

Interferometrie in streifender Inzidenz an Asphären

S. Rothau*, T. Schamburek*, N. Lindlein*

* Institut für Optik, Information und Photonik, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
mailto:sergej.rothau@fau.de

Es wird ein interferometrisches Messverfahren vorgestellt, mit dem Oberflächen von technisch rauen, steilen und konvexen Asphären vermessen werden können. Dabei kann der Prüfling im unpolierten Zustand vorliegen und somit Rauigkeitswerte von etwa $0,5 \mu\text{m}$ aufweisen. Neben dem Grundprinzip des Messverfahrens werden das Messsetup und die ersten Messergebnisse mit dazugehörigen Diskussionen der Phasenverläufe und der Eliminierung der Dejustagen vorgestellt.

1 Einführung

Bereits einige wenige asphärische Flächen können mehrere sphärische Linsen eines optischen Systems ersetzen, was zu einer Reduzierung in Gewicht und Größe des Systems führt. Deswegen spielen asphärische Linsen für das Design hochwertiger Abbildungsoptiken eine immer wichtiger werdende Rolle. Dabei spielt die Qualitätsprüfung solcher Speziallinsen eine entscheidende Rolle. Da außerdem die hohe Ansprüche an die Messgenauigkeit gestellt werden, sind hauptsächlich nur interferometrische Messtechniken dafür geeignet.

Idealerweise muss die Qualitätskontrolle während der ganzen Herstellungskette einer Linse stattfinden. Somit ist es wichtig auch technisch raue Linsen nach dem Schleifvorgang auf ihre Formabweichung prüfen zu können. Da die Linsen noch unpoliert sind, liegen die typischen Rauigkeitswerte von geschliffenen Linsen bei etwa $0,5 \mu\text{m}$. Solche Werte der Oberflächenrauigkeit machen eine Messung mit Standardmethoden im sichtbaren Wellenlängenbereich bei senkrechter Inzidenz aufgrund der starken Streuung der Prüfwelle unmöglich.

Ein vielversprechender Lösungsansatz besteht darin, Interferometrie in streifender Inzidenz mit einer Arbeitswellenlänge von 633 nm dafür zu verwenden [1]. Aufgrund des streifenden Einfalls der Testwelle und der damit verbundenen hohen effektiven Wellenlänge, können damit technisch raue Oberflächen mit hoher numerischer Apertur in sichtbarem Licht geprüft werden.

2 Messprinzip

Der Interferometer-Kern besteht im Prinzip aus zwei diffraktiven optischen Elementen (DOE) und dem dazwischen zentral platzierten Prüfling (siehe Abb. 1). Der asphärische Prüfling wird mit einer Prüfwelle unter streifendem Einfall beleuchtet, wofür die ± 1 . Beugungsordnung des ersten DOEs verwendet wird.

Die periodische Strukturen der DOEs sind Parallelkurven zur idealen asphärischen Scheitelform des Objekt. Somit kann das Messverfahren als ein lokaler Null-Test interpretiert werden. Nach der Reflexion in einem schmalen - etwa 1 mm breiten - Meridianstreifen um

den Scheitelbereich herum, trägt die Prüfwelle die Formabweichungen des Messobjekts von der idealen Form als Phasenergebnis in sich.

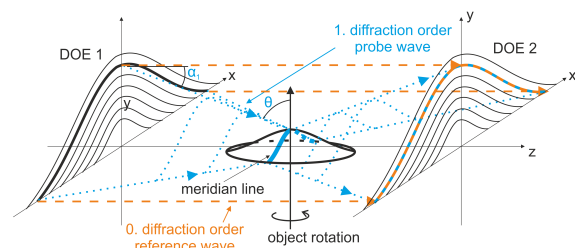


Abbildung 1 Skizze des Interferometer-Kerns mit einem asphärischen Prüfling.

Aufgrund des großen Einfallswinkels θ vergrößert sich die effektive Wellenlänge λ_{eff} im Vergleich zu der Beleuchtungswellenlänge λ erheblich. Nutzt man die Abhängigkeit des Beugungswinkels $\sin(\alpha_1) = \lambda/P_{DOE}$ von der Wellenlänge λ und der DOE-Periode P_{DOE} aus, kann mit Gleichung 1 gezeigt werden, dass die effektive Wellenlänge der Periode P_{DOE} und somit typischerweise einigen μm entspricht.

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda}{\cos(\theta)} = \frac{\lambda}{\cos(\pi/2 - \alpha_1)} = P_{DOE} \quad (1)$$

Als Referenzwelle wird das ungebeugte Licht der 0. Beugungsordnung verwendet. Nach dem Vereinigen der beiden Wellen durch das DOE2, das identischen Strukturen wie das DOE1 hat, wird das entstandene Interferogramm auf einen Detektor abgebildet und ausgewertet.

Mit einer Messung können nur die Oberflächenabweichungen des schmalen Reflexionsbereichs gewonnen werden. Für eine vollflächigere Oberflächencharakterisierung muss die Messung mehrmals wiederholt werden und der Prüfling zwischen den Messungen um seine Symmetrieachse rotiert werden.

Die anschließende Datenauswertung beinhaltet unter anderem die Elimination der Dejustagen, das Entzerren der Datenfelder und das Zusammensetzen und Interpolieren der einzelnen Messergebnisse auf ein gemeinsames Oberflächenraster.

3 Messsetup

Die Skizze des realisierten Messsetups für asphärische Objekte ist in Abb. 2 dargestellt. Das rote Licht (633 nm) eines HeNe-Lasers (PH) wird mit geeigneten Optiken (L) kollimiert. Zusätzlich wird mit einer rotierenden Mattscheibe (RS) die räumliche Kohärenz der Beleuchtung reduziert, was die Qualität des resultierenden Interferograms enorm verbessert [2].

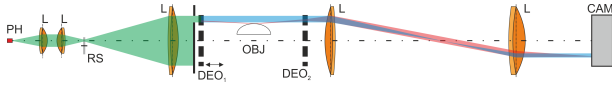


Abbildung 2 Eine nicht maßstabgetreue Skizze des Messaufbaus mit eingezeichneten Strahlengängen.

Die Periode der verwendeten DOEs ist $P_{DOE}=10\ \mu\text{m}$. Das erste DOE ist über einen Piezo-Aktuator entlang der optischen Achse verschiebbar. Dies erlaubt vordefinierte Phasenschritte zwischen den beiden Strahlen einzuführen und somit das Interferogramm mit phasenschiebenden Algorithmen auszuwerten.

Die Abbildung des Interferograms auf eine Vollformat Kamera (CAM) findet mit einem Abbildungsteleskop statt, das aus zwei Linsen mit dem Durchmesser von jeweils 80 mm und einem Brennweitenverhältnis von 500 mm zu 300 mm besteht. Für eine Messung über die volle Apertur ist ein großflächiger Sensor mit genügender Auflösung für die Abbildung des gesamten Interferenzbereichs notwendig (siehe Abb. 3).

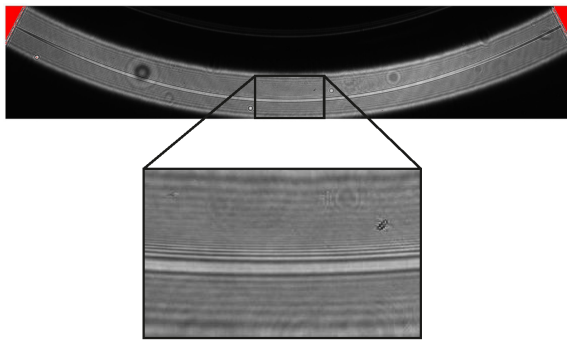


Abbildung 3 Das Kamerabild mit vergrößerter Darstellung eines Ausschnitts des Interferenzgebiets.

4 Ergebnisse: Simulation und Messung

Das umgesetzte Messsetup wurde außerdem ausführlich mit einer Raytracing Simulation analysiert. Die simulierte Nullphase ist in der linken Abb. 4 in kartesischen Koordinaten dargestellt und entspricht dem Phasenergebnis eines idealen Prüflings ohne Dejustagen und Formabweichungen. Dabei hat die rechte Darstellung in Abb. 4 ein optimiertes, rechteckiges Format mit asphärischen Koordinaten, die analog zu den Polarkoordinaten mittels Transformation aus den kartesischen Koordinaten berechnet werden.

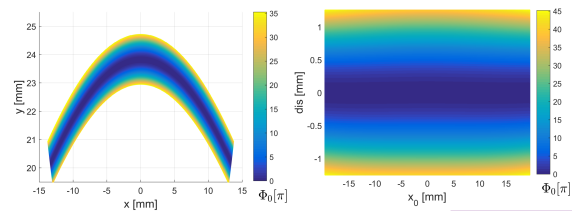


Abbildung 4 Die simulierte Nullphase einer idealen Asphäre ohne Dejustagen: links: kartesische Koordinaten; rechts: asphärische Koordinaten.

Das resultierende Interferogramm im realen Messsetup wurde mittels eines 5-Phasen Algorithmus ausgewertet. Das Rohphasenergebnis und die Restphase nach dem Abzug der Dejustagen und Nullphase können Abb. 5 entnommen werden.

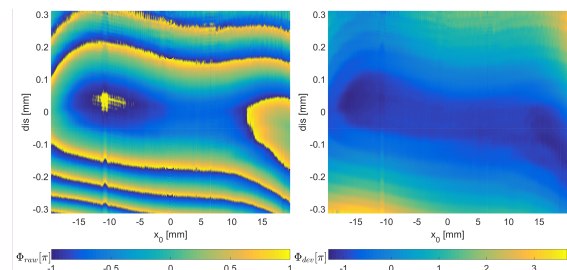


Abbildung 5 Darstellung der Ergebnisse in asphärischen Koordinaten: links: die gemessene Rohphase ($\text{mod}(2\pi)$); rechts: Die Feinphase ohne Dejustagen und der Nullphase;

5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein interferometrisches Messverfahren zur Prüfung technisch rauer, steiler Asphären mit sichtbarem Licht vorgestellt. Mittels Simulation kann schon der volle Messprozess inklusive Objektrotation und aller dazugehörigen Analyseschritte automatisch durchgeführt werden (siehe Abb. 6). Die Messung eines Meridianschnitts einer Asphäre wurde experimentell gezeigt. Als Letztes muss die vollflächige Messung verbunden mit der kontrollierten Objektrotation experimentell umgesetzt und die dazugehörigen metrologischen Untersuchungen gemacht werden.

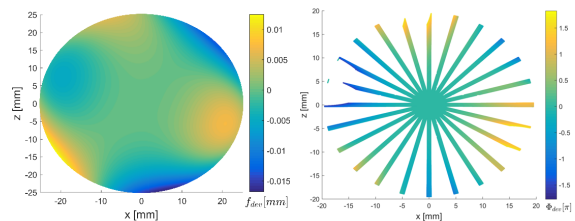


Abbildung 6 links: Die eingegebenen Formabweichungen von der idealen Asphäre des simulierten Objekts; rechts: Simulation des Gesamtergebnisses nach 12 Einzelmessungen;

Literatur

- [1] Rothau et al., Appl. Opt. **58** (2019)
- [2] Rothau et al., Appl. Opt. **60** (2021)