

Absolute Topographievermessung gekrümmter optischer Oberflächen mit hoher lateraler Auflösung

Axel Wiegmann*, M. Stavridis*, M. Schulz*, C. Elster*

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin

mailto:axel.wiegmann@ptb.de

Es wird die Erweiterung eines scannenden Absolutmessverfahrens für hochgenaue Profilschnitte von optischen Oberflächen vorgestellt. Mit dem erweiterten Verfahren ist es möglich den Prüfling schneller zu erfassen, da die erreichbare laterale Auflösung nicht mehr von dem Abstand zwischen benachbarten Messpositionen begrenzt wird sondern lediglich von dem verwendeten Interferometer.

1 Einleitung

Der Dynamikbereich von Interferometern ist u.a. durch den effektiven Pixelabstand auf der Prüflingsoberfläche begrenzt, da bei zu großer Prüflingssteigung der Streifenabstand im Interferenzmuster zu klein wird. Um stärker gekrümmte Prüflinge vermessen zu können wird bei dem Traceable Multi Sensor (TMS) Verfahren ein kompaktes Interferometer mit einer Apertur von wenigen mm über den Prüfling geführt. Mit einem Autokollimator wird die Verkippung des Interferometers gemessen. Aus den aufgenommenen Daten werden mit dem TMS Algorithmus neben der Prüflingstopographie auch die Höhenoffsets der Führung sowie die systematischen Fehler des Interferometers berechnet. Die Prüflingstopographie wird dabei absolut, also inklusive dem sphärischen Anteil, bis auf eine unbekannte Gerade rekonstruiert.

Um einen Prüfling mit hoher lateraler Auflösung zu vermessen, ist es entscheidend, die systematischen Fehler des Interferometers mit mindestens der gleichen lateralen Auflösung zu kennen. Weiterhin darf der Rekonstruktionsalgorithmus die Topographie nicht glätten und muss eine bis auf eine Gerade eindeutige Lösung liefern. Im Folgenden wird das TMS Verfahren erweitert, um höhere laterale Auflösungen zu erzielen.

2 Messprinzip

Um mit dem TMS Verfahren [1, 2] einen Prüfling zu messen, werden mit dem kompakten Interferometer hintereinander mehrere Positionen angefahren und jeweils eine Teiltopographie gemessen (Abb. 1).

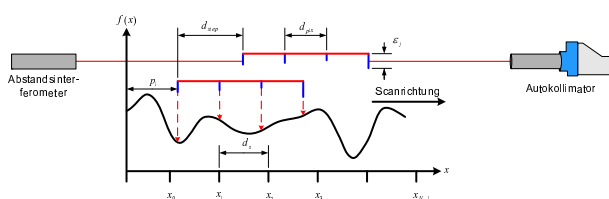


Abb. 1 Prinzipische Skizze des TMS Verfahrens

Die Verkippung b_i wird mit einem Autokollimator ge-

messen. Betrachtet man das Pixel mit der Nummer j des Interferometers in der Messposition i , so lässt sich dessen Messwert $m_{i,j}$ modellieren als:

$$m_{i,j} = -f(p_i + s(j)) + \epsilon_j + a_i + b_i s(j) \quad (1)$$

Dabei ist ϵ_j der Fehler der Interferometerreferenz für das Pixel j , a_i der Höhenoffset der Führung und $s(j)$ die Pixelposition. Diese Gleichung ist linear in den Unbekannten ϵ_j , a_i , b_i und $f(\cdot)$. Die systematischen Sensorfehler, die Offsets und die Topographie erhält man als Lösung des zugehörigen linearen Gleichungssystems.

3 Erweiterung auf beliebige Messpositionen

In der obigen Form für den Algorithmus muss die Topographie immer an den Stellen vermessen werden, an denen sie auch rekonstruiert werden soll. Aus praktischen Gründen ist der Algorithmus erweitert worden [3], so dass nur noch die Messposition bekannt sein muss, jedoch nicht mehr präzise angefahren werden muss. Ein Topographiewert an der Stelle \tilde{x} zwischen den eigentlichen Rekonstruktionspunkten x_k wird dabei als Linearkombination der gewünschten Topographiewerte ausgedrückt:

$$m_{i,j} = \sum_{k=floor(\frac{\tilde{x}}{d_s})-\frac{o-1}{2}}^{ceil(\frac{\tilde{x}}{d_s})+\frac{o-1}{2}} -c_k(\tilde{x})f(x_k) + \epsilon_j + a_i + b_i s(j) \quad (2)$$

$$c_k(\tilde{x}) = \prod_{\substack{i=floor(\frac{\tilde{x}}{d_s})-\frac{o-1}{2} \\ i \neq k}}^{ceil(\frac{\tilde{x}}{d_s})+\frac{o-1}{2}} \frac{\tilde{x} - x_i}{x_k - x_i} \quad (3)$$

Damit können nun Verfahrensabstand (x_{step}), Pixelabstand (d_{pix}) und Rekonstruktionsabstand (d_s) frei gewählt werden. Durch die Wahl des Parameters o kann die Transferfunktion des Rekonstruktionsverfahrens beeinflusst werden; je höher o , umso rechteckiger wird die Transferfunktion und hohe Ortsfrequenzen der Topographie werden besser rekonstruiert.

4 Laterale Auflösung

4.1 Referenz des Interferometers

Die Fehler der Interferometerreferenz müssen mit mindestens derselben lateralen Auflösung bekannt sein, mit der auch der Prüfling vermessen werden soll. Der erweiterte TMS Algorithmus erlaubt es, jedes Pixel als unabhängigen Sensor anzusehen. Damit erhält man den systematischen Interferometerfehler im Pixelabstand, auch wenn der Prüfling mit einer schlechteren lateralen Auflösung rekonstruiert wird. Bedingung ist dabei aber, dass x_{step} und d_s identisch sind. Ist der Rekonstruktionsabstand kleiner als der halbe Verfahrabstand ($d_s < \frac{1}{2}x_{step}$), so hat das Gleichungssystem keine eindeutige Lösung mehr (Abb. 2). Daher verliert man die Information über den Sensorfehler, wenn in einem zu großen Abstand verfahren wird (Abb. 3).

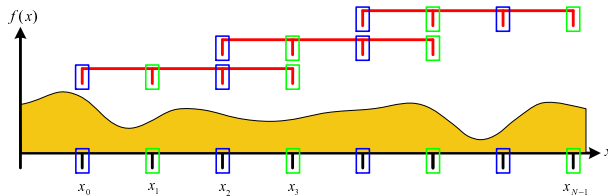


Abb. 2 Alle blau markierten Pixel messen die Topographie an den blau markierten Positionen, alle grün markierten Pixel an den grünen Positionen. Beide Gruppen haben keine gemeinsamen Punkte, daher ist das Gleichungssystem nicht eindeutig lösbar wenn der Verfahrabstand größer als der halbe Rekonstruktionsabstand ist.

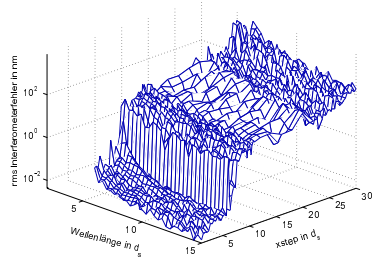


Abb. 3 Simulationsergebnis für die Berechnung des systematischen Interferometerfehlers (ohne Rauschen für die Messwerte) für eine sinusförmige Topographie mit 100 nm Amplitude. Der Rekonstruktionsabstand d_s betrug $3d_{pix}$. Für $x_{step} > 2d_s = 6d_{pix}$ ist das Gleichungssystem nicht mehr eindeutig lösbar.

4.2 Prüfling

Wünschenswert ist es, den Prüfling mit derselben lateralen Auflösung zu vermessen wie sie das kompakte Interferometer bietet. Dies kann trotz oben geschildeter Problematik erreicht werden, indem nicht äquidistant verfahren wird. Dabei wird der Verfahrabstand z.B. von Anfangs 200 μm auf 150 μm in der Topographiemitte verringert und bis zum Ende dann wieder erhöht. Dadurch verzahnen sich die Teilgitter wieder und das Gleichungssystem hat wieder eine eindeutige Lösung (Abb. 4).

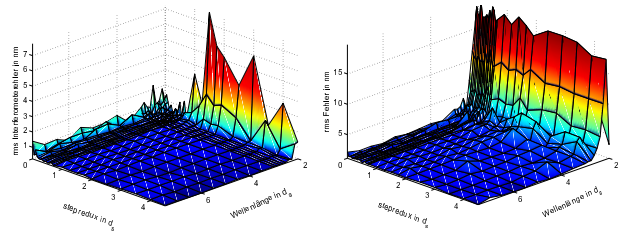


Abb. 4 Simulationsergebnisse für die Berechnung des systematischen Interferometerfehlers (links) und die sinusförmige Prüflingstopographie (rechts) für realistische Simulationsparameter. Der Parameter „stepreduz“ beschreibt den Unterschied zwischen maximalem ($200 \mu\text{m} = 10d_s$) und minimalem Verfahrabstand.

5 Messergebnisse

Erste Tests des erweiterten TMS Verfahrens bestätigen die Simulationsergebnisse (Abb. 5). Vermessen wurde eine Topographie mit 15 cm Durchmesser und einem „Peak to Valley“ von 500 nm. Verfahrabstand und Rekonstruktionsabstand betragen 200 μm was dem 10 fachen Pixelabstand entspricht. Der Interferometerfehler jedoch wurde im Pixelabstand rekonstruiert. Es wurden über eine Dauer von etwa 10 Tagen 20 Messungen hintereinander durchgeführt.

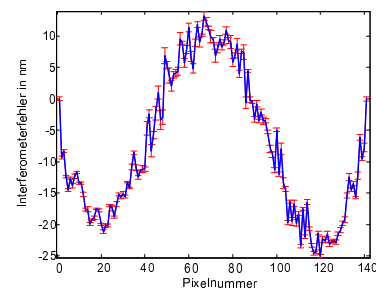


Abb. 5 Rekonstruierter mittlerer Sensorfehler aus 20 Messungen mit dem TMS Verfahren. Die roten Balken geben die Standardabweichung eines jeden Messwertes über alle 20 Messungen an.

6 Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projekts II D 5 - 14/06.

Literatur

- [1] 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).
- [2] M. Schulz and C. Elster, “Traceable multiple sensor system for measuring curved surface profiles with high accuracy and high lateral resolution,” *Optical Engineering* **45**, 060,503–1–060,503–3 (2006).
- [3] A. Wiegmann, M. Schulz, and C. Elster, “Absolute profile measurement of large moderately flat optical surfaces with high dynamic range,” *Opt. Express in press* (2008).