

Hologramminterferometrische qualitative und quantitative Untersuchung des Verformungsfeldes eines statisch belasteten auftragsgeschweißten Bauteiles

L. Mente, W. Osten

0. Einleitung

Die holografische Interferometrie ist ein geeignetes und empfindliches Feldmeßverfahren zum Nachweis plastischer Deformationen insbesondere an metallischen Bauteilen, da sie es gestattet, berührungslos Verschiebungen an der Oberfläche undurchsichtiger Körper mit hoher Genauigkeit und Empfindlichkeit zu messen. Es kann sowohl für qualitative als auch für quantitative Untersuchungen eingesetzt werden, wobei bereits qualitative Messungen eine gute Aussagefähigkeit haben können. Im folgenden wird am Beispiel einer konkreten Untersuchung für einen Praxispartner eine sinnvolle Kombination von qualitativer und quantitativer Untersuchungsmethode im Detail beschrieben, wobei für die bei hologramminterferometrischen Messungen i.a. aufwendige quantitative Auswertung ein fehlerminimiertes Verfahren zur Anwendung kam.

1. Holografische Interferometrie

Die holografische Interferometrie ist ein kohärent-optisches Verfahren, das auf der holografischen Speicherung und unverzerrten Rekonstruktion dreidimensionaler Bilder beruht. Die Holografie ist vor allem durch diese Möglichkeit der dreidimensionalen Abbildung bekannt geworden. Das Erzeugen der Bilder beruht darauf, daß das von einem Objekt gestreute Wellenfeld vollständig in einem Hologramm gespeichert und später exakt reproduziert wird.

In den meisten Fällen dient zum Speichern eine Fotoplatte. Fällt ein stationäres Lichtwellenfeld direkt auf eine Fotoplatte, wird die Intensitätsverteilung als Schwärzung der Platte festgehalten. Bei der Holografie gelingt es, sowohl die Amplituden als auch die Phasenverteilung in der Schwärzung zu registrieren, indem man zusammen mit dem vom Objekt gestreuten Wellenfeld eine kohärente Referenzwelle auf die Platte fallen läßt (Bild 1). Beide interferieren miteinander (mikroskopische Interferenz). Die in der Fotoschicht der Fotoplatte

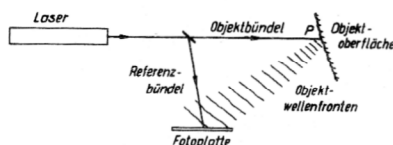


Bild 1
 Prinzipieller Versuchsaufbau zur Aufnahme von Hologrammen

entstehende Schwärzungsverteilung bezeichnet man als Hologramm. Es stellt ein kompliziertes Beugungsgitter dar. Wird es mit kohärentem Licht beleuchtet, so wird eine Welle erzeugt, die die gleiche Amplituden- und Phasenverteilung wie die ursprüngliche Welle hat. Praktisch sieht man das unverzerrte räumliche Bild des Objektes. Betrachtet man das Objekt durch das Hologramm, so erscheint Objekt und sein rekonstruiertes räumliches Bild deckungsgleich. Verschiebt sich das Objekt oder Bereiche des Objektes, so können – bei Beachtung bestimmter Randbedingungen – Interferenzstreifen über dem Objekt beobachtet werden (makroskopische Interferenz), die ein Maß für die Verschiebung sind. Durch Auswertung des Interferogramms im Sinne einer qualitativen Bearbeitung (phänomenologische Beschreibung der Interferenzstreifenbilder) sind in vielen Fällen bereits wichtige Aussagen über das Untersuchungsobjekt möglich. Charakteristische Fragestellungen für diese Auswertemethode sind:

- Wo treten örtlich Interferenzstreifen am Bauteil auf?
- Welchen Verlauf haben die Interferenzstreifen?
- Anzahl bzw. Dichte der Interferenzstreifen?
- Gradient der Interferenzstreifendichte?

Bei komplizierten Objekten erfordert die qualitative Auswertung eine große Erfahrung.

Da die zu beobachtenden Interferenzstreifen durch die Änderung der optischen Weglänge bei Verschiebung des Objektes oder von Teilen des Objektes auftreten, ist auch eine quantitative Auswertung möglich. Der quantitative Zusammenhang zwischen einer Objektverschiebung und dem holografischen Interferenzmuster ergibt sich aus dem entlang einem Interferenzstreifen konstanten Unterschied dieser Weglänge.

Interferenzstreifen treten nicht nur bei Beobachtung von Hologramm und Objekt in der beschriebenen Weise auf, sondern auch, wenn die Fotoplatte zweimal belichtet wird – einmal im Ursprungszustand des Objektes und einmal bei verändertem Objekt. Die unmittelbare Beobachtung des Objektes kann dann entfallen. Man bezeichnet diese Methode als Doppelbelichtung und sie stellt eine der verbreitetsten Methoden der holografischen Interferometrie dar. Sie wurde bei den folgenden Untersuchungen angewendet.

2. Problemstellung

Für ein auftragsgeschweißtes Werkstück waren in Abhängigkeit von verschiedenen Paarungen Grundwerkstoff –

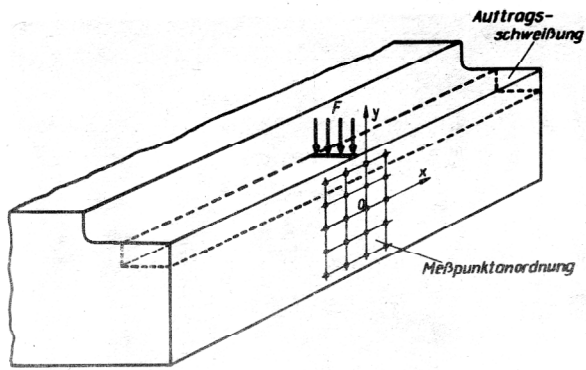


Bild 2
Untersuchtes auftragsgeschweißtes Bauteil (Rastermaß 10 mm)

Auftragswerkstoff für eine statische Belastung gemäß Bild 2 zu ermitteln:

Bei welcher Grenzlaster treten in Abhängigkeit von der Werkstoffpaarung plastische Deformationen auf?

Wie verhält sich die Werkstoffpaarung bei weiterer Belastung?

Welche Verschiebungen (Oberflächenrelief) ergeben sich für einen ausgewählten typischen Fall einer plastischen Deformation?

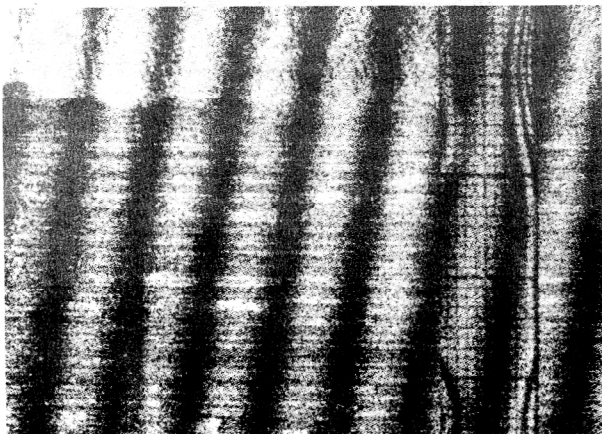


Bild 3
Untersuchungsobjekt mit ungestörtem Mismatch-Raster

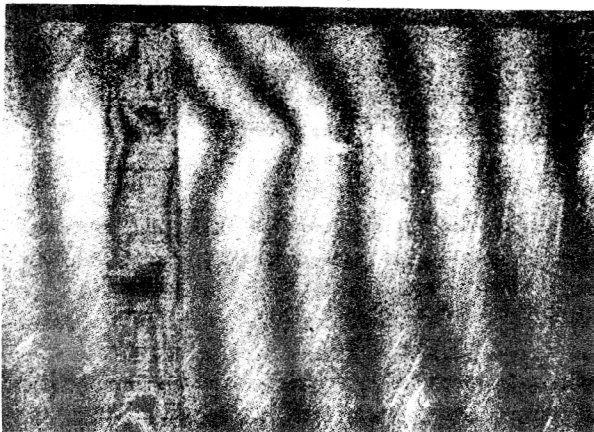


Bild 4
Untersuchungsobjekt mit durch plastische Verformung gestörtem Mismatch-Raster

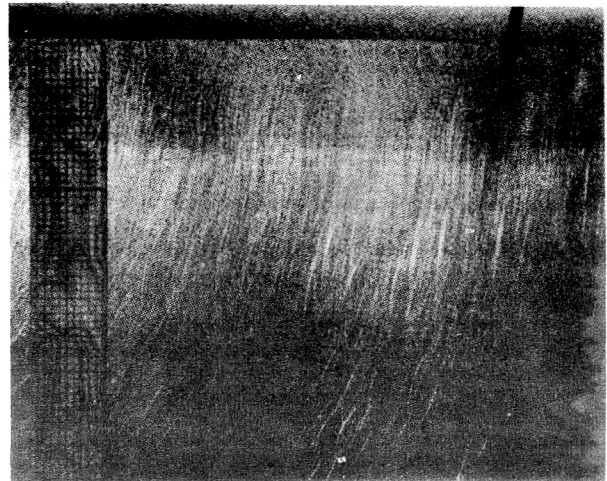


Bild 5
Örtliche Intensitätsänderung (Pfeil) infolge plastischer Verformung ohne zusätzliches Aufbringen eines Mismatch-Rasters

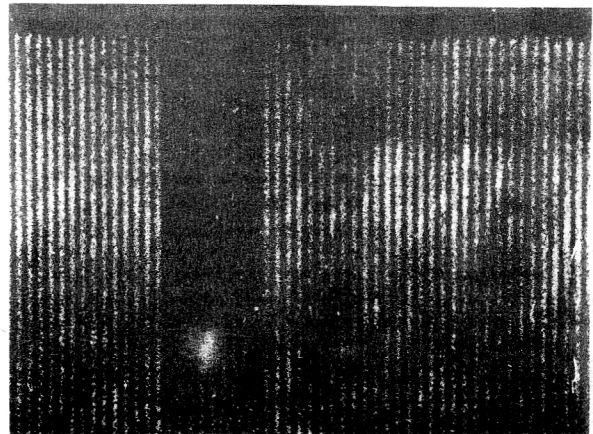


Bild 6
Ungestörtes Mismatch-Raster (vgl. Bild 3)



Bild 7
Untersuchungsobjekt mit Maximum der plastischen Verformung im Übergangsbereich zwischen Grundwerkstoff und aufgetragener Schicht in 10 – 12 mm Tiefe (Last 89,5 kN; H 52-3/CR 3)

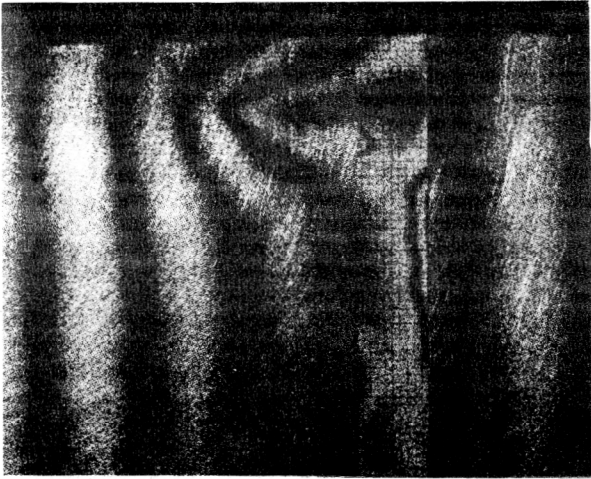


Bild 8
Probe nach Bild 7, Laststeigerung auf 97,5 kN

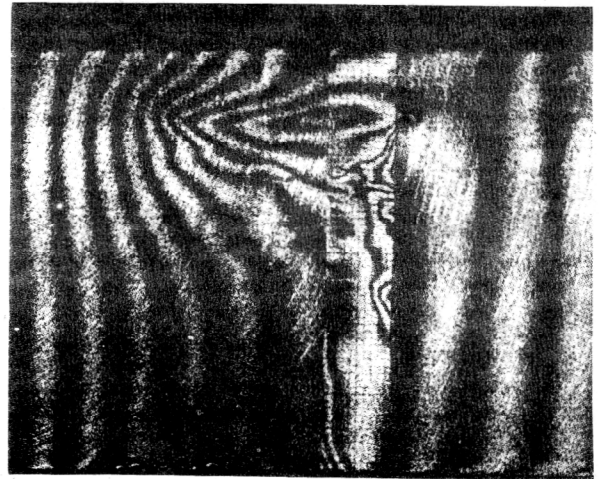


Bild 10
Probe nach Bild 9, Laststeigerung auf 179,5 kN

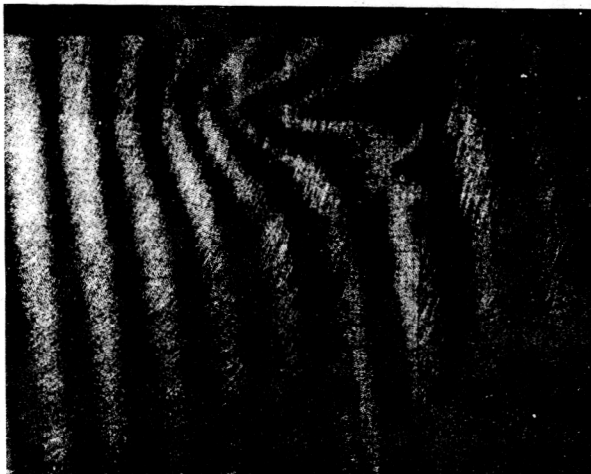


Bild 9
Probe nach Bild 8, Laststeigerung auf 105,5 kN

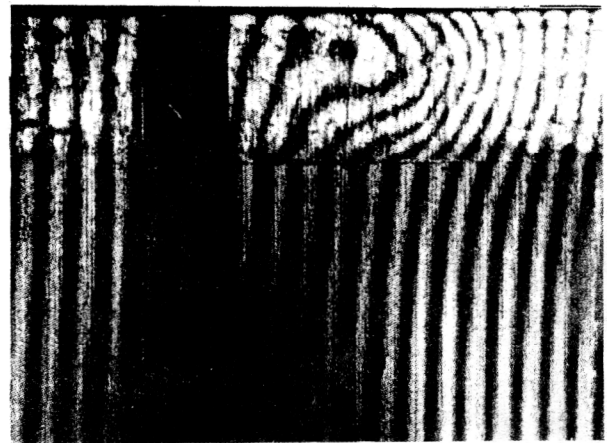


Bild 11
Probe mit Maximum der plastischen Verformung in der auftragsgeschweißten Schicht in 4 – 5 mm Tiefe
(Last 122,5 kN; H 52–3/CR 8)

3. Messungen und Ergebnisse

3.1. Qualitative Untersuchungen

Zur Lösung der einzelnen Probleme wurde die Mismatch-Technik in der holografischen Interferometrie angewandt. Wie der Name bereits ausdrückt, handelt es sich bei den Mismatch-Techniken um Techniken, bei denen eine zusätzliche „scheinbare“, d. h. dem eigentlichen Meßeffect überlagerte Verschiebung aufgebracht wird, wodurch ein Meßeffect in bestimmten Fällen erst möglich, bzw. besonders deutlich wird.

Im vorliegenden Beispiel wird diese Möglichkeit in Verbindung mit der Doppelbelichtungstechnik eingesetzt. Dabei wird so vorgegangen, daß zunächst die Fotoplatte bei unbelastetem Bauteil belichtet wird. Dann wird das gesamte Objekt um einen geringen Betrag verschoben, also eine definierte Starrkörperverschiebung vorgenommen, belastet, wieder entlastet und zum zweiten Mal belichtet. Anschließend kann die Platte fotochemisch verarbeitet und nach dem Trocknen repositioniert werden. Durch das Verschieben des gesamten Objektes zwischen

beiden Belichtungen wird ein Interferenzstreifenraster von nahezu parallelen Geraden erzeugt (Mismatch, Bild 3). Die Beurteilung wird dadurch wesentlich erleichtert, da sich örtliche Verschiebungen an der Oberfläche des Objektes – die gesuchten plastischen Verformungen – in einer Störung des geradlinigen parallelen Verlaufes der Interferenzstreifen zeigen (Bild 4). Diese Anzeige ist sehr empfindlich und ohne weitere Hilfsmittel mit bloßem Auge deutlich zu erkennen, während ohne Erzeugen eines Interferenzstreifenrasters der Beginn der plastischen Verformung nur als örtliche Intensitätsänderung schlecht zu beobachten ist (Bild 5). Die Feinheit des Rasters kann durch die Größe der Starrkörperverschiebung den Erfordernissen angepaßt werden (Bild 6, 3). Bleibt das Raster von parallelen Geraden erhalten, ist noch keine plastische Deformation erfolgt, und durch stufenweise weitere Belastung kann die Grenzlast zunächst näherungsweise und in zusätzlichen Messungen mit kleineren Laststeigerungsintervallen genauer bestimmt werden. Durch Anwendung der Echtzeit-Technik kann das stufenweise Arbeiten vermieden und die Grenzlast bei kontinuierlichem Belasten gefun-

den werden. Um einen ausreichenden Kontrast zu erzielen, ist es hier allerdings notwendig, daß die Intensitäten von Objektstrahl und Referenzstrahl so eingestellt werden, daß das Objekt und das virtuelle Bild die gleiche Helligkeit haben.

Das Verhalten der Werkstoffpaarung bei weiterer plastischer Verformung kann mit Hilfe der geschilderten Technik sehr gut qualitativ beurteilt werden, besonders wenn infolge der stufenweisen Lastzunahme ganze Bildserien zur Verfügung stehen (Bild 7, 8, 9, 10).

So war es in diesem Fall ein wichtiges Ergebnis, daß sich bei einer Werkstoffpaarung das Verformungsmaximum im Übergangsbereich zwischen Grundwerkstoff und aufgetragener Schicht ausbildet, was ein sehr inhomogenes Werkstoffverhalten bedingt (Bild 10), während bei einer anderen Paarung das Verformungsmaximum in der aufgetragenen Schicht im Bereich der maximalen Schubspannungen liegt und ein homogeneres Werkstoffverhalten zu beobachten ist (Bild 11).

Hier konnte anhand einer rein qualitativen Beurteilung des Interferenzstreifenverlaufes eine Vorauswahl einer günstigen Werkstoffpaarung erfolgen, die durch zusätzliche Untersuchungen im Hinblick auf die Praxisbewährung ergänzt und bestätigt wurde.

3.2. Quantitative Untersuchungen

Für die auf Grund der qualitativen Auswertung gefundene günstige Werkstoffkombination interessierte für eine Laststufe (die wieder auf der Basis der qualitativen Einschätzung des Interferenzstreifenfeldes als typisch ausgewählt wurde) das Verschiebungsfeld der Werkstückoberfläche (Oberflächenrelief) in dem Werkstückgebiet, das plastisch deformiert war (Bild 12).

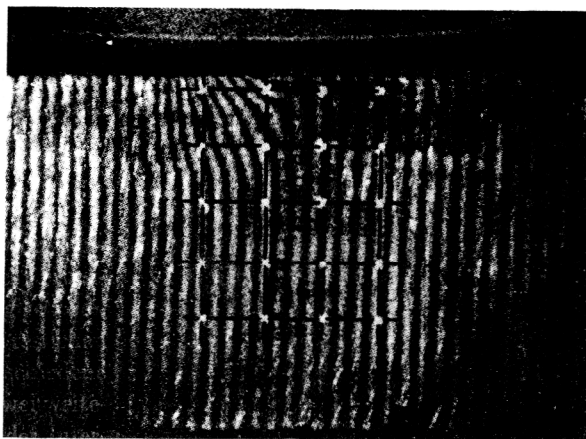


Bild 12

Probe mit durch plastische Verformung gestörtem Mismatch-Raster und Lage der bei der quantitativen Auswertung berücksichtigten Objektpunkte
(Last 138 kN; H 52-3/CR 8 geüht)

Zur Erzeugung des quantitativ auszuwertenden Interferenzstreifenfeldes wurde wie unter 2.1. vorgegangen. Um eine möglichst genaue und günstige Auswertung zu ermöglichen, sind einige Voraussetzungen an das Interferometer und die Auswertemethode zu stellen.

Zur Auswertung der holografisch erzeugten Interferogramme im Hinblick auf die zu vermessenden Objektveränderungen existieren zahlreiche Methoden bzw. Meßvorschriften. Die im Rahmen der Untersuchungen verwendete Meßvorschrift basiert auf dem Modell von Sollid [1], wonach die Bestimmung der drei Komponenten des Verschiebungsvektors in Richtung der Achsen eines orthogonalen Koordinatensystems ohne vorherige Kenntnis der Verschiebungsrichtung möglich ist. Ihren quantitativen Zusammenhang erhält diese Meßvorschrift in der Grundgleichung der Hologramminterferometrie, durch die eine Verbindung zwischen der gesuchten Verschiebung \vec{d} des Meßpunktes P und der bezüglich einer bestimmten Beobachtungsrichtung $\vec{e}_B(P)$ über P gemessenen Interferenzordnungszahl N hergestellt wird:

$$N \cdot \lambda = [\vec{e}_B(P) + \vec{e}_q(P)] \cdot \vec{d}(P). \quad (1)$$

λ ist die Lichtwellenlänge, mit der das Hologramm aufgezeichnet worden ist; $\vec{e}_B(P)$ und $\vec{e}_q(P)$ sind Einheitsvektoren, die die Richtung vom Meßpunkt zum Beobachtungspunkt bzw. Beleuchtungsquellpunkt angeben. Eine Modifikation der aus dieser Meßvorschrift direkt ableitbaren statischen Auswertemethode [2] ist die dynamische Auswertemethode [3]. Diese benötigt zur Berechnung von \vec{d} anstelle der absoluten Interferenzstreifenordnung N über P die Änderung der Interferenzordnungszahl ΔN_{oi} , wenn die Richtung, unter der P durch das Hologramm beobachtet wird, kontinuierlich über dem Hologramm von $\vec{e}_{B_0}(P)$ nach $\vec{e}_{B_1}(P)$ geändert wird:

$$\lambda \cdot \Delta N_{oi} = [\vec{e}_{B_0}(P) - \vec{e}_{B_1}(P)] \cdot \vec{d}(P). \quad (2)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (1) und (2) ist jedoch lediglich die Berechnung der Projektion des Verschiebungsvektors auf die Richtung des sogenannten Sensitivitätsvektors \vec{S} möglich. Dieser liegt im Fall der hier verwendeten dynamischen Auswertemethode in Richtung des Differenzvektors der beiden Beobachtungsrichtungen:

$$\vec{S}_1 = [\vec{e}_{B_0}(P) - \vec{e}_{B_1}(P)] \quad (3)$$

Zur Berechnung der 3 Komponenten u, v und w des Verschiebungsvektors in Richtung der Achsen eines kartesischen Koordinatensystems sind drei unabhängige Gleichungen der Form (2) erforderlich. Die beiden restlichen Gleichungen lassen sich experimentell auf verschiedene Weise beschaffen. Beispielsweise ergeben sich zwei weitere Auswertegleichungen, wenn die Änderung der Interferenzordnungszahl über dem Meßpunkt entlang zweier weiterer Beobachtungswege auf dem Hologramm bestimmt wird. Üblicherweise gehen die drei Beobachtungswege von einem gemeinsamen Ausgangspunkt aus, so daß das resultierende Gleichungssystem lautet:

$$\lambda \cdot \Delta N_{oi} = [\vec{e}_{B_0}(P) - \vec{e}_{B_i}(P)] \cdot \vec{d}(P)$$

bzw. (4)

$$\lambda \cdot \Delta N_{oi} = \vec{S}_i(P) \cdot \vec{d}(P)$$

mit $i = 1, 2, 3$.

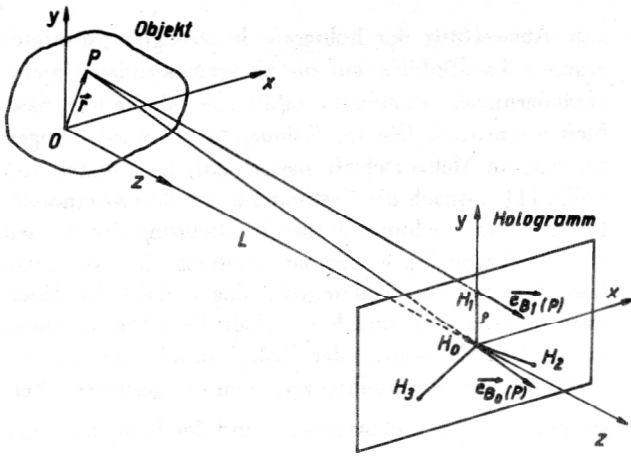


Bild 13
Geometrie des verwendeten Interferometers

Da nur ein Hologramm verwendet wird, ist dieses Verfahren auch unter der Bezeichnung Single-Hologram-Analysis bekannt.

Zur Lösung des Gleichungssystems (4) muß durch den Meßprozeß eine gewisse Anzahl von Eingangsdaten erbracht werden. Wird die Wellenlänge λ als bekannt vorausgesetzt, so verbleibt die experimentelle Bestimmung einer definierten Anzahl von geometrischen Parametern des Interferometers ($\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3$) und Interferenzordnungsanzahländerungen $\Delta N_{01}, \Delta N_{02}, \Delta N_{03}$. Diese Eingangsdaten werden in Abhängigkeit von der Genauigkeit der zu ihrer Bestimmung verwendeten Meßmittel und Methoden mehr oder weniger stark fehlerbehaftet sein und verfälschen so das eigentliche Ziel der Messung – den Verschiebungsvektor. Es zeigt sich jedoch, daß der Grad, mit dem sich eventuelle Fehler der Eingangsdaten auf die Lösung von (4) fortpflanzen, abhängig ist von der Geometrie, die zur Aufnahme und Auswertung der Interferogramme gewählt wird. In den letzten Jahren sind mehrere Arbeiten erschienen, in denen die Autoren diese Problematik mit verschiedenen Methoden der Fehlerrechnung untersuchen [4] bis [6].

Durch die Verwendung von Methoden der Störungsrechnung linear algebraischer Systeme gelangen insbesondere Wenke u. a. [5] zur Angabe von theoretisch fundierten Hinweisen zur Gestaltung von Interferometergeometrien, die im Prozeß der numerischen Berechnung der Verschiebungen zu einem günstigen Verhalten in bezug auf die Fehlerfortpflanzung der Eingangsdaten führen. Alle so gewonnenen Fehlerabschätzungen zeigen, daß bei vorhandenen Fehlern in der Geometrie- und Phasemessung eine Verkleinerung des Einflusses dieser Fehler auf den Lösungsvektor von (4) lediglich durch die Erniedrigung der Konditionszahl κ der Koeffizientenmatrix \underline{G} des Gleichungssystems zu erreichen ist. Da in die Matrix \underline{G} alle Angaben über die Geometrie des Meßprozesses eingehen, steht diese Zahl in direktem Zusammenhang mit der Konfiguration des optischen Aufbaus und wird so auch als Konditionszahl des Interferometers bezeichnet. In dieser Eigenschaft ist κ ein nützliches numerisches Maß zur Einschätzung der Güte des Interferometers. Im Interesse einer erfolgreichen Durchführung

der Messungen sollte deshalb neben dem meßtechnischen Problem auch darauf geachtet werden, daß die Konditionszahl bei der Gestaltung des optischen Arrangements dem Idealfall $\kappa = 1$ möglichst nahe kommt.

Eine Interferometergeometrie, die zu einer minimalen Konditionszahl führt, wenn, wie im Fall der dynamischen Methoden, nur ein Hologramm zur Anwendung gelangen soll, wird in [7] begründet und diskutiert. Diese Geometrie ist gekennzeichnet durch eine 120° -Symmetrie in der Lage der Beobachtungswegen auf dem Hologramm (vgl. Bild 13). Alle Beobachtungswegen gehen von einem gemeinsamen Punkt H_0 aus und ihre Endpunkte H_1, H_2 bzw. H_3 liegen auf einem Kreis, dessen Radius ρ möglichst groß zu wählen ist. Letztere Bedingung wird durch die Größe der zur Verfügung stehenden Fotoplatte eingeschränkt. Das Hologramm, dessen Ebene parallel zur x, y-Ebene des Objektkoordinatensystems liegt, befindet sich in einem orthogonalen Abstand L vom Objekt. Bei einer solchen Anordnung führt das Verhältnis der Länge der Abtastwege ρ zum Abstand L von

$$\xi = \frac{\rho}{L} = 2 \cdot \sqrt{2}$$

zu einer Konditionszahl $\kappa = 1$ für den Objektpunkt P, der im Koordinatenursprung liegt. Praktische Interferometeranordnungen weisen i. allg. ξ -Werte auf, die auf Grund der Versuchsbedingungen (Fotoplattegröße, Platzbedarf) kleiner als der angegebene Idealwert sind. In solchen Fällen gilt für die Konditionszahl [7]:

$$\kappa(G) = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + 1} - 1} \quad (5)$$

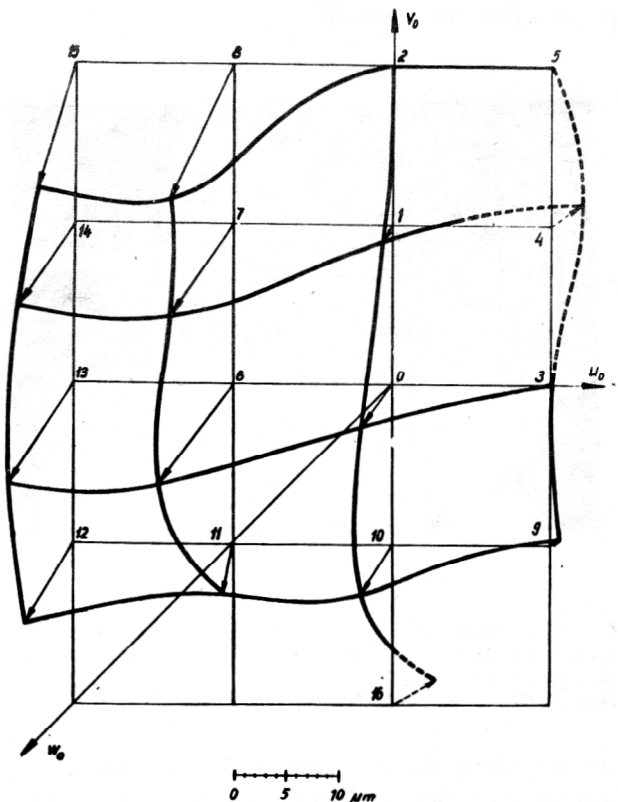


Bild 14
Verschiebungsfeld (Oberflächenrelief) der Probe nach Bild 12

Die Bedeutung von κ sollte jedoch immer in seiner Anwendbarkeit als Gütekriterium des Interferometers und so als geeignetes Mittel zur Auswahl der besten Aufnahme- und Auswertegeometrie der Interferogramme verstanden werden. Für eine realistische Einschränkung der jeweiligen Meßfehler empfiehlt sich die in [6], [7] beschriebene statistische Fehleranalyse.

Zur Gewinnung des Verschiebungsfeldes an dem beanspruchten auftragsgeschweißten Bauteil wurde ein Interferometer mit den folgenden Charakteristika verwendet:

$$\begin{aligned} L &= 300,50 \text{ mm} \\ \rho &= 70,00 \text{ mm} \\ \xi &= 0,23 \\ \kappa &= 6,15 \end{aligned}$$

Als Lichtquelle diente ein Helium-Neon-Laser des Typs HNA 188 mit der Wellenlänge $\lambda = 632,8 \cdot 10^{-6}$ mm. Die Krafterleitung und Verteilung der markanten Meßpunkte auf dem Untersuchungsobjekt sind im Bild 2 dargestellt. Da die Bestimmung der ΔN_{oi} ($i = 1,2,3$) über dem jeweiligen Meßpunkt P durch visuelle Beobachtung des Interferenzstreifenbildes erfolgte, wurde zur Verbesserung der Genauigkeit der Meßdaten das Hologramm mit einer Maske versehen, die die Beobachtung der Änderung der Interferenzerscheinung über P lediglich entlang der vorgeschriebenen Beobachtungswege gestattete. Diese von Kohler [8] vorgeschlagene Methode ist sehr einfach zu realisieren und eignet sich besonders für Routine-messungen unter beliebigen Bedingungen. Sie läßt aber auch nur eine Genauigkeit von $\pm 5/10$ Ordnungen in der Bestimmung der ΔN_{oi} zu. Um die statistische Sicherheit der Meßwerte zu erhöhen, wurde jede Messung mehrmals unter identischen Versuchsbedingungen durchgeführt und der resultierende Mittelwert der Interferenzordnungsanzahländerungen für die Berechnung der Verschiebung $\vec{d}(P)$ herangezogen. Bei einem solchen Vorgehen kann die Genauigkeit der ΔN_{oi} auf etwa $\pm 2/10$ Ordnungen erhöht werden. Die numerische Berechnung des Verschiebungsfeldes erfolgte mit Hilfe eines programmierbaren Tischrechners des Typs EMG 666. Neben den Verschiebungen beinhaltet das erstellte Programm Informationen über die Konditionszahl des Interferometers und die Fehler der Verschiebungskomponenten. Beispielsweise führt die angegebene Toleranz der ΔN_{oi} im Meßpunkt P (0,0,0) zu den folgenden Standardabweichungen der Komponenten von \vec{d} :

$$\sigma_{\Delta u} = \pm 0,45 \mu\text{m}$$

$$\sigma_{\Delta v} = \pm 0,45 \mu\text{m}$$

$$\sigma_{\Delta w} = \pm 2,80 \mu\text{m}$$

Werden verbesserte Methoden zur Erfassung der Interferenzordnungen verwendet [9], [10], so erhöht sich die Genauigkeit der Komponenten u, v und w in dem Maße, in dem die Genauigkeit der ΔN_{oi} verbessert wird. Das resultierende Verschiebungsfeld zeigt Bild 14.

4. Zusammenfassung

Um die gestellte Aufgabe mit möglichst geringem Aufwand zu lösen, wurde versucht, durch eine sinnvolle Kombination qualitativer und quantitativer Untersuchungen schnell zu einer Aussage zu kommen, die die Auswahl einer für den vorgesehenen Verwendungszweck optimalen Werkstoffpaarung Grundwerkstoff – Auftragswerkstoff ermöglicht. Dabei wurde davon ausgegangen, daß wesentliche Teile des Problems durch eine qualitative Beurteilung des Interferenzstreifenmusters einer Lösung zugeführt werden können. Die qualitative Auswertung hat den Vorteil eines relativ geringen Aufwandes; sie erfordert allerdings eine gewisse Erfahrung bei der Beurteilung des Interferogramms und ist deshalb noch weniger verbreitet als die quantitative Auswertung. Durch die angewandte Technik des Anfertigen ganzer Belastungsserien konnten – wie die Ergebnisse zeigen – sehr sichere und eindeutige Aussagen getroffen werden. Abgerundet wurden die Untersuchungen durch die quantitative Ermittlung des Verformungsfeldes für einen ausgewählten Belastungsfall. Dadurch ergab sich die Möglichkeit, sich ein anschauliches Bild vom Verhalten der untersuchten Werkstoffpaarung zu machen. Auch bei den quantitativen Untersuchungen wurde Wert darauf gelegt, Methode und Auswertung so aufzubereiten, daß im Interesse einer leichten praxisnahen Anwendbarkeit durch einen günstigen Interferometeraufbau die bei der Auswertung zwangsläufig auftretenden Fehler sich auf das Meßergebnis möglichst wenig auswirken und daher auch an die Erfassung der Meßdaten keine übertrieben hohen Anforderungen gestellt werden müssen. So konnte eine sehr einfache Methode zur Ermittlung der Interferenzordnungsanzahländerung angewendet werden. Die Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Messungen ergänzen sich in vorteilhafter Weise und vermitteln ein umfassendes Bild vom Verhalten des Bauteiles unter den Prüfbedingungen. Die Untersuchungen sind damit auch ein Beitrag zu der immer noch etwas problematischen Verbindung zwischen den Grundlagen der holografischen Interferometrie und der ingenieur-technischen Praxis.

Verzeichnis der Symbole

N	absolute Interferenzordnungsanzahl
ΔN	Interferenzordnungsanzahländerung
λ	Wellenlänge des Laserlichts
\vec{e}_B	Einheitsvektor in Beobachtungsrichtung
\vec{e}_q	Einheitsvektor in Beleuchtungsrichtung
\vec{d}	Verschiebungsvektor
P	Objektpunkt
\vec{S}	Sensitivitätsvektor
\underline{G}	Koeffizientenmatrix
κ	Konditionszahl
H	Hologrammpunkt
L	orthogonaler Abstand Objekt – Hologramm
ρ	Länge der Beobachtungswege auf dem Hologramm
ξ	Verhältnis von ρ zu L
σ	Standardabweichung

LITERATUR

- [1] Sollid, J. E.: Holographic Interferometry Applied to Measurements of Small Static Displacements of Diffusely Reflecting Surfaces. *Appl. Opt.* 8 (1968) 1587 – 1595
- [2] Ennos, A. E.: Measurement of In-Plane Surface Strain by Hologram Interferometry. *J. Phys. E. (J. Sci. Instrum.)*
- [3] Aleksandrov, E. B., Bonč-Bruevič, A. M.: Issledovanie poverchnostnykh deformatsij tel pomoščju gologrammnoj tehniki, *Žurnal techn. fiziki* 37 (1967) S. 360 – 369.
- [4] Matsumoto, T., Iwata, K., Nagata, R.: Measuring Accuracy of Three-Dimensional Displacements in Holographic Interferometry. *Appl. Opt.* 12 (1973) 961 – 967.
- [5] Wenke, L., Schreiber, W., Erler, K.: Zur Genauigkeit von Verfahren der quantitativen Auswertung holografischer Interferogramme. *Feingerätetechnik* 29 (1980) 9, S. 413 – 416.
- [6] Nobis, D., Vest, C. M.: Statistical Analysis of Errors in Holographic Interferometry. *Appl. Opt.* 17 (1978) 2198 – 2204.
- [7] Osten, W., Häusler, F.: Zur Optimierung holografischer Interferometer. Preprint P-MECH-08/81.
- [8] Kohler, H.: Untersuchungen zur quantitativen Analyse der holografischen Interferometrie. *Optik* 39 (1974) 229 – 235
- [9] Ek, L., Biedermann, K.: Analysis of a System for Hologram Interferometry with a Continuously Scanning Reconstruction Beam. *Appl. Opt.* 17 (1978) 1727.
- [10] Dändliker, R., Ineichen, B., Mottier, F. M.: High Resolution Hologram Interferometry by Electronic Phase Measurement. *Optics Commun.* 9 (1973) 412.

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. L. Mente
Dipl.-Phys. W. Osten
Akademie der Wissenschaften der DDR
Institut für Mechanik
1199 Berlin, Rudower Chaussee 5