Mehrwellenlängen-Scherografie für die zerstörungsfreie Prüfung und Dehnungsmessung

Multi-Wavelengths Shearography for NDT and Strain Measurements

Erwin Hack, EMPA – Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Dübendorf

Manuskripteingang: 03. Juli 2002; zur Veröffentlichung angenommen: 09. August 2002.

Scherografie ist eine lasergestützte, bildgebende Technik zur Dehnungsmessung und zerstörungsfreier Prüfung (ZfP). Wir beschreiben einen Scherografie-Messkopf, der es dank Mehrwellenlängentechnik und schaltbarer Scherrichtungen erlaubt, die zweidimensionale Dehnungsverteilung auf einer Objektoberfläche zu erfassen. Der Vergleich mit DMS-Messwerten im Zugversuch zeigt eine gute Übereinstimmung. Anwendungen auf plastische Deformationen sowie ein Beispiel aus der ZfP werden diskutiert.

Non-destructive testing and the measurement of strain are key techniques in material characterisation and structural testing. By using laser-based imaging techniques such as shearography the whole-field displacements of an object surface can be visualised. A multi-wavelengths shearographic sensor with switchable shear directions was developed to measure planar strain distributions. In this paper we describe the experimental set-up and give examples of in-plane strain measurements during tensile testing. The comparison with strain gage measurements and an application to NDT are discussed.

Schlagwörter: Scherografie, Dehnungsmessung, ZfP, optische Verfahren, Bildverarbeitung, Qualitätskontrolle

Keywords: Shearography, strain distribution, non-destructive testing, quality assurance

1 Einleitung

Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) und Dehnungsmessungen sind Schlüsseltechniken zur Charakterisierung von Materialien und zum Prüfen von Strukturen. Scherografie (im Englischen „Electronic speckle pattern shearing interferometry“ oder kurz „Shearography“ genannt) hat in der ZfP einige Verbreitung gefunden [1; 2]. Die Stärke dieser laserinterferometrischen Methode liegt darin, dass sie die Oberflächenverformungen eines Objekts bildhaft sichtbar macht. Die Dichte und Lage der Interferenzstreifen ermöglichen eine rasche, qualitative Beurteilung von Fehlstellen oder Unregelmäßigkeiten. Obwohl aus den Phasenbildern mit geeigneter Umrechnung und Kalibrierung auch Dehnungswerte berechnet werden können [3–5], finden sich bisher kaum solche Anwendungen in industrieller Umgebung. Dies liegt vor allem an fehlenden benutzerfreundlichen Messinstrumenten für mehrdimensionale Messungen.

In diesem Beitrag beschreiben wir Anwendungen eines Scherografiemesskopfs, der es erlaubt, den Dehnungszustand einer Objektoberfläche vollständig zu erfassen. Er wird deshalb sowohl zur quantitativen Messung von Dehnungsverteilungen als auch zur ZfP eingesetzt. Der Messkopf wurde im Brite-EuRAM-Projekt MuWaS (Multi-Wavelengths Shearography) durch die Zusammenarbeit von Etemeyer Qualitätssicherung, Neu-Ulm, Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Messtechnik, Ulm, Cranfield University, Bedford (UK), Zwick Materialprüfung GmbH, Ulm, Centro Ricerche FIAT, Torino (IT), und EMPA entwickelt. In Abschnitt 2 beschreiben wir kurz das Funktionsprinzip des Messkopfs, ohne in die an anderem Ort veröffentlichten Details zu gehen [6]. Der Abschnitt 3 zeigt ein Beispiel ebener Dehnungsmessung im Zugversuch und den Vergleich mit DMS-Messungen. In Abschnitt 4 wird der Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung diskutiert und mit der Untersuchung eines Rohrverbinders illustriert.

ScheroGRAFISCHE Dehnungsmessung

ur vollständigen Beschreibung eines ebenen Dehnungszustandes ist die Messung der Dehnung in drei Richtungen (z. B. mit einer DMS-Rosette) oder die Messung des Dehnungstensors, Gl. (1), notwendig.

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

etzteres wird erreicht durch die Messung der Ableitung in x - und y -Richtung der Verformungskomponenten u und v . Wenn die Objektoberfläche nicht senkrecht auf der optischen Achse der Kamera liegt, muss u. U. auf die lokalen Koordinaten umgerechnet werden. Um die 3D-Verformungskomponenten zu erfassen, muss das Prüfobjekt von drei unterschiedlichen Richtungen beleuchtet werden. Dazu werden drei Infrarot-Diodenlaser verschiedener Wellenlänge benutzt, die das Objekt *gleichzeitig* beleuchten. Der Messkopf enthält entsprechend drei synchronisierte W-CCD-Modulkameras, die den gleichen Bildausschnitt sehen. Durch eine geeignete Kombination von Farbtrennungsoptik und Infrarot-Bandpassfiltern zeichnet jede der Kameras das Specklefeld eines einzelnen Lasers auf. Der Aufbau ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

Im MuWaS-Messsystem werden SDL-Laserdioden (*Spectra Lode Laboratories*) von 810, 830 und 850 nm Wellenlänge verwendet. Diese erbringen eine Leistung von mehr als 100 mW *single frequency*. Durch ihre kompakte Bauweise und verhältnismäßig geringen Kosten sind sie Gas- oder Festkörperlaser überlegen. Die nahe beieinander liegenden Wellenlängen erlauben es auch, für alle drei Laser eine einzige Phasenschiebeeinheit zu verwenden.

Um die für die Dehnungsmessung notwendigen zwei Ableitungsrichtungen zu realisieren, müssen zwei orthogonale Scherrichtungen vorhanden sein. Diese können im

Bild 1: Schematische Darstellung des Messkopfs. M1: Phasenschiebeelement, M2 und M3: Spiegel für zwei Scherrichtungen; FLC: schaltbarer Polarisator, F1, F2, F3: Bandpassfilter; BS: Strahlteiler, PBS: polarisierende Strahlteiler.

MuWaS-Messkopf elektronisch geschaltet werden [7]. Das am ILM entwickelte Verfahren basiert auf einer Polarisationsabhängigkeit der Scherrichtung und einem schaltbaren Polarisator in Form eines FLC-Elements (*ferroelectric liquid crystal*) (vgl. Bild 1). Somit können alle sechs Ableitungskomponenten der Verformung gemessen werden, ohne die Laserdioden, das Scherelement oder den Messkopf zu bewegen.

Die drei CCD-Kameras sind an den RGB-Eingang einer Farbbilderfassungskarte (IC-PCI von *Imaging Technology Inc.*) angeschlossen. Eine *LabView*-Bedieneroberfläche steuert das Messsystem (Phasenschiebeeinheit, Umschalten der Scherrichtung, Bildeinzug), die Bildverarbeitung und andere Geräte wie z. B. eine Zugprüfmaschine. Ebenso werden andere Messgrößen (Temperatur, Kraft, DMS-Messwerte) mit aufgezeichnet.

3. Dehnungsmessung im Zugversuch

Für die Zugversuche wurde die testXpert-Software von Zwick um ein Modul erweitert, das die Ansteuerung des MuWaS-Messkopfes innerhalb eines Prüfablaufs erlaubt. Die Bildauswertung wird offline im Programm ISTRATE (Etemeyer) vorgenommen.

Bild 2 zeigt den an einer 20-kN-Zugprüfmaschine (Zwick) eingebauten ScheroGrafie-Messkopf. Der Messkopf wird während des Prüfablaufs der Probenmitte nachgeführt. Der

Bild 2: ScheroGrafie-Messkopf an der Zugmaschine. Zwei der drei Laserdioden zur Beleuchtung des Prüfkörpers sind sichtbar.

Bild 3: Vergleich der Dehnungswerte von DMS- und scherografischer Messung (links). Rechts die Kreuzterme der Ableitungen.

Aluminiumkörper ($25 \times 1 \times 200 \text{ mm}^3$) wurde in Schritten von 50 N bis zu einer Endlast von 1800 N belastet. Bei jeder Laststufe wurde die Kraft während ca. 4 Sekunden konstant gehalten. In dieser Zeit wurden die Phasenbilder der drei Laser aufgenommen und auf die kartesischen Koordinaten umgerechnet. Ein typischer Zugversuch mit 50 Laststufen und der entsprechenden Datenerfassung dauert somit weniger als 5 Minuten.

In Bild 3 ist der Dehnungsverlauf bei zunehmender Last im elastischen Bereich des Prüfkörpers aufgezeichnet [8]. Im linken Teil werden optisch ermittelte Längs- und Querdehnungen mit einer DMS-Messung verglichen.

Dargestellt sind die Ableitungen des Verformungsvektorfeldes ($u(x, y)$, $v(x, y)$) in x - bzw. y -(Scher-)Richtung. Die Abweichungen der scherografischen Werte von $\partial v/\partial y$ und $\partial u/\partial x$ von den DMS-Dehnungswerten ε_{yy} und ε_{xx} betragen bei der maximalen Last weniger als $\pm 2\%$ für die Längsdehnung bzw. $\pm 10\%$ für die Querdehnung. Mit dieser Übereinstimmung konnte die scherografische Messung validiert werden.

Im rechten Teil von Bild 3 sind die Kreuzterme $\partial v/\partial x$ und $\partial u/\partial y$ dargestellt. Diese sind einer klassischen DMS-Messung nicht zugänglich. Die Ableitungen $\partial u/\partial y$ und $\partial v/\partial x$ sind im Betrag vergleichbar, haben aber entgegengesetztes Vorzeichen. Dies bedeutet, dass die Scherrich-

tungen des Messsystems (x und y) mit den Hauptachsen des Prüfkörpers zusammenfallen, d. h. der Dehnungstensor in Gl. (1) ist diagonal. Bei genauerem Hinsehen ist eine leichte Verdrehung der Probe um 0.55 mrad im Gegenuhrzeigersinn erkennbar.

In einem weiteren Versuch wurde ein Prüfkörper aus Stahl in den plastischen Bereich hinein gedehnt, also in den Bereich, der einer DMS-Messung nicht zugänglich ist. Dabei bildete sich ein Scherband aus. Bild 4 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf des Versuchs. Die im Folgenden gezeigten scherografischen Bilder wurden bei der 20. Laststufe aufgenommen.

Die plastische Verformung führt zu einer Entspannung des Spannfutters und damit zu zunehmendem Traversenweg

Bild 4: Kraft-Weg-Diagramm eines Zugversuchs an einem Stahlprüfkörper.

Bild 5: Quer- und Längsdehnung eines Prüfkörpers aus Stahl während plastischer Verformung im Zugversuch. Dehnungswerte sind in Promille angegeben.

du/dy dv/dx

Bild 6: Kreuzterme der Verformungsableitungen im gleichen Spannungszustand wie Bild 5. Dehnungswerte sind in Promille angegeben.

und abnehmender Last. Die Änderungen der Querdehnung $\varepsilon_{xx} = \partial u / \partial x$ und Längsdehnung $\varepsilon_{yy} = \partial v / \partial y$ auf dieser Laststufe sind in Bild 5 dargestellt. Deutlich ist erkennbar, dass es Bereiche mit zunehmender Dehnung neben solcher mit abnehmender Dehnung gibt. Durch die zunehmende Dehnung im Fließbereich entspannt sich das Material im festeren Bereich. Das Scherband zeigt sich daran, dass sich die entsprechenden Zonen schräg zueinander ausbilden. Der Verlauf der Kreuzterme in Bild 6 zeigt, dass sich Ober- und Unterteil des Prüfkörpers vom Scherband entfernen.

1 Zerstörungsfreie Prüfung

Scherografie wird ausgiebig für die Prüfung von Bauteilen aus Verbundwerkstoffen eingesetzt [2]. Deren zunehmende Verwendung in der Luftfahrtindustrie und die immer stärkere Verbreitung von Polymerverbundwerkstoffen in anderen Ingenieurdisziplinen rufen nach einer verstärkten Produktionsprüfung der Komponenten. Beispiele neuer großmaßstäblicher Einrichtungen zur automatisierten scherografischen Überwachung sind in der Produktion von Hubschrauber-Rotorblättern [9] und thermischer Schutzkomponenten für die ARIANE-Rakete [10].

Hier zeigen wir eine ZfP-Inspektion an einem Rohrverbinder (Bild 7), die an die DIN-Vornorm DIN V 54180-3 [11] anlehnt.

Bild 8 zeigt die Dehnungsfelder, die durch Druckbelastung des Rohrs hervorgerufen werden. Eine Fehlstelle ist in beiden Bildern in der unteren linken Ecke klar ersichtlich. In

Bild 7: MuWaS-Messkopf bei der Inspektion einer Rohrverbindung.

Bild 8: Verteilung der Dehnung längs der Rohrachse ε_{xx} (oben) und Verteilung der Umfangsdehnung ε_{yy} (unten).

Bild 9 ist der fragliche Bereich, wie er sich in den Kreuzableitungen präsentiert, wiedergegeben. Auch hier tritt die Fehlstelle deutlich zu Tage.

Schließlich ist in Bild 10 die Ableitung der Verformung aus der Ebene heraus dargestellt. Diese Information erhält man auch mit sog. *out-of-plane-sensitive* Scherografie-Messsystemen. Die Fehlstelle ist auch hier deutlich erkennbar, da der Überdruck im Rohr an der Schwachstelle eine leichte Verwölbung der Rohroberfläche bewirkt.

Bild 9: Verteilung der Kreuzterme ε_{xy} (links) und ε_{yx} (rechts).

Bild 10: Verteilung der Ableitungen der radialen Verformung. $\partial w/\partial x$ (links) und $\partial w/\partial y$ (rechts).

5 Zusammenfassung

Ein kompakter Mehrwellenlängen-Scherografie-Messkopf für allgemeine ZfP-Aufgaben und für die quantitative Bestimmung zweidimensionaler Dehnungsverteilungen wurde vorgestellt. Im Gegensatz zu anderen Scherografiesystemen werden phasengeschobene Bilder für drei Beleuchtungsrichtungen gleichzeitig aufgenommen, indem das Objekt mit drei Laserdioden leicht verschiedener Wellenlänge beleuchtet und von drei Kameras beobachtet wird. Überdies kann zwischen zwei Scherrichtungen elektronisch umgeschaltet werden, sodass Scherwinkel und Scherweite mechanisch nicht verändert werden müssen. Die Beleuchtungsgeometrie und die angepasste Bildauswertung erlauben die Bestimmung aller sechs der Scherografie zugänglichen Ableitungen der Verformungskomponenten.

Quantitative Messungen zeigen die Übereinstimmung mit klassischen DMS-Messungen – bei korrekter Mittelung

über die DMS-Messfläche. Die Kompaktheit des Messkopfs erlaubt den Einsatz an Zugprüfmaschinen oder in industrieller Umgebung. Da Scherografie eine berührungslose und bildgebende Messtechnik ist, sind auch Dehnungsmessungen im plastischen Bereich von Materialien möglich. Für die ZfP sind schaltbare Scherrichtungen deshalb von Vorteil, weil Fehlstellen je nach Typ, Lage und Form in der einen oder anderen Scherrichtung deutlicher erkennbar sind.

Danksagung

Der Scherografie-Messkopf wurde im Brite-EuRAM-Projekt MuWaS unter Vertragsnummer BRPR CT96-0272 entwickelt. Für die Unterstützung durch die Europäische Kommission und das Schweizerische Bundesamt für Bildung und Wissenschaft soll hiermit gedankt werden.

Literatur

- [1] P. Rastogi, D. Inaudi (Eds.), *Trends in optical non-destructive testing and inspection* (Elsevier, Amsterdam 2000).
- [2] Y.Y. Hung, „Shearography for non-destructive evaluation of composite structures“, *Opt. Lasers Eng.* **24**, 161–182, 1996.
- [3] Y.Y. Hung, J.Q. Wang, „Dual-beam phase shift shearography for measurements of in-plane strains“, *Opt. Lasers Eng.* **24**, 403–413, 1996.
- [4] W. Steinchen, L.X. Yang, G. Kupfer, P. Mäkel, F. Vössing, „Strain analysis by means of digital shearography: potential, limitations and demonstration“, *J. Strain Analysis* **33**, 171–182 (1998).
- [5] H.A. Aebischer, S. Waldner, „Strain distributions made visible with image-shearing speckle pattern interferometry“, *Opt. Lasers Eng.* **26**, 407–420, 1997.
- [6] R. Kästle, E. Hack, U. Sennhauser, „Multi-wavelength shearography for quantitative measurements of 2D strain distributions“, *Appl. Optics* **38**, 96–100, 1999.
- [7] T. Siebert, B. Schmitz, „A new shearing setup for simultaneous measurement of two shear directions“, *SPIE*, **3637**, 225–230, 1999.
- [8] E. Hack, R.P. Kästle, Multi-wavelengths shearography for optical whole-field strain measurements, *Proc. Nouveaux moyens optiques pour l'industrie II*, Colmar, 1999, p. 31–36.
- [9] M. Honlet, A. Ettemeyer, T. Walz, B. Christophe, „Automated Inspection of Helicopter Rotor Blades using Shearography“, *ECNDT*, Copenhagen 1998.
- [10] A. Ettemeyer, O. Erne, „Automatic Shearography: Test Systems for Aircraft and Spacecraft Components“, *Techtextil* 1999, Frankfurt, Bondtec-Forum.
- [11] DIN V 54180-3 (1997-03) ZfP – Shearografie – Teil 3: Prüfung von Rohrleitungen.

Dr. phil., Dipl.-Phys. Erwin Hack promovierte am Physikalisch-Chemischen Institut der Universität Zürich auf dem Gebiet der Laserspektroskopie. An der EMPA hat er ein Labor für bildgebende optische Messverfahren aufgebaut. Sein Arbeitsschwerpunkt liegt auf Speckle- und Streifenprojektionsmethoden. Adresse: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Elektronik/Messtechnik, Ueberlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf, E-Mail: erwin.hack@empa.ch