

BURKE, J.; HELMERS, H.; HINSCH, K.; KUNZE, C.; WILKENS, V.

Messung schnell veränderlicher Verformungen mit räumlich phasenschiebender elektronischer Specklemuster-Interferometrie (ESPI)

Die elektronische Specklemuster-Interferometrie (ESPI) ist in Verbindung mit der Phasenschiebetechnik zu einer praxis-tauglichen interferometrischen Meßmethode für Objektverformungen geworden ([1]). Erfolgreiche Anwendungen liegen z.B. im Bereich der Werkstoffprüfung und der Denkmalpflegeforschung. Der übliche Einsatz des zeitlichen Phasenschiebens stellt erhebliche Anforderungen an die Stabilität des Meßaufbaus und schränkt die erreichbare Zeitauflösung ein. Wir berichten über die Realisierung eines räumlich phasenschiebenden ESPI-Systems, mit dem prinzipiell 3D-Verformungen in Video-Echtzeit gemessen werden können

1. Grundlagen des zeitlichen Phasenschiebens

Das Streulichtfeld (Specklemuster), das bei Beleuchtung eines Objektes mit kohärentem Laserlicht entsteht, trägt Information über Geometrie und Mikrostruktur der Objektoberfläche. Um Verformungen der Oberfläche im Bereich der Lichtwellenlänge messen zu können, muß die Phase des Lichtfeldes vor und nach der Verformung erfaßt werden. Dies läßt sich durch Überlagerung mit einer Referenzwelle erreichen. Das dadurch entstehende Interferenzmuster am Ort eines in der x/y -Ebene bei $z = 0$ angeordneten Sensors wird beschrieben durch:

$$I(x,y) = I_0(x,y)(1 + \gamma(x,y) \cos\varphi(x,y)) \quad (1)$$

I ist die gemessene Intensität, I_0 die mittlere Intensität, γ die Modulation und φ die interessierende Phase relativ zur Phase der Referenzwelle. Um sie zu bestimmen, werden mindestens drei unterschiedliche Interferogramme benötigt, die durch Verschieben der Phase der Referenzwelle um jeweils α gewonnen werden:

$$I_i(x,y) = I_0(x,y)(1 + \gamma(x,y) \cos(\varphi(x,y) + \alpha_i)) \quad i = 1,2,3 \quad (2)$$

Für Phasenschiebewinkel $\alpha_i = (i-1)120^\circ$ erhält man daraus die gesuchte Phase $\varphi(x,y)$ ([1], [2]):

$$\varphi(x,y) \bmod \pi = \arctan\left(\sqrt{3} \frac{I_3(x,y) - I_2(x,y)}{2I_1(x,y) - I_2(x,y) - I_3(x,y)}\right), \quad (3)$$

die durch Vorzeichenbetrachtung der Terme im Zähler und Nenner von Gl. (3) auf 2π abgebildet werden kann. Aus der gemessenen Phase für zwei Objektzustände vor und nach der Verformung läßt sich die Differenzphase $\Delta\varphi(x,y)$ und daraus die Objektverformung berechnen.

2. Räumliches Phasenschieben in ESPI

Beim zeitlichen Phasenschieben können während der zeitlich nacheinander erfolgenden Aufzeichnung der drei Interferogramme Phasenfluktuationen durch Erschütterungen des Interferometers, Luftturbulenzen in den Strahlengängen oder schnelle Verformungen des Meßobjektes auftreten, die zu verfälschten oder unbrauchbaren Meßergebnissen führen. Das räumliche Phasenschieben begegnet diesem Problemen durch gleichzeitige Aufnahme der Interferogramme, wobei der Phasenvorschub in einer Raumrichtung statt in der Zeit durchgeführt wird. Hierzu ist eine Modifikation der gewöhnlichen ESPI-Anordnung nötig (Abb. 1) ([3]). Durch einen seitlichen Versatz des Quellpunktes der Referenzwelle um Δx wird am Ort des Sensors, einer CCD-Kamera, ein hinreichend linearer Phasenvorschub $\beta(\Delta x)$ erzeugt. Er wird so justiert, daß er im Interferenzmuster gem. Gl. (1) zu Interferenzstreifen mit einer Periode von 3 Pixelbreiten in x -Richtung führt. Die mittlere Specklegröße wird mittels der Blende in der Abbildungsoptik auf eine Größe von ebenfalls 3 Pixelbreiten eingestellt, so daß sich die gesuchte Phase an einem Pixel der Spalte n aus jeweils drei benachbarten Intensitätsmeßwerten gewinnen läßt ([3]):

$$\varphi(x_n, y) \bmod \pi = \arctan\left(\sqrt{3} \frac{I(x_{n-1}, y) - I(x_{n+1}, y)}{2I(x_n, y) - I(x_{n-1}, y) - I(x_{n+1}, y)}\right) \quad (4)$$

3. Messung schnell veränderlicher und dreidimensionaler Verformungen

Abb. 2 zeigt ein Beispiel für eine Messung schnell veränderlicher Verformungen. Eine am Rand eingespannte Metallplatte wurde mit Hilfe eines piezogetriebenen Stempels in der Mitte kontinuierlich verformt. Dargestellt ist jeweils die Differenzphase $\Delta\varphi(x,y)$ mod 2π als Grauwertverteilung, wie sie sich bei der Beobachtung der Objektverformung im Videotakt ergibt. Während das zeitliche Phasenschieben aufgrund der kontinuierlichen Objektbewegung versagt, liefert das räumliche Phasenschieben das richtige Ergebnis: eine vom Rand zur Mitte kontinuierlich ansteigende Phasendifferenz bzw. Verformung.

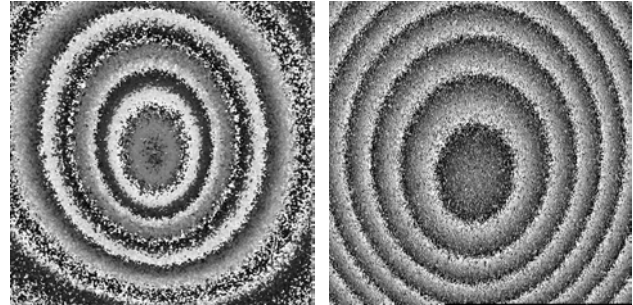
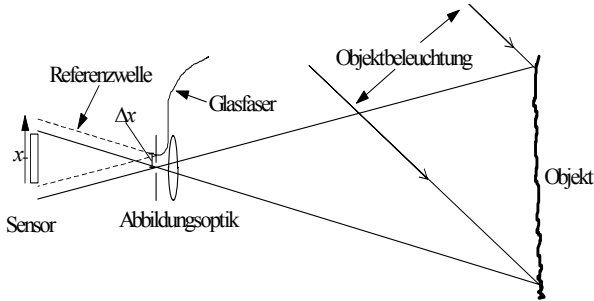


ABB. 1: ESPI-System mit räumlichem Phasenschieben

ABB. 2: $\Delta\varphi(x,y)$ für ein schnell verformtes Objekt. Links zeitliches, rechts räumliches Phasenschieben

Zur vollständigen Erfassung einer 3D-Verformung müssen an jedem Objektpunkt die drei Raumkomponenten des Verformungsvektors \vec{d} gemessen werden. Dazu wird das Objekt bei konstanter Beobachtungsrichtung \vec{b} aus drei verschiedenen Raumrichtungen $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3$ beleuchtet und jeweils die Differenzphase $\Delta\varphi_{\vec{k}_i}(x,y)$, $i = 1, 2, 3$, gemessen. In Kenntnis der Geometrie des Meßaufbaus ($\vec{b}, \vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3$) kann aus diesen drei Datensätzen $\Delta\varphi_{\vec{k}_i}(x,y)$ dann \vec{d} berechnet werden. Abb. 3 zeigt als Beispiel das Ergebnis einer Verformungsmessung an einem rechteckigen, unten eingespannten Tuch, das nach oben gezogen wurde. Trotz des für interferometrische Messungen kritischen Objekts ließ sich die Verformung eindeutig bestimmen.

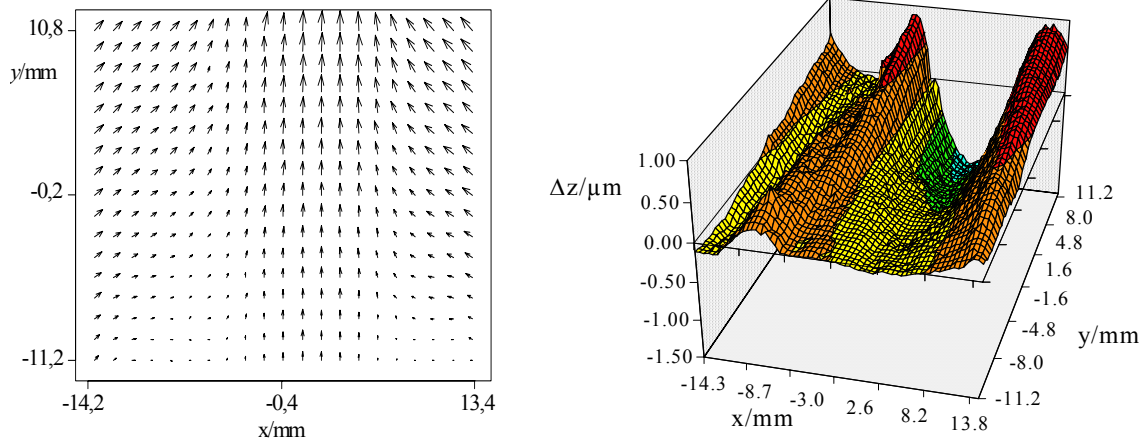


ABB. 3: Ergebnis einer 3D-Verformungsmessung an einem Tuch. Links x/y-Verformung (längster Pfeil entspricht $2\mu\text{m}$), rechts z-Verformung

4 Literatur

- GREIVENKAMP, J. E., BRUNING, J. H.: Phase Shifting Interferometry; in Malacara, D. (Ed.): Optical Shop Testing; John Wiley & Sons, New York 1992, p. 501-598
- SCHWIDER, J.: Advanced evaluation techniques in interferometry; in Wolff, E. (Ed.): Progress in Optics XXVIII; Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam 1990, p. 271-359
- BOTHE, T., BURKE, J., HELMERS, H.: Spatial phase shifting in ESPI: minimization of phase reconstruction errors; Appl. Opt. (in press) (1997)

Adresse: J. BURKE, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, FB Physik, D-26111 Oldenburg