

# Vergleich unterschiedlicher Kleinwinkel-Deflektometrie-Verfahren zur Ebenheitsmessung

Gerd Ehret, Michael Schulz

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

<mailto:gerd.ehret@ptb.de>

An der PTB wurde in den letzten Jahren ein Kleinwinkel-Deflektometer für Prüflinge bis zu einer Größe von einem Meter kontinuierlich weiterentwickelt. Wir stellen unterschiedliche Kleinwinkel-Deflektometrie-Verfahren vor, zeigen Messungen und diskutieren die Vor- und Nachteile der Verfahren.

## 1 Einführung

Deflektometrische Messverfahren werden zur hochgenauen Ebenheitsmessung eingesetzt. Hierzu werden Autokollimatoren oder ähnliche Systeme genutzt, die die Oberfläche nahezu in Richtung der Flächennormalen antasten und die geringe Abweichung des reflektierten Lichtstrahls von der Einfallrichtung messen. Deshalb werden diese Verfahren als Kleinwinkel-Deflektometrie (KWD) bezeichnet. Die Unsicherheiten betragen wenige Nanometer. Wir stellen hier verschiedene KWD-Verfahren vor, die an der PTB realisiert sind und vergleichen diese.

## 2 Prinzipien der Kleinwinkel-Deflektometrie

Das klassische KWD-Verfahren beruht auf der punktwweisen Messung des lokalen Gradienten der Oberfläche unter Verwendung eines Pentaprismas. Kollimiertes Licht wird dabei mit dem Pentaprisma um  $90^\circ$  abgelenkt und beleuchtet den Prüfling. Die Ablenkung des Lichtes durch den Prüfling wird mit einem Autokollimator (AC) gemessen (siehe Abb. 1). Durch die spezielle Ablenkung des Lichtstrahls im Pentaprisma werden Führungsfehler der Scanningachse in erster Ordnung eliminiert. Anstatt eines Pentaprismas aus Glas kann auch eine Anordnung aus zwei Spiegeln verwendet werden, was den Vorteil besitzt, dass Rückreflexe der Ein- und Austrittsflächen vermieden werden.

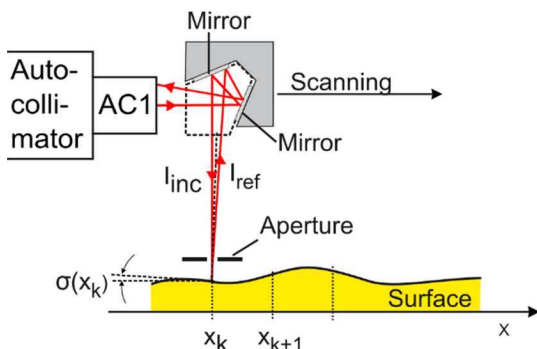


Abb. 1 Prinzip der klassischen Kleinwinkel-Deflektometrie mit Pentaprisma bzw. Doppelspiegel.

Anstelle des Pentaprismas kann auch ein weiterer Autokollimator verwendet werden (siehe Abb. 2). Dieses Verfahren wurde kürzlich in das Deflectometric Flatness Reference (DFR)-System der PTB [1] implementiert.

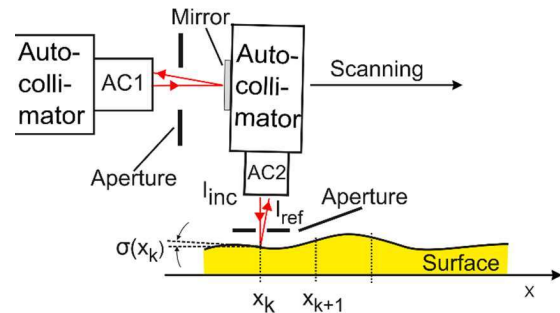


Abb. 2 Prinzip der Kleinwinkel-Deflektometrie mit weiterem AC.

Mit beiden Verfahren (Abb. 1 und 2) kann der Prüfling „step-by-step“ oder „on-the-fly“ gescannt werden. Vorteilhaft bei dem Verfahren nach Abb.1 ist, dass der Führungsfehler nicht über einen weiteren Autokollimator gemessen werden muss. Nachteilig ist jedoch, dass der Abtaststrahl mit kleiner Apertur (im Bereich von einigen Millimetern) große optische Weglängen zurücklegt. Damit verbunden sind gewisse Wegabhängigkeiten [2]. Vorteilhaft bei dem Verfahren nach Abb. 2 ist, dass der Abtaststrahl mit kleiner Apertur nahezu immer den gleichen Abstand zum Prüfling besitzt und der Autokollimator (AC1) mit einer großen Apertur von einigen 10 mm betrieben werden kann.

Durch die Messung der Steigungen  $\sigma(x_m)$  und den Schrittweiten  $\Delta x$  kann durch numerische Integration das Höhenprofil berechnet werden:

$$h(x_k) = \sum_{i=1}^N \sigma(x_m) \cdot \Delta x + h(x_0). \quad (1)$$

Neben der rückgeführten Messung der Schrittweiten müssen die Autokollimatoren kalibriert werden. Dies wird über das Winkelprimärnormal WMT 220 der PTB realisiert, das die Möglichkeit der Kalibrierung des ebenen Winkels, d. h. einer Messachse, bietet. Eine Charakterisierung des Raumwinkels kann mit dem PTB-Raumwinkel-Kalibriersystem für

Autokollimatoren (Spatial Angle Autocollimator Calibrator, SAAC) durchgeführt werden [2].

Erfahrungsgemäß gilt, dass man mit einer Messunsicherheit der Winkelmessung von 0,01 arcsec (50 nrad) Unsicherheiten von wenigen Nanometern für die Höhenmessung bei einem 300 mm-Scan erreichen kann.

Ein weiteres KWD-Verfahren ist das sog. Exact Autocollimation Deflectometric Scanning (EADS)-Verfahren [3], siehe Abb. 3. Durch einen zusätzlichen Piezoaktuator wird der Prüfling an jeder Messstelle so gekippt, dass der Abtaststrahl (hier AC3) genau senkrecht auf die Prüflingsoberfläche schaut. Vorteilhaft hierbei ist, dass der Sensor mit dem Abtaststrahl (kleiner Durchmesser) nur den Nullwinkel messen muss. Nachteilig ist, dass man eine deutlich längere Messzeit pro Scan hat. Ein 500 mm-Scan, wie er in der Abb. 5 dargestellt ist, dauert bei einer Schrittweite von 1 mm ca. eine Stunde.

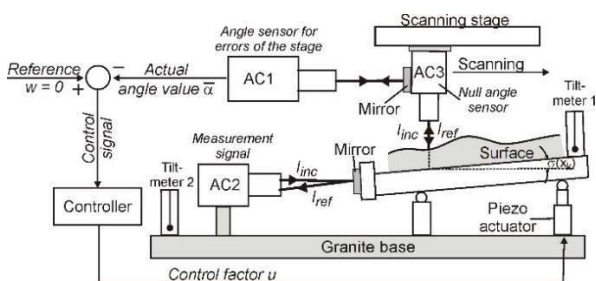


Abb. 3 EADS-Verfahren. Prüfling wird nachgekippt.

Abb. 4 zeigt ein Foto des Aufbaus. In Abb. 5 sind 7 Schnitte eines 500 mm-Zerodurprüflings dargestellt. Der obere Plot zeigt das Messsignal des AC2, das bei den 7 dargestellten Scans eine Streuung von 0,014 arcsec (RMS) aufweist. Der untere Plot zeigt den Autokollimator, der als Nullsensor fungiert. Er zeigt, dass der digitale Regler das Nullsignal in den Bereich von wenigen tausendstel Winkelsekunden regelt. Die Streuung beträgt 0,0016 arcsec (RMS).

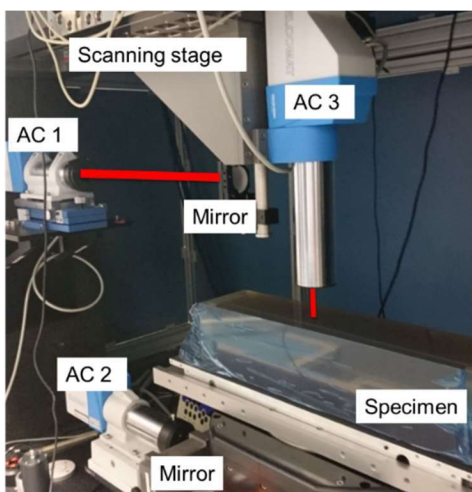


Abb. 4 Foto des DFR-Systems an der PTB.

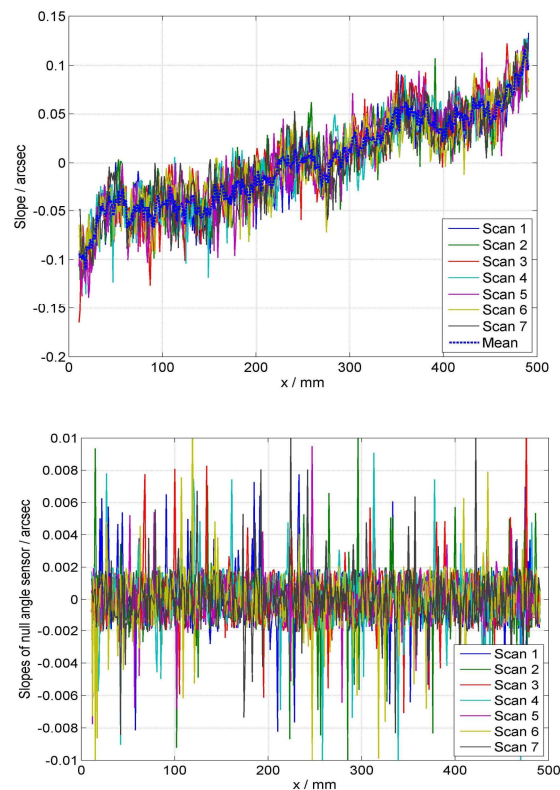


Abb. 5 EADS-Messung eines 500 mm-Zerodurprüflings. Winkelmesswerte des AC2 (oben) und Winkelmesswerte des Nullwinkelsensors AC3 (unten).

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde das KWD-System der PTB mit seinen Messmöglichkeiten vorgestellt. Zwei neue Messmodi, bei denen an Stelle des Pentaprismas ein AC verwendet wird, wurden implementiert (Abb. 2 und Abb. 3) Exemplarische Messungen wurden gezeigt. Bei dem EADS-Modus in Abb. 3 soll zukünftig der eigene Nullwinkelsensor mit sub-Millimeter Apertur integriert werden [4], so dass deflektometrische Messungen mit sub-Millimeter-Aperturen möglich werden.

### Literatur

- [1] G. Ehret, M. Schulz, M. Stavridis, C. Elster: Deflectometric systems for absolute flatness measurements at PTB, Meas. Sci. Technol. 23(094007), 1–8 (2012)
- [2] M. Schumann, R. D Geckeler, M. Krause and A. Just: The spatial angle autocollimator calibrator: optimised model, uncertainty budget and experimental validation, Metrologia, Vol. 56 (1), (2018)
- [3] 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)
- [4] G. Ehret, S. Quabis, M. Schulz, B. Andreas, R. D. Geckeler: Sensorentwicklung zur deflektometrischen Topografiemessung mit sub-Millimeter Aperturen, DGaO Proceeding (2013)