

# Sensorentwicklung zur deflektometrischen Topografiemessung mit sub-Millimeter Aperturen

Gerd Ehret, Susanne Quabis, Michael Schulz, Birk Andreas, Ralf D. Geckeler

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany

<mailto:gerd.ehret@ptbde>

Es wird ein Null-Winkelsensor mit sub-Millimeter-Apertur und Auflösungen von 0,01 arcsec vorgestellt. Dieser Null-Winkelsensor in Kombination mit einem speziellen deflektometrischen Verfahren (EADS) ermöglicht es, in der Kleinwinkel-Deflektometrie laterale sub-Millimeter Auflösungen zu erreichen.

## 1 Einleitung

Zur hochgenauen Topografiemessung werden u.a. scannende deflektometrische Systeme benutzt, die zur Winkelmessung Autokollimatoren mit Genauigkeiten im Bereich von 0,01 arcsec verwenden. Um diese Genauigkeiten zu erreichen, ist jedoch eine sehr genaue Lokalisierung z.B. des Schwerpunktes des Signals auf einer CCD notwendig. Bei einem Autokollimator mit einer Brennweite von 300 mm muss der Schwerpunkt auf dem Bildsensor auf 29 nm genau bestimmt werden. Bei einer Pixelgröße von 7  $\mu\text{m}$ , würde dies einer Lokalisation des Schwerpunkts auf 0,004 eines Pixels entsprechen.

Mit Kleinwinkel-Deflektometern kann die Form von nahezu ebenen Prüflingen mit sub-Nanometergenauigkeiten gemessen werden [1,2]. Die Apertur des Autokollimators bestimmt dabei die laterale Auflösung der Formmessung. Diese liegt bisher im Millimeterbereich, da kommerziell erhältliche Autokollimatoren auf Grund ihres Aufbaus nicht mit sub-Millimeter-Aperturen betrieben werden können. Ähnlich wie bei der flächenhaft messenden phasenschiebenden Deflektometrie [3] gibt es auch hier bei der Punkt für Punkt messenden Deflektometrie physikalische Grenzen hinsichtlich der lateralen auflösbaren Distanz und der Winkelauflösung. Diese physikalischen Grenzen sind u.a. abhängig vom Signal-zu-Rausch-Verhältnis, das jedoch durch Mitteln mehrerer Messungen verbessert werden kann. Ein neuartiges deflektometrisches Verfahren, das sogenannte „Exact Autocollimation Deflectometric Scanning“ (EADS) [4] ermöglicht es nun, das Scannen durch einen Null-Winkeldetektor durchzuführen. Somit können unter Verwendung eines Null-Winkelsensors mit kleiner Apertur Topographien mit lateraler sub-Millimeter-Auflösung erfasst werden.

## 2 Messaufbau

Eine mögliche Realisierung für einen Null-Winkelsensor mit sub-Millimeterapertur ist in Abb. 1 dargestellt. Eine Blende, die im Abstand

von wenigen Millimetern zum Prüfling positioniert ist, wird mit einer kollimierten Lichtquelle beleuchtet. Das von der Prüflingsoberfläche reflektierte Licht gelangt über einen Strahlteiler und eine Zerstreuungslinse auf den Bildsensor. Eine Beleuchtung mit einem fokussierten Lichtstrahl liefert eine deutlich geringere Winkelsensitivität und kommt deshalb hier nicht in Betracht.

Die Ablenkung des Strahls auf dem Bildsensor sowie die Winkelsensitivität können über den sog. ABCD-Matrix-Formalismus bestimmt werden. Es ergibt sich für die Ablenkung des Lichtflecks:

$$\Delta x_S = (d_1 + d_2 - d_1 \cdot d_2 / f) \cdot \alpha_1,$$

wobei  $d_1$  der Abstand zwischen Blende und Zerstreuungslinse,  $d_2$  der Abstand zwischen Zerstreuungslinse und Bildsensor,  $f$  die Brennweite der Zerstreuungslinse und  $\alpha_1$  der Reflexionswinkel ist. Der Reflexionswinkel  $\alpha_1$  entspricht dem doppelten Drehwinkel  $\alpha$  des Prüflings. Die Winkelsensitivität ergibt sich durch Differentiation zu:

$$\frac{\partial (\Delta x_S)}{\partial \alpha_1} = (d_1 + d_2 - d_1 \cdot d_2 / f)$$

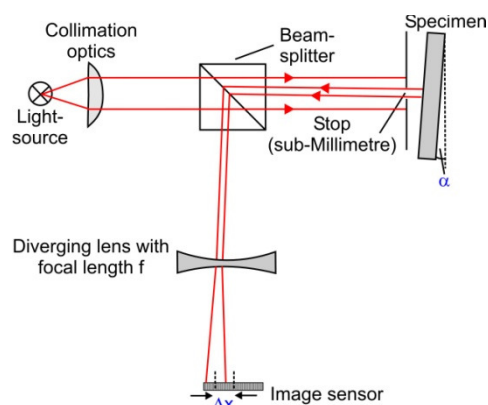


Abb. 1 Schematischer Aufbau des Null-Winkelsensors

Ein Foto des Messaufbaus ist in Abb. 2 dargestellt. Als Lichtquelle dient der Ausgang einer Singlemode-Faser, in die das Licht eines 532nm-Laser eingekoppelt wird. Mit einer inkohärenten Beleuch-

tung wie z.B. einer LED konnten Aperturen bis 0,3 mm Durchmesser realisiert werden. Hierbei konnten zwar störende Interferenzen im Vergleich zu einer Laser-Beleuchtung vermieden werden, jedoch musste auf Grund der geringeren Leuchtdichte die Integrationszeit der Kamera deutlich erhöht werden, was zu einem schlechten Signal-Rausch-Verhältnis führte.

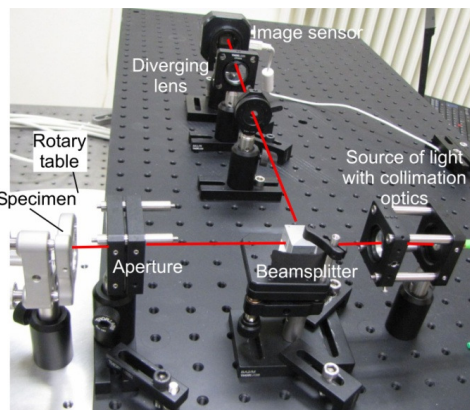


Abb. 2 Foto des Null-Winkelsensors

### 3 Messergebnisse

In einem ersten Schritt wurde der experimentelle Aufbau hinsichtlich seiner Stabilität untersucht und optimiert. Die Pixelgröße der Kamera beträgt  $6,7 \mu\text{m}$ . Abb. 3 zeigt ein typisches Ergebnis einer Stabilitätsmessung mit einer Blende mit 0,3 mm Durchmesser.

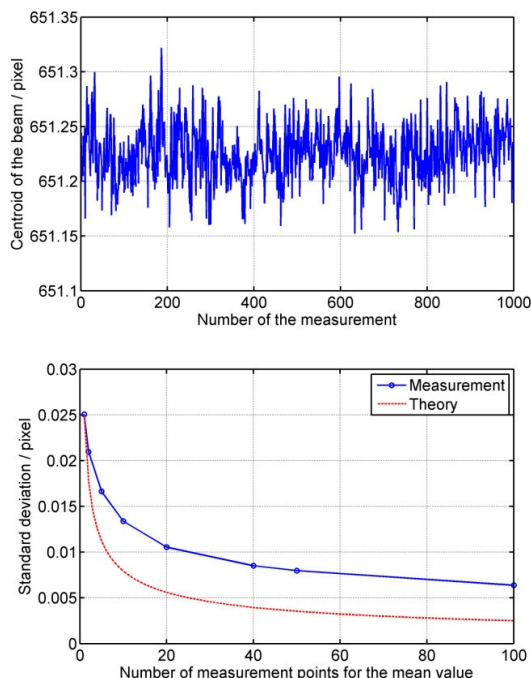


Abb. 3 Stabilität des Null-Winkelsensors, oben: Position des Schwerpunkts von 1000 Bildern aufgenommen in einem Zeitintervall von 5 Minuten, unten: Standardabweichungen durch Mittelung. Die rote Kurve zeigt die Reduzierung der Standardabweichung wie sie bei rein „stochastischem“ Rauschen zu erwarten wäre.

Abb. 4 zeigt die Linearität des Winkelsensors. Dazu wurde der Prüfling mit einem hochgenauen Drehtisch in Schritten von 1 arcsec gedreht und jeweils der Schwerpunkt des Lichtfleckes auf der Kamera ausgewertet. Es ergibt sich eine Steigung bzw. Sensitivität von  $0,93 \text{ Pixeln} / \text{arcsec}$ . Damit könnte eine Winkelauflösung von  $0,01 \text{ arcsec}$  bei Mittelung von etwa 30 Bildern (siehe Abb. 3) erreicht werden.

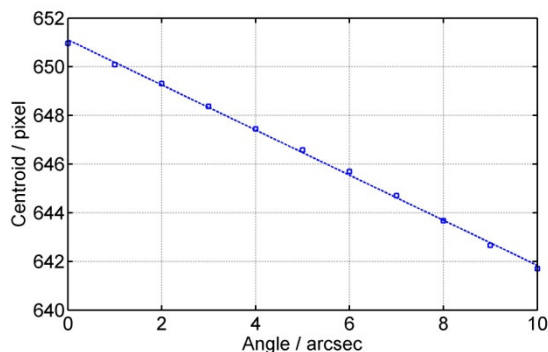


Abb. 4 Linearität des Winkelsensors

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass ein Null-Winkelsensor mit lateraler Auflösung von 0,3 mm und einer Messgenauigkeit von  $0,01 \text{ arcsec}$  realisierbar ist. Wichtig hierbei sind u. a. ein gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis, ein möglichst kontanter Dunkelstrom, eine stabile Lichtquelle und entspiegelte Optiken im Falle von Laserbeleuchtung.

#### Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des EMRP Projektes IND10 (<http://www.ptb.de/emrp/ind10-home.html>). Wir danken dem EMRP für die finanzielle Unterstützung. EMRP wird gemeinsam finanziert von den an EMRP teilnehmenden Ländern innerhalb von EURAMET und der Europäischen Union.

#### Literatur

- [1] R. D. Geckeler, I. Weingärtner, I: *Sub-nm Topography Measurement by Deflectometry: Flatness Standard and Wafer Nanotopography*, Proc. SPIE 4779, 1–12 (2002)
- [2] G. Ehret, M. Schulz, M. Stavridis, C. Elster: *Deflectometric systems for absolute flatness measurements at PTB*, Meas. Sci. Technol. 23(094007), 1–8 (2012)
- [3] M. C. Knauer, C. Richter, O. Hýbl, J. Kaminski, C. Faber, G. Häußler: *Deflektometrie macht der Interferometrie Konkurrenz*, Technisches Messen 76(4), 175-181 (2009)
- [4] M. Schulz, G. Ehret, A. Fitzenreiter: *Scanning deflectometric form measurement avoiding path-dependent angle measurement errors*, J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publications 5(10026), 1–4 (2010)