

Anwendung der shearografischen Dehnungsmessung mit transienter Wärmeanregung zur zerstörungsfreien Prüfung für die Detektion von Rissen in faserverstärktem Kunststoff im Vergleich zur Thermografie

Ann-Kathrin BÖMKES, Christopher PETRY, Jessica PLAßMANN, Michael SCHUTH
Hochschule Trier, Technikum OGKB, Trier

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

Kurzfassung. Ein Wachstum der Luftfahrtindustrie wäre ohne den Fortschritt im Leichtbau nicht denkbar. Damit gehen moderne zerstörungsfreie Prüfverfahren einher, welche die Betriebssicherheit von Flugzeugen gewährleisten. Die Entwicklung neuer Leichtbaukonstruktionen führt erfordert zunehmend komplexere Bauteile, wodurch die Anforderungen an die zerstörungsfreien Prüfverfahren steigen. Die optische Messtechnik bietet hierbei den entscheidenden Vorteil der berührungslosen, schnellen und flächendeckenden Fehlstellendetektion. Zudem arbeiten sie materialunabhängig, was sie für die Prüfung moderner Werkstoffkomposite prädestiniert. Dennoch existieren Fehlerarten, die nur schwer auffindbar sind. Risse sind beispielsweise erst ab einem bestimmten Ausmaß mittels ZfP auffindbar. Sie wachsen exponentiell, was das Risiko eines Bruchs gefährlich macht. Sofern nicht bereits ein Aufklaffen vorliegt, sind Risse unter visueller, thermografischer und computertomografischer Betrachtung unsichtbar. Daher werden oftmals aufwändige Prüfungen wie das Farbeindringverfahren durchgeführt.

Hingegen misst die Shearografie das Dehnungsverhalten einer Oberfläche unter einer Belastung. Dabei ist insbesondere die Ausrichtung des Shears zur Ausbreitungsrichtung einer Fehlstelle dafür verantwortlich, ob diese entdeckt wird. Da die Ausbreitungsrichtung in der Praxis unbekannt ist, wird in diesem Paper ein Dual-shear Versuchsaufbau mit transienter Objektbelastung diskutiert. Mittels FEM-Simulation und Digital Image Correlation wird gezeigt, dass sich Risse bevorzugt durch Anomalien im in-plane Dehnungsverhalten bemerkbar machen. In der praktischen Anwendung liefern die einfacher messbaren out-of-plane Anteile ebenfalls vielversprechende Ergebnisse. Der Sachverhalt wird für rissbehaftete Zugproben sowie anhand eines praktischen Beispiels im Vergleich zur aktiven Thermografie erörtert und die Einsatztauglichkeit der Dual-shear Methode aufgezeigt.

1. Grundlagen

1.1 Verzerrungstensor

Im Rahmen der folgenden Untersuchung werden verschiedene Messverfahren angewandt und deren Ergebnisse miteinander verglichen. Um die Ergebnisse klar voneinander abzugrenzen, wird der Verzerrungstensor ϵ über die Größen der Verschiebung ausgedrückt nach ([1], vgl. S. 73 ff.):

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) & \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.2 Rissmechanik

Bauteile weisen in vielen Fällen bereits von Beginn an Fehlstellen auf. Über den Verlauf der Betriebsbelastung entwickeln sich hieraus u. a. Risse, welche zu Brüchen und spontanem Bauteilversagen führen können. Entscheidend für das Wachstum solcher Risse ist deren Orientierung relativ zur Belastung. In der Literatur werden hierzu unter Annahme eines einachsigen Spannungszustands drei Rissöffnungsmoden unterschieden [2], aus deren Superposition sich alle real auftretenden Orientierungen annähern lassen, siehe Abb. 1, links.

Im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchung wurden entsprechende Bauteilproben erzeugt und Rissöffnungen der Mode I behandelt.

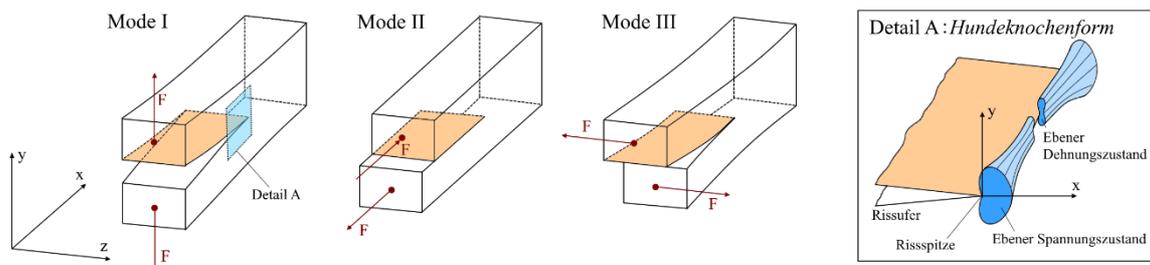


Abb. 1: Darstellung der drei Rissöffnungsmoden, abgeleitet aus ([2], [3] S. 133).

Durch die Belastung des rissbehafteten Bauteils wird im Bereich der Risspitze eine Spannungsüberhöhung herbeigeführt. Die plastische Zone zeigt sich in der ε_{yy} -Verformung durch eine sog. *Hundeknochenform*, siehe Abb. 1, Detail A.

1.3 Digitale Shearografie

Die digitale Shearografie (DS) ist ein interferometrisch-optisches Messverfahren, welches bevorzugt zur zerstörungsfreien Prüfung im Bereich der Luft- und Raumfahrt eingesetzt wird [4]. Ein Messobjekt wird flächig mit kohärentem Laserlicht beleuchtet. Da die Oberflächen im technischen Bereich meist rau sind, entsteht das Interferenzphänomen des sog. Specklemusters auf dem Kamerachip. Dabei wird das Messobjekt durch ein Shearelement erfasst, wodurch zwei um den Shearbetrag verschobene Bilder auf dem Kamerachip entstehen. Durch die rechnerische Bildverarbeitung von zwei solchen Doppelbildern im unbelasteten und belasteten Messobjekt-Zustand werden Verformungen im Sub-Mikrometerbereich erfasst. Folgende Verzerrungsanteile werden durch die DS gemessen:

$$\begin{pmatrix} u_{ges} \\ v_{ges} \\ w_{ges} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} \quad (2)$$

Die grün dargestellten Anteile sind die erfassbaren in-plane Dehnungen (ip), die blauen Anteile die messbaren ip Gleitungen und die orangenen Anteile die out-of-plane Neigungen (oop) (s. auch [5]). Der Messaufbau zur Bestimmung der genannten Anteile unterscheidet sich hinsichtlich Shear- und Beleuchtungsrichtung. Bei einer Shearung in x-Richtung werden die Ableitungen nach dx ermittelt, während bei einer Shearung in y-Richtung Ableitungen nach dy erfassbar sind. Die oop Verformungen können unmittelbar unter einer orthogonalen Beleuchtung und Beobachtung zur Messoberfläche erfasst werden. Die ip Messung ist aufwändiger. Je Messobjekt-Zustand muss die Beleuchtung nacheinander in die positive und die negative Richtung geändert werden ([4] S. 325 ff.). Für eine Beleuchtung in x-Richtung ergeben sich die ip Anteile mit der Verformung u auf dem Zähler, für eine Beleuchtung in y-Richtung die mit der Verformung v auf dem Zähler, s. Gl. (2). Bei einer ip Messung kann zudem, durch eine einfache, zusätzliche Ergebnisüberlagerung, der dem Shear entsprechende oop Anteil berechnet werden. Die oop Ergebnisse werden im Folgenden auf diese Weise anhand der ip Messungen berechnet.

2. Gegenüberstellung: Shearografie und Digital Image Correlation zur Rissdetektion

Um die Einsatztauglichkeit der DS in der Praxis zu validieren, werden vergleichende Messungen mittels DIC ([4] S. 409 ff.) durchgeführt. Die Sensitivität beider Verfahren für dieselben Verformungshöhen wird in etwa aufeinander abgestimmt, indem eine sehr kleine Messfläche von ca. 15 mm x 25 mm bei derselben Kameraauflösung von 2,3 Megapixel betrachtet wird. Bei der DIC erfolgt dies mittels Mikroskop, wobei durch eine Kamera alle ip Verformungsanteile erfassbar sind:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{zx} & \frac{1}{2} \gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Die Gegenüberstellung nach Tabelle 1 erfolgt durch die qualitative Auswertung der Messungen an Kunststoffproben mit einer Dicke von 2,5 mm und einer Breite von 15 mm. Der einseitig eingebrachte, horizontal verlaufende und bzgl. der Probendicke durchgängige 6 mm Riss wird durch eine definierte Aceton-Behandlung erzeugt. Das Messobjekt wird mittels selbstentwickelter Mikrozugprüfmaschine in y-Richtung um max. ca. 20 Mikrometer verformt. Die Messergebnisse werden je Verfahren um eine entsprechende FEM Simulation erweitert. Die simulierten Shearogramme werden durch Ableiten und Modulo-Operation aus

den FEM Ergebnissen berechnet, wobei der Shearbetrag / das Doppelbild jedoch nicht dargestellt wird. Die shearografischen Messungen werden unter einem betragsmäßigem Beleuchtungswinkel von 45 ° erfasst.

Tabelle 1. Gegenüberstellung der ip DIC, ip DS sowie oop DS Messergebnisse und entsprechende simulierte Ergebnisse.

		ϵ_{xx}	γ_{xy}	ϵ_{yy}	
FEM	Simulation				
	DIC				
		$\epsilon_{xx} = \delta u / \delta x$	$\delta v / \delta x$	$\delta u / \delta y$	$\epsilon_{yy} = \delta v / \delta y$
Shearogramme	Simulation				
	Messung				
		$\delta w / \delta x$ (Beleuchtung in x-Richtung)	$\delta w / \delta x$ (Beleuchtung in y-Richtung)	$\delta w / \delta y$ (Beleuchtung in x-Richtung)	$\delta w / \delta y$ (Beleuchtung in y-Richtung)
	Messung				

Alle Ergebnisse der DIC korrelieren mit der Simulation und erlauben die Lokalisierung der Risspitze an derjenigen Stelle, an der die Verformungsextrema aneinandergrenzen. Die

shearografischen Messungen sind im Vergleich zur idealen Simulation stark verrauscht. Dies ist auf die Speckle-Dekorrelation zurückzuführen, welche durch den hier groß gewählten Abbildungsmaßstab und die ip Verformung des Messobjektes stark begünstigt wird ([6] Teil 1 Kapitel 2). Die Dehnung in x-Richtung, erfasst mit einem Shear und einer Beleuchtung in Richtung des Rissverlaufs, zeigt keinen Ausschlag im Bereich der Fehlstelle. Die beiden Gleitungsanteile hingegen zeigen einen sprunghaften, schwachen Phasenübergang von schwarz (oben) nach weiß (unten) auf der Höhe des Risses. Dieser weist jedoch insgesamt einen sehr hohen Rauschanteil auf und ist schlecht sichtbar und damit schwer deutbar. Die Dehnung in y-Richtung, erfasst mit einem Shear und einer Beleuchtung orthogonal zum Rissverlauf, zeigt einen eindeutigen Ausschlag im Bereich der Fehlstelle. Einen ähnlichen, wenn auch lateral kürzeren Ausschlag zeigt der Neigungsanteil mit Shear orthogonal zum Rissverlauf. Die Detektierbarkeit des Risses ist demnach stark von seiner Verlaufsrichtung und von der shearografisch erfassten Verformungsgröße abhängig, vor allem hinsichtlich der Shearrichtung. In der Praxis ist die Verlaufsrichtung oftmals unbekannt, wodurch zwei Messungen notwendig sind, jeweils mit Shear in x- und in y-Richtung.

Ein Ausschlag der $\delta u/\delta x$ ip Dehnung im Bereich der Rissspitze kann nur durch eine Belastungssteigerung simuliert werden, die im Messversuch zur Dekorrelation führen würde. Die $\delta v/\delta x$ und $\delta u/\delta y$ ip Gleitungen zeigen sowohl in der Simulation als auch in der Messung, dass im Bereich der Fehlstelle eine anormale, stärkere Phasenänderung auftritt. Im Ergebnis der $\delta v/\delta y$ ip Dehnung zeichnet sich der Riss deutlich ab, auch wenn die Messung eine genaue Lokalisation der Rissspitze aufgrund des Shearbetrags nicht ermöglicht. Ip Messungen sind aufgrund der notwendigen Beleuchtungsvariation während der Messung, wie oben dargestellt, sehr aufwändig und damit auch störanfällig. Zudem eignen sie sich nicht für typische, transiente Messobjektanregungen, wie beispielsweise bei der einfachen, optischen Wärmeanregung eines Objektes mittels Halogenstrahler. Aus diesem Grund wird im Folgenden die praxistaugliche oop Verformungsmessung weiterverfolgt.

Ein Vorteil der oop Messung ist zudem, dass die Sensitivität in der Praxis höher ausfällt, als die der ip Messung. Die Beleuchtung bei der oop Messung erfolgt idealerweise normal zur Messoberfläche (Beleuchtungswinkel $\theta_{xz} = 90^\circ$), wobei oop Verformungen einen Messausschlag in Form von Phasenstreifen N nach Gl. (4) hervorrufen. Der Ausschlag, hervorgerufen durch ip Verformungen, fällt hingegen für einen typischen Beleuchtungswinkel von $\theta_{xz} = 45^\circ$ für ip Messungen (vgl. Tabelle 1) ca. 3x kleiner aus. Hierzu ist je nach Messabstand ein ausladender Messaufbau notwendig, welcher die ip Messung stark vibrationsempfindlich macht.

$$N = \frac{\delta_x}{\lambda} \left[\frac{\partial u}{\partial x} \sin(\theta_{xz}) + \frac{\partial w}{\partial x} (1 + \cos(\theta_{xz})) \right] \quad (4)$$

Mit

- N = Phasenstreifenordnung / Messausschlag
- δ_x = Shearbetrag (hier in x-Richtung)
- λ = Laserwellenlänge
- θ_{xz} = Beleuchtungswinkel auf der xz-Ebene

Typische shearografische Messgeräte zur oop Messung weisen konstruktiv bedingt einen Beleuchtungswinkel von $\theta_{xz} < 90^\circ$ auf. Oop Messergebnisse enthalten somit zum geringen Anteil auch ip Verformungen. Dieser Umstand zeigt sich insbesondere im Messergebnis $\delta w/\delta y$ (Tabelle 1). Die Simulation der reinen oop Verformung (nicht dargestellt) zeigt nur unter sehr hoher Belastung einen Rissindikator. Stattdessen wird die Fehlstelle in der praktischen Messung sichtbar. Abschließend zu dieser Gegenüberstellung sei festgehalten, dass die ip Praxistauglichkeit mittels räumlicher Phasenschiebe-Shearografie weiter in den Vordergrund rückt [7]. Der höchste Messausschlag bei dem geringsten Rauschanteil kann durch die

$\delta v/\delta y$ Dehnungsmessung erfasst werden. Den Sachverhalt gilt es somit in zukünftigen Untersuchungen näher zu betrachten.

3. Praktischer Messversuch an einer naturfaserverstärkten Platte

Im Folgenden werden die Ergebnisse der shearografischen Messung¹ einer Platte (260 mm x 250 mm x 2mm) aus naturfaserverstärktem Kunststoff (Laminat) mit drei durchgehenden Rissen dargestellt, s. Abb. 2 links. Weiterhin erfolgt der Vergleich mit den Ergebnissen einer thermografischen Messung². Bis auf die Messgeräte sind alle anderen Parameter bei der Messung identisch, soweit nicht explizit aufgeführt.

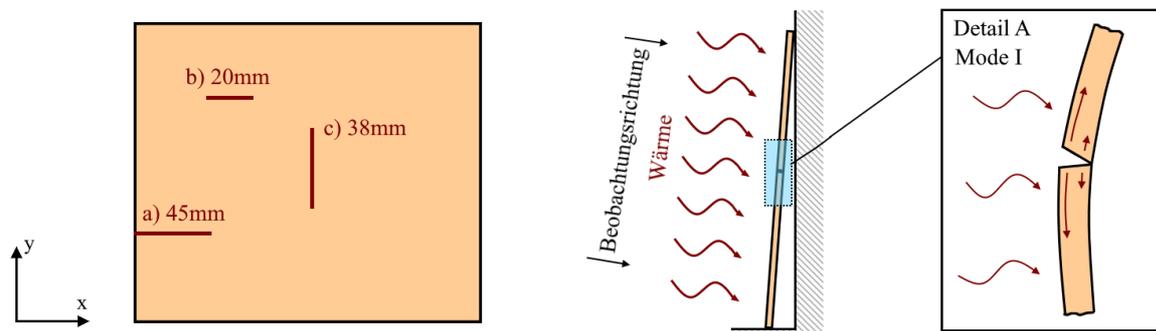


Abb. 2: links: Schematische Darstellung der untersuchten Platte; mittig: Lagerung und Richtung der vorderflächigen Wärmeanregung; rechts: Detailansicht der erzeugten Rissöffnungsmode I durch die Plattenwölbung.

Die Lagerung der Platte erfolgt durch einfaches Hinstellen (unten) und Anlehnen (oben). Die Anregung erfolgt thermisch mittels Single-Burst. Als Anregungseinheit werden zwei Halogenstrahler mit jeweils 500 Watt optischer Leistung verwendet, die links und rechts seitlich und auf Höhe des Messgeräts in einem Abstand von 350 mm zum Messobjektmittelpunkt aufgestellt werden. Die Risse sind visuell nahezu nicht auffindbar. Die vorderflächige Erwärmung der Platte verursacht im Zusammenspiel mit der freien Lagerung eine Wölbung auf das Messgerät zu. Dieser Effekt ist typisch für viele shearografische Prüfungen mit vorderflächiger Wärmeanregung. Er verursacht annähernd ein Rissöffnen nach Mode I (vgl. Abb. 2 rechts). Durch die Variation der Erwärmungsdauer und der Messzeitpunkte wird je Verfahren die optimale Parameterkonfiguration zur Gewährleistung des höchstmöglichen Fehlstellenkontrasts ermittelt. Anhand des Verhältnisses zwischen Messsignal und Rauschen, dem sog. SNR-Wert, werden die Ergebnisse der Shearografie und der Thermografie miteinander verglichen. Der Wert ist ein Maß für die Glaubwürdigkeit eines Indikators im Messergebnis hinsichtlich des tatsächlichen Vorhandenseins einer Fehlstelle im Messobjekt ([8] S. 107 f.).

Bei der thermografischen Messung stellte sich der höchste Fehlstellenkontrast bei einer Erwärmungsdauer von 10 Sekunden für die Abkühlung von Sekunde 10 bis Sekunde 40 ein. Im Thermogramm werden alle drei Risse sichtbar, s. Abb. 3 links. Darüber hinaus zeigt sich mittig ein horizontal verlaufender Streifen, der anormal stark abkühlt. Hier wird eine fertigungsbedingte Werkstoff-Inhomogenität vermutet, welche nicht weiter beachtet wird. Abb. 3 rechts zeigt beispielhaft den Messausschlag über den vertikalen Riss c). Das SNR beträgt ca. 3,7. Riss a) wird mit einem SNR von ca. 2 erfasst, Riss b) mit ca. 2,4.

¹ Selbstentwickeltes Messgerät; laterale Auflösung 2,3 Megapixel; Tiefenauflösung hier ca. 2 Mikrostrain.

² FLIR A65 Thermografiekamera; laterale Auflösung 0,33 Megapixel; Tiefenauflösung 0,05 K.

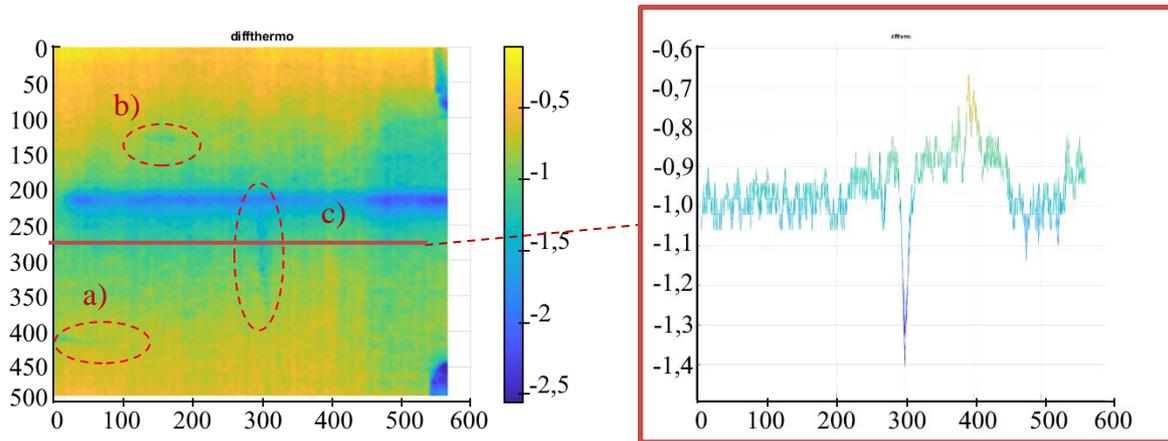


Abb. 3: Messergebnis der Thermografie; links: Thermogramm der Platte mit rot markierten Rissen; rechts: Messausschlag auf Höhe des vertikalen Risses c).

Es werden zwei shearografische Messungen mit einem Shearbetrag von 5 mm in x- und y-Richtung durchgeführt. Der höchste Fehlstellenkontrast wird bei einer Erwärmungsdauer von 5 Sekunden für die Abkühlung von Sekunde 20 bis Sekunde 40 erzielt. Abb. 4 zeigt das demodulierte Verformungsergebnis der DS mit Shear in x-Richtung. Riss c) zeigt sich deutlich mit einem SNR-Wert von ca. 5, da er orthogonal zur Shearrichtung verläuft. Weiterhin wird ein Indikator auf den Riss a) sichtbar, obwohl er parallel zur Shearrichtung verläuft. Der Ausschlag lässt zwar keine sichere Detektion zu, gibt jedoch den Anlass, diesen Bereich mit einem Shear in y-Richtung zu untersuchen.

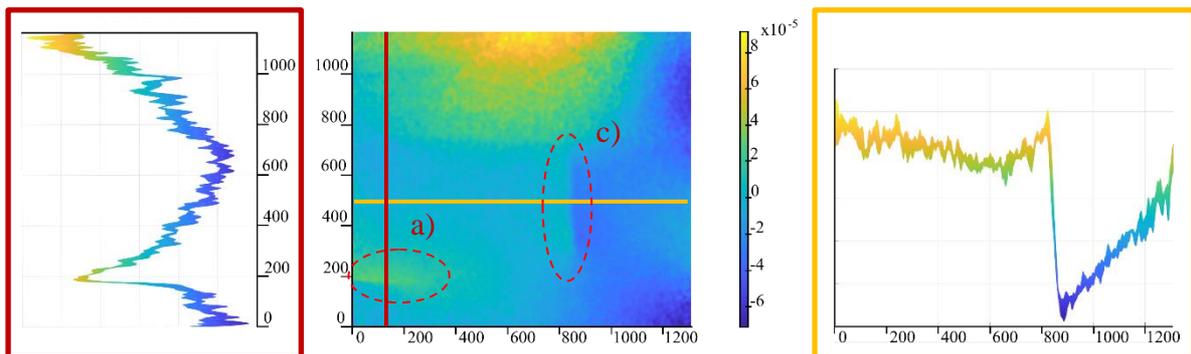


Abb. 4: Messergebnis der DS mit Shear in x-Richtung; links: Messausschlag auf Höhe des horizontalen Risses a); mittig: demoduliertes Verformungsergebnis; rechts: Messausschlag auf Höhe des vertikalen Risses c).

Die Messung mit Shear in y-Richtung zeigt Riss a), welcher orthogonal zur Shearrichtung verläuft, deutlich mit einem SNR von ca. 3,3. Der kurze Riss b), welcher ebenfalls orthogonal zur Shearrichtung verläuft, wird nicht sichtbar.

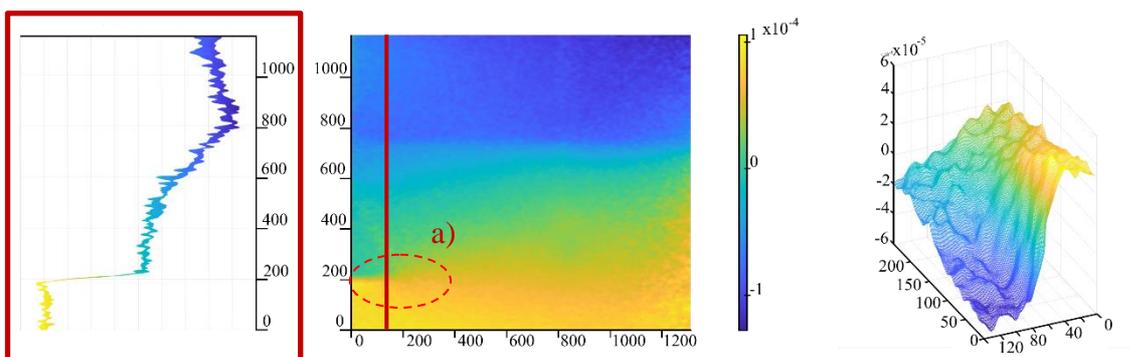


Abb. 5: Messergebnis der DS mit Shear in y-Richtung; links: Messausschlag auf Höhe des horizontalen Risses a); mittig: demoduliertes Verformungsergebnis; rechts: 3D Ansicht des Fehlstellenindikators

Mit dem gewählten Messaufbau können thermografisch alle drei Fehlstellen detektiert werden. Für den Riss a) und b) ist die Aussagesicherheit jedoch eher gering. Shearografisch können lediglich zwei Fehlstellen detektiert werden, die Risse a) und c). Der jeweilige SNR-Wert > 3 gewährleistet dabei eine ausreichende Sicherheit für die Fehlstellenprüfung und bestätigt die oben diskutierte Einsatztauglichkeit der oop Messung für Risse. Das Gesamtergebnis des Messversuchs und der Verfahrensvergleich an der Platte mit Rissen deckt sich mit den Untersuchungen von Schmidt et al. [9] für Impact-Schäden und Delaminationen: Die Thermografie ist in der Lage, kleinere Fehlstellen zu messen, während die Shearografie sensibler misst.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder und W. Wall, Technische Mechanik 2: Elastostatik, 12. Hrsg., Springer Verlag GmbH, 2017.
- [2] D. Gross und T. Seelig, Bruchmechanik - Mit einer Einführung in die Mikromechanik, Springer Verlag GmbH, 2011.
- [3] J. Rösler, H. Harders und M. Bäker, Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, 3. Hrsg., Vieweg+Teubner, 2008.
- [4] W. Buerakov und M. Schuth, Handbuch Optische Messtechnik - Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung, 1 Hrsg., Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [5] R. Groves, S. James, D. Furfari, S. T. R. Barnes, P. Irving und S. Fu, „Full-field Laser Shearography Instrumentation for the Detection and Characterization of Fatigue Cracks in Titanium 10-2-3,“ *Journal of ASTM International*, Januar 2006.
- [6] P. Jacquot und J.-M. Fournier, Interferometry in Speckle Light - Theory and Application, IMAC-EPFL, GC Ecublens; 1015 Lusanne, Switzerland; The Rowland Institute for Science, 100 Edwin H. Land Boulevard, Cambridge, MA 02142, USA: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [7] C. Petry und M. Schuth, „Multi-Wavelengths Michelson Interferometer Based Spatial Phase Shift Shearography with Color Camera,“ SAE International, WCX SAE World Congress Experience, doi:10.4271/2019-01-1269, 2019 .
- [8] P. Mener, „Zerstörungsfreie Prüfung von modernen Werkstoffen mit dynamischen Shearografie-Verfahren,“ Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart, <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/2175>, 2013.
- [9] W. Schmidt und S. Getto, „Leichtbauprüfung mittels Multisensorsystemen,“ Stuttgart, 2013.