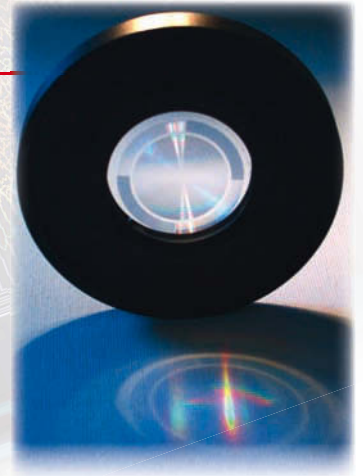


Interferometrische Prüfung asphärischer Oberflächen

Simon Aigner, Jean-Michel Asfour, Dioptic GmbH, Weinheim

Viele präzisionsoptische Systeme nutzen heute asphärische Linsen. So enthalten z.B. Zoomobjektive durchschnittlich zwei, oft sogar bis zu vier Asphären, weil diese ein kompakteres und leichteres Design bei gleicher oder besserer Leistung ermöglichen. In der interferometrischen Qualitätsprüfung asphärischer Linsen mit Diffraktiven Null-Linsen (DNL) können Formabweichungen <50 nm gemessen werden. Wir erläutern Herstellung und Einsatz solcher DNLs sowie Randbedingungen für eine hohe Prüfgenauigkeit.



1 Längenmessung und Interferometrie

Jede Längenmessung basiert auf einem quantitativen Vergleich des Messobjekts mit einem Referenzmaßstab. Bei der Längenmessung mit einem Interferometer können Wegdifferenzen direkt in Einheiten der Wellenlänge λ des verwendeten monochromatischen (Laser-) Lichts abgezählt werden. Auf diese Art und Weise lassen sich Strecken mit einer Absolutgenauigkeit von einigen Nanometern bestimmen.

In der Laserlithographie können Mikrostrukturen durch interferometrische Positionskontrolle des Schreibkopfes mit eben dieser Positionsgenauigkeit als Chrommaske oder geätztes Höhenprofil erzeugt werden. Binäre Strukturen lassen sich dadurch mit höchster Genauigkeit belichten (**Bild 1**). Durchleuchtet man eine solche gitterartige Linienstruktur, so werden die Strahlen gebeugt. Je nach Realisierung als Maske oder Höhenprofil können 10–40% des einfallenden Lichts in die erste Beugungsordnung gelenkt werden. **Bild 2** zeigt, wie der Gitterlinienabstand S dabei den

Winkel θ bestimmt, um den ein Strahl abgelenkt wird. Dieser Beugungswinkel ist umso größer, je kleiner die Periode des Gitters wird:

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{S} \quad (\text{Gl. 1})$$

Durch eine lokale Variation des Linienabstands S lässt sich die Richtung des gebeugten Strahls sehr genau einstellen. Führt man die Linien als Kreise mit unterschiedlichem Abstand aus, so lassen sich aus einer einfallenden ebenen Welle beinahe beliebige Strahlverteilungen und damit Wellenfronten erzeugen. Die wichtigste Einschränkung solcher diffraktiver Hologramme liegt bei der minimal strukturierbaren Gitterkonstante. Für die im Folgenden vorgestellten Hologramme können bei einer Wellenlänge von $\lambda = 633 \text{ nm}$ Beugungswinkel bis $\theta < 30^\circ$ erreicht werden.

2 Diffraktiver Null-Test mit Hologrammen

Die Erzeugung beliebig gekrümmter Wellenfronten kann zum interferometrischen Test optischer Oberflächen verwendet werden. Hierbei werden standardmäßig nach dem Fizeau-Prinzip aufgebaute Interferometer eingesetzt: Als letzte optische Fläche vor dem eigentlichen Prüfling wird ein Strahlteiler eingesetzt, der einen Teil des einfallenden Lichts reflektiert und so eine Referenzwelle erzeugt. Das restliche Licht passiert den Strahlteiler, wird an der zu prüfenden Oberfläche reflektiert und gelangt auf dem Rückweg zusammen mit der Referenzwelle ins Interferometer. Dort entsteht durch Überlagerung von Objekt- und Referenzwelle ein Interferogramm.

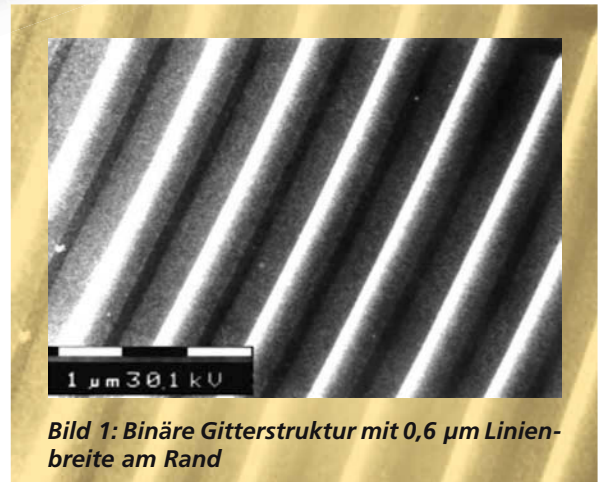


Bild 1: Binäre Gitterstruktur mit 0,6 μm Linienbreite am Rand

Der typische Prüfaufbau zum Test einer sphärischen Oberfläche ist in **Bild 3** (oben) dargestellt. Ein konventionelles Messobjektiv erzeugt hier eine sphärische Welle. Treffen die vom Interferometer kommenden Strahlen überall senkrecht auf die Prüffläche auf, so werden sie in sich zurückreflektiert und überlagern sich perfekt mit der Referenzwelle. Zeigt die Oberfläche aber eine kleine Deformation, so ändert sich die optische Weglänge und die verformte Wellenfront erzeugt ein abweichendes Signal im Interferogramm.

Versucht man nach diesem Messprinzip asphärische Oberflächen zu vermessen, ergibt sich ein Problem: Orthogonal zur Prüflingsoberfläche verlaufende und dort reflektierte Strahlen bilden keine sphärische Welle, wie in **Bild 3** (Mitte) gut an der Kautistik im Fokusbereich zu erkennen ist. Die für die Prüfung benötigte Wellenfront kann mit konventioneller refraktiver Optik nur schwer oder gar nicht erzeugt werden.

Hier ermöglicht es nun die Flexibilität der beliebigen Wellenfronterzeugung durch Hologramme, genauer durch Diffraktive Null-Linsen (DNLs), parallel einfallende Strahlen derart zu beugen, dass diese überall auf der Asphäre senkrecht auf treffen und im Idealfall perfekt in sich zurückreflektiert werden. Besonders geeignet für diese Messung sind sogenannte

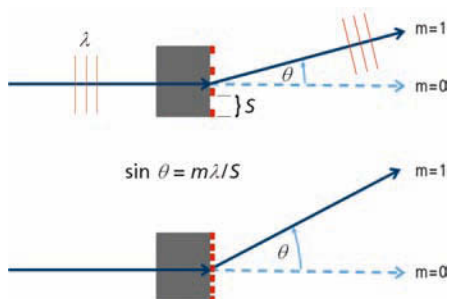


Bild 2: Gezielte Ablenkung eines Strahls durch Änderung der Gitterperiode

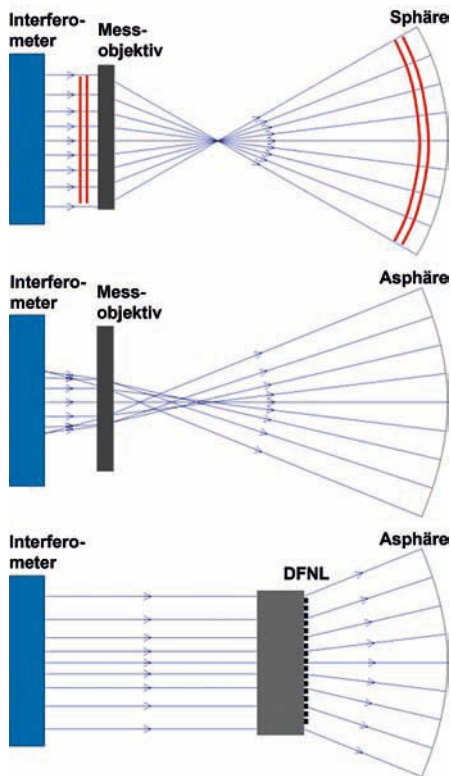


Bild 3: Interferometrischer Null-Test

Diffraktive Fizeau Null-Linsen (DFNL), wie in Bild 3 unten dargestellt. Hierbei lässt sich sogar der Strahlteiler zur Erzeugung der Referenzwellenfront als sog. Fizeau-Fläche in das Hologramm integrieren, so dass die Referenzwelle wie bei der sphärischen Messung an der letzten optischen Oberfläche vor der Prüfoberfläche erzeugt wird.

3 Fehlereinflüsse bei der Herstellung diffraktiver Hologramme

Da Diffraktive Null-Linsen ähnlich wie sphärische Probegläser ein Referenznormal zur Herstellung und Prüfung asphärischer Oberflächen darstellen, ist deren Qualitätskontrolle auf Fertigungsfehler von herausragender Bedeutung. Jede Abweichung der Referenz kann sich auf die hergestellten Oberflächen übertragen und Formabweichungen verursachen. Bei der interferometrischen Messung mit konventionellen Hologrammen (DNLs) ist immer ein zusätzliches sphärisches Fizeau-Messobjektiv notwendig. Die Kombination mehrerer Komponenten im Strahlengang erfordert eine aufwendige Justage und führt zusätzliche Wellenfrontfehler ein, die im transmittierenden Substrat des Hologramms entstehen. Bei DFNLs spielen diese Probleme praktisch

keine Rolle, da die Referenzwelle durch das Hologramm selbst in einer Ebene mit der Prüfwelle erzeugt wird. Fehlereinflüsse im gemeinsamen optischen Pfad auf dem Weg bis zur Referenzfläche beeinträchtigen Referenz- und Objektwelle in gleicher Weise und machen sich daher im Interferogramm nicht bemerkbar. Der für das Interferogramm maßgebliche optische Pfadunterschied bleibt davon unberührt. Dagegen haben Schreibfehler in der Hologrammstruktur einen starken direkten Einfluss auf das Messergebnis. Verschiebt sich die Position einer Gitterlinie um den Wert ϵ_r , so erzeugt dies bei einer Prüfwellenlänge λ und der Gitterperiode S den Phasenfehler

$$W_r = \lambda \epsilon_r / S \quad (\text{Gl. 2})$$

Dies entspricht einer Änderung der optischen Pfadlänge um

$$d = W_r \lambda / 2\pi \quad (\text{Gl. 3})$$

Mit dieser Umrechnung lässt sich ein direkter Bezug zwischen gemessenen Linienpositionen des Hologramms und den damit verbundenen Wellenfrontfehlern des Referenznormals herstellen.

4 Fehlerkompensation

Zur Anpassung an die Rotationssymmetrie asphärischer Prüflinge arbeitet das hier verwendete laserlithografische Schreibsystem in Polarkoordinaten. Der Schreibkopf wird über einen luftgelagerten Linearmotorantrieb radial positioniert, während das zu beschreibende Substrat auf einer ebenfalls luftgelagerten Spindel rotiert. Die radiale Position wird interferometrisch kontrolliert.

Zu Beginn des Schreibprozesses wird möglichst nah zum Rotationsmittelpunkt ein sehr kleiner Kreis belichtet, mikroskopisch ausgewertet und der tatsächliche Mittelpunkt durch Bildverarbeitung als radialer Nullpunkt kalibriert. Während des Schreibprozesses wird der anfangs einbelichtete Kreis in regelmäßigen Zeitabständen angefasst und das Positioniersystem nachkalibriert. Die hieraus ersichtliche Drift des Positioniersystems (**Bild 4**) lässt sich direkt in einen Phasenfehler umrechnen.

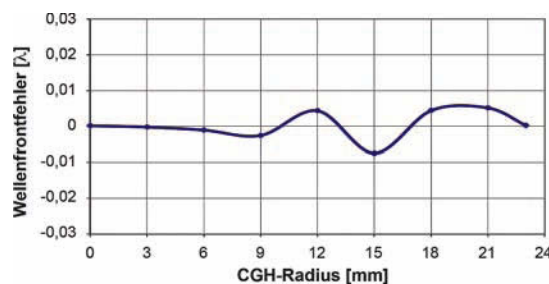


Bild 4: Positionier- und folglich Wellenfrontfehler durch Änderung des Koordinatenursprungs

Für eine zweite, unabhängige Kontrolle der Längendrift während des mehrere Stunden dauerenden Schreibprozesses werden innerhalb der ersten Minute an verschiedenen radialen Positionen Referenzmarken einbelichtet, wie in **Bild 5** dargestellt. Im weiteren Verlauf des Lithographieprozesses werden die Linien des Hologramms vervollständigt. Der Versatz zwischen den Linien und den Referenzmarken wird über Bildverarbeitung ermittelt und liefert nach Gl. 2 den Phasenfehler der gebeugten Wellenfront, der typischerweise unter $\lambda/20$ liegen muss.

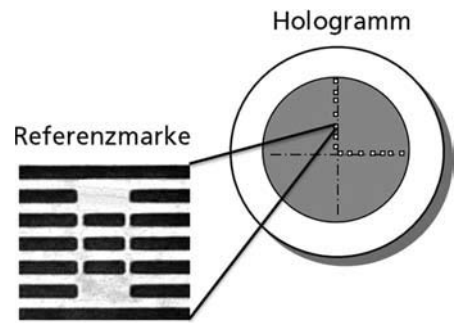


Bild 5: Referenzmarken zur Kontrolle der Hologramm-Strukturierung

Bild 6 zeigt das Messergebnis einer Referenzsphäre, die unter Verwendung einer DFNL geprüft wurde, das eine sphärische Wellenfront erzeugt. Damit lässt sich der Gesamtfehler bei der Hologrammherstellung quantifizieren. Da sich der Fertigungsprozess eines Hologramms für sphärische Prüfflächen nicht von dem für asphärische Prüfflächen unterscheidet, kann die Messgenauigkeit auch für asphärische Wellenfronten in gleicher Weise angegeben werden.

Literaturhinweise:

- [1] A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov, R.K. Nasyrov, J.-M. Asfour, *Computer generated holograms: fabrication and application for precision optical testing*, Proc. of SPIE, Vol. 7102, 710206 (2008)
- [2] A.G. Poleshchuk, V. Cherkashin, J.-M. Asfour, *Testing optical surfaces by high precision diffractive Null lenses with integrated reference surface*, Proc. of the SPIE, Vol. 5145, pp. 202-208 (2003)
- [3] A.G. Poleshchuk, V.P. Korolkov, V.V. Cherkashin, J. Burge, *Methods for certification of CGH fabrication*, OSA Trends in Optics and Photonics Series (Optical Society of America), Vol. 75, DMD6 (2002)

5 Fazit

Diffraaktive Fizeau Null-Linsen (DFNL) bieten die Möglichkeit, asphärische Oberflächen interferometrisch mit einer typischen Prüfgenaugigkeit von $\lambda/10$ bei 633 nm zu vermessen. DFNLs werden laserlithographisch als binäres Beugungsgitter direkt auf einem Präzisions-Plansubstrat aufgebaut. Gleichzeitig einbelichtete Referenzmarken erlauben eine unabhängige Qualitätsprüfung der Positioniergenauigkeit der einbelichteten Strukturen und somit auch der Prüfgenaugigkeit der Messung. DFNL haben gegenüber konventionellen Diffraaktiven Null-Linsen den Vorteil, dass sowohl die Referenz- als auch die Prüfwelle durch das Hologramm erzeugt werden. Außerdem entfällt hierdurch die zeitaufwendige und fehlerbehaftete Justage des Hologramms gegen ein Prüfobjektiv.

Ansprechpartner:



Dr. Simon Aigner
Qualitätsprüfung
optischer Systeme



Jean-Michel Asfour
Geschäftsführer

Dioptric GmbH
Bergstr. 92A
D-69469 Weinheim
Tel. 06201/65040-18, Fax -01
eMail: aigner@dioptric.de
Internet: www.dioptric.de

LASER-Messe: Stand B2.361

www.photonik.de ▶ Webcode 3005

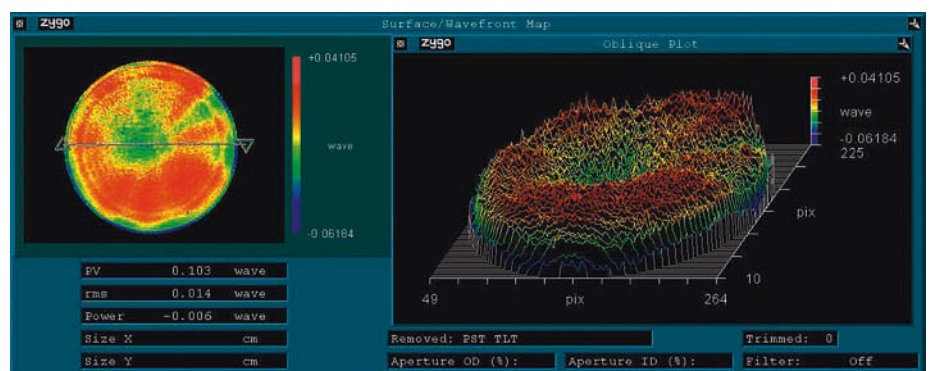


Bild 6: Qualifizierung einer DFNL an einer Referenzsphäre