

# Kohärent-optische Verfahren in der Oberflächenmeßtechnik

## Coherent-optical metrology

H.J. Tiziani

**Schlagwörter:** Interferometrie, Holografie, Speckletechniken, Streifenanalyse

*Zur Bewegungs-, Verformungs- und Schwingungsmessung eignen sich Verfahren basierend auf Interferometrie, Holografie und dem Specklephänomen. Diese Verfahren sind schon länger bekannt. Ihr Einsatz profitierte erst von der Entwicklung von Festkörperspeichern und leistungsfähigen Rechnern, aber auch der Laserentwicklung. Auch die entsprechende Software steht inzwischen zur Verfügung. Dies hat den kohärenten Verfahren im praktischen Einsatz insbesondere für den industriellen Einsatz zum Durchbruch verholfen. Weitere Arbeiten werden den Einsatz kohärent-optischer Verfahren in rauherer Industrieumgebung ermöglichen. Speckletechniken werden dazu besonders weiterentwickelt, da sie vielfach weniger stör anfällig sind als holografische.*

*For displacement, deformation and vibration analysis, interferometry, holography and speckle techniques are becoming useful tools. The techniques have taken advantage of the development of solid state detectors and powerful small computers with the appropriate frame grabbers as well as small and rugged lasers. The appropriate software is ready. Therefore, coherent optical techniques can more frequently be applied in industrial environments. It turns out that speckle techniques are not more sensitive to environmental disturbances than holographic techniques.*

## 1 Einleitung

Die kohärente optische Meßtechnik ist in den letzten Jahren wesentlich erweitert worden. Aus Laboruntersuchungen haben sich vermehrt industrielle Anwendungen entwickelt. Diese Entwicklungen sind unterstützt worden durch neue Lichtquellen, insbesondere Laser, durch Festkörperdetektoren sowie Mikroprozessoren mit entsprechender Software. Die wichtigste Entwicklung der 80er Jahre war die Verknüpfung der Interferometrie mit der Elektronik und der Mikroprozessortechnik für die schnelle Daten-Akquisition und -Analyse. Die rechnergestützte Streifen-Analyse in der Interferometrie, Holografie und den Speckle-Techniken hat die Verfahren wesentlich anwendungsfreundlicher und dadurch auch industriell einsetzbar gemacht.

Die klassischen Methoden zur Streifenanalyse basieren auf der Anwendung von Digitalisier-Tablets zur Aufbereitung der Interferenzstreifenbilder für die Weiterverar-

beitung im Rechner, wobei eine derartige Digitalisierung der Streifenbilder sehr zeitintensiv ist. Weitaus besser geeignet zur automatischen Streifenauswertung sind Phasenschiebe- und Fouriertransformations-Verfahren [1–8]. Die Streifenauswerteverfahren werden nicht nur bei der Zweistrahlinterferometrie, sondern auch bei der holografischen Interferometrie, der Speckle-Interferometrie wie auch bei den Moiré-Techniken vorteilhaft eingesetzt.

## 2 Prinzip der Streifenauswertung

Für die automatische Streifenauswertung wird das Streifenmuster z. B. mit einem Detektor-Array registriert. Die fotoelektrischen Signale werden digitalisiert und in den Rechner-Speicher eingelesen. Zweckmäßigerweise teilt man die Verfahren in statische und dynamische ein. Bei den dynamischen muß in den Meßaufbau eingegriffen werden, häufig durch eine Phasenschiebung, z. B. mit Hilfe eines Piezospiegels im Referenzarm. Mit den statischen Verfahren werden bevorzugt offene Streifensysteme analysiert [2; 3]. Bei der Phasenschiebemethode wird die Phase meistens im Referenzarm in Stufen oder kontinuierlich um vorgegebene Beträge beispielsweise um 90° geschoben. Dies kann unterschiedlich erfolgen; entweder durch Verschieben eines Referenzspiegels mit Hilfe eines piezoelektrischen Transducers (a), durch Verkippen einer Planparallelplatte (b), durch Verschiebung eines Gitters (c) oder polarisationsoptisch (d). Die Phasenschiebung wird jeweils rechnergesteuert durchgeführt. Bild 1 zeigt beispielhaft die oben genannten Phasenschiebeverfahren.

Es werden verschiedene Auswertelgorithmen mit drei, vier, fünf oder mehr Phasenstufen verwendet [4–7]. Insbesondere der Algorithmus von Hariharan [5] hat sich sehr bewährt, wobei die Information des Detektor-Arrays jeweils fünfmal ausgelesen wird. Jedesmal wird die Phase um 90° geschoben.

Die folgenden Gleichungen geben die jeweilige Intensitätsverteilung mit  $\pi/2$  Phasenschiebung auf dem Detektor wieder:

$$I_1 = I_0(1 + m \cos(\phi(x, y) - \pi)) \quad (1)$$

$$I_2 = I_0(1 + m \cos(\phi(x, y) - \pi/2)) \quad (2)$$

$$I_3 = I_0(1 + m \cos \phi(x, y)) \quad (3)$$

$$I_4 = I_0(1 + m \cos(\phi(x, y) + \pi/2)) \quad (4)$$

$$I_5 = I_0(1 + m \cos(\phi(x, y) + \pi)). \quad (5)$$

Daraus errechnet sich  $\phi(x, y)$  gemäß

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \quad (6)$$

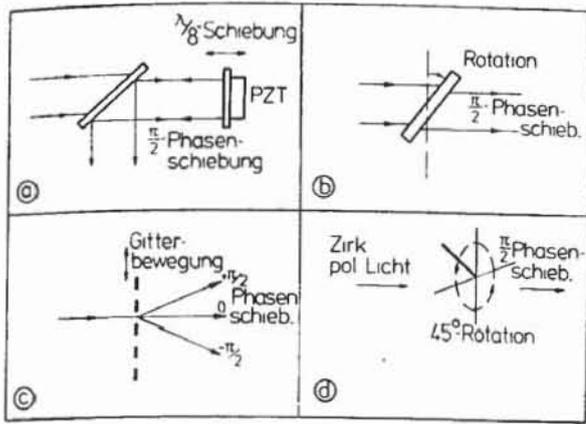


Bild 1. Phasenschiebeverfahren.

- a) Referenzspiegelbewegung
- b) Verkippung einer Planparallelplatte
- c) Bewegung eines Beugungsgitters
- d) Rotation einer  $\lambda/4$ -Platte oder eines Polarisators

Der optische Wegunterschied  $OPD(x, y)$  folgt aus  $OPD(x, y) = \phi(x, y) \cdot \lambda/2\pi$ . Die Phase und daraus der optische Wegunterschied kann damit für jeden Empfängerpunkt berechnet werden. Durch die Subtraktionen und die Division entsprechend Gl. (6) werden Helligkeits- oder Empfindlichkeits-Variationen über die Detektorfläche kompensiert, solange die Detektoren nicht übersteuert werden. Die Streifenauswerteverfahren, die auf Phasenschiebung basieren, ergeben die vorzeichenrichtige Wellenfront; sie sind i.a. auch schneller als Streifenverfolgungsmethoden.

### 3 Vermessen asphärischer Flächen

Am Beispiel der Vermessung einer asphärischen Fläche mit Hilfe eines Computerhologramms (CGH) soll die Zweistrahlinterferometrie mit automatischer Streifenbewertung vorgestellt werden. Insbesondere durch die Erweiterung der Software können auch komplizierte asphärische Flächen vermessen werden. Der Aufbau ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Das CGH zusammen mit

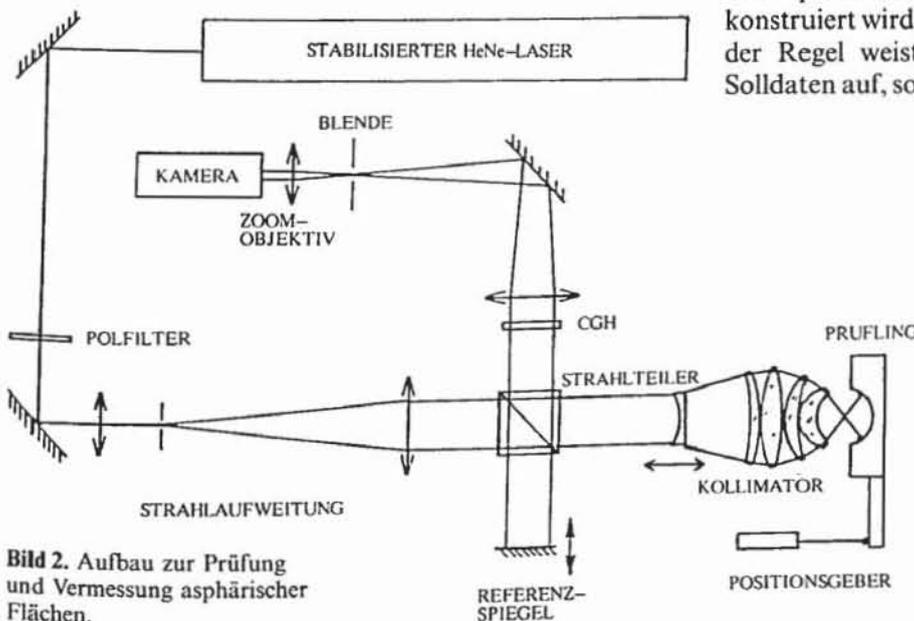


Bild 2. Aufbau zur Prüfung und Vermessung asphärischer Flächen.

der Hilfsoptik ersetzt die sog. Null-Linse, die sehr genau hergestellt und vermessen werden müßte.

Zum besseren Verständnis der Funktion des CGH überlagern wir gedanklich eine komplizierte, gerechnete Soll-Wellenfront mit einer perfekten Planwelle auf dem Hologramm. Bei der Rekonstruktion mit der komplizierten Soll-Wellenfront entsteht die perfekte Planwelle oder ergibt umgekehrt die Rekonstruktion mit der Planwelle die Soll-Wellenfront. Das rechnerisch ermittelte Hologramm wird z.B. mit einem Plotter oder Laserscanner punktweise als Schwärzungsbild auf möglichst hochauflösende Fotoplatten aufgezeichnet, entwickelt und in die vorbestimmte Position (Bild 2) gebracht. Bedingt durch Fabrikationsfehler bzw. Toleranzen stimmt die rekonstruierte Wellenfront nicht mit der gerechneten überein, was zu Abweichungen im Interferenzbild führt. Dieses Interferenzbild kann durch Polynomentwicklung der Wellenfront analysiert werden. Dazu eignen sich besonders Zernike-Polynome wegen ihrer orthogonalen Eigenschaften.

Bild 2 zeigt einen Aufbau zur Vermessung von Asphären und Preßformen für Compact-Disk-Köpfe, der auf dem Einsatz von Computer-Hologrammen basiert. Dabei wird die einfallende Welle am Strahlteiler in eine Referenz- und eine Prüfwellen aufgeteilt. Die Prüfwellen durchläuft vor dem Auftreffen auf den Prüfling ein Linsensystem mit bekannten optischen Daten zur Bestimmung der resultierenden Wellenfront. Das Linsensystem dient zur Anpassung der Wellenfront und der Prüfapertur. Mit Hilfe eines Strahldurchrechnungsprogramms wird die Wellenfront vom Strahlteiler über die Hilfsoptik zum Prüfling und zurück zur Hologrammposition ermittelt. Bei den Untersuchungen erwies es sich als vorteilhaft, ein Linsensystem einzufügen, das die sphärische Aberration durch genau kontrolliertes Verschieben eines oder mehrerer Elemente in gewissen Grenzen variieren kann. Hierzu wurde ein speziell gerechnetes optisches System von der Fa. Cerco für uns gefertigt.

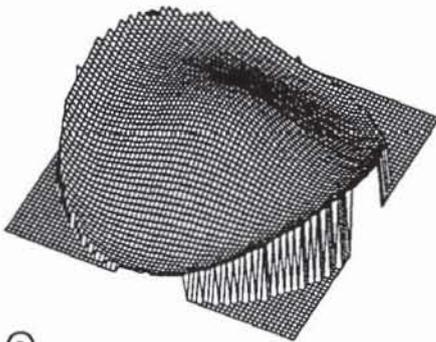
Das Computerhologramm wird so gerechnet, daß bei der Rekonstruktion mit der Soll-Wellenfront vom Prüfling und optischen Hilfssystem eine perfekte Planwelle rekonstruiert wird, die mit der Referenzwellen interferiert. In der Regel weist der Prüfling Abweichungen von den Solldaten auf, so daß die rekonstruierte Wellenfront keine



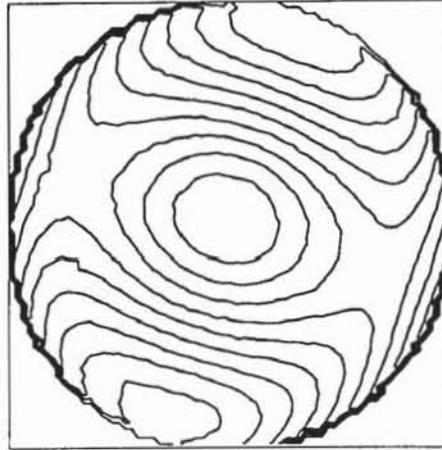
Bild 3. Interferogramm einer Preßform.

**Bild 4.** Auswertung des Interferogramms von Bild 3.

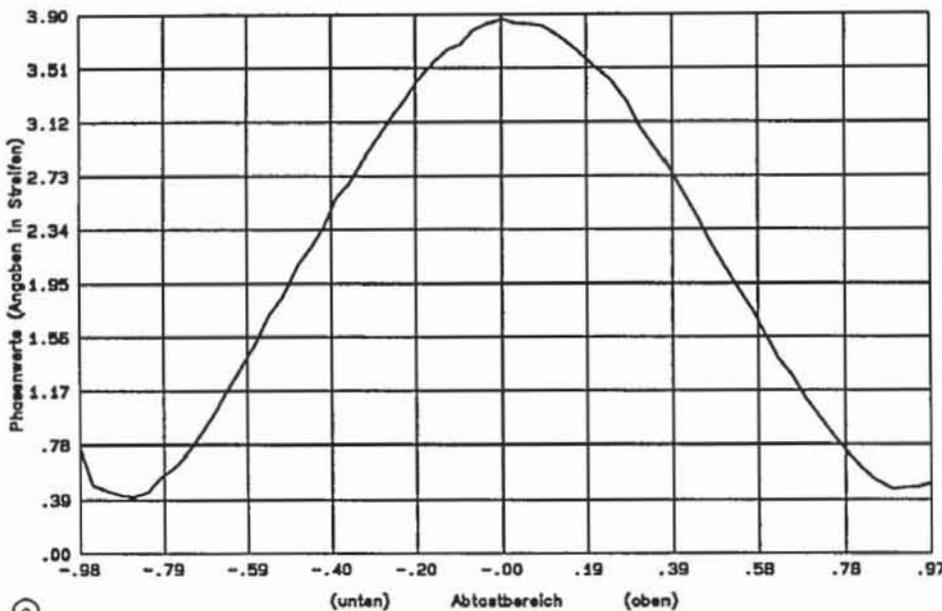
- a) in Pseudo-3D-Darstellung
- b) als Konturlinien dargestellt
- c) Senkrechtschnitt durch die Wellenfront
- d) Waagrechtschnitt durch die Wellenfront



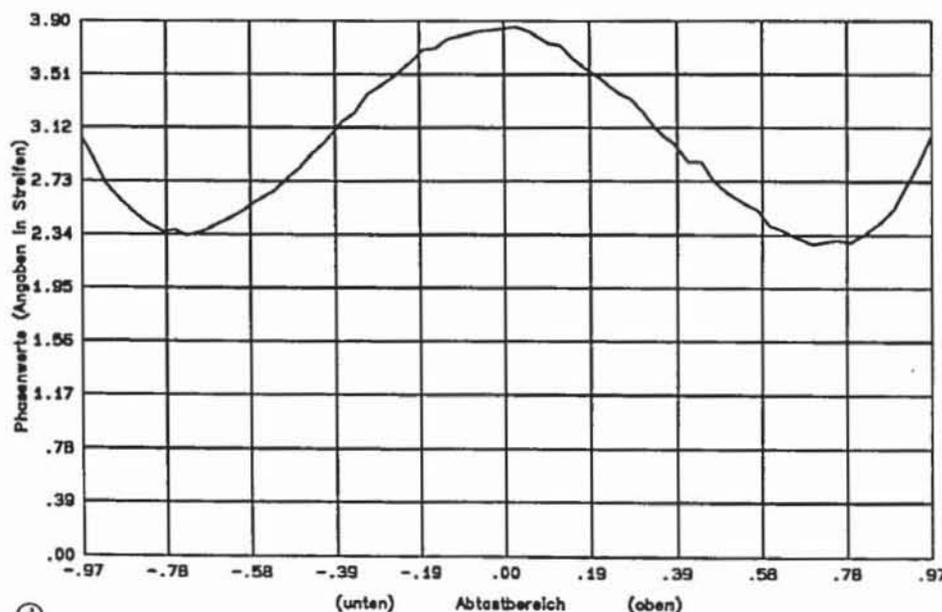
Ⓐ



Ⓑ



Ⓒ



Ⓓ

Planwelle mehr ist. Das durch Überlagerung mit der perfekten oder bekannten Wellenfront der Referenzwelle entstehende Streifenmuster wird automatisch ausgewertet. Damit kann auf die Abweichung des Ist- von dem Sollzustand geschlossen werden [8].

Bild 3 zeigt ein Interferogramm einer Preßform und Bild 4 die entsprechenden Auswertungen.

### 4 Holografie und Speckel-techniken

Die Holografie und die holografische Interferometrie werden zukünftig vermehrt eingesetzt werden. Dazu hat auch die automatische Streifenbewertung wesentlich beigetragen [10; 11; 12]. Heute stehen geeignete Auswerteverfahren zur Verfügung. Beim praktischen Einsatz der holografischen Interferometrie spielt die Wahl des Speichermediums eine wesentliche Rolle. Üblicherweise werden dafür heute fothermische Speicher-materialien verwendet. Darüber hinaus können auch fotorefraktive Speicher in der Holografie und den Speckel-Anwendungen eingesetzt werden. Am Beispiel der Konturlinienaufzeichnung soll dies veranschaulicht werden. Ein von uns verwendeter Aufbau ist in Bild 5 skizziert. Auf einem fotorefraktiven Kristall aus  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) wird die Objektwelle mit der Referenzwelle überlagert. Sowohl in der Referenz- als auch in der Objektwelle sind zwei Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  vorhanden. Für jede Wellenlänge wird jeweils simultan ein Hologramm aufgezeichnet. Praktisch gleichzeitig wird das Hologramm unter dem Bragg-Winkel mit einer der beiden Wellenlängen rekonstruiert [9]. Es treten Konturlinien auf, die dem rekonstruierten Bild überlagert sind. In Bild 6 sind Konturlinien einer Metalloberfläche dargestellt. Die Lini-abstände betragen  $14 \mu\text{m}$ . Die entsprechenden Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  waren  $521 \text{ nm}$  bzw.  $531 \text{ nm}$ .

Auf Alternativen zur holografischen Konturlinienaufzeichnung, wie Doppelbelichtung mit Brechzahlvariation oder Winkeländerung zwischen beiden Belichtungen, soll hier nicht eingegangen werden.

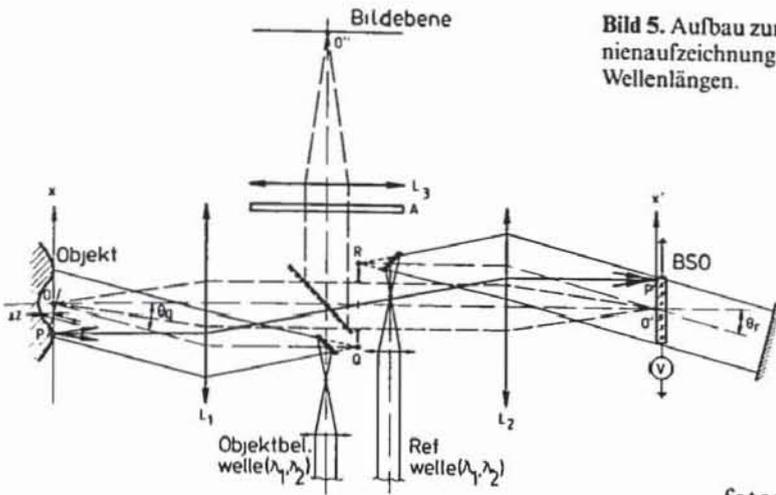


Bild 5. Aufbau zur Konturlinienaufzeichnung mit zwei Wellenlängen.

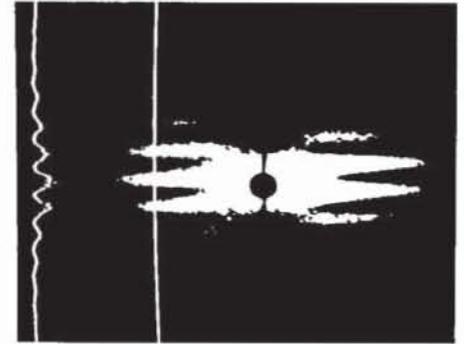


Bild 8. Beispiel zur Analyse einer harmonischen Schwingung mit einem BSO-Kristall als Speichermedium.



Bild 6. Beispiel der Echtzeit-Konturlinienaufzeichnung mit fotorefraktiven Kristallspeichern und der Zweiwellenlängentechnik. Die Konturlinienabstände entsprechen Höhenvariationen von 17 Mikrometern.

### 5 Speckle-Fotografie

Wird eine optisch raue Oberfläche mit kohärentem Licht, z. B. von einem Laser, beleuchtet, entstehen feine Interferenzmuster, sog. Speckles. Optisch rau bezeichnen wir eine Oberfläche, wenn die Höhen der Mikrostrukturen größer oder gleich der Wellenlänge des verwendeten Lichtes sind.

Speckle-Fotografie und Speckle-Interferometrie haben sich inzwischen eingebürgert und ergänzen die holografische Interferometrie. Bei der Speckle-Fotografie werden zwei Specklemuster vor und nach einer Verformung fotografisch registriert. Als Speichermedium eignen sich Fotoemulsionen, thermoplastische Materialien oder

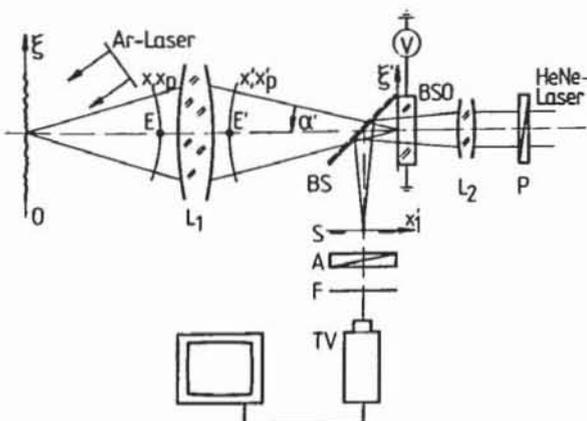


Bild 7. Aufbau zur Speckle-Fotografie mit BSO-Speicher.

fotorefraktive Kristalle. Im Speichermedium wird eine Vielzahl von nahezu identischen Specklepaaren registriert. Wird das so gespeicherte Bild mit kohärentem Licht beleuchtet, entstehen in der Brennebene einer Linse Young'sche Interferenzstreifen. Sie verlaufen senkrecht zum Verschiebungsvektor; der Streifenabstand ist umgekehrt proportional zur Objektverschiebung. Bild 7 zeigt einen Aufbau, wobei der Speicher ein fotorefraktiver Kristall ist ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ). Die Speckleregistrierung erfolgte mit  $\lambda = 514 \text{ nm}$ . Zur simultanen zerstörungsfreien Auslesung wird ein HeNe-Laser verwendet, da BSO im roten Spektralbereich nur eine geringe Empfindlichkeit aufweist.

Die Young'schen Streifen erscheinen während der Belichtung des zweiten verschobenen Specklemusters. Dabei wird das erste Bild nach und nach gelöscht. Eine automatische Auswertung ermöglicht die schnelle Verformungs- und Verschiebungsmessung. Ein Ergebnis ist in Bild 8 zu sehen. Es handelt sich hier um die Zeitmittelaufnahme einer harmonischen Schwingung [11; 17; 18]. Das Specklemuster wird während mehrerer Schwingungszyklen in dem fotorefraktiven Speichermedium registriert. Es entsteht eine der Helligkeitsvariation proportionale Brechzahlvariation und damit ein dem zeitgemittelten Specklegramm proportionales Phasenmuster im Kristall.

### 6 Speckle-Interferometrie

Bedingt durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger Rechner, Bildspeicher und Software ist die Speckle-Interferometrie eine wichtige Ergänzung der Holografie für industrielle Anwendungen, besonders in der Materialprüfung und Qualitätskontrolle, geworden.

In der Speckle-Interferometrie werden wie in der holografischen Interferometrie Specklemuster unterschiedlicher Objektzustände mit einer Referenzwelle überlagert und gespeichert. Anders als in der Holografie können fotoelektrische Empfänger, z. B. CCD-Arrays, eingesetzt werden. Dies ist dadurch möglich, daß durch Wahl der Apertur des abbildenden optischen Systems die Specklegröße dem Auflösungsvermögen der Kamera angepaßt werden kann. Die Specklegröße ergibt sich aus

$$\Delta y' \approx \frac{1,22\lambda}{2 \sin(\alpha')}$$

Dabei sind  $\alpha'$  der bildseitige Öffnungswinkel des abbildenden Systems und  $\lambda$  die Wellenlänge des verwendeten Lichtes [15; 16].

Zur Speckleaufnahme werden heute vielfach CCD-Kameras mit nachgeschaltetem Analog/Digital-Wandler und Halbleiterspeicher eingesetzt. Sie ermöglichen eine schnelle Speicherung von Verformungszuständen von Objekten. Die analog zur Interferometrie zu behandelnden Streifenmuster entstehen im Gegensatz zur Holografie durch Subtraktion der Specklebilder der beiden Objektzustände,  $I_{1P} - I_{2P}$ , wobei

$$I_{1P} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \phi \quad (7)$$

$$I_{2P} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos(\phi + \Delta\phi). \quad (8)$$

Die Subtraktion  $I_{1P} - I_{2P}$  ergibt

$$V_S = 4U_O U_R \sin\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin \frac{\Delta\phi}{2}, \quad (9)$$

und daraus die von der CCD-Kamera registrierte Intensität

$$|V_S| = 4k \left[ |U_O|^2 |U_R|^2 \sin^2\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Dabei sind  $I_1, I_2$  die Intensitäten der Objekt- bzw. Referenzwellenfelder auf dem Detektor,  $\phi$  und  $\Delta\phi$  die Phase bzw. Phasendifferenz, resultierend aus der Verformung. Darüber hinaus kann auch das Zeitmittelverfahren angewendet werden.

Der schematische Aufbau eines Speckleinterferometers ist in Bild 9 dargestellt. Er eignet sich zur Messung der sich normal zur Objektebene einstellenden Verschiebungen (sog. Out-of-plane-Verschiebung). Zur Untersuchung von Verschiebungen in der Objektebene (in-plane) wird der Prüfling aus zwei unterschiedlichen Richtungen beleuchtet. Im Aufbau in Bild 9 wird das Objekt mit einem Laser beleuchtet. Der optisch rauhe Prüfling bzw. das Specklemuster wird auf die CCD-Kamera abgebildet und dort mit der kohärenten Referenzwelle überlagert. Durch Subtraktion der Specklegramme vor und nach der Verformung entstehen Streifen mit relativ schlechtem Kontrast und überlagertem Specklerauschen. Sie stellen ein Maß der Verformung dar. Die quantitative Analyse des Streifenmusters erfolgt mit der rechnergestützten Streifenauswertung, wie sie eingangs diskutiert wurde (Bild 1). Die dazu erforderliche Phasenschiebung wurde bisher mit einem Piezospiegel realisiert.

Eine alternative Methode zur Phasenschiebung ergibt sich durch Ausnutzung der Tatsache, daß bei geeigneter Positionierung eines Gitters die Phasendifferenz zwischen  $-1.$ ,  $0.$  bzw.  $1.$  Beugungsordnung jeweils  $90^\circ$  beträgt. Bild 10 zeigt schematisch einen Aufbau zur Gitterphasenschiebemethode; Bild 11 drei zeitgleich vorliegende, um jeweils  $90^\circ$  gegeneinander phasenverschobene Interferogramme.

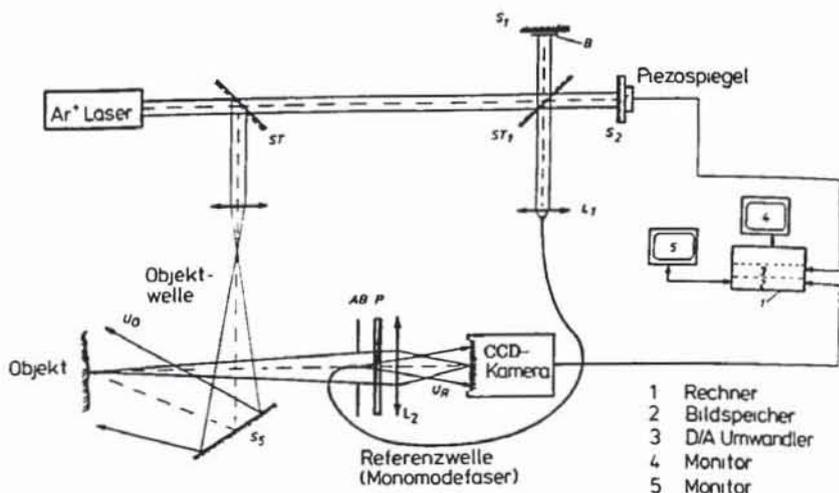


Bild 9. Aufbau zur Speckle-Interferometrie.

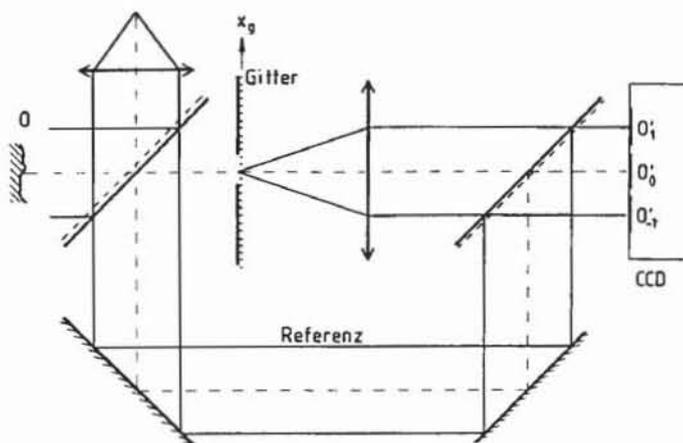


Bild 10. Prinzip der Speckle-Interferometrie mit Gitter zur Phasenschiebung.

Bild 11. Simultan registrierte phasenverschobene Streifenbilder nach der Gittermethode.

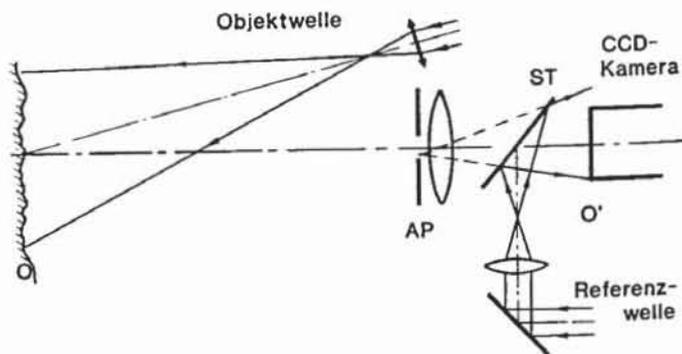
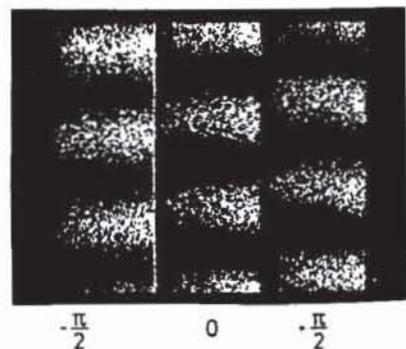


Bild 12. Prinzip der Phasenschiebung mit verkippter Referenz in der Speckle-Interferometrie.

An unserem Institut werden die oben beschriebenen Verfahren entwickelt und für verschiedene Aufgaben auch eingesetzt. Bewährt hat sich weiter ein Verfahren, bei dem durch eine leichte Verkipfung der Referenzwelle die Phasen benachbarter Kamera-Pixel eine Differenz von  $90^\circ$  aufweisen, wie dies in Bild 12 veranschaulicht ist. Exemplarisch werden im folgenden nach diesem Verfahren gewonnene Ergebnisse aus der zerstörungsfreien Materialprüfung vorgestellt.

## 8 Speckle-Interferometrie zur Detektion von Material- und Klebedefekten

In Bild 13 ist ein Ergebnis einer Untersuchung keramikbeschichteter Stahlringe gezeigt. Die unterschiedliche Verformung entstand durch Erwärmung des Stahlringes. Das Ergebnis läßt auf eine unterschiedliche Schichtdicke schließen, da die dickere Keramikschicht sich stärker ausdehnt als die dünnere. Bild 13a zeigt die Schichtdickenänderung des Keramikbelages in Pseudo-3D-Darstellung. Die durch eine Temperaturdifferenz aufgetretene Schichtdickenänderung ist als Stufe deutlich sichtbar. Bild 13b zeigt die dazu gehörenden Konturlinien.

Untersuchungen von Klebeverbindungen belegen die Möglichkeiten der Speckleinterferometrie in der Defektanalyse zur Detektion verdeckter Klebefehlstellen. Dazu wurden die Objekte wiederum thermisch ange regt (kurzzeitige Erwärmung im Heißluftstrom). In Bild 14a ist das Resultat einer Klebefehlstellendetektion als Streifenbild dargestellt. Es sind zwei verdeckte Defekte sichtbar, im linken Teilbild handelt es sich um eine Klebefehlstelle von ca. 2,5 mm, im rechten Teilbild von ca. 10 mm Durchmesser, die Blechdicke beträgt 1,0 mm. Die Streifen entstanden wie oben beschrieben durch Subtraktion zweier Speckleinterferogramme, wobei das eine vor, das andere nach der Objekterwärmung aufgenommen wurde.

Die in Bild 14b und 14c dargestellte Streifenauswertung erfolgte mit der Methode der verkippten Referenzwelle nach vorausgegangener Filterung des dem Streifenbild überlagerten Specklerausens. Die Bilder 14d bzw. 14e zeigen die entsprechenden Konturlinien.

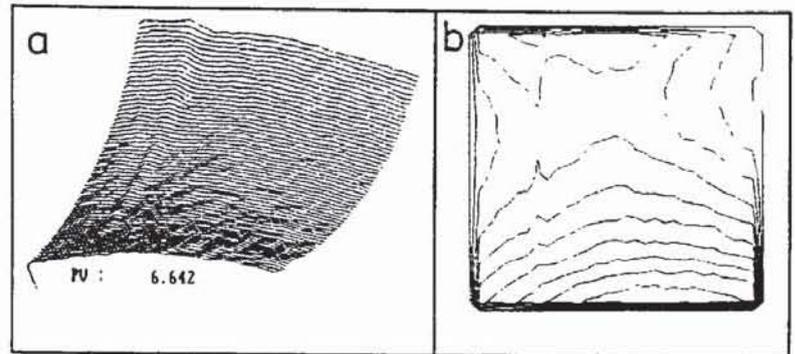


Bild 13. Dickenänderung von aufgesinterten Keramikschichten und Streifenanalyse mit Phasenschiebung durch verkippte Referenz.

- a) Pseudo-3D-Darstellung  
b) Konturlinien

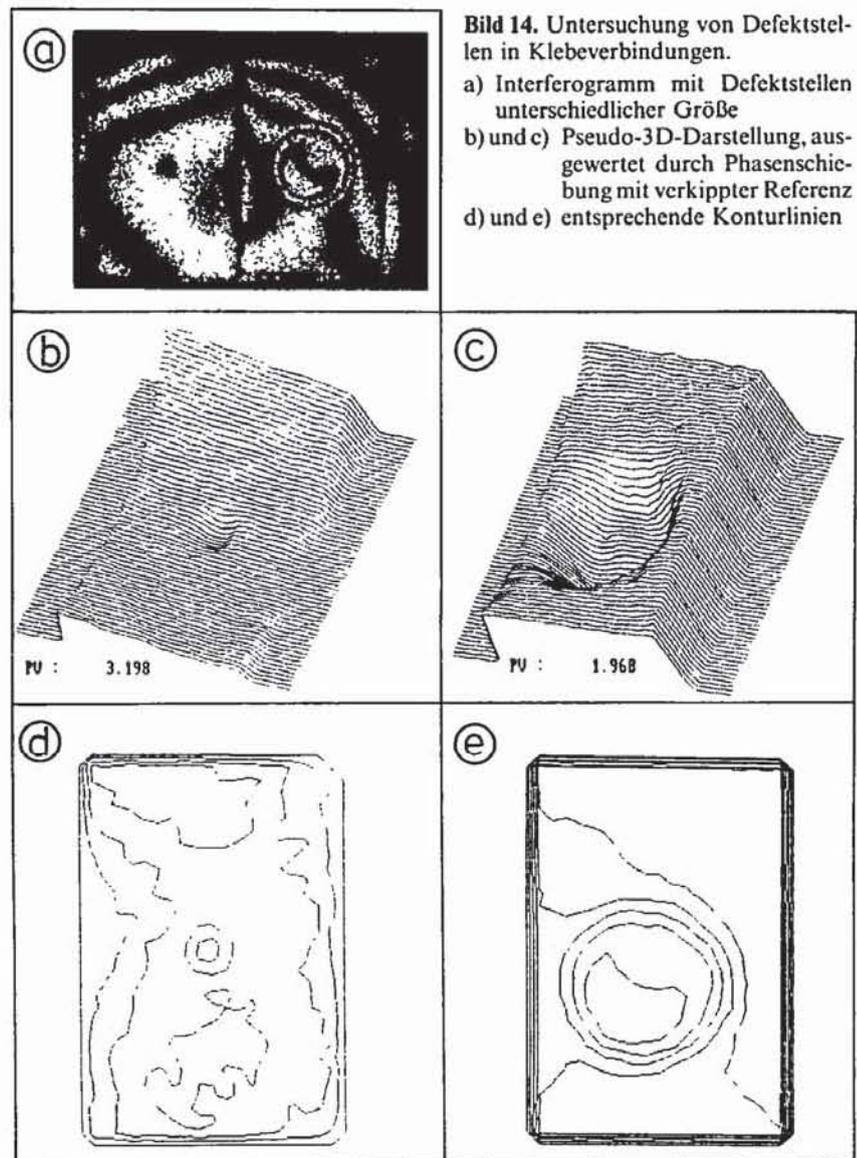


Bild 14. Untersuchung von Defektstellen in Klebeverbindungen.

- a) Interferogramm mit Defektstellen unterschiedlicher Größe  
b) und c) Pseudo-3D-Darstellung, ausgewertet durch Phasenschiebung mit verkippter Referenz  
d) und e) entsprechende Konturlinien

## 9 Schlußfolgerungen

Interferometrische, holografische Verfahren sowie die Speckle-Interferometrie eignen sich zur flächenhaften Verformungs-, Bewegungs- und Schwingungsmessung. Die Verfahren dürften in Zukunft vermehrt in der Indu-

strie eingesetzt werden – dies um so mehr, als die entsprechende Software zur Streifen- und Modalanalyse bereits weitgehend vorliegt. Die Speckle-Interferometrie dürfte eine noch bessere Akzeptanz finden, da TV-Techniken genutzt werden können und die Bildentstehung im Rechner erfolgt. Auch sind die Anforderungen an den Probenaufbau geringer und die Flexibilität größer als bei der Holografie. Allerdings ist die Streifenauflösung geringer und eine Filterung der verrauschten Streifenmuster nötig.

## Literatur

- [1] *Brunning, J.H.*: Fringe scanning interferometers. In: Malacara, E. (Ed.): Optical shop testing. John Wiley and Sons, New York (1978).
- [2] *Takeda, M., Ina, H. und Kobayashi, S.*: Fourier transform method for fringe pattern analysis for computerbased topography and interferometry. *JOSA* 72 (1982), S. 156–160.
- [3] *Kreis, Th.*: Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method. *J. Opt. Soc. Am. A*, 3 (1986), S. 847–855.
- [4] *Dörband, B.*: Die 3-Interferogramm-Methode zur automatischen Streifenauswertung in rechnergesteuerten digitalen Zweistrahlinterferometern. *Optik* 60 (1982), S. 161–174.
- [5] *Hariharan, P., Oreb, B.F. und Eiju, T.*: Digital phaseshifting interferometry: a simple error-compensation phase calculation algorithm. *Appl. Opt.* 26 (1987), S. 2504–2506.
- [6] *Schwider, J., Burow, R., Elssner, K.E., Grzonna, J., Spolaczyk, R. und Merkel, K.*: Digital wave-front measuring interferometry; some systematic error sources. *Appl. Opt.* 22 (1983), S. 3421–3432.
- [7] *Tiziani, H.J.*: Lasergestützte Meßtechnik. *Technisches Messen* 54 (1987), S. 221–230.
- [8] *Dörband, B. und Tiziani, H.J.*: Testing aspheric surfaces with computer generated holograms: analysis of adjustment and shape errors. *Appl. Optics* 24 (1985), S. 2604–2611.
- [9] *Küchel, F.M., Schmieder, Th. und Tiziani, H.J.*: Beitrag zur Verwendung von Zernike-Polynomen bei der automatischen Interferenzstreifenauswertung. *Optik* 65 (1983), S. 123–142.
- [10] *Creath, K.*: Phase shifting speckle interferometry. *Appl. Opt.* 24 (1985), S. 3053–3058.
- [11] *Tiziani, H.J.*: Realtime metrology with BSO crystals. *Optica Acta* 29 (1982), S. 463–470.
- [12] *Breckmann, B. und Thieme, W.*: Computer-Aided Analysis of Holographic Interferograms using the Phase-shift Method. *Appl. Opt.* 24 (1985), S. 2145–2149.
- [13] *Tiziani, H.J.*: Optical methods for precision measurements. *Optical and Quantum Electronics* 21 (1989), S. 253–282.
- [14] *Küchel, F.M. und Tiziani, H.J.*: Real time contour holography using BSO crystals. *Optics Comm.* 38 (1981), S. 17–20.
- [15] *Erf, R.K.* (ed.): Speckle metrology. Academic Press, New York (1978).
- [16] *Jones, R. und Wykes, C.*: Holographic and Speckle Interferometry. Cambridge University Press (1989).
- [17] *Tiziani, H.J.*: Berührungslose optische Echtzeitmeßtechnik. *Laser und Optoelektronik* 15 (1983), S. 315–324.
- [18] *Tiziani, H.J. und Klenk, J.*: Vibration analysis by speckle techniques in real time. *Appl. Opt.* 20 (1981), S. 1467–1470.

Der Autor dankt den Herren B. Pfister, B. Schmidt und G. Schmidt für die Unterstützung bei der Aufbereitung der Vorlagen.

Prof. Dr. H. J. Tiziani, Universität Stuttgart, Institut für Technische Optik, W-7000 Stuttgart 80.