

Virtuelle und reale Experimente am neuen deflektometrischen Ebenheitsstandard

Gerd Ehret*, Michael Schulz*, Maik Baier*, Arne Fitzenreiter*, Wolfgang Jöckel*,
Manuel Stavridis**, Clemens Elster**

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

** Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Abbestr. 2-12, 10587 Berlin, Germany

<mailto:gerd.ehret@ptb.de>

An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) wurden 2010 zwei neue deflektometrische Systeme zur absoluten Topographiebestimmung von nahezu ebenen Flächen für Größen bis zu einem Meter installiert. Es werden virtuelle Experimente und ein erstes reales Experiment am System für liegende Prüflinge gezeigt.

1 Einleitung

Der neue deflektometrische Ebenheitsstandard (DFR: Deflectometric Flatness Reference) kann die absolute Ebenheit von Prüflingen mit Größen bis zu einem Meter und mit Massen bis zu 120 kg messen [1, 2]. Er besteht aus System 1 für liegende und System 2 für stehende Prüflinge. Angestrebt wird eine Unsicherheit im Sub-Nanometerbereich – auch für große Prüflinge mit typischen Höhen bis 200 nm. Die wesentlichen Fehlereinflüsse wie Unebenheiten der optischen Flächen im Strahlengang, Bahnfehler der mechanischen Führungen oder Justagefehler der Komponenten werden durch virtuelle Experimente in ihren Auswirkungen quantifiziert. Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse zeigen auf, welche Genauigkeiten benötigt werden, um Topographiemessungen im Sub-Nanometerbereich realisieren zu können. Die Modellierungen zeigen auch, dass erst durch eine Justierung der optischen und mechanischen Komponenten im Winkelsekundenbereich sub-Nanometer-genaue Messungen möglich sind.

2 Aufbau der DFR-Systeme

In Abb. 1 ist ein Foto des Systems für liegende Prüflinge gezeigt. An einer hochgenauen luftgelagerten Linearachse mit Führungsfehlern von weniger als drei Winkelsekunden bei einem Verfahrensweg von einem Meter sind zwei Schlitten befestigt. Mit dem ersten Schlitten kann der Autokollimator und mit dem zweiten das Pentaprisma bzw. eine entsprechende Doppelspiegeleinheit (DM) bewegt werden. In den beiden Systemen sind drei verschiedene deflektometrische Prinzipien (Direkt-, Differenzdeflektometrie [1, 2] und das sog. Exact Autocollimation Deflectometric Scanning (EADS)-Verfahren [3]) realisiert. Zur Ausrichtung der DM - Einheit zur optischen Achse wurden geeignete Justierverfahren an der PTB entwickelt [4, 5]. Damit wird es möglich Justierungen im Winkelsekundenbereich zu erreichen.

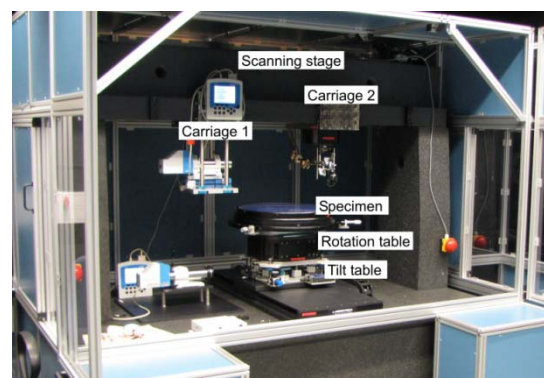


Abb. 1 Foto des DFR-Systems 1

3 Virtuelle Experimente

Zur Quantifizierung von Fehlereinflüssen, zum Vergleich der verschiedenen deflektometrischen Messmodi und zur Bestimmung der Messunsicherheit wurde das in Abb. 1 gezeigte System in die bestehende Simulationsumgebung der PTB implementiert.

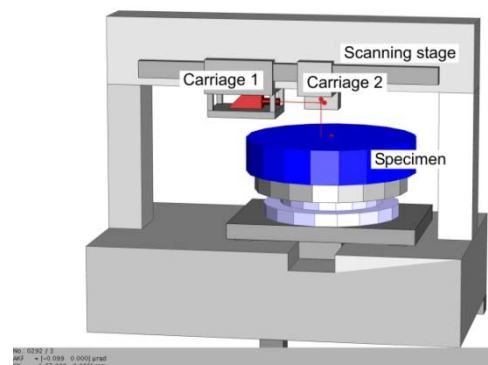


Abb. 2 Ausgabe der Simulationsumgebung mit dem aktuellen Stand des virtuellen Experiments

Für die Sensitivitätsanalyse wurden 4 Gruppen (Scanning stage, Autokollimator, Doppelspiegel und Prüfling) gebildet, die zunächst untereinander verglichen wurden, um herauszufinden, welche Gruppe den größten Fehlereinfluss liefert. Abb. 3

zeigt das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse für den Fall der direkten Deflektometrie. Die sog. Boxplots stellen hier die Sensitivität gemittelt über 100 virtuelle Experimente dar. Links im Boxplot ist der Fehler ausgeschaltet (ideal) und rechts im Boxplot ist der Fehler eingeschaltet (real). Die Boxplots zeigen, dass bei den so gewählten Eingangsgößen alle 4 Gruppen ähnliche Sensitivitäten haben und Messungen im sub-Nanometerbereich auch für große Prüflinge möglich sind. Anschließend können dann mit weiteren virtuellen Experimenten innerhalb jeder Gruppe die einzelnen Fehler quantifiziert werden.

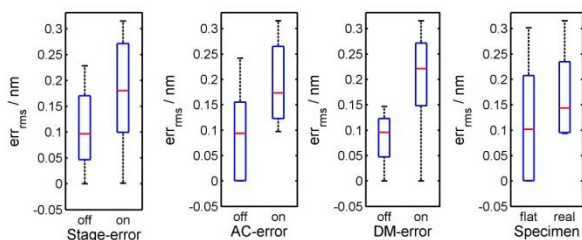


Abb. 3 Typ. Sensitivitätsanalyse eines 800 mm Scans für die vier Gruppen (von links nach rechts: Führungsfehler, Autokollimatorfehler, Fehler des Doppelspiegel-systems und Einfluss der Prüflingstopographie)

4 Reale Experimente

Abb. 4 zeigt die gemessenen Steigungen für 7 Scans am Glasprüfling, der in Abb. 1 zu sehen ist für die Direkt-Deflektometrie.

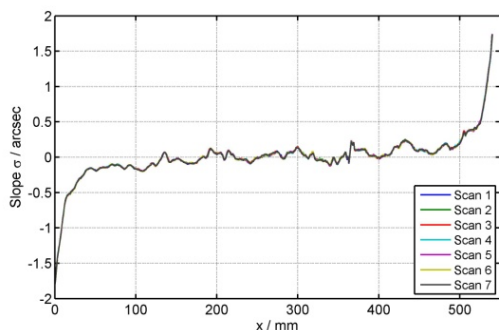


Abb. 4 Gemessene Steigungen von 7 Scans für die Direkt-Deflektometrie mit einer Scanlänge von 540 mm

Aus den gemessenen Steigungen ergeben sich durch Integration die Topographien in Abb. 5.

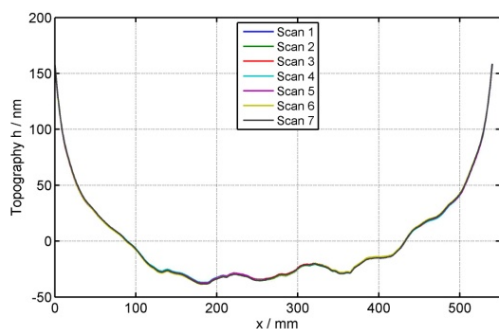


Abb. 5 Gemessene Topographien der 7 Scans

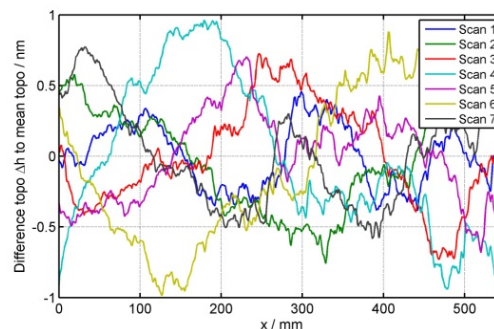


Abb. 6 Abweichungen der gemessenen Topographien

Abb. 6 zeigt die Abweichungen vom Mittelwert, die hier +/- 1 nm (pv) betragen.

5 Ausblick

Durch Verbesserungen wie z. B. den Einsatz eines Doppelspiegels anstatt eines Pentaprismas und Verbesserungen in der Winkelbestimmung, z. B. durch eine höhere Anzahl an Mittelungen sollen die Messungen weiter verbessert und optimiert werden. Damit sollen dann Reproduzierbarkeiten von deutlich unter 1 nm und Unsicherheiten unter 1 nm erreicht werden.

Die Messunsicherheiten werden mit Hilfe der Simulationsumgebung berechnet und Vergleichsmessungen mit anderen Instrumenten durchgeführt. Anschließend sind Messungen für Kunden möglich.

Literatur

- [1] G. Ehret, M. Schulz, M. Baier, A. Fitzenreiter: A new optical flatness reference measurement system; DGaO-Proceedings, 110. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO), (2009), http://www.dgao-proceedings.de/download/110/110_p22.pdf
- [2] M. Schulz, G. Ehret, M. Stavridis, C. Elster: Concept, design and capability analysis of the new Deflectometric Flatness Reference at PTB, Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. A616, pp. 134-139, (2010)
- [3] M. Schulz, G. Ehret, A. Fitzenreiter: Scanning deflectometric form measurement avoiding path-dependent angle measurement errors; Journal of the European Optical Society: Rapid Publications (2010), www.jeos.org/index.php/jeos_rp/article/view/10026/596
- [4] R. D. Geckeler: Optimal use of pentaprisms in highly accurate deflectometric scanning, Meas. Sci. Technol. 18, 115-125 (2007)
- [5] G. Ehret, M. Schulz, A. Fitzenreiter, M. Baier, W. Jöckel, M. Stavridis, C. Elster: Alignment methods for ultraprecise deflectometric flatness metrology, Proc. of SPIE: 8082, pp. 808213-1 - 808213-8 (2011)