

Messung gekrümmter Oberflächen mit einem absoluten Viachsensoren

Michael Schulz, Ralf D. Geckeler

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

<mailto:michael.schulz@ptb.de>

Um gekrümmte optische Oberflächen hochgenau und mit hoher Ortsauflösung messen zu können, wurde unlängst ein System aus gekoppelten Abstandssensoren in Kombination mit einem Autokollimator vorgestellt. Details, Potenzial und Grenzen für ein solches System mit Linearführung werden vorgestellt und der Einsatz für verschiedene Prüflingsformen wird diskutiert.

1 Einführung

Zur hochgenauen Messung der Topografie nahezu ebener optischer Oberflächen haben sich die Interferometrie und optische Winkelmesstechniken etabliert. Die hochgenaue Topografiemessung gekrümmter optischer Oberflächen stellt für diese Verfahren allerdings ein Problem dar, insbesondere, wenn eine absolute Formmessung einschließlich des sphärischen Anteils oder eine hohe Lateralaufklärung gewünscht sind.

Ein neues Verfahren, das stärker gekrümmte optische Oberflächen hochgenau und mit einer hohen Ortsauflösung messen kann, wurde unlängst vorgestellt [1]. Das System besteht aus einem Scankopf mit gekoppelten Abstandssensoren (hier ein Kompaktinterferometer), der von einer Linearverschiebeeinheit über die Oberfläche geführt wird, und einem zusätzlichen Autokollimator, der die Verkippung des Scankopfes erfasst.

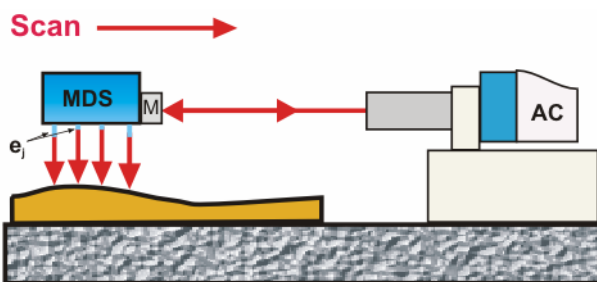


Abb. 1 Das TMS – System bestehend aus Multiple Distance Sensor (MDS, hier ein Interferometer) und Autokollimator (AC). Das Messlicht des Autokollimators wird von einem am Scankopf befestigten Spiegel (M) reflektiert. Die e_j bezeichnen die Nullpunktfehler der einzelnen Abstandssensoren.

Damit kann auch der quadratische Anteil der Topographie hochgenau bestimmt werden, der bei den klassischen Stitching - Verfahren nicht genau bestimmt werden kann. Die einzelnen Messgrößen des Systems lassen sich auf die SI - Einheiten zurückführen. Daher wird es als Traceable Multiple Sensor system (TMS) bezeichnet.

In das grundlegende mathematische Modell gehen neben den Abstandsdaten des Interferometers und den Neigungsdaten des Autokollimators an den einzelnen Scanpositionen die Nullpunktfehler der Abstandssensoren (e_j , siehe Abb. 1) sowie die Höhen- und Neigungsfehler der Führung ein. Die Topografie des Prüflings und die Nullpunktfehler der Abstandssensoren ergeben sich für rauschfreie Messdaten im Rahmen des Modells exakt. Werden in eine Simulation typische Rauschwerte für die Abstandssensoren und den Autokollimator aufgenommen, so resultieren Messunsicherheiten im Bereich weniger Nanometer [2].

2 Potenzial des TMS - Verfahrens

Das mathematische Modell erlaubt an jeder Scanposition einen verschiedenen Abstands-Offset des Sensorkopfes, setzt aber die Linearität der Abstandssensoren voraus. Damit entspricht es dem Interferometerprinzip, bei dem schon durch die Phasenmehrdeutigkeit (Vielfache der Wellenlänge) der Offset unbekannt ist.

Das Verfahren benötigt keine Referenzfläche als Geradheits- bzw. Ebenheitsreferenz und kann als Scanverfahren auch große Prüflinge messen. Dabei kann die Lateralaufklärung, bestimmt durch Scanschritt und Sensorabstand, bis in den Bereich weniger Mikrometer gehen. Eine flächenhafte Information kann durch die Kombination von Schnitten erhalten werden.

Wird ein Interferometer mit kleiner Apertur (A_{MDS}) verwendet, so sind gegenüber einer Vollfeldmessung ($\varnothing_{Prüfling}$) deutlich stärker gekrümmte bzw. gekippte Oberflächen messbar. Die Begrenzung für das Interferometer liegt hier in der Streifendichte, wobei der Gewinn G in Prüflingskoordinaten $G = \varnothing_{Prüfling} / A_{MDS} \approx 10 \dots 1000$ erheblich sein kann. Wie schon erwähnt liefert die Lösung des Gleichungssystems auch die Offsetfehler der Abstandssensoren, d.h. auch das verwendete Interferometer kann mittels des TMS – Verfahrens absolut kalibriert werden.

Messungen mit einem ersten TMS – Aufbau sind z.B. in [3] zu finden. Es wurden Flächen mit einer peak-to-valley – Höhe von bis zu 120 000 nm bei einer Länge von 220 mm gemessen.

3 Randbedingungen: TMS mit Interferometer

Die im praktischen Einsatz erreichbaren Messunsicherheiten sind in der Regel durch Effekte, die in dem grundlegenden Modell noch nicht enthalten sind, beeinflusst. Dies sind z.B. Abweichungen des effektiven Sensorabstandes des Sensorarrays, Justierunsicherheiten der Richtungen von Autokollimator, Verschiebeeinheit und Sensorarray oder auch eine Abweichung der Blendenposition des Autokollimatorspiegels gegenüber seiner Kalibrierung [3].

Der effektive Sensorabstand zum Beispiel muss wegen des im Interferometer befindlichen Abbildungssystems kalibriert werden. Da sich ein relativer Fehler dieser Größe direkt als relativer peak-to-valley - Topografiefehler auswirkt [3], muss er hochgenau kalibriert werden. Diese Kalibrierung kann allerdings durch eine einfache Erweiterung des Messaufbaus erreicht werden. Eine zusätzliche Kippenheit verkippt dabei den Sensorkopf geringfügig. In die Kippungsinformation, die vom Interferometer gewonnen wird, geht aber der effektive Sensorabstand ein, d.h. er kann aus Vergleich mit den vom Autokollimator gemessenen Werten bestimmt werden.

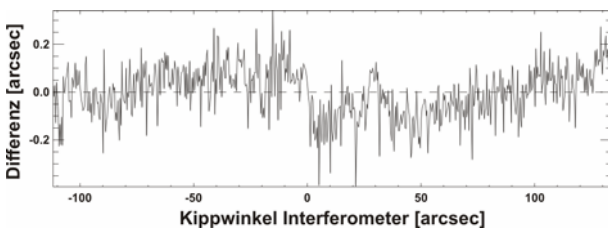


Abb. 2 Differenz zwischen dem Winkelmesswert des Interferometers und des Autokollimators nach Kalibrierung.

Abb. 2 zeigt, dass eine genaue Kalibrierung möglich ist, dass aber auch noch Einflüsse des für diesen Einsatz nicht optimierten Interferometers (z.B. nur 8 bit A/D-Konverter) vorhanden sind [3].

Eine wesentliche Begrenzung der messbaren Prüflingsformen ergibt sich aus der Streifendichte. Geht man von einer sphärischen Prüflingsoberfläche aus, so kann für verschiedene maximale Streifendichten die Begrenzung durch die Krümmung der Oberfläche (Abb. 3) bzw. die Randneigung (Abb. 4) abgeleitet werden. Bei einer Apertur d des Interferometers, einem Durchmesser D des Prüflings, einer Wellenlänge λ (hier 633 nm) und einer maximalen Streifenzahl N auf dem Sensor ergeben sich folgende Beziehungen für den kleinsten messbaren Prüflingsradius:

$$R = \frac{d^2}{N\lambda} \text{ als Effekt der reinen Krümmung, bzw.}$$

$$R = \frac{dD}{N\lambda} \text{ als Folge der Randneigung.}$$

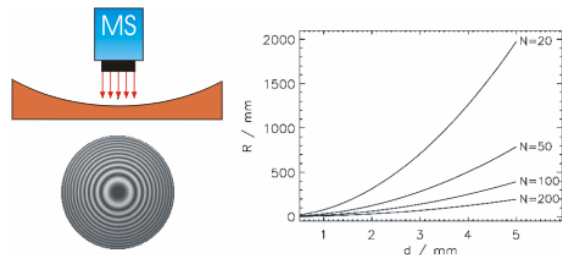


Abb. 3 Kleinster messbarer Prüflingsradius bei senkrechter Orientierung des Sensors zur Oberfläche.

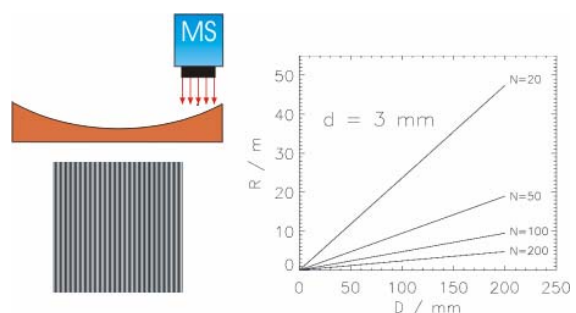


Abb. 4 Kleinster messbarer Prüflingsradius bedingt durch die Randneigung des Prüflings.

Die mit dem oben vorgestellten System mit Linearführung (lineares TMS) messbaren Krümmungsradien sind für typische Prüflinge insbesondere durch die Randneigung eingeschränkt.

4 Ausblick

Das lineare TMS – Verfahren erschließt einen Bereich von Prüflingen, der mit klassischen, vollfeldmessenden Interferometern nicht zugänglich ist. Um noch stärker gekrümmte Oberflächen messen zu können ist eine Erweiterung des Messverfahrens, z.B. unter Einbeziehung von Drehbewegungen, die das Interferometer senkrecht zur Oberfläche orientieren, in Vorbereitung.

Literatur

- [1] M. Schulz, "Traceable Multiple Sensor Systems for High-Accuracy Form Measurement," DGaO-Proceedings 2005, http://www.dgao-proceedings.de/download/106/106_p10.pdf
- [2] C. Elster, I. Weingärtner and M. Schulz, "Coupled distance sensor systems for high-accuracy topography measurement: Accounting for scanning stage and systematic sensor errors", Prec. Eng. 30, 32-38 (2006)
- [3] M. Schulz and R.D. Geckeler, "Scanning Form Measurement for Curved Surfaces", Proc. SPIE 5921, 29-39 (2005).