

# Scannende Formprüfung asphärischer Oberflächen

Robert Schmitt, Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen / Fraunhofer IPT, Aachen  
 Jörn Riedel, Stephan Stürwald, Fraunhofer IPT, Aachen  
 Jean-Michel Asfour, Dioptic GmbH, Weinheim

**Das hier vorgestellte neue Verfahren zur Vermessung asphärischer Flächen basiert auf der Kombination eines Laserinterferometers, eines ellipsoiden Spiegels und zwei steuerbaren Kippspiegeln. Dieser Aufbau ermöglicht, den Lichtweg vom Laserinterferometer zur untersuchten Asphärenoberfläche zu erfassen und mit einem simulierten Strahlverlauf für eine Sollfläche zu vergleichen. Die Differenz zeigt die Abweichung der untersuchten Oberfläche von der Sollfläche.**

Die Vermessung asphärischer Oberflächen ist häufig mit hohem Aufwand und hohen Kosten verbunden. Die üblichen taktilen Verfahren sind einerseits langsam und bergen andererseits die Gefahr der Beschädigung, während bisherige optische Messverfahren auf Basis eines Formprüfinterferometers ein teures computergeneriertes Hologramm (CGH) benötigen [1-3]. Wir stellen hier ein neues Verfahren vor, welches erlaubt, spiegelnde, asphärische Flächen bei bekannter Sollgeometrie mit moderatem Aufwand und relativ hoher Adaptivität für verschiedene Asphärengometrien zu vermessen.

## 1 Prinzip des Aufbaus

Zentraler Bestandteil des Aufbaus ist der Teil eines vollständig geschlossenen Ellipsoids, der als Referenz für alle Komponenten gilt und als Aluminiumspiegel ausgeführt ist. Jeder Lichtstrahl, der von einem Fokuspunkt der Ellipse aus startet, trifft nach der Reflexion am Ellipsoiden in den zweiten Fokuspunkt. Diese sogenannte Brennpunkteigenschaft sorgt dafür, dass ein Lichtstrahl aus einem Fokuspunkt der Ellipse stets

senkrecht auf eine Sphäre im anderen Fokuspunkt fällt und somit auf gleichem Wege reflektiert wird, wenn der Mittelpunkt dieser Sphäre mit dem Fokuspunkt des Ellipsoiden zusammenfällt (Bild 1). Im Falle von Asphären wird der Lichtstrahl nicht mehr genau in den Fokuspunkt reflektiert sondern lediglich in die Nähe. Die Abwei-

chungen sind so gering, dass sie den Akzeptanzwinkel des Interferometers nicht überschreiten, eine Messung also noch möglich ist. Gleichzeitig sind sie aber so groß, dass sich der Lichtweg um einige messbare Mikrometer ändert. Vom Laserinterferometer aus wird der Laserstrahl über zwei Kippspiegel in den linken Fokuspunkt der Ellipse geleitet und von dort in Richtung des ellipsoiden Spiegels gelenkt. Im rechten Ellipsoidfokus befindet sich der Prüflingshalter auf einer luftgelagerten Achse.

Die ellipsoide Form des Spiegels sorgt für eine Winkelvergrößerung des abtastenden Lichtstrahls, so dass ein Großteil der Oberfläche erfasst werden kann, während die Spiegel selbst nur einen

Kippbereich von maximal  $\pm 3^\circ$  haben. Zur Vermessung rein sphärischer Oberflächen wäre ein Kippspiegel im linken Fokuspunkt des Ellipsoiden (Sp 1) ausreichend, um die Oberfläche abzurastern. Bei asphärischen Oberflächen sorgt eine entsprechende Kompensationsdrehung des zweiten Spiegels (Sp 2) dafür, dass trotz Abweichung von der idealen Kugelform das Laserlicht immer noch senkrecht auf den Prüfling fällt, somit auf dem gleichen Weg durch den Messaufbau zurück ins Interferometer gelangt und die Messung möglich wird (überspitzt dargestellt in Bild 2).

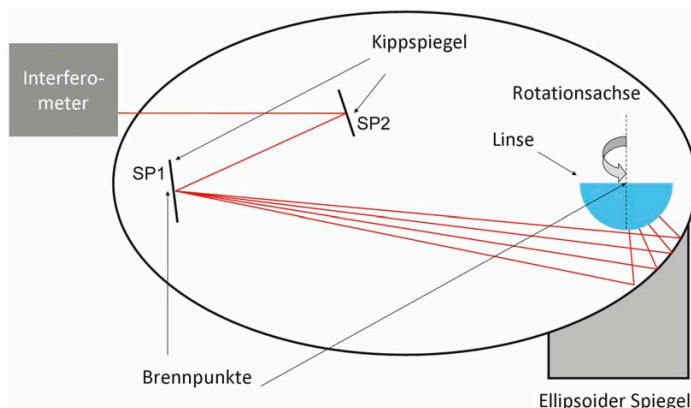


Bild 1: Möglicher Messaufbau mit Sphäre

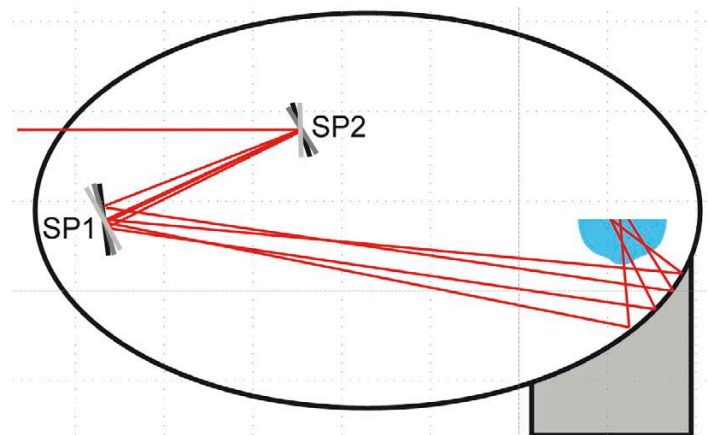


Bild 2: Schematischer Strahlverlauf für asphärische Oberflächen

## 2 Simulation und Ansteuerung

Entsprechend der gewünschten Sollgeometrie der zu prüfenden Asphäre wird vor der Messung eine Strahlverfolgungssimulation des Aufbaus mittels der Software MATLAB vorgenommen, mit der dann die Kippspiegel angesteuert werden und der Vergleich mit den gemessenen Weglängen des Lichtes durch den Ellipsoid erfolgt. Der Laserstrahl des Interferometers wird

in der Simulation gemäß den Gesetzen der geometrischen Optik betrachtet und ist als Vektor mit einem Ursprungspunkt beschrieben. Die Simulation startet die Strahlverfolgung nicht im Interferometer, sondern im Prüfling mit der Ausgangssituation, dass die simulierten Strahlen stets senkrecht auf der Prüflingsoberfläche stehen, als Grundvoraussetzung zur Durchführung einer Messung.

**Bild 3** zeigt die simulierte Strahlverfolgung durch den gesamten Aufbau. Mehrere mögliche Strahlwege, welche die Oberfläche des Prüflings abrastern, sind dargestellt. Die Detailvergrößerung lässt den abweichenden Auftreffpunkt auf dem Kippspiegel im linken Ellipsoidfokus bei zu untersuchenden Asphären erkennen. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Spiegel selbst nicht eingezeichnet.

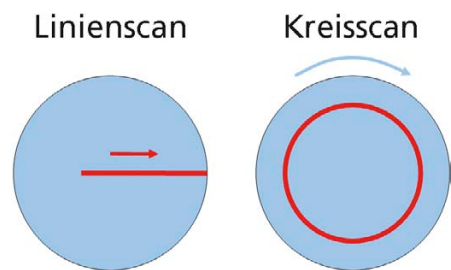
Für die Simulation müssen Scheitelradius, konische Konstante und die Asphärenparameter  $a_4$  bis  $a_{10}$  (höhere Ordnungen sind auch möglich) bekannt sein. Mit Hilfe eines numerischen Verfahrens werden damit Spiegeleinstellungen ermittelt, bei denen die Lichtstrahlen senkrecht auf die Prüflingsoberfläche treffen, reflektiert über den Kippspiegel Sp 1 in den Pivotpunkt des Kippspiegels Sp 2 gelenkt werden und dann parallel zur großen Halbachse der Ellipse in das Interferometer verlaufen. Aus diesen simulierten Spiegelpositionen lassen sich kalibrierte Steuerdaten zur Ansteuerung der Kippspiegel über eine Digital-Analog-Wandlerkarte ermitteln.

### 3 Messung und Auswertung

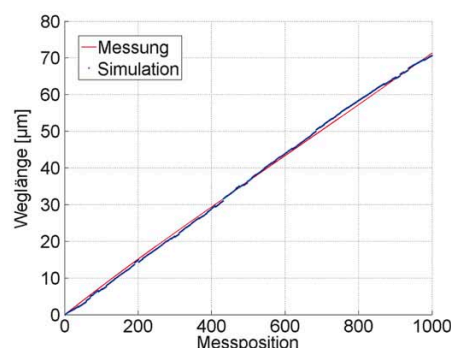
Bei unserem Messaufbau kam ein Einstrahl-Laserinterferometer mit frequenzstabilisiertem He-Ne-Laser zum Einsatz, der eine Auflösung im Bereich von 0,1 nm zulässt. Die erreichbare Auflösung wird im vorliegenden Aufbau jedoch maßgeblich durch das Rauschen der elektronischen Steuerung beider Kippspiegel beeinflusst. Bei den Kippspiegeln handelt es sich um aktive geregelte Komponenten, die durch ständige interne Nachregelung eine per analogem Signal diktierte Stellung einnehmen und halten. Die Spiegelposition wird im Laufe der Messung ständig geändert, jedoch in einem Zeitrahmen, der deutlich langsamer ist als die interne Positionsregelung der Kippspiegel. Jede angesteuerte Position wird also eine zeitlang gehalten. Dadurch entsteht eine beständige kleine Variation der jeweils eingestellten Spiegelpositionen, die naturgemäß auch einen Einfluss auf die Laserstrahlrichtung hat. Bedingt wird dies durch bewusst lang gewählte Lichtwege im Aufbau (über zwei Meter), die selbst bei kleinsten Winkelabweichungen einer

Reflexion messbare Auswirken ermöglichen. Die geringen Abweichungen der Spiegelpositionen bewirken ein Rauschen im Messsignal im Bereich von etwa 0,1  $\mu\text{m}$ . Für die Messung der Rauheit, bei der  $\lambda/20$  und besser erreicht werden müssen, ist diese Art der Messung daher nicht mehr geeignet, wohl aber für die Formprüfung. Eine Verkleinerung des Aufbaus und einer Verkürzung der Lichtwege ist nicht möglich, da u.a. die Prüflingsgeometrie eine gewisse Mindestgröße des Ellipsoiden verlangt und dieser die Größe des Aufbaus diktiert.

Zwei Messmodi (**Bild 4**) sorgen für eine vollständige Erfassung der Prüflingsoberfläche über Schnittmessungen in radialer und tangentialer Richtung: ein Linienscan, der radial über die Prüflingsoberfläche verläuft, während diese stillsteht und ein Kreisscan, bei dem der stillstehende Laserstrahl einen Kreis auf der rotierenden Prüf-



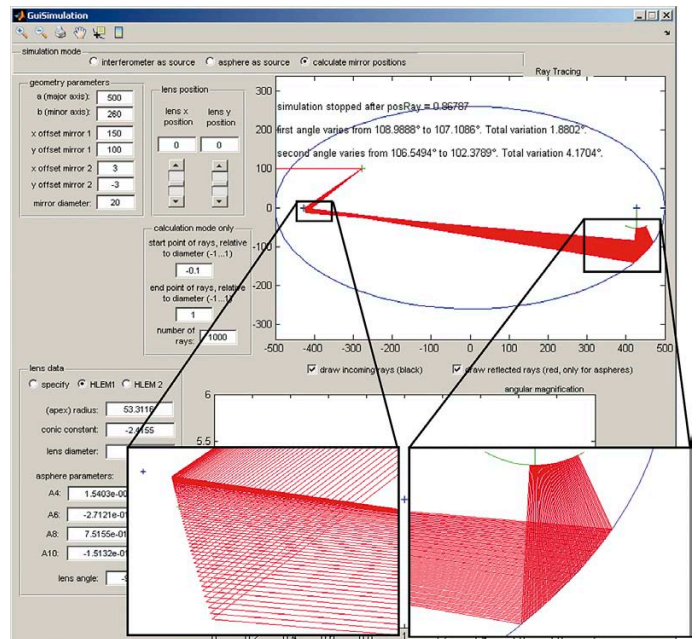
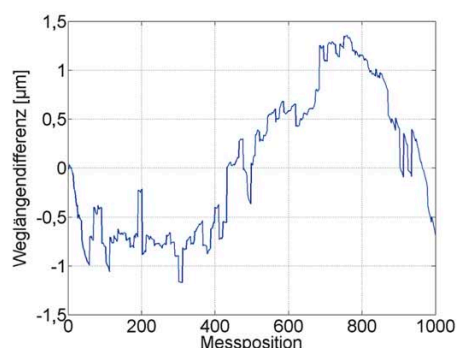
**Bild 4: Zwei Messmodi für radiale und tangentiale Messrichtungen ergeben vollständiges Oberflächenprofil**



**Bild 5: Messergebnisse und Differenzprofil eines Linienscans sowie der zugehörigen Simulation**

lingsoberfläche erfasst. Der Prüfling rotiert dabei in einer selbstzentrierenden Halterung, die verschieden große Linsen mit der Symmetrieachse im Rotationszentrum halten kann und auf einer luftgelagerten Achse mit einem Rundlauffehler kleiner als 0,05  $\mu\text{m}$  angebracht ist.

Die Auswertung der Messung erfolgt durch einen Vergleich der gemessenen Weglängen mit den numerisch ermittelten Weglängen der vorher durchgeführten Simulation. Im Idealfall wären beide Weglängen identisch, aus den vorhandenen Abweichungen lässt sich die wirkliche Oberfläche des Prüflings herleiten. **Bild 5** zeigt das Ergebnis eines Linienscans für eine Asphäre: links die gemessene Länge, rechts das Differenzprofil von Messung und Simulation. Die totale Weglängenänderung im linken Graphen ist mit 70  $\mu\text{m}$  recht gering, was der Brennpunkteigenschaft der Ellipse geschuldet ist. Am rechten Graphen kann man ablesen, dass die Linse leichte fertigungsbedingte Abweichungen im



**Bild 3: Strahlverfolgungssimulation mit MatLab**

Bereich von  $\pm 1 \mu\text{m}$  aufweist. Differenzen dieser Größenordnung führen jedoch nicht dazu, dass der Laserstrahl nicht mehr in das Laserinterferometer zurückfällt. Trotz Abweichungen der realen Prüflingsgeometrie von simulierter Sollgeometrie ist eine Interferenz- und damit Weglängenmessung möglich ist.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem hier vorgestellten Aufbau ist es bereits möglich, Schnittprofile der Oberfläche eines asphärischen Prüflings aufzunehmen und auszuwerten. Das Verfahren eignet sich für hochgeöffnete Asphären mit Durchmessern bis zu 8 cm, wobei dies lediglich durch den verwendeten ellipsoiden Spiegel festgelegt wird; mit anderen Spiegelgeometrien wären andere Linsen messbar. Insbesondere die steilen Flanken einer hochgeöffneten Linse sind bei dem vorgestellten Aufbau aufgrund des ellipsoiden Spiegels gut erreichbar.

Um aus den aufgenommenen Schnittprofilen eine vollständige 3D-Oberfläche errechnen zu können, muss die eigene

Auswertesoftware weiterentwickelt werden. Ziel ist die 3D-Darstellung und damit visuelle Kontrolle der Oberfläche.

Eine softwaregestützte, automatisierte Justage des Messaufbaus, die bisher noch manuell erfolgt, kann gerade den Wechsel der zu untersuchenden Asphärenform erleichtern und beschleunigen.

## Danksagung

Die Arbeiten wurden auf wissenschaftlichen Geräten durchgeführt, die aus Mitteln der DFG sowie der Landesregierung Nordrhein-Westfalen im Rahmen des Kompetenzzentrums »Hightech-Produktion für Wachstumsmärkte« gefördert wurden, für die wir an dieser Stelle danken.

## Literaturhinweise:

- [1] C.Y. Poon, B. Bhushan, *Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiles*, *Wear* 190 (1995) 76-88
- [2] J.L. Guerreo, J.T. Black, *Stylus Tracer Resolution and Surface Damage as Determined by Scanning Electron Microscopy*, *Journal of Engineering for Industry*, November 1972

[3] D. Malacara, *Optical Shop Testing*, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley & Sons, 2007

## Ansprechpartner:

Jörn Riedel  
Fraunhofer Institut  
für Produktions-  
technologie (IPT)  
Steinbachstr. 17  
D-52074 Aachen  
Tel. 0241/8904-357  
Fax 0241/8904-6357  
eMail: joern.riedel@ipt.fraunhofer.de  
Internet: www.ipt.fraunhofer.de



Jean-Michel Asfour  
Geschäftsführer  
Diopic GmbH  
Bergstr. 92A  
D-69469 Weinheim  
Tel. 06201/65040-18  
Fax 06201/65040-01  
eMail: asfour@diopic.de  
Internet: www.diopic.de



www.photonik.de

► Webcode 6005