

Zoom-Objektiv für die interferometrische Messung schwach gekrümmter Optiken

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

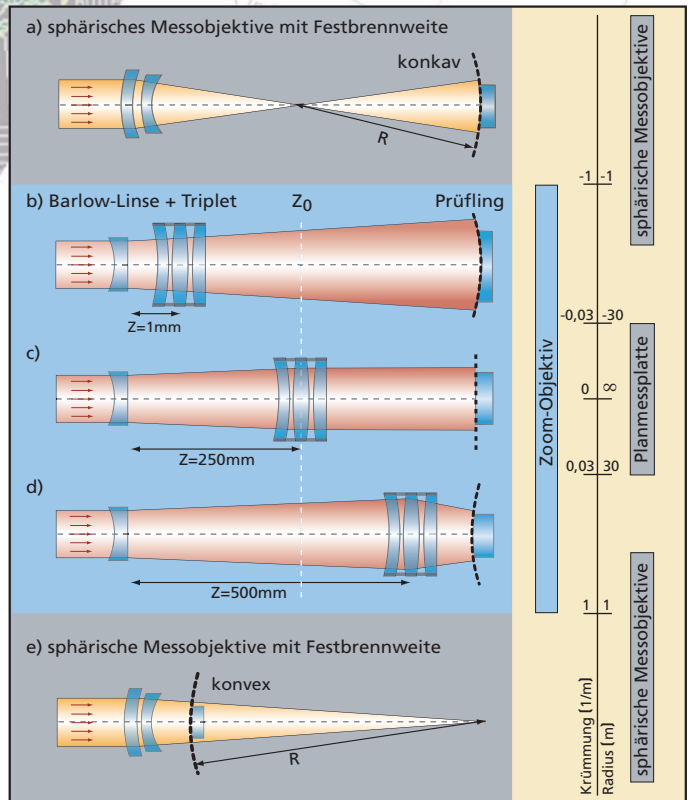
Neben dem Krümmungsradius sphärischer Oberflächen können auch deren Formabweichungen interferometrisch gemessen werden. Bei geringer Krümmung wird die Messapparatur allerdings sehr groß. Das hier vorgestellte Verfahren nutzt eine innovative Zoom-Optik mit minimiertem Wellenfrontfehler, mit der dieses Problem durch Kompensation der dominanten sphärischen Aberrationen gelöst werden kann. Dies ermöglicht erstmals kompakte Aufbauten zur präzisen Prüfung optischer Oberflächen mit großen Krümmungsradien.

1 Interferometrische Radienprüfung

Für die klassische Radienprüfung wird ein Interferometer mit einem sphärischen Messobjektiv ausgestattet (s. Bild 1a und 1e). Der Prüfling befindet sich auf einer optischen Bank mit Wegmesssystem. Für die Radienmessung werden zwei Positionen angetastet: die sog. Cat-Eye-Position, in der die konvergente Kugelwelle genau auf den Scheitelpunkt des Prüflings fokussiert ist, sowie die konfokale Position, in der man ein Interferogramm der Prüflingsoberfläche erhält. Die Wegdifferenz entspricht nun dem absoluten Krümmungsradius des Prüflings, während das Interferogramm Oberflächenformabweichungen anzeigt. Bei konkaven Prüfkörpern erzeugt die konvergente Kugelwelle einen Fokus zwischen Messobjektiv und Prüfling (s. Bild 1a). Der Messabstand beträgt dann in etwa das Doppelte des Krümmungsradius. Bereits für Radien ≥ 1 m ist damit eine Messaufbau-Größe erreicht, die im Labor schwierig zu handhaben ist.

Um eine vollständige Ausleuchtung verschiedener Prüflinge zu erhalten und gleichzeitig das Bildfeld möglichst gut auszunutzen, benötigt man eine Reihe von Messobjektiven mit unterschiedlichen f-Zahlen. Die f-Zahl bezeichnet das Verhältnis der Brennweite zum Durchmesser der Austrittsapertur. Verfügbare f-Zahlen sind z.B. f/0,65, f/0,75, f/1,5, f/3,3, f/7,3, f/11. Je größer der Krümmungsradius einer konkaven Oberfläche ist, desto größer wird die f-Zahl des erforderlichen Messob-

Bild 1:
a) und e) Messobjektive mit Festbrennweite für die klassische Radienmessung;
b)–d) Zoom-Objektiv zur Prüfung großer Krümmungsradien



jektivs. Für konvexe Oberflächen dagegen muss die Brennweite des Messobjektivs größer sein als der Krümmungsradius der Oberfläche. Wenn daher für die Prüfung verschieden großer Krümmungsradien eine Vielzahl passender Messobjektive benötigt wird, ist dies nicht nur kostspielig sondern auch eine Frage der begrenzt kommerziell verfügbaren Messobjektive mit unterschiedlichen f-Zahlen.

Für sehr große Krümmungsradien im Bereich von $R \approx 20$ m gibt es die Möglichkeit, mit einer Planmessplatte zu arbeiten. Die Messung basiert dann auf der Auswertung der entstehenden ringförmigen Interferenzstreifen. Daraus lässt sich über $R = d^2/(8s)$ der Krümmungsradius berech-

nen. Hierbei bezeichnet der Parameter s die interferometrisch ermittelte Höhe der Wölbung der Linsenmitte gegen den Rand, der sog. Pfeilhöhe.

In die Radienberechnung gehen somit der Abstand des Prüflings zum Interferometer und der genaue Prüflingsdurchmesser d mit ein. Ausgehend von einer 4"-Optik, einer Messgenauigkeit im Durchmesser von $\Delta d = 0,1$ mm und einem Messfehler der Pfeilhöhe von $\Delta s = 100$ nm, erhält man bei einem Prüfling mit $R \approx 20$ m eine Krümmungsradius-Messgenauigkeit im Bereich von 1%. Das im Folgenden beschriebene Verfahren mit Hilfe eines Zoom-Objektivs arbeitet typischerweise um eine Größenordnung genauer.

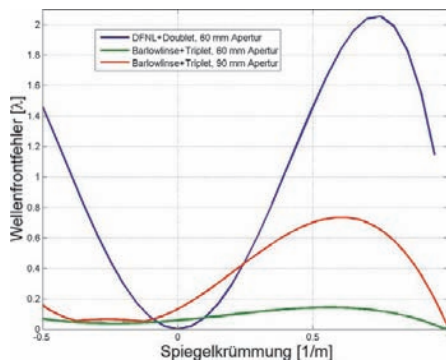


Bild 2: Wellenfrontfehler eines Zoom-Objektivs bestehend aus DFNL und Achromat sowie eines Zoom-Objektivs bestehend aus Barlow-Linse und Triplet

2 Radienprüfung mit Zoom-Objektiv

Ziel des neu entwickelten Verfahrens ist es, den Krümmungsradius-Bereich $|R| \geq 1$ m (konkav und konvex) mit einem einzigen Zoom-Objektiv in einem kompakten Interferometeraufbau zugänglich zu machen.

Der erste Ansatz für ein derartiges System wurde im Jahr 2007 vorgestellt [1]. Hierbei erzeugt eine diffraktive Fizeau Null-Linse (DFNL, anstelle der Barlow-Linse in Bild 1) eine perfekte, divergente Kugelwelle [2]. Ein achromatisches Linsen-Doublet kollimiert das Strahlenbündel zu einer ebenen Welle.

Verschiebt man das Linsen-Doublet in Richtung des DFNL, wird aus der ebenen Welle eine schwach gekrümmte divergente Welle, bei Vergrößerung des Abstandes hingegen eine schwach gekrümmte konvergente Welle. Durch geschickte Wahl der Brennweiten kann der gewünschte Messbereich dann mit einem kompakten Aufbau abgedeckt werden.

Mit der Kombination aus DFNL und Achromat (Linsen-Doublet) wird eine Wellenfrontqualität mit Restfehlern zwischen 2 und $5,5 \lambda$ erzielt (**Bild 2**).

Durch Kombination einer Barlow-Linse zur

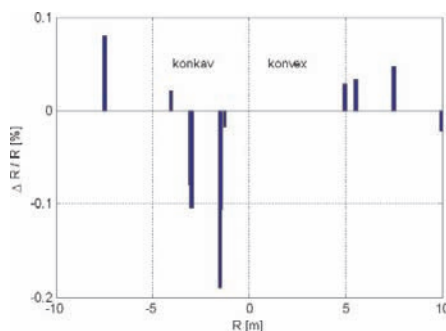


Bild 3: Krümmungsradius-Messungen an kalibrierten Probegläsern (relative Abweichungen in Prozent)

Zerstreuung des kollimierten Austrittsstrahls des Interferometers und einem speziell angepassten Triplet konnte nun ein Zoom-Objektiv entwickelt werden, das über den weitaus größten Teil des Messbereichs eine Wellenfrontqualität mit Restfehlern von weniger als $0,15 \lambda$ zeigt – bei gleichem Prüflingsdurchmesser von 60 mm. Das Zoom-Objektiv arbeitet noch bis zu einem Prüflingsdurchmesser von 90 mm und bleibt selbst dann noch unter einem Restfehler von $0,75 \lambda$. Bild 2 zeigt auch Messergebnisse unter Verwendung einer solchen Zoom-Anordnung.

Der Krümmungsradius-Messbereich ist derart ausgelegt, dass man an ein $f/15$ -Messobjektiv nahtlos anknüpfen und dann große Krümmungsradien bis zur Planfläche lückenlos prüfen kann (Bild 1).

3 Systematische Restfehler

Alle gängigen Interferometer sind in der Lage, justagebedingte Fehler der gemessenen Oberflächenformabweichung mittels Software zu eliminieren. Die dominanten Fehler sind Kippfehler (tilt) und sphärische Fehler (defokus). Die nächst höhere Fehlerordnung betrifft sphärische Aberrationen. Bereinigt man die Messergebnisse um diese systematischen Fehler, so liegt die Messungengenauigkeit theoretisch unterhalb von $\lambda/100$ und ist somit vernachlässigbar oder wird von anderen Fehlerquellen wie z.B. Oberflächen-Fertigungstoleranzen oder Montagetoleranzen dominiert. Es besteht allerdings die Gefahr, dass Formabweichungen, die ein ähnliches Profil zeigen wie z.B. eine sphärische Aberration, rechnerisch eliminiert werden und das Ergebnis dadurch verfälschen.

Die zusätzlichen Freiheitsgrade durch Verwendung einer vierlinsigen Zoomoptik führen dazu, dass die systematischen Restfehler auf $< 0,15 \lambda$ deutlich verkleinert werden konnten. Damit ist neben der präzisen Bestimmung des Krümmungsradius nun auch eine Messung der Formabweichung mit interferometrischer Präzision möglich.

4 Ergebnisse

Bild 3 zeigt eine Messreihe verschiedener kalibrierter Probegläser, deren Krümmungsradien mit dem vorgestellten Verfahren bestimmt wurden. Die Standardabweichung (1σ) lag bei $\Delta R/R = 0,4\%$ bezogen auf die Kalibrationswerte der Probegläser, die maximale Messabweichung lag bei $1,9\%$. Bei einem Probeglas mit Krümmungsradius $R = -7490$ mm wurde eine Reproduzierbarkeit von $\Delta R = \pm 1$ mm ermittelt (1σ), entsprechend einer relativen Genauigkeit von $0,13\%$.

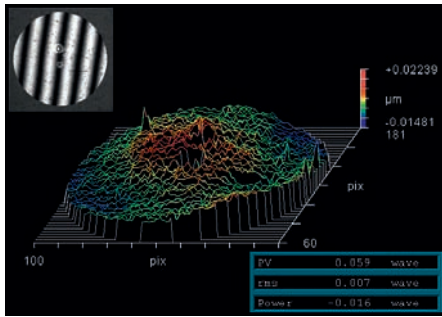


Bild 4: Messung eines Probeglasses mit $R = 3002 \text{ mm}$ (Layertec GmbH, Mellingin)

Bild 4 zeigt ein Interferogramm mit Auswertung des Höhenprofils einer Probeglas-Oberfläche. Die Restfehler liegen unterhalb von $0,06 \lambda$ ($\lambda/17$), ohne Korrektur der sphärischen Aberrationen. Damit ist gezeigt, dass mit dem beschriebenen Ver-

fahren sowohl der Krümmungsradius als auch Oberflächenformabweichungen mit hoher Präzision gemessen werden können.

Danksagung

Wir danken Herrn Benjamin Rudolph von der Layertec GmbH in Mellingin für die Durchführung der Messungen sowie für die zur Verfügung gestellten Prüfkörper.

Literaturhinweise

- [1] S. Schneider, D. Rohleder, J.-M. Asfour, *Interferometrische Vermessung sphärischer Spiegeloberflächen mit großen Krümmungsradien*, Photonik 2/2007, S. 84-85
- [2] J.-M. Asfour et al., *Asphere testing with a Fizeau interferometer based on a combined computer-generated hologram*, J. Opt. Soc. Am. A, vol. 23, 1, pp. 172-178, 2006

Ansprechpartner:



Dr. Simon Aigner



Jean-Michel Asfour

Dioptric GmbH
Bergstr. 92A
D-69469 Weinheim
Tel. 06201/65040-15
Fax 06201/65040-01

eMail: aigner@dioptric.de
Internet: www.dioptric.de

OPTATEC 2008: Stand H14

www.photonik.de

► Webcode **3009**