

Anwendung der synthetischen Holografie in der Meßtechnik

Von H.J. Tiziani¹⁾

Einführung

Der Einsatz computer-generierter Hologramme (CGH) oder synthetischen Hologramme ist vielfältig. CGH können eingesetzt werden zur Herstellung komplexer optischer Filter für die optische Korrelation und geometrische optische Transformationen sowie zur Erzeugung von dreidimensionalen Rekonstruktionen von synthetisierten Objekten und Wellenfeldern, aber auch als HOE (holografisch-optische Elemente). HOE und CGH können vielseitig eingesetzt werden, zum Beispiel:

- Beugungsgitter
- Strahlteiler
- Fokussierelement, Kollimator
- Kreditkarten
- Erkennungskarten
- Anzeigen (head-up)
- Optische Filter für optische Filtrierung
- Zur Prüfung asphärischer Flächen
- Zur Erzeugung spezieller Wellenfronten.

Zur Berechnung der Hologrammfunktion eines physikalisch nicht existierenden Objektes muß ein mathematisches Modell des Objektes vorliegen. Die Hologrammfunktion wird punktweise oder als Kurvenschar berechnet und dargestellt. Dabei wird mit einem Minimum an Hologrammstützstellen das Objektfeld gespeichert.

Bei der Aufzeichnung von CGH mit einer rechnergesteuerten Apparatur müssen die Stützstellen unverzerrt dargestellt werden. Für die Aufzeichnung werden häufig Plotter eingesetzt, die mit diskreten Schrittweiten bzw. diskreten Intensitätsstufen arbeiten. Grobe oder feine Quantisierung wirkt sich in Abhängigkeit vom Codierungsverfahren in differenzierter Weise auf die Qualitätsparameter des Hologramms aus. Auflösungsvermögen und Beugungseffektivitäten sind wesentliche Kenngrößen von CGH.

Ein wichtiges Einsatzgebiet ist die Prüfung asphärischer Flächen mit CGH. Darüber wird in diesem Beitrag besonders berichtet. Asphärische Flächen werden zunehmend in optischen Geräten und Systemen zur Realisierung extremer Eigenschaften bezüglich Öffnungsverhältnis und Abbildungsfehlerkorrektur verwendet. Die Herstellung derartiger Flächen erfordert zwangsläufig ein Meßgerät, das eine Qualitätskontrolle der erreichten Flächenform mit Genauigkeiten von $0,1 \mu\text{m}$ und besser ermöglicht. Die geforderten Genauigkeiten liefern interferometrische Meßmethoden, die außerdem eine visuelle und quantitative Beurteilung der gesamten Fläche erlauben.

Aufgrund der außerordentlichen Flexibilität bei der Absolutmessung verschiedener Asphärentypen in einem Interferometer, hat sich die Verwendung computer-generierter

Hologramme (CGH) als besonders geeignet erwiesen. Um die Streifendichten im Hologramm nicht zu groß werden zu lassen und die Aperturen von Interferometer und Testfläche einander anzupassen, werden zusätzliche „teilkompensierende Systeme“ aus einfachen sphärischen Linsen eingesetzt.

Im folgenden sind zunächst das von uns entwickelte Verfahren, die Meßapparatur, und die automatische Interferogrammauswertung beschrieben. Zur Kompensation der zwangsläufig anfallenden Justierfehler von Asphäre und Computerhologramm sowie zur Bestimmung der Asphären-Listparameter aus den Wellenfrontdaten, wird bei uns ein Programm angewendet, das Interferogrammanalyse und Strahldurchrechnung vereint.

Zur Vermessung asphärischer Flächen mit CGH wird ein Hologramm von den Solldaten gerechnet, hergestellt und in einem Aufbau rekonstruiert, zum Vergleich mit dem Prüfling. Die daraus resultierenden Wellenfrontabweichungen erscheinen als Interferenzmuster, das automatisch ausgewertet wird.

Interferenzstreifenanalyse in der Meßtechnik

Bei der Zweistrahlinterferenzanordnung entsprechen zweidimensionale Interferenzstreifenabstände Oberflächenvariationen von $\lambda/2$ (in Reflexion). Vielfach-Interferenzmethoden verbessern die Genauigkeit der Streifenanalyse.

Für die Interferenzstreifenanalyse bieten sich verschiedene Verfahren an:

- Fotografieren der Interferenzstreifen und Festlegung der Streifenmitten zur Auswertung im Computer, wo die entsprechende Phasenverteilung gerechnet wird.
 - Messung der Streifenposition mit Hilfe photoelektrischer Empfänger, zum Beispiel Diodenzeile oder TV-Technik. Einfache Streifenanalyseverfahren können eingesetzt werden, sofern durch Kippungen der Referenzwelle geschlossene Streifen vermieden werden können.
- Ein interessantes Verfahren wurde von Takeda [3] und Küchel vorgeschlagen. Dabei basiert das schnelle Fourier-Transformationsverfahren, FFT, auf der Auswertung der 1. Ordnung der Fouriertransformation des Interferenzmusters.
- Bei gezielt eingeführten Phasenänderungen, zum Beispiel im Referenzstreifengang, wird die vorzeichenrichtige Streifenanalyse geschlossener Interferenzstreifen ermöglicht.

Elektronische, digitale Phasenmeßverfahren für die Interferenzstreifenanalyse fallen in zwei Kategorien:

1. Sensoren, bei welchen Phasenänderungen zwischen den zwei interferierenden Wellen in diskreten Schritten zeitlich nacheinander erfolgen („Phase shifting“ Interferometer) [1, 2].
2. Sensoren, die mit zwei Frequenzen operieren oder bei welchen die Phase zwischen den zwei interferierenden

¹⁾ Professor Dr. H.J. Tiziani, Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart, 7000 Stuttgart 80

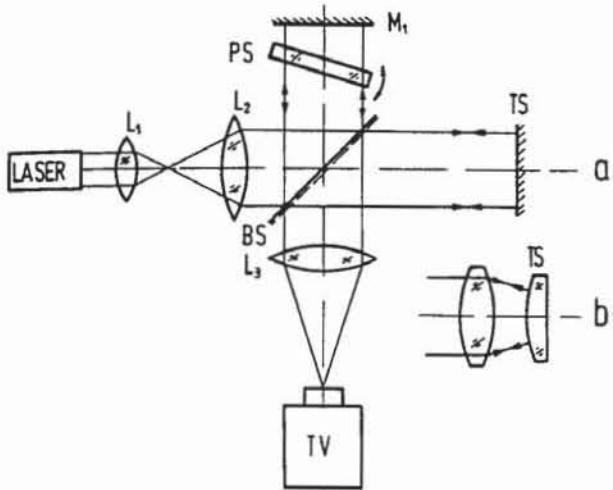


Bild 1: Twyman-Green Zweistrahl Interferenzanordnung

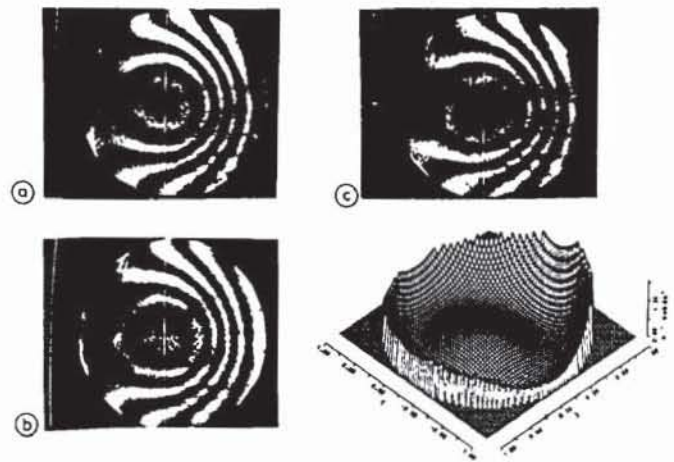


Bild 2: 3-Interferogramm Methode: Streifenauswertung mit Hilfe der Phasenschiebung

Wellen kontinuierlich geschoben wird. Daraus resultiert eine Frequenzdifferenz, die analysiert wird („heterodyne oder AC“-Interferometer).

Diese Interferenzstreifenauswerteverfahren können nicht nur bei Zweistrahlinterferenzanordnungen, sondern auch in der holografischen Interferometrie eingesetzt werden [4].

Auf der stufenweisen Phasenschiebung basiert eines unserer automatischen Streifenauswerteverfahren. Dabei wird im Referenzstrahlengang die Phase um je 90° geschoben, entweder durch Verkippen einer planparallelen Platte oder einem mit Piezoelement verschobenen Referenzspiegel oder mit polarisationsoptischen Mitteln.

Das Interferenzmuster

$$I_1(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos[\phi(x,y)]$$

ändert sich zu

$$I_2(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos[\phi(x,y) + \pi/2]$$

bzw.

$$I_3(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos[\phi(x,y) + \pi]$$

was zur gesuchten Phase ϕ führt

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

wobei $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} W(x,y)$ und $W(x,y)$ die gesuchte Wellenfront an den Stützstellen darstellt.

In Bild 1 ist ein Twyman-Green-Interferometer mit Phasenschiebung, die beispielsweise mit Hilfe der planparallelen Platte im Referenzarm eingeführt wird, skizziert. Die Phasenschiebung kann auch zeitlich kontinuierlich eingeführt werden. Die Integration erfolgt dann vielfach in mindestens drei, meistens gleichen Intervallen. Im Bild 2 ist die Phasenschiebung des Interferenzmusters um je 90° , bzw. $\lambda/4$ mit der ausgewerteten Wellenfront dargestellt.

Im Bild 3 ist die eindimensionale Streifenauswertung am Beispiel einer diamant-gedrehten Ge-Oberfläche veranschaulicht. Durch Hochpaß-Filtrierung kann auch eine Art „Mikrostrukturanalyse“ der Oberfläche mit einer Auflösung

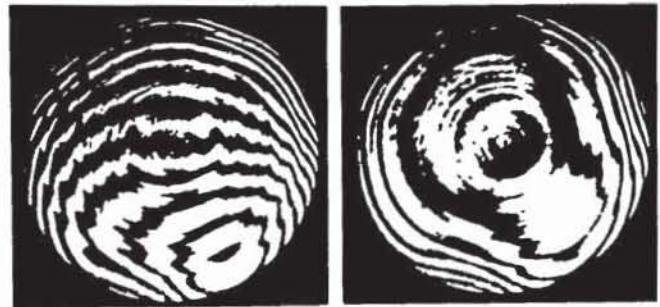


Bild 3a: Interferenzmuster einer mit Diamantwerkzeug gedrehten sphärischen Fläche ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$)

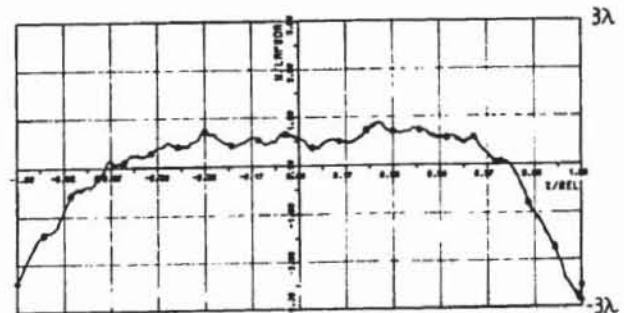


Bild 3b: Eindimensionale Streifenanalyse von Bild 3a unter Benutzung von 2048 Stützwerten

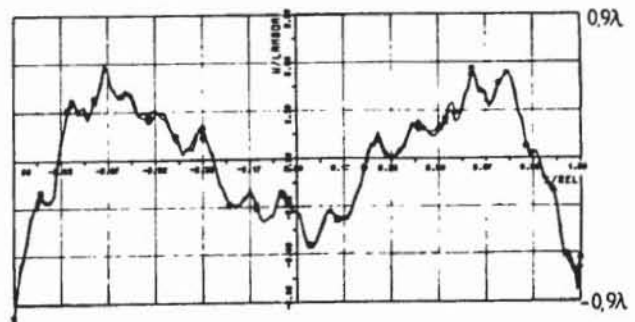


Bild 3c: Eindimensionale Mikrostrukturanalyse der Oberfläche in Bild 3a

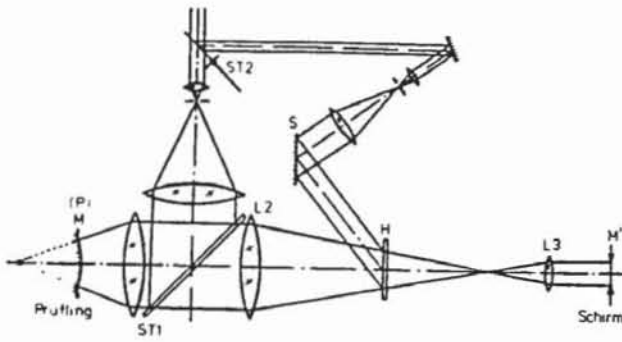


Bild 4a: Anordnung zum holografischen Formvergleich von asphärischen Flächen

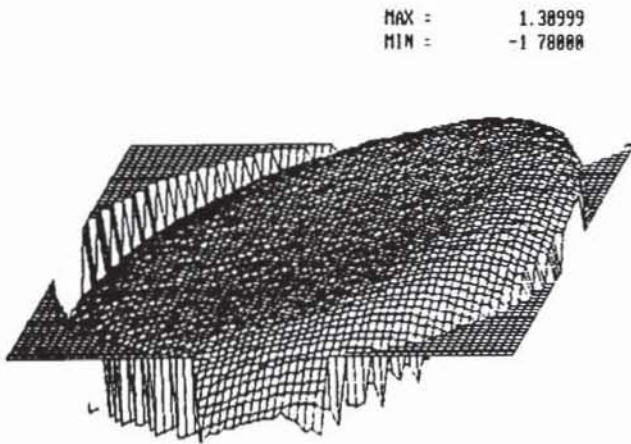


Bild 4b. Streifenbewertung beim Formvergleich einer asphärischen Fläche

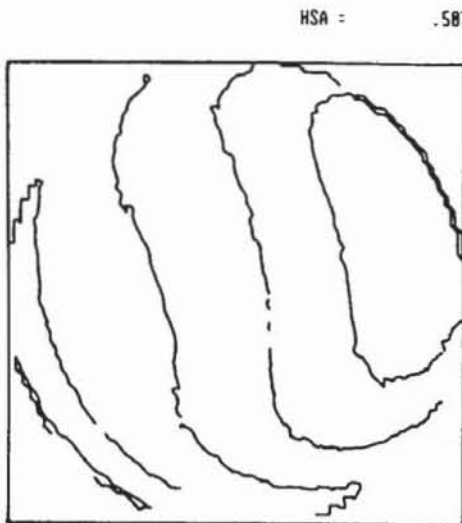


Bild 4c: Konturlinie von Bild 4b

von $\lambda/100$ erreicht werden (Bild 3c). Vielfach ist es vorteilhaft, die Wellenfront in Polynomen zu beschreiben. Zernike-Polynome eignen sich dazu besonders wegen der Orthogonalitätseigenschaften [2]. Daraus lassen sich die klassischen Aberrationsteile bestimmen.

Formvergleich am Beispiel asphärischer Flächen

Die holografische Interferometrie hat sich für Anwendungen wie berührungslose Verformungs-, Verschiebungs- und Schwingungsmessung als sehr nützlich erwiesen. Sie eignet sich aber auch zur Vermessung von Formabweichungen komplizierter asphärischer Flächen. Bild 4a zeigt schematisch eine Anordnung zum Formvergleich asphärischer Flächen. Dabei ist es vorteilhaft, ein In-situ-Verfahren einzusetzen. Thermoplastische Materialien oder photorefraktive Kristalle eignen sich als Hologrammspeicher. Ein Interferenzstreifenbild ist in Bild 4b ersichtlich. Die entsprechende Streifenauswertung in Bild 4c, im vorgestellten Verfahren wird von einer Referenzfläche vorerst ein Hologramm H erstellt. Zum Formvergleich wird der Prüfling an die Stelle der Referenzasphäre gesetzt. Beim Beleuchten des Hologramms mit der Referenzwelle wird die Wellenfront der Referenzfläche rekonstruiert und mit der Wellenfront des Prüflings verglichen. Stimmen die geometrischen Formen der Oberflächen nicht überein, entstehen Interferenzstreifen, die Höhenschichtlinien der Abweichung darstellen und automatisch ausgewertet werden können (Kapitel „Interferenzstreifenbewertung in der Meßtechnik“). Die Positionierung des Prüflings ist nicht ganz unkritisch. Das Verfahren kann zur Serienprüfung von asphärischen Glas-, Kunststoff- oder Metallflächen benutzt werden. Allerdings handelt es sich hier um eine Relativprüfung, einem Vergleich mit der Referenzoberfläche. Für die Absolutprüfung bietet sich der Einsatz von CGH an, wie er im nächsten Abschnitt beschrieben wird. Die Referenzasphäre kann mit dem nachfolgend beschriebenen Verfahren vermessen werden. Zur quantitativen Auswertung der Interferenzstreifen dient eine der beschriebenen automatischen Streifenbewertemethoden.

Herstellung von synthetischen Hologrammen

Der Einsatz von synthetischen oder computer-generierten Hologrammen, CGH, ist vielseitig; in diesem Beitrag soll der Einsatz speziell zur Asphärenprüfung diskutiert werden. Obwohl das Prinzip der CGH schon einige Zeit bekannt ist, verlangt deren Einsatz für starke asphärische Abweichungen des Prüflings weitere Untersuchungen. Dies um so mehr, weil der Einsatz asphärischer Flächen besonders bei optischen Systemen, die im IR arbeiten, zunimmt.

Verschiedene Verfahren eignen sich zur Herstellung von CGH, neue Methoden werden entwickelt. Bisher wurde vielfach ein großer Rechner mit Calcop Plotter benutzt, um ein Hologramm anhand der gerechneten Interferenzmuster-Verteilung (Gitterverteilung) aufzuzeichnen. Das Verfahren kann fehleranfällig und zeitraubend sein. Arbeiten zur Aufzeichnung mit Hilfe der rechnergesteuerten Laserstrahlableitung oder Elektronenstrahlauflaufzeichnung laufen noch. Zwei Verfahren zur Herstellung der CGH sollen hier vorgestellt werden. Dabei handelt es sich um zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren.

Bild 4 zeigt ein Lohmann [5] Typ Hologramm. Es handelt sich hier im wesentlichen um ein Fourier-Hologramm und basiert darauf, daß Verschiebungen des lokalen Gitters in der Fourier-Ebene einer Phasenverschiebung bei der Rekonstruktion in der Rücktransformation entsprechen. Das CGH wird vorerst in Raster eingeteilt. Einer Gitterverschiebung von einem Raster entspricht eine Phasenschiebung von 2π .

Das Prinzip ist in Bild 5 skizziert. In einer früheren Arbeit wurde die CGH-Aufzeichnung mit Hilfe eines stabilisierten Kathodenstrahles durchgeführt [6]. Das Prinzip der Aufzeichnung ist aus Bild 6 ersichtlich. Allerdings ist die Positionsgenauigkeit, die mit dem stabilisierten Kathodenstrahl erreicht wird, nicht ausreichend. Deshalb wird zusätzlich noch ein Amplitudengitter „G“ unmittelbar vor die Emulsion plaziert. Die Gitterperiode entspricht dem Zellenabstand. Die Hologramme werden dann so geschrieben, daß Lichtflecke größer als die Spaltbreiten, aber kleiner als die Gitterperiode, von einer schnellen Kathodenstrahlröhre produziert werden. Die Positionsgenauigkeit der Lichtflecke hängt dann nur noch von der Positionsgenauigkeit des Gitters ab, dessen Schlitzbreite kleiner als die Hälfte der Periode ist. Für jede Phasenstufe wird die fotografische Platte mit Hilfe eines rechnergesteuerten Schrittmotors genau verschoben. Es werden alle Strahlpositionen belichtet, die zu einer Phasenstufe zugeordnet sind, und erst anschließend wird das Gitter verschoben. 25 Phasenstufen für 126 x 126 Zellen wurden für einfache Hologramme benutzt. Mit der Technik ist es möglich, in ca. 15 – 20 min. ein Hologramm aufzuzeichnen. Diese Technik eignet sich aber nicht für große Wellenfrontabweichungen. Ein zusätzliches Verfahren wurde entwickelt, welches einen rechnergesteuerten Optronics-Trommel-Plotter P 1700 einsetzt. Mit dem Rechner pdp 11/34 werden sowohl die Wellenfronten gerechnet und der Plotter gesteuert, als auch die Ergebnisse ausgewertet. Auf diese Art können bis zu 20.000 x 20.000 pixels geschrieben werden, mit einer Positionsgenauigkeit von 2 µm/cm, mit kleinsten Schrittweiten von 12,5 µm. Eine anschließende 6-7fach Reduktion auf eine hochauflösende Fotoplatte oder Fotoresist ist vorteilhaft. Laserscanner, Elektronenstrahl- und Ionenstrahlverfahren sind Alternativen zu der vorgestellten Hologrammaufzeichnung.

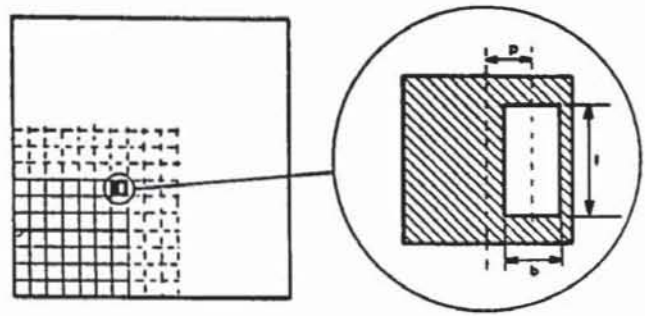


Bild 5: Prinzip des Lohmannhologrammes

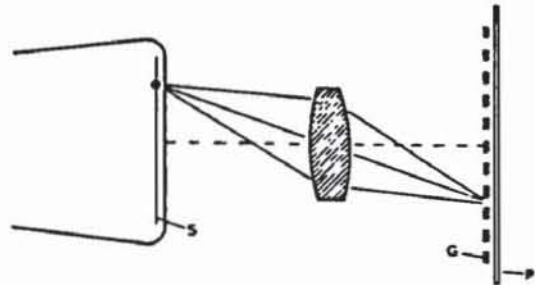


Bild 6: Hologrammaufzeichnung mit Kathodenstrahlröhre

Einsatz synthetischer Hologramme zum Wellenfrontvergleich

Der Einsatz von synthetischen Hologrammen oder CGH ist vielseitig. Beispielsweise können mit CGH asphärische Wellenfronten bei der Rekonstruktion mit einer Planwelle erstellt und mit der zu prüfenden verglichen werden [7]. Allerdings entspricht dann die rekonstruierte Wellenfront der anhand der Soll-daten errechneten. Abweichungen des Prüflings mit Ist-daten sind als Interferenzstreifen sichtbar. Eine Alternative ist in Bild 7 anhand des Prüfaufbaus skizziert. Wird ein Hologramm einer Wellenfront entsprechend den Soll-daten der Asphäre mit einer Planwelle überlagert und erfolgt nach der Hologrammaufzeichnung die Rekonstruktion mit der perfekten asphärischen Wellenfront, entsteht eine perfekte Planwelle. Diese Planwelle kann mit der ebenen Referenzwelle, die vom Spiegel M reflektiert wird, überlagert werden. Allerdings wird die interessierende Referenzplanwelle ohne Beugung das CGH passieren. Das CGH ist so ausgelegt, daß die Rekonstruktion mit der asphärischen Welle im Idealfall eine Planwelle ergibt, die unter dem gleichen Winkel wie die Referenzwelle das Hologramm verläßt. Abweichungen zwischen der Soll- und Ist-Asphäre erscheinen als Interferenzstreifen, die mit dem automatischen Streifenauswertesystem analysiert werden. Da die Referenz- und Prüfwelle an der gleichen Stelle das CGH passieren, sind Hologramminhomogenitäten, wie ungewünschte Dickenänderungen, nicht problematisch in dieser Anordnung.

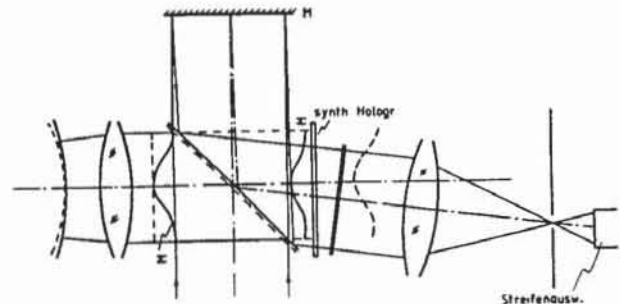


Bild 7: Anordnung zur Prüfung asphärischer Flächen mit CGH

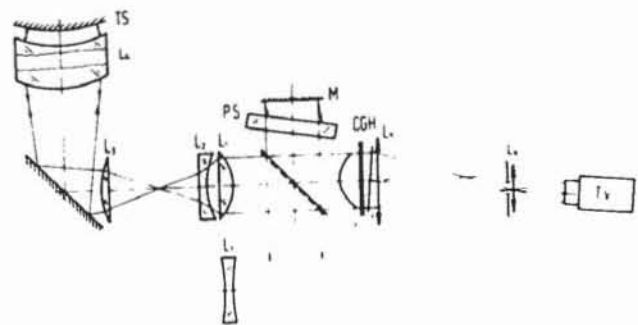


Bild 8: Anordnung zur industriellen Prüfung asphärischer Flächen mit CGH

Bild 8 zeigt die bei uns eingesetzte Anordnung zur Vermessung asphärischer Flächen. Die einfallende ebene Welle wird durch einen Teilerspiegel in Test- und Referenzwelle aufgespalten. Der Referenzarm ist durch einen leicht gekippten Planspiegel abgeschlossen, der das Licht an den Interferometerausgang reflektiert, wo es auf das Compu-

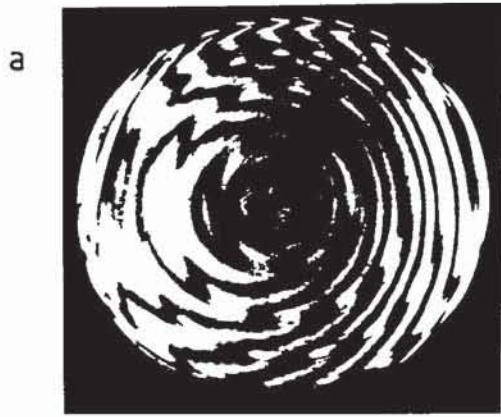


Bild 9a Interferogramm

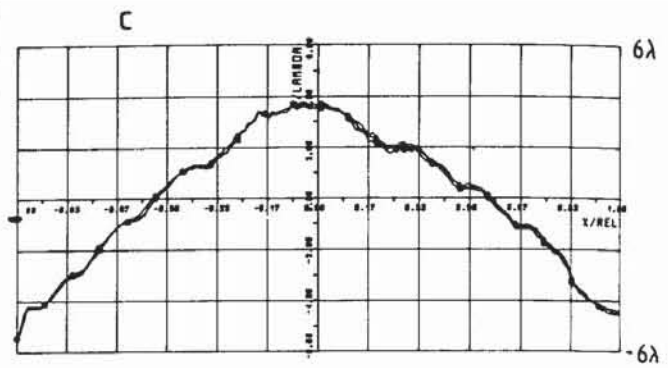


Bild 9b: Eindimensionale Streifenanalyse

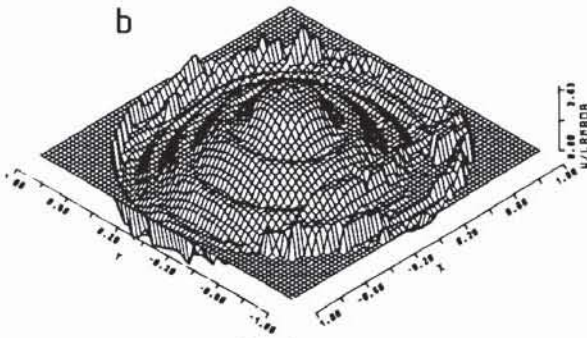


Bild 9c: Zweidimensionale Streifenanalyse

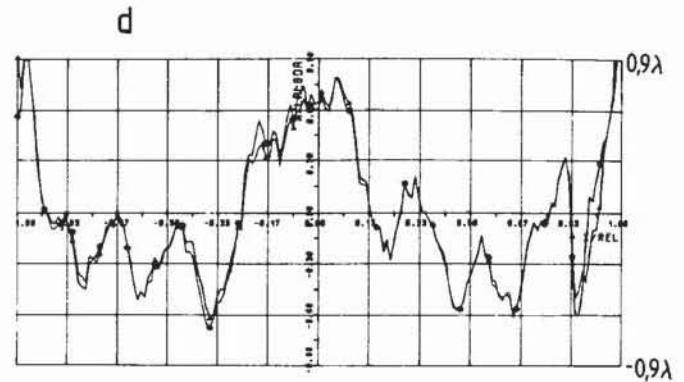


Bild 9d: Mikrostrukturanalyse

Bild 9: Interferogramm mit Auswertung einer asphärischen Ge-Oberfläche

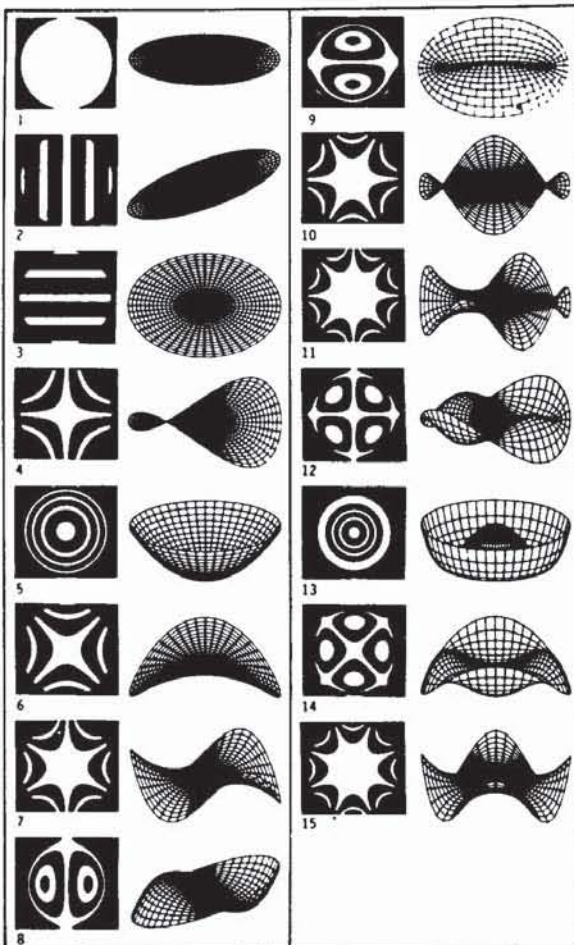


Bild 10 Zernike Polynome

terhologramm fällt. Zur automatischen Interferogrammauswertung ist eine Planparallelplatte in den Referenzarm eingebracht, die die Phase der Referenzwelle verschieben kann. Die Linsen L1, L2, L3 sind sphärische Hilfslinsen zur Anpassung der Interferometerapertur an die Testflächen-Apertur und zur näherungsweise Abbildung der Testfläche auf das Hologramm. Außerdem sollen die Hilfslinsen einiges an Asphärität der Testwelle kompensieren. L4 ist ein Präzisionsobjektiv, das ursprünglich zum Testen sphärischer Flächen konzipiert war. Zusammen mit der Hilfslinse L1' liefert es eine nahezu perfekte Kugelwelle, deren Fokus – auf den Scheitel der Testfläche gelegt – als Referenzpunkt zur genauen axialen Positionierung des Prüflings dient. Das CGH am Interferometerausgang erzeugt bei perfektem Prüfling in erster Beugungsordnung eine Planwelle, die mit der nullten Beugungsordnung der Referenzwelle interferiert. Eine Blende in der Brennebene von L5 filtert die unerwünschten Beugungsordnungen aus. Abweichungen des Prüflings von der Sollform sind unmittelbar an den „Streifenverbiegungen“ zu erkennen. Das Objektiv L6 bildet das Interferenzbild in der Hologrammebene auf die Empfängerfläche des Vidicons oder der CCD-Kamera ab.

Zur Anpassung an verschiedene Asphärentypen können die Abstände der Linsen L1, L2 und L3 verändert oder die Linsen ausgetauscht werden. Die Linsen müssen nicht perfekt sein, da das Interferometer zunächst mit einem sehr genauen Kugelspiegel kalibriert wird (mit CGH) und die resultierenden Fehlerterme in der Wellenfront dem eigentlichen Asphären-Prüfhologramm zur Fehlerkompensation beaufschlagt werden.

Die verbleibenden Fehleranteile bei der Asphärenprüfung sind dann hauptsächlich – bei ansonsten perfektem Prüfling – auf Justierfehler von Asphäre und Hologramm zurückzuführen.

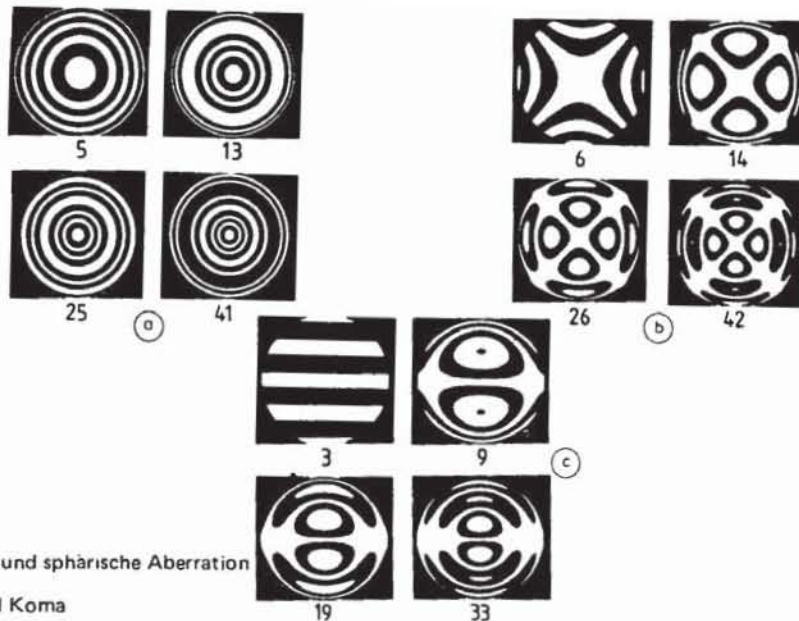


Bild 11: Zernike-Polynome dargestellt als typische Aberrationsglieder beobachtet im Interferometer

Mit Hilfe des automatischen Interferenzstreifenauswertesystems werden die Phasenfehler errechnet und im CGH des Prüflings berücksichtigt. Ein typisches Ergebnis wird anhand von Bild 9 beim Beispiel der mit Diamantwerkzeug gedrehten GE-Oberfläche dargestellt. In Bild 9 ist neben dem Interferenzmuster die ein- und zweidimensionale Streifenanalyse dargestellt, zusammen mit einer „Mikrostrukturanalyse“.

Bei der automatischen Streifenanalyse werden die Phasenfehler bei einzelnen Stützstellen ermittelt. Für die Streifenanalyse werden eine Hamamatsu C 1000 Kamera mit pdp 11/34 Rechner, der auch zur Berechnung und Aufzeichnung des CGH dient, als auch eine Diodenzeile oder CCD-Matrix zusammen mit einem IBM PC, wahlweise eingesetzt. Die Entwicklung in Zernike-Polynome (Bild 11) erwies sich als sehr nützlich, auch im Hinblick auf die Berücksichtigung von Justierfehlern bei der Prüfung.

Bestimmung und Kompensation von Justierfehlern, Berechnung der Asphären-Istparameter

Die gemessenen Wellenfronten können mit Hilfe der Ausgleichsrechnung in Zernike-Polynome entwickelt werden, wobei etlichen Termen die Bedeutung der klassischen Bildfehler zukommt. Bild 10 zeigt Zernike-Polynome und Bild 11 die entsprechenden für Defokussierung, sphärische Aberration, Astigmatismus und Koma 3. und höherer Ordnungen in einer Darstellung, wie sie bei Überlagerung mit einer Planwelle im Interferometer beobachtet werden.

Bei kalibriertem Interferometer stammen die gemessenen Wellenfrontdeformationen von der Formabweichung der Asphäre, aber auch von Fehlpositionierungen des Prüflings und des Hologramms. Um die Positionierungsfehler nicht irrtümlich den Formabweichungen anzulasten, ist eine Trennung der Einflüsse wünschenswert. Eine Justierung nach visuellen Kriterien ist oft sehr schwierig und zeitraubend, da 6 bis 7 Freiheitsgrade aufeinander abgestimmt werden müssen. Bild 12 zeigt ein computer-generiertes Beispiel für eine konkave hyperbolische Fläche bei Dejustierungen von Asphäre und Hologramm.

Jede gemessene Wellenfront kann näherungsweise durch Linearkombinationen dieser Zernike-Terme beschrieben werden. Einzelne Polynom-Terme eignen sich zur Bestimmung des Justierzustandes. Verkippungen und Dezentrierungen von Asphäre und Hologramm führen zu ungeraden Funktionen, die durchweg eine von Null verschiedene Steigung im Null-Punkt aufweisen.

Im folgenden sind Beispiele für rechnerische Justierkorrekturen gezeigt. Dabei wurde ein senkrechter Schnitt durch die Interferogramme nach der 3-Interferogramm-Methode in der 1024-Elemente-Auflösung des CCD ausgewertet. Die x-Richtung wurde der Einfachheit halber vernachlässigt. Gezeigt werden in Bild 13 gemessene, sowie die von den Einflüssen der Dejustierung bereinigten Wellenfronten. Nach demselben Schema, unter der Verwendung der ro-

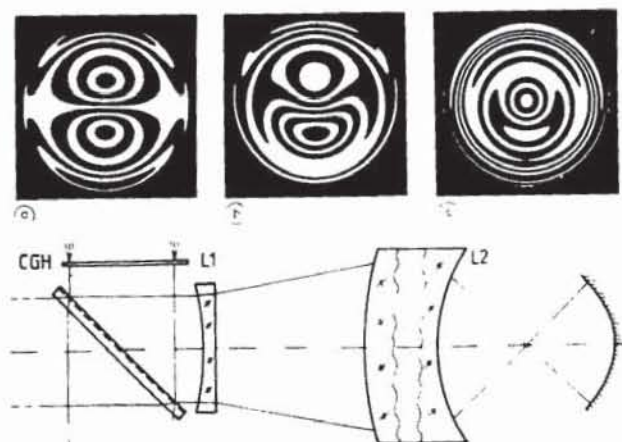


Bild 12. Interferogramm bei Dejustierung von Asphäre und Hologramm
a) Zentrierfehler des CGH
b) Zentrierfehler der asphärischen Fläche
c) Verkippung der asphärischen Fläche

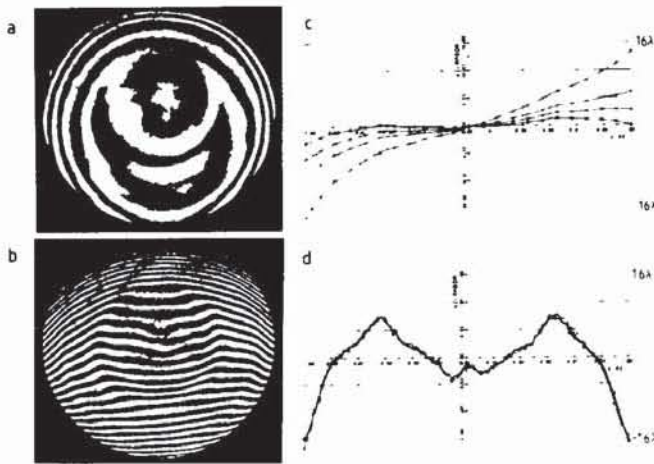


Bild 13: Verkipfungskompensation bei der Prüfung asphärischer Flächen

tationssymmetrischen Zernike-Terme werden Asphärenparameter, wie Scheitelradius, Exzentrizität und Asphäritäten höherer Ordnung, ermittelt. Bild 9 zeigt ein Beispiel einer ein- und zweidimensionalen Vermessung einer Germanium-Asphäre. In Bild 9d konnten, nach der Bestimmung der Asphärenparameter, aus der Wellenfront und deren Subtraktion, die Restabweichungen aufgetragen werden, um eine Art Rauheitsprofil darzustellen.

Mit dem vorgestellten Verfahren wurden bisher verschiedenste Asphären verschiedenster Hersteller vermessen. Bei sehr starken asphärischen Flächen, wo die Streifendichte zu hoch wird (über 30 Streifen pro mm), kann ein Verfahren ausgelegt werden, das eine größere Wellenlänge, zum Bei-

spiel $10,6 \mu\text{m}$, zugrundelegt. Es kann aber auch ein Zweiwellenlängenverfahren benutzt werden [14]. Weitere Untersuchungen zur Elimination von Justierfehlern laufen zur Zeit.

Schrifttum

- [1] Wyant, J.C.: Chapter 12 in optical shop testing, ed. Malacara, D., John Wiley and Sons, New York 1978.
- [2] Küchel, F.M., Schmeider, Th. und Tiziani, H.J., „Beitrag zur Verwendung von Zernike-Polynomen bei der automatischen Interferenzstreifenauswertung“, *Optik* 65, pp. 123–142. 1983.
- [3] Takeda, M., Ina, H. and Kobayashi, S.: „Fourier transform method for fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry“, *JOSA* 72, pp. 156–160. 1982.
- [4] Dändliker, R., *Progress in Optics*, ed. Wolf, E.: North Holland Publ., Amsterdam 1980. Vol. XVII, 1.
- [5] Lohmann, A.W., Paris, D.P.: „Binary Fraunhofer-holograms, generated by computer“, *Appl. Optics*, Vol. 6, pp. 1739-1748. 1967.
- [6] Witz, W.: „Ein neues Verfahren zur Herstellung synthetischer Hologramme für die Erzeugungen von Wellenflächen“, *Optik*, Vol. 42, pp. 287–294. 1975.
- [7] Fercher, A.F., Kriese, M.: „Binäre synthetische Hologramme zur Prüfung asphärischer Elemente“, *Optik*, Vol. 35, pp. 168–179. 1972.
- [8] Schwider, J., Grzanna, J. Spolaczyk, R., and Burow, R.: „Testing aspherics in reflected light using blazed synthetic holograms“, *Optica Acta*, Vol. 27, pp. 683–698. 1980.
- [9] Mercier, R., Lowenthal, J.: „Comparison of in-line and carrier frequency holograms in aspheric testing“, *Optics Comm.*, Vol. 33, pp. 151–256. 1980.
- [10] Tiziani, H.J.: „Prospects of testing aspheric surfaces with computer-generated holograms“, *SPIE Proc.*, Vol. 235. 1980.
- [11] Dörband, B., Tiziani, H.J.: „Auslegung von Kompensations-systemen zur interferometrischen Prüfung asphärischer Flächen“, *Optik* 67, pp. 1–20. 1984.
- [12] Dörband, B.: „Analyse optischer Systeme“, Dissertation, Universität Stuttgart, 1986.
- [13] Dörband, B., Tiziani, H.J.: „Testing aspheric surface with computer generated holograms: analysis of adjustment and shape errors“, *Appl. Optics*, Vol. 24, pp. 2604–2611. 1985.
- [14] Küchel, F.M., Tiziani, H.J.: „Real-time contour holography using BSO-crystals“, *Opt. Comm.* 38, pp. 17–20. 1982.