

Stabilitätsanalyse für das TMS-Verfahren: Einfluss hoher Ortsfrequenzen des Prüflings

Axel Wiegmann* **, Clemens Elster**, Ralf D. Geckeler* und Michael Schulz*

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

*Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

**Abbestraße 2-12, 10587 Berlin

<mailto:axel.wiegmann@ptb.de>

Das Traceable Multi Sensor (TMS) System dient zur hochgenauen Topographiemessung optischer Oberflächen. Das Verfahren berechnet aus einer Serie überlappendender Einzelmessungen des Prüflings sowie Winkelmessungen die Gesamtopographie, die Höhenabweichungen der Linearführung von einer idealen Führung sowie die systematischen Abweichungen der Referenzfläche von einer idealen Ebene. Dargestellt werden die Ergebnisse von Computersimulationen bezüglich der Stabilität des Verfahrens für ausgewählte Fehlereinflüsse.

1 Das TMS-Verfahren

Das Interferometer wird scannend über die Topographie bewegt. Die ungewollte Verkippung durch die Führung wird mit einem Autokollimator gemessen. Die systematischen Abweichungen der einzelnen Interferometerpixel in Messrichtung sind im nachfolgenden Bild (Abb. 1) blau dargestellt.

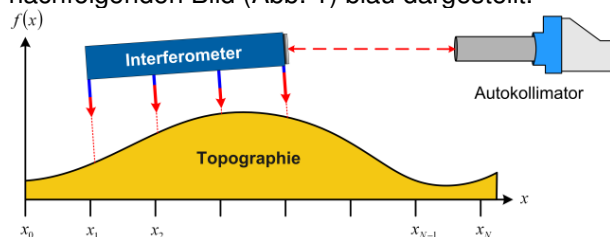


Abb. 1 Skizze des TMS-Verfahrens.

Betrachtet man das Pixel Nr. j mit der Position $s(j)$ im Interferometer in der Messposition Nr. i am Ort $p(i)$, so lässt sich dessen Messwert m bei einer Verkippung um b_i aufschreiben als:

$$m_{i,j} = -f(p(i) + s(j)) + \varepsilon_j + a_i + b_i \cdot s(j) \quad (1)$$

Diese Gleichung ist linear bzgl. der Topographie $f(p(i) + s(j)) = f(x_k)$, der systematischen Sensorabweichungen ε_j und der Höhenoffsets a_i der Linearführung. Diese Größen erhält man mit dem TMS-Algorithmus als Lösung des zugehörigen linearen Gleichungssystems. Im Gegensatz zu herkömmlichen Stitching-Algorithmen erhält man mit dem TMS-Verfahren auch den quadratischen Anteil der Topographie^{1,2}.

2 Datenvorverarbeitung

Um den Rechenaufwand zu reduzieren, werden insgesamt 10 Pixel zu einem virtuellen Abstandssensor zusammengefasst. Der Messwert dieses virtuellen Abstandssensors ist der Wert eines an die Messwerte der Pixel angepassten Polynoms an der jeweiligen Sensorposition.

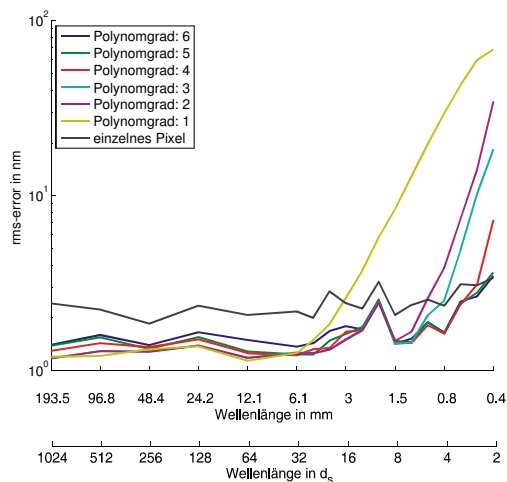


Abb. 2 Rms-error für eine sinusförmige Topographie mit einer Ausdehnung von 10 cm und einer Amplitude von 100 nm. Der Abstand d_s der virtuellen Abstandssensoren beträgt 10 Pixel $\hat{=} 189 \mu\text{m}$.

In Abhängigkeit vom Grad des Fitpolynoms werden hohe Ortsfrequenzen unterschiedlich stark gedämpft (Abb. 2).

3 Laterale Positionierabweichung

Grundlage des TMS-Verfahrens ist, dass die Abstandssensoren hintereinander an denselben Topographiepositionen messen. Die lineare Verschiebeeinheit kann diese Positionen aber nur mit endlicher Genauigkeit anfahren. Der Einfluss die-

ser Positionierabweichung in Abhängigkeit von der Topographiewellenlänge ist in Abb. 3 wiedergegeben.

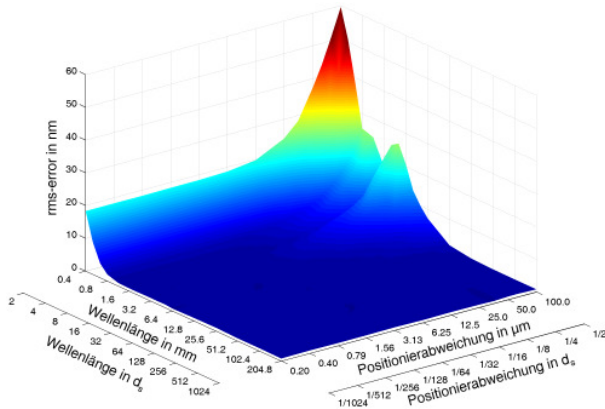


Abb. 3 Einfluss der Positionierabweichung auf die resultierende Topographie. Für die Vorverarbeitung wurden je 10 Pixel mittels eines Polynomfits 4ten Grades zu einem virtuellen Abstandssensors zusammengefasst.

Für eine Wellenlänge von 1,6 mm ergibt sich ein lokales Minimum für den rms-error der Topographie. Die Wellenlänge für welche dieses Minimum auftritt, ist vom Abstand zwischen erstem und letztem virtuellen Abstandssensor abhängig. Bei Vorwissen über die Power Spectral Density des Prüflings, können die virtuellen Abstandssensoren geeignet gewählt werden.

4 Pixelabstand

Wesentlich für das TMS-Verfahren ist eine genaue Kenntnis des Pixelabstandes. Dessen Einfluss, wie auch derjenige der Verzeichnung, wurde mittels einer Asphäre mit einem Peak to Valley (PV) von 50 µm simuliert.

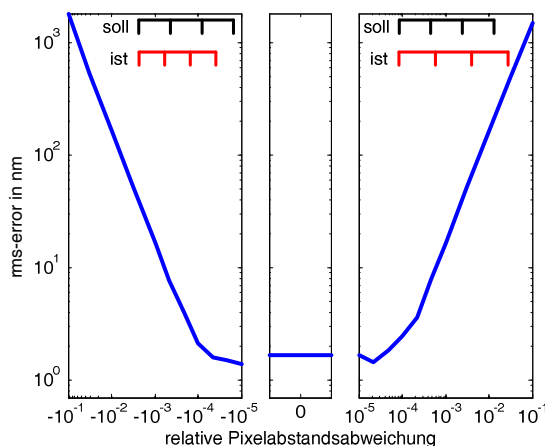


Abb. 4 Einfluss eines falsch angenommenen Pixelabstandes auf die resultierende Gesamtopographie für eine Topographie mit einem PV von 50 µm. Links: Pixelabstand zu klein angenommen, rechts: Pixelabstand zu groß angenommen.

Wie in Abb. 4 dargestellt, hängt der resultierende rms-error nicht davon ab, ob der Pixelabstand zu groß oder zu klein angenommen wurde. Eine relative Abweichung im Pixelabstand führt etwa zu

einem ebenso großen relativen rms-error der rekonstruierten Topographie.

5 Verzeichnung

Die Optik des Interferometers führt zu einem vom Abstand zum Symmetriezentrum abhängigen Vergrößerungsfaktor. Die auf den Prüfling projizierten Pixel sind daher nicht äquidistant. Für die Simulationen wurden die Pixelposition als Funktion vom Abstand zur optischen Achse nicht linear, sondern als Polynom 2ten Grades modelliert. Die angegebene relative Verzeichnungsabweichung in Abb. 5 entspricht der relativen Abstandsänderung eines Pixels am Rand der Apertur ($\varnothing=3$ mm) bzgl. der optischen Achse.

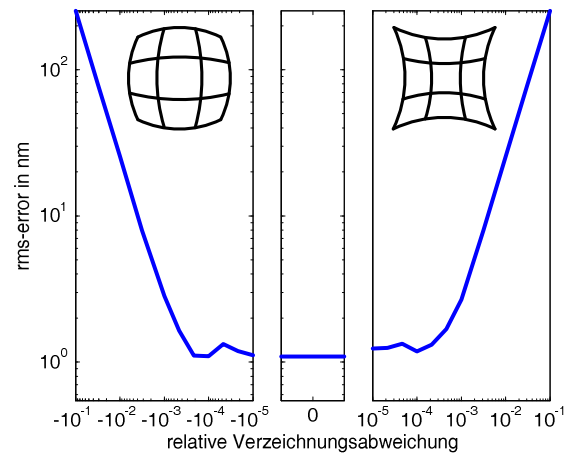


Abb. 5 Einfluss der Interferometerverzeichnung auf die resultierende Gesamtopographie für eine Topographie mit einem PV von 50 µm. Links: tonnenförmige Verzeichnung, rechts: kissenförmige Verzeichnung.

Für die Auswertung wurden die Pixel als äquidistant angenommen, wobei hierfür der gemittelte Pixelabstand verwendet wurde. Im Vergleich zum Pixelabstand, ist der Einfluss der Verzeichnung etwa eine Größenordnung geringer.

Realistische Größenordnungen für die relative Pixelabstandsabweichung (10^{-4}) und die Verzeichnung (kleiner $2 \cdot 10^{-3}$) ergeben für die simulierte Asphäre mit einem PV von 50 µm einen rms-error von weniger als 10 nm.

6 Literatur

- [1] I. Weingärtner and C. Elster, "System of four distance sensors for high-accuracy measurement of topography," Precision Engineering 28, pp. 164–170, 2004.
- [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," Precision Engineering 30, pp. 32–38, 2006