

Vergleich von hochgenauen deflektometrischen Verfahren für die Ebenheitsmetrologie

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

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
**Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin

mailto: gerd.ehret@ptb.de

An der PTB werden zur Zeit neue deflektometrische Referenzsysteme zur hochgenauen Ebenheitsmessung installiert. Dabei kommen unterschiedliche deflektometrische Verfahren zum Einsatz, die mit virtuellen Experimenten analysiert und verglichen werden. Genauigkeiten im Subnanometerbereich sind für Prüflinge bis zu einem Meter möglich.

1 Überblick der hochgenauen deflektometrischen Verfahren

Deflektometrische Verfahren bieten die Möglichkeit der absoluten Topographiebestimmung von nahezu ebenen Flächen mit Subnanometer-Unsicherheiten. Als Ebenheitsreferenz wird die geradlinige Ausbreitung des Lichts verwendet. Die Messung der Topographie wird durch rückgeführte Winkel- und Längenmessung realisiert. Zur rückgeführten Winkelmessung wird ein durch die PTB kalibrierter Autokollimator eingesetzt.

Das Prinzip der direkten Deflektometrie ist in Abb. 1 dargestellt. Der Prüfling wird mit einem Pentaprisma oder einem sog. Doppelspiegel (Strahlableitung um 90°) optisch abgetastet und dabei die lokalen Steigungen der Oberfläche mit einem hochgenauen Autokollimator gemessen. Durch Integration der Steigungen erhält man die Topographie.

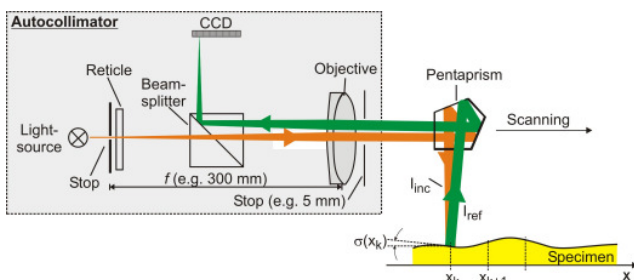


Abb. 1 Prinzipskizze der Deflektometrie zur hochgenauen Ebenheitsmessung

Neben der Direkt-Deflektometrie gibt es auch die Möglichkeit der sog. Differenz-Deflektometrie [1,2]. Hierbei werden Steigungen an verschiedenen Messorten gemessen und daraus Differenzsteigungen gebildet. Aus diesen Differenzsteigungen werden mittels der sogenannten „Shearing“-Mathematik [1] die Steigungen rekonstruiert, deren Integration wieder zur Topographie führt.

Vorteilhaft bei der Direkt-Deflektometrie ist, dass es ein schnelles und einfach auszuwertendes Verfahren ist. Vorteilhaft bei der Differenz-Deflektometrie sind die konstanten optischen Weglängen an den Shear-Positionen und der geringe Einfluss einer (unerwünschten) Probenkipfung von Differenzmessung zu Differenzmessung.

Beide Deflektometrieprinzipien sind in dem neuen Ebenheitsmesssystem (siehe Abb. 2), das zur Zeit an der PTB installiert wird, realisiert [3-5]. Mit diesem System können zukünftig Prüflingstopographien bis zu einer Länge von 1,0 m gemessen werden.

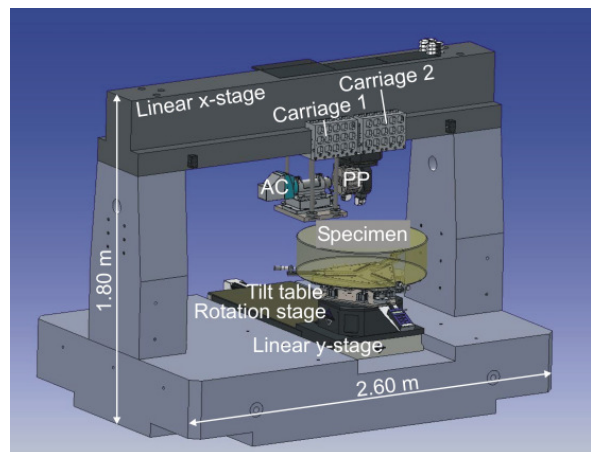


Abb. 2 Konstruktionskizze der deflektometrischen Ebenheitsreferenz für horizontal liegende Prüflinge (AC: Autokollimator, PP: Pentaprisma / Doppelspiegel)

Das in Abb. 2 dargestellte Ebenheitsmesssystem wurde als „virtuelle Maschine“ (Abb. 3) implementiert, um durch entsprechende Simulationen signifikante Unsicherheitsquellen zu erkennen oder unterschiedliche deflektometrische Verfahren vergleichen zu können.

2 Virtuelle Experimente zur Deflektometrie

Mit der Umsetzung des deflektometrischen Ebenheitsmesssystems als virtuelle Maschine können realitätsnahe, virtuelle Experimente durchgeführt werden.

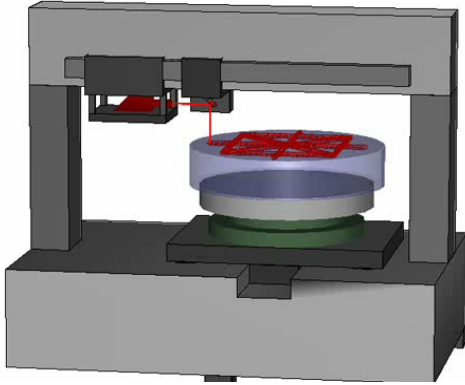


Abb. 3 Implementierung der deflektometrischen Ebenheitsreferenz als virtuelle Maschine

Folgende drei deflektometrische Methoden wurden verglichen:

a) Direkt-Deflektometrie mit festem AC

Der Autokollimator ist fest (Schlitten 1 bewegt sich nicht), während der Doppelspiegel den Prüfling scannt.

b) Differenz-Deflektometrie mit festem AC

Der Autokollimator ist fest und es werden Differenzsteigungen gemessen, die zur Auswertung herangezogen werden.

c) Differenz-Deflektometrie mit bewegtem AC

Damit die optische Weglänge an den Shear-Positionen konstant bleibt, wird der Autokollimator mitbewegt.

Für die einzelnen Komponenten der virtuellen Maschine wurden Annahmen getroffen. So wurde z. B. der Autokollimator mit einer ausgedehnten Lichtquelle modelliert, deren Apertur 3 mm beträgt. Für die Winkelmessung des Autokollimators wurde eine linear winkelabhängige und eine linear wegabhängige Messabweichung im Bereich von einigen hundertstel Winkelsekunden angenommen. Ein genaues AC-Modell ist bisher nicht bekannt. Die Führungen, an denen der Autokollimator und der Doppelspiegel befestigt sind, haben bei einem Verfahrensweg von 1 Meter Positionsabweichungen von 3 μm in x-, y- und z-Richtung, sowie Winkelabweichungen von 3 arcsec in allen drei Rotationsachsen. Der Doppelspiegel zur Strahlablenkung hat eine Ebenheit von 10 nm (pv). Die angenommene Topographie des Prüflings (siehe Abb. 3) hat einen pv-Wert von 200 nm mit Ortsfrequenzen im Bereich von 1 μm bis 1 m. In Tabelle 1 sind die berechneten Abweichungen für die drei unterschiedlichen deflektometrischen Verfahren für eine Scanlänge von 800 mm gegenübergestellt.

Alle drei Verfahren liefern Genauigkeiten im Subnanometerbereich und haben somit das Potenzial für eine hochgenaue Topographiebestimmung.

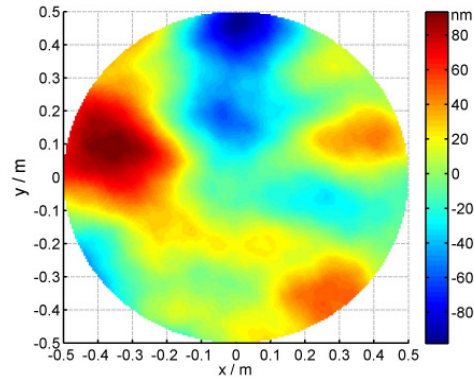


Abb. 4 Typische Prüflingstopographie für die virtuellen Experimente

Tab. 1 Ergebnisse der virtuellen Experimente für eine Scanlänge von 800 mm

Methode	Direkt-Deflektometrie mit festem AC	Differenz-Deflektometrie mit festem AC	Differenz-Deflektometrie mit bewegtem AC
Abweichung(rms)	0,700 nm	0,727 nm	0,623 nm

3 Diskussion, Ausblick

Es wurden erste Ergebnisse von virtuellen Experimenten zu drei unterschiedlichen deflektometrischen Verfahren vorgestellt. Für Scanlängen von 800 mm sind Abweichungen im Subnanometerbereich möglich, wenn die Führungen, der Autokollimator und des Doppelspiegels die angegebenen Eigenschaften besitzen. Zusätzlich zu dem hier vorgestelltem System wird ein ähnliches System für stehende Prüflinge aufgebaut [3-5], in dem jedoch prinzipbedingt nur das Verfahren der Differenz-Deflektometrie mit bewegtem AC realisiert werden kann. Das reale System, das zur Zeit installiert wird, wird vermutlich noch etwas bessere Eigenschaften besitzen als hier angenommen, so dass Unsicherheiten auch von großen Prüflingen (bis zu 1 Meter) im Subnanometerbereich möglich sind.

Literatur

- [1] C. Elster, I. Weingärtner: Solution to the Shearing problem, Applied Optics 38 (23):5024-5031, 1999.
- [2] R. D. Geckeler, I. Weingärtner: Sub-nm Topography Measurement by Deflectometry: Flatness Standard and Wafer Nanotopography, in Proc. of SPIE 4779:1-12, 2002.
- [3] G. Ehret, M. Schulz, M. Stavridis, C. Elster: A New Flatness Reference Measurement System Based on Deflectometry and Difference Deflectometry, Fringe 2009: 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology, 318 -323, 2009.
- [4] G. Ehret, M. Schulz, M. Baier, A. Fitzenreiter: A new optical flatness reference measurement system, DGaO-Proceedings 2009, www.dgao-proceedings.de
- [5] M. Schulz, G. Ehret, M. Stavridis, C. Elster: Concept, design and capability analysis of the new Deflectometric Flatness Reference at PTB, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 2010, doi:10.1016/j.nima.2009.10.108