kann auch die ca. 2 mm unter der Oberfläche liegende Faserstruktur des Schlauchs herausgearbeitet werden (siehe Abbildung 3). Die durch sie verursachte Verformung zeigt sich an der Schlauchoberfläche, sobald die Anregungswärmefront in die entsprechende Tiefenlage diffundiert ist. Hierzu wird die Verformung kurz nach dem Anregungsvorgang für 4 Sekunden gemessen. Auf diese Weise können Aussagen über die Intaktheit und Lage der Netzstruktur der Fasern getroffen werden.

Für die Serienprüfung dieses Bauteils mit Schwerpunkt der oberflächlichen Fehlstellendetektion wird die Betrachtung des Aufwärmprozesses favorisiert. Pro Teilabschnitt wird eine Messdauer von einer Sekunde vorgeschlagen. Mit den gewählten Parametern kann die Fehlstelle auch detektiert werden, wenn sie sich im Randbereich der Probe befindet. Daher kann angenommen werden, dass bei vergleichbaren Fehlstellenausmaßen die zweiseitige Prüfung des Schlauchs ausreichend ist.

In Summe benötigen die Aufnahmen ohne Einbezug der Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters zwischen den Aufnahmen 17 Sekunden. Bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 0,3 m/s kann die einseitige Prüfung des Schlauchs im Versuch in 20,2 Sekunden abgeschlossen werden. Die vollständige, zweiseitige Prüfung benötigt folglich, entsprechend des gewählten Verfahrensweges, mindestens 40,4 Sekunden.

2.2. Carbonfaserverstärktes Kunststoffrohr mit Impact-Schaden

Aufgrund der geringen Masse und im Vergleich dazu hohen Steifigkeit findet CFK in immer mehr Anwendungsbereichen Anwendung. Schon 2011 lag der Anteil an Verbundwerkstoffen beim Airbus A380 um die 25%, davon etwa 85% CFK [2]. Die Verwendung dieses Werkstoffs zur Gewichtsreduktion ist jedoch inzwischen auch außerhalb der Luftfahrtindustrie gängig.

Durch den komplexen Aufbau der Strukturen sind jedoch gerade die Analyse und die Auslegung des jeweiligen Bauteils von Bedeutung, um dessen Leistung und Effizienz weiter zu steigern. Entsprechend hoch ist der Bedarf, die Aussagen über visuell nicht detektierbare Fehlstellen, welche bei der Fertigung oder im Betrieb auftreten, treffen zu können. [3]

Um die Grenzen des verwendeten Aufbaus der Shearografie mit räumlichem Phasenschieben zu erproben, wurde ein CFK-Rohr mit einem Außendurchmesser von 62 mm und einem Innendurchmesser von 58 mm untersucht. Die stark reflektierende Oberfläche in Kombination mit der dunklen Farbe und zylindrischen Geometrie des Bauteils stellen insbesondere für kamerabasierte Prüfverfahren eine große Herausforderung dar.

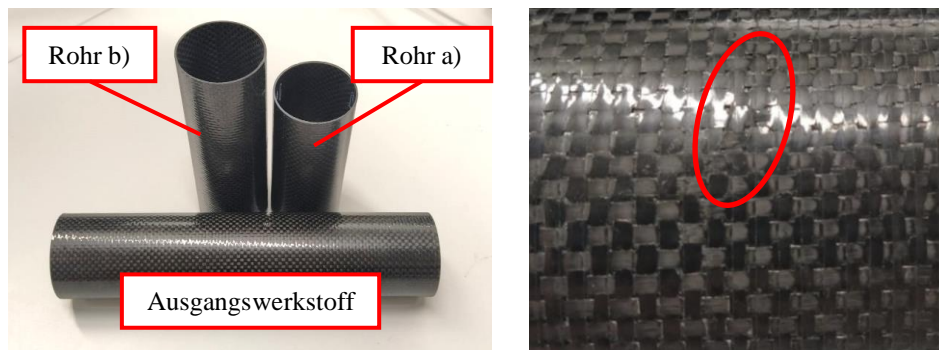


Abb. 4. Messreihe 2: Carbonfaserverstärktes Kunststoffrohr mit Impact-Schaden, rechte Detailansicht: durch verändertes Reflexionsverhalten im passenden Beobachtungswinkel visuell detektierbarer Impact-Schaden an Rohr b)

Für die Untersuchung werden zwei Rohre mit Impact-Schäden versehen: Rohr a) wird mit einem Impact von ca. 2,7 Joule geschädigt, Rohr b) mit einem Impact von ca. 10 Joule. Der Schaden in Rohr a) ist visuell nicht detektierbar. Der stärkere Impact an Rohr b) führt dagegen vereinzelt zum Reißen der Carbonfasern, was sich in einem veränderten Reflexionsverhalten der Oberfläche bemerkbar macht (siehe Abbildung 4, rechts). Weiterhin weist Rohr b) eine umlaufende Netz-Anomalie auf, welche vermutlich durch einen Fertigungsfehler verursacht wurde.

Zur Untersuchung der Bauteile werden die Rohre aufgestellt und über 7 Sekunden flächig erwärmt. Die Belastungseinheit, ein Halogenstrahler mit fokussiertem Beleuchtungspot und einer Leistung von 1000W, wird in einem Abstand von 500 mm positioniert. Das Messgerät wird im Abstand von 400 mm von der Oberfläche, unter einem Winkel von 25° zur Mittelachse des Rohres befestigt. Hiermit kann ein Teil der störenden, gerichteten Reflexionen ausgehend von der Rohroberfläche vermieden werden.

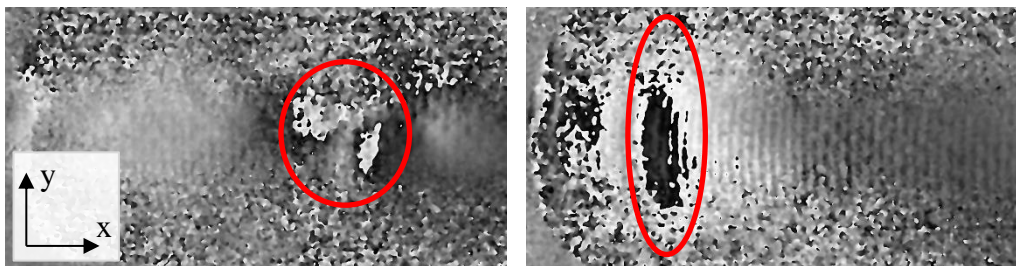


Abb. 5. Ergebnisse von Messreihe 2: links: Shearogramm des Impact-Schadens an Rohr a), rechts, Shearogramm mit Indikator für Netz-Anomalie.

Abbildung 5 stellt die Ergebnisse der Untersuchungen dar. Links zeigt sich ein Indikator für die visuell nicht detektierbare Fehlstelle an Rohr a), welcher im Abkühlprozess ca. 10 Sekunden nach der Wärmeeinbringung erfasst werden konnte. Gleichsam kommt es aufgrund der starken Reflexion des Bauteils sowie der Wölbung im Randbereich zu starker Dekorrelation. Rechts wird der Indikator für die Netz-Anomalie von Rohr b) dargestellt. Auch hier entsteht Dekorrelation im Randbereich des Rohres.

Trotz der verfahrensbedingt geringeren Lichtausbeute und der durch das Material und die Bauteilgeometrie erschwerten Bedingungen, konnten mithilfe des Messaufbaus prüfrelevante Ergebnisse erzielt werden. Allerdings gibt es für diese besonders kritischen Bauteile weiterhin Forschungsbedarf, um in Zukunft automatische und sichere Auswertungen durchführbar zu machen.

2.3. Materialuntersuchungen an einer PKW-Tür

Ein Vorteil der Shearografie ist ihre materialunabhängige Arbeitsweise. Diese wird im Folgenden am Beispiel einer PKW-Tür aufgezeigt. Es werden Messungen an zwei unterschiedlichen Positionen durchgeführt: EPDM-Türdichtung und ockerfarbene feingemusterte Kunststoff-Verkleidung. Die Positionen werden mithilfe des am UR5 montierten shearografischen Messsystems angefahren. Für die Untersuchungen wird ein Shearbetrag von 4 mm in x-Richtung eingestellt.



Abb. 6. Messreihe 3: Materialuntersuchungen an einer PKW-Tür, links: Detailansichten der untersuchten Materialien (oben: Türdichtung, unten: Kunststoff-Verkleidung), rechts: Gesamt-Darstellung der PKW-Tür

Position 1: EPDM-Türdichtung

Ähnlich wie auch der EPDM-Kühlmittelschlauch aus Messreihe 1, besitzt die Dichtung der PKW-Tür eine matt-schwarze, leicht glänzende Oberfläche. Die dunkle Farbe führt dazu, dass bei einer augensicheren Gesamtlaserleistung von 10 mW eine Belichtungszeit von 150 ms gewählt werden muss. Trotzdem ist diese Belichtungszeit um den Faktor 3 geringer als für den glänzenderen Kühlmittelschlauch. Für die Prüfung wurde die Oberfläche mit einem Skalpell angerissen. Es liegt kein Aufklaffen vor, wenn es nicht durch eine mechanische Belastung hervorgerufen wird. Die Veränderung des Schlauchs ist demnach visuell nicht detektierbar.

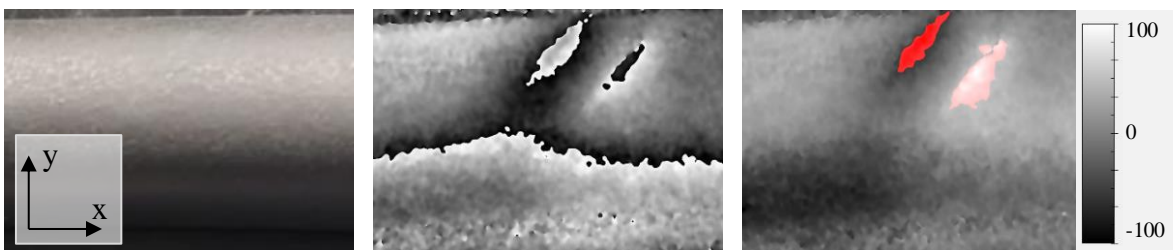


Abb. 7. Messreihe 3, Position 1: Türdichtung, links: Originalaufnahme der Dichtung mit visuell nicht detektierbarer Fehlstelle (Riss), mittig: Shearogramm mit Indikator für die Fehlstelle, rechts: Shearogramm demoduliert, farbliche Markierung von Verformungsänderungen betragsmäßig über 94 Microstrain

Die Belastung erfolgt thermisch über 0,5 Sekunden. Nach ca. 4,5 Sekunden kann bei der Beobachtung des Abkühlprozesses die in der Abbildung dargestellte Fehlstelle durch die betragsmäßige Grenzwertüberschreitung von 94 Microstrain in einer zusammenhängenden Fläche von 10.000 Pixeln detektiert werden.

Position 2.a: Kunststoff-Verkleidung

Im Gegensatz zu den zuvor untersuchten Oberflächen ist der ockerfarbene Bereich der Kunststoff-Verkleidung eher hell. Dadurch kann die Belichtungszeit auf 31,5 ms verringert werden, was die Bilderfassung beschleunigt und die Prüfung somit um einen entsprechenden Faktor robuster macht.

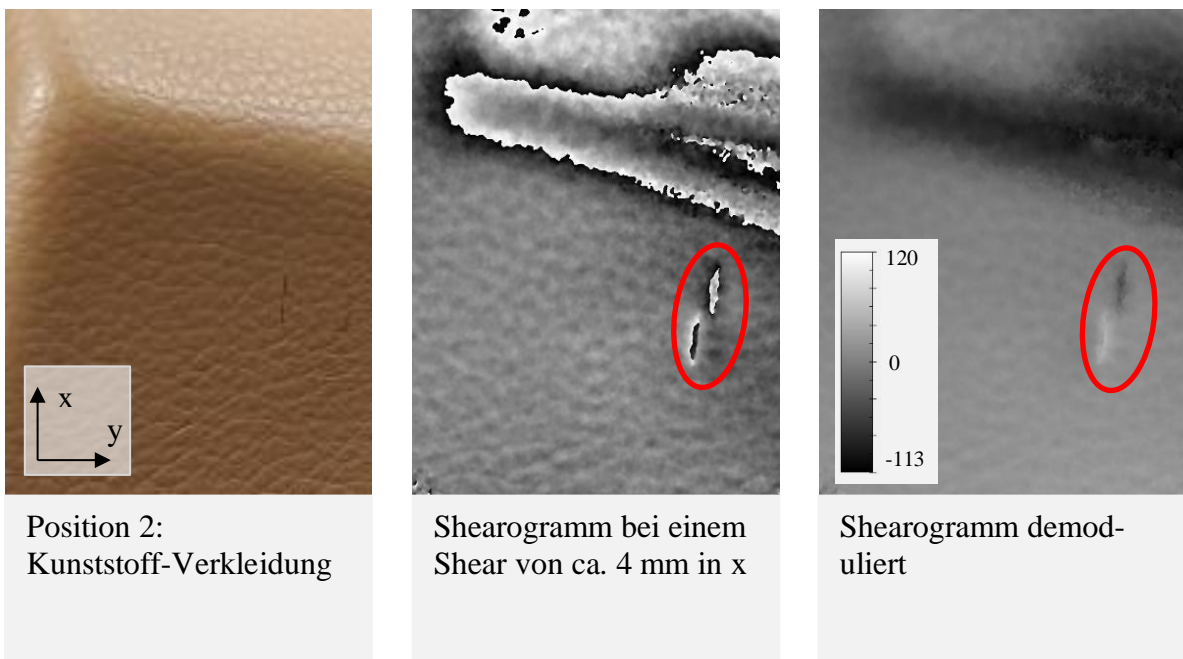


Abb. 8. Messreihe 3, Position 2: Kunststoff-Verkleidung, links: Originalaufnahme der Verkleidung mit visuell detektierbarer Fehlstelle (Riss), mittig: Shearogramm mit Indikator für die Fehlstelle (rot umkreist) und für die erhöhte Relativverformung im Bereich der Bauteilkante (oberer Bildbereich), rechts: Shearogramm demoduliert

Für die Messung wird die Prüffläche für 0,5 Sekunden mit dem Halogenstrahler erwärmt. In Abbildung 8 mittig wird das Shearogramm des Aufwärmprozesses nach knapp einer Sekunde dargestellt. Erkennbar werden zum einen die erhöhte Relativverformung im Bereich der Bauteilkante und die Oberflächenbeschaffenheit der Verkleidung, zum anderen aber auch ein 4 mm langer Riss im Material.

3. Fazit

Im vorliegenden Paper wurde die Einsatztauglichkeit der Shearografie mit räumlichem Phasenschieben beispielhaft anhand diverser Automotive-Serienbauteile aufgezeigt. Die Messreihen beschäftigten sich mit Objekten verschiedener Materialien sowie unterschiedlich komplexer Bauteilgeometrien. Durch die Wahl geeigneter Anregungsparameter konnten Fehlstellen detektiert werden, weswegen wir das Verfahren für die breite industrielle Anwendung als NDT-Verfahren vorschlagen.

4. Literatur

- [1] C. M. Petry, „Weiterentwicklung der Shearografie mit räumlichem Phasenschieben als zerstörungsfreies Prüfverfahren für die automatisierte Serienüberwachung“, 2021, doi: 10.22028/D291-35137. [Online]. Verfügbar unter: <https://publikationen.sulb.uni-saarland.de/handle/20.500.11880/32111>
- [2] „Windkraft verdrängt Luft- und Raumfahrt als CFK-Abnehmer Nummer eins“, *Kunststoff Information*, S. 7, 5. Dez. 2011, 2011.
- [3] ZwickRoell, „DLR: Ermüdungsprüfungen an CFK-verstärkten Composites“, 12. Aug. 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.k-aktuell.de/produkte-im-einsatz/dlr-ermuedungspruefungen-an-cfk-verstaerkten-composites/>.