

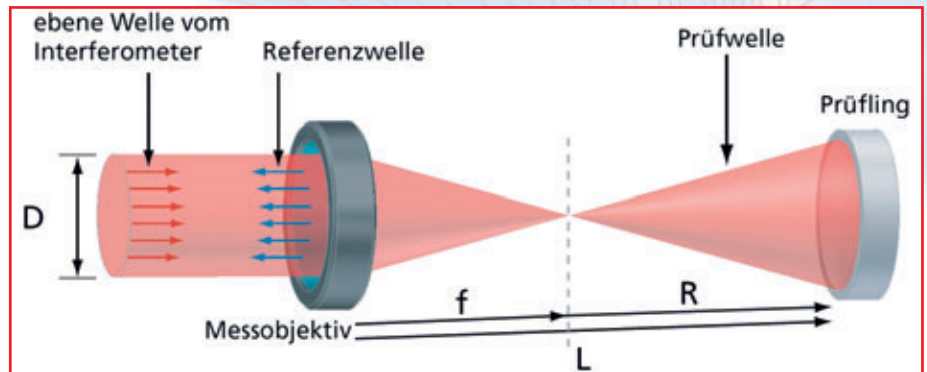
# Interferometrische Vermessung sphärischer Spiegeloberflächen mit großen Krümmungsradien

Stephan Schneider, Daniel Rohleder, Jean-Michel Asfour,  
Dioptric GmbH, Weinheim

Die Interferometrie ist aufgrund ihrer hohen Präzision das maßgebliche Verfahren zur Qualitätskontrolle optischer Oberflächen. Im Vergleich zur Profilometrie liegen ihre Vorteile in der berührungslosen Messung und im Vergleich zu scannenden Verfahren in der zweidimensionalen Auflösung. Nur bei Oberflächen mit sehr großen Krümmungsradien gibt es geometriebedingte Vorteile tastender Verfahren. Dieser Bereich kann nun mit dem hier vorgestellten Verfahren ebenfalls interferometrisch abgedeckt werden.

## Interferometrische Radienprüfung

Eine verbreitete Methode zur Radienprüfung beruht auf dem Fizeau-Prinzip [1]. Die von einem Interferometer erzeugte ebene Welle (rote Pfeile in **Bild 1**) wird von einem Messobjektiv in eine reflektierte Referenzwelle (blaue Pfeile) und eine transmittierte Prüfwelle aufgespalten. Im Idealfall wird die Prüfwelle vom Prüfling perfekt in sich zurück reflektiert. Damit ist ein interferometrischer Nulltest zwischen reflektierter Prüfwelle und der Referenzwelle möglich. **Bild 1** zeigt schematisch die Messung des Krümmungsradius  $R$  eines konkaven Spiegels. Der Prüfling wird zunächst in der Brennebene im Abstand  $f$  zum Messobjektiv positioniert. Diese als "Cateye" bezeichnete Position ist mit Hilfe des Interferometers sehr genau zu bestimmen. Anschließend wird der Prüfling entlang der optischen Achse verfahren. Stimmt die Krümmung der Prüfwelle exakt mit der des Prüflings überein, ist die Prüfposition erreicht. Der Verfahrensweg  $Z$  entspricht dem Krümmungsradius  $R$  des Prüflings. Oberflächenabweichungen des Prüflings von der sphärischen Sollform zeigen sich im Interferogramm direkt als Abweichungen von einer konstanten Phase. Durch Variation des Öffnungsverhältnisses  $f/D$  ( $D$ : Strahldurchmesser der einfallenden Welle) des Messobjektivs kann ein kontinuierlicher Messbereich von Krümmungsradien erzielt werden. Der Arbeitsabstand  $L$  ergibt sich aus  $L = f + R$  und liegt bereits bei Krümmungsradien  $R > 2$  m außerhalb typischer Labormaßstäbe. Um das Problem unhandlicher Arbeitsabstände bei großen Krümmungsradi-

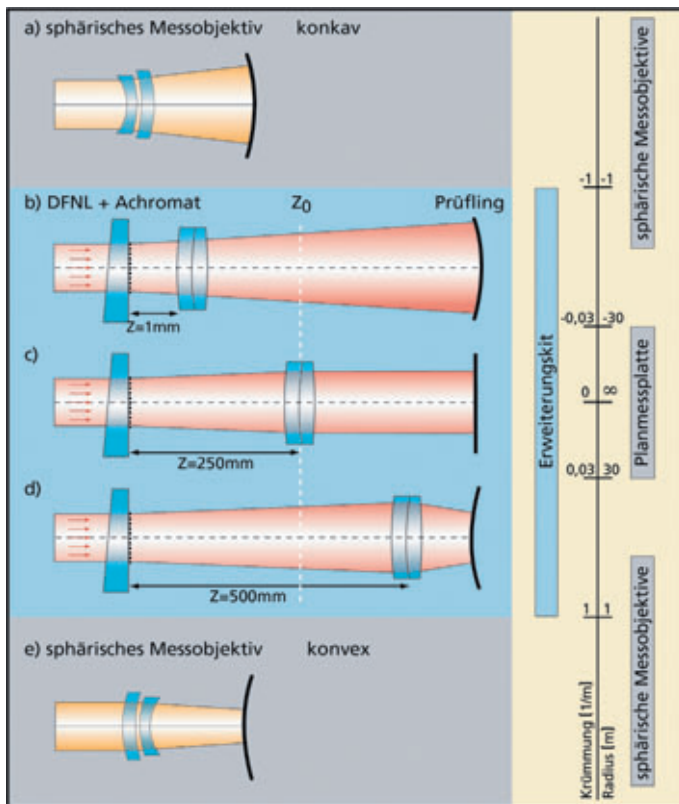


**Bild 1:** Radienmessplatz für eine konkave Spiegeloberfläche. Strahldurchmesser  $D$ , Krümmungsradius  $R$  der Spiegeloberfläche, Abstand der Spiegeloberfläche zum Messobjektiv  $L$

en zu umgehen, werden Messobjektive angeboten, die divergente Wellen erzeugen (**Bild 2a**). In einer Anordnung mit divergenten Wellen fehlt aber ein realer Brennpunkt und damit die Möglichkeit einer Wegkalibration über die Messung in Cateye-Position. Zudem gibt es wegen der endlichen Staffelung verfügbarer divergenter Messobjektive mit z.B.  $R = 3$  m, 4 m, 8 m, nach wie vor Konstellationen, die eine optische Bank mit sehr großen Messentfernungen erfordern: Für die Prüfung eines konkaven Spiegels mit einem Krümmungsradius von  $R = 12$  m mittels eines Messobjektivs mit einer Brennweite von  $f = -8$  m ergibt sich ein Gesamtabstand von  $L = 4$  m. Mit Hilfe des hier vorgestellten Verfahrens ist es dagegen uneingeschränkt möglich, bei einem Arbeitsabstand von etwa  $L = 0,8$  m den gesamten Bereich von Krümmungsradien oberhalb von  $IRI \geq 1$  m interferometrisch zu prüfen.

## Messbereichserweiterung

Zur Erweiterung des interferometrischen Messbereichs von Krümmungsradien werden eine diffraktive Fizeau Null Linse (DFNL) [2] und ein auf der optischen Achse verschiebbarer Achromat benötigt (**Bild 2b-d**). Die DFNL erzeugt diffraktiv-optisch eine divergente Welle und ersetzt somit das sphärische Messobjektiv. Durch Variation des Abstands zwischen der DFNL und dem Achromaten ist der Krümmungsradius der Prüfwelle in einem weiten Bereich durchstimmbare. Eine einfache Positionierung des Achromaten und des Prüflings entlang der optischen Achse lässt sich durch Justagehologramme sicherstellen. Diese Hologramme erzeugen, ebenfalls diffraktiv-optisch, Brennpunkte an definierten Positionen. Die Justage erfolgt dann analog zu der oben beschriebenen Radienmessung über das Antasten der Cateye-Positionen.



**Bild 2:** Die klassische interferometrische Radienmessung mit sphärischen Messobjektiven erfasst standardmäßig den Bereich für  $IRI < 1,5 \text{ m}$  (graue Balken). Mit dem hier vorgestellten Verfahren kann der Bereich auf  $IRI < \infty$  erweitert werden (blauer Balken)

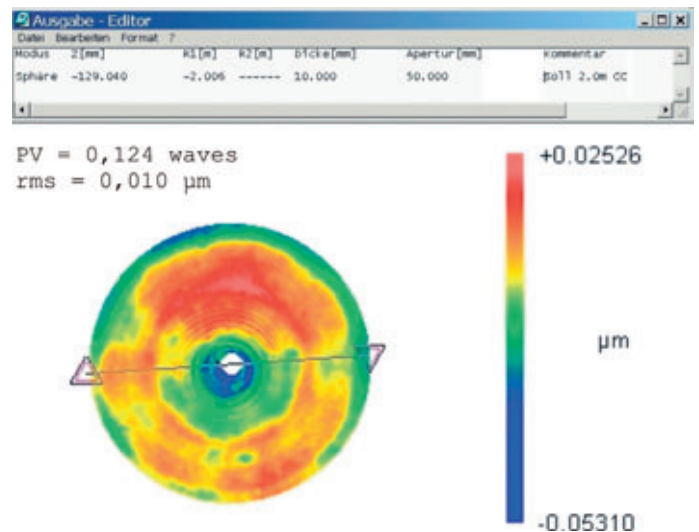
Bild 2 vergleicht den Messbereich sphärischer Messobjektive mit dem des hier vorgestellten Verfahrens. Sphärische Messobjektive erfassen standardmäßig den Bereich für  $IRI < 1,5 \text{ m}$  (Bild 2a,e). Unter Verwendung einer Planmessplatte können Oberflächen mit sehr großen Radien,  $IRI > 30 \text{ m}$ , geprüft werden. Das Interferogramm zeigt in diesem Fall die typischen Ringe einer sphärischen Abweichung des Prüflings vom Soll-Wert. Mit einer geeigneten Software kann das Interferogramm ausgewertet und der Krümmungsradius  $R$  des Prüflings berechnet werden. Diese Methode beruht allerdings nicht auf einem interferometrischen Nulltest sondern erfordert eine Bildauswertung des Interferogramms.

Im Gegensatz dazu erzeugt die Kombination aus DFNL und Achromat eine angepasste Prüfwelle und ermöglicht über den gesamten Messbereich für  $IRI > 1 \text{ m}$  einen Nulltest. Wird der Achromat dicht hinter der DFNL positioniert (Bild 2b), ergibt sich eine divergente Welle für die Prüfung konkaver Krümmungsradien mit z.B.  $R = -1 \text{ m}$ . Bei großem Abstand des Achromaten zur DFNL (Bild 2d) ergibt sich eine konvergente Prüfwelle für den Test konvexer Krüm-

mungsradien von z.B.  $R = +1 \text{ m}$ . An der  $Z_0$ -Position (Bild 2c) ist die Prüfwelle eben, d.h. der Krümmungsradius  $R$  ist unendlich. Die dazwischenliegenden  $Z$ -Positionen liefern kontinuierlich einstellbare Krümmungsradien der Prüfwelle. Für einen gegebenen Prüfling wird die  $Z$ -Position angefahren, bei der die mittlere Krümmung im Interferogramm minimal ist. Daraus lässt sich der zugehörige Krümmungsradius  $R$  des Prüflings mit einer Genauigkeit  $< 0,2\%$  für  $IRI < 10 \text{ m}$  und  $< 0,6\%$  für  $IRI < 50 \text{ m}$  berechnen (**Bild 3 oben**). Das Interferogramm zeigt zusätzlich die Abweichungen des Prüflings von der idealen sphärischen Form (**Bild 3 unten**).

### Korrektur sphärischer Wellenfrontfehler

Der hier vorgestellte Messaufbau mit DFNL und verschiebbarem Achromaten entspricht nicht dem Fizeau-Prinzip, denn der Achromat wird nur von der Prüfwelle durchlaufen und nicht von der Referenzwelle. Sowohl die optischen Fehler des Achromaten als auch dessen Justagefehler beeinflussen direkt die Oberflächenprüfung.



**Bild 3:** Oben: Ausgabefenster des Messverfahrens bei der Prüfung eines konkaven Spiegels mit nominellem Radius  $R = 2 \text{ m}$  und Strahldurchmesser  $D = 50 \text{ mm}$ . In der Messposition bei  $Z = -129,040 \text{ mm}$  erzeugt die Kombination aus DFNL und Achromat eine angepasste Prüfwelle mit  $IRI = 2,006 \text{ m}$ . Unten: In der Messposition interferometrisch gemessene Oberflächenabweichungen des Test-Spiegels relativ zur Prüfwelle

Verursacht wird der Restfehler der Wellenfront größtenteils durch sphärische Aberration des Achromaten. Der Fehler kann durch das Polynom Nr. 9 der Zernike-Fringe-Zerlegung beschrieben werden:  $Z_9 = 6 r^4 - 6 r^2 + 1$ . Üblicherweise erlaubt eine Interferometersoftware die Korrektur des Interferogramms in Bezug auf Zernike-Polynome. Subtrahiert man den Anteil des neunten Zernike Polynoms  $Z_9$ , so reduziert sich der Restfehler um mehr als eine Größenordnung und liegt damit im gesamten Messbereich von  $1 \text{ m} < IRI < 350 \text{ m}$  bei  $PV < \lambda/10$ .

### Literaturhinweise:

- [1] M.V. Mantravadi, Newton, Fizeau, and Haidinger interferometers, Optical Shop Testing, Daniel Malacara, sec. ed., pp. 1-50, John Wiley and Sons, New York (1992)
- [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. Stephan Schneider  
Optische Sondermessmittel  
Diopic GmbH  
Bergstr. 92A  
D-69469 Weinheim  
Tel. 06201/65040-15  
Fax 06201/65040-01  
eMail: schneider@diopic.de  
Internet: www.diopic.de

