

# Absolut-Abstandsreferenz für die Streifenreflexionstechnik zur Verringerung systematischer Messfehler

Marc Sandner\*, Wansong Li\*\*, Thorsten Bothe\*\*\*, Jan Burke\*\*\*\*, Christoph von Kopylow\*, Ralf B. Bergmann\*

\*BIAS - Bremer Institut für angewandte Strahltechnik, Bremen

\*\*VEW Vereinigte Elektronik Werkstätten GmbH, Bremen

\*\*\*GOM – Gesellschaft für optische Messtechnik mbH, Braunschweig

\*\*\*\* bis 31.6.2011: CSIRO Materials Science and Engineering – Australian Centre for Precision Optics, Lindfield

mailto: sandner@bias.de

Mit dem Streifenreflexions-Messverfahren lässt sich die Oberfläche reflektierender Objekte präzise vermessen. Um systematische Messfehler zu reduzieren, die sich aus der Ungenauigkeit der Abstandsmessung zwischen Messkopf und Objekt ergeben, wird ein Distanzsensor in den Messaufbau integriert. Verbesserungen in der Messgenauigkeit werden anhand von Testmessungen dargestellt.

## 1 Einführung

Auf der Streifenreflexionstechnik (SRT) basierende Messverfahren ermöglichen die Bestimmung von Oberflächengradienten, lokalen Oberflächenkrümmungen und Form von reflektierenden Objekten [1] mit hoher Auflösung und unter Verwendung einer strukturierten, inkohärenten Beleuchtung. Eine wichtige Ursache für systematische Fehler ist der Messfehler des Absolutabstands zwischen Messkopf und Objekt. Eine Möglichkeit zur korrekten Bestimmung dieses Abstands besteht in der Integration eines Distanzsensors in den Aufbau.

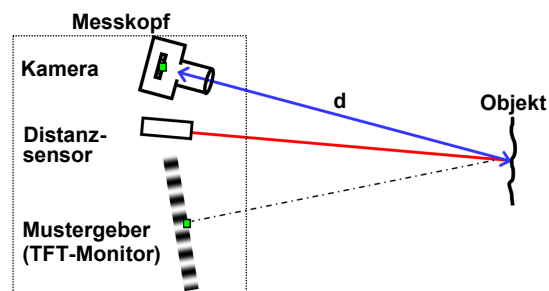
## 2 Streifenreflexionsmessung mit bekanntem Objektabstand

Bei der Messung mit einem SRT-Messaufbau wird die Verformung eines auf einem Mustergeber (TFT-Monitor) dargestellten Streifenmusters durch dessen Spiegelung an der zu untersuchenden Oberfläche ermittelt. Ergebnis dieses als Phasemessung bekannten Vorgangs ist eine Karte mit Koordinatenverknüpfungen von jedem Pixel in der Kamerasensorebene zu einer entsprechenden Position in der Mustergeberebene, die auf dem Sichtstrahl des Pixels liegt. Für ein jedes solches Sensor-/ Mustergeber-Koordinatenpaar (siehe Abb.1) herrscht jedoch eine Uneindeutigkeit bezüglich des Abstands des vermessenen Bereichs auf der Objektfläche zum Kamerazentrum und dem Kippwinkel zwischen dessen Oberflächennormale und der optischen Achse [2]. Zur Auflösung dieser Uneindeutigkeit sind verschiedene Verfahren bekannt [3]. Bei dem verwendeten Aufbau wird das Objekt so ausgerichtet, dass seine Oberfläche einen Punkt im Raum enthält der, entlang der optischen Achse der Kamera, einen definierten Abstand  $d$  zum Kamerazentrum hat. Durch Festlegung des Abstands  $d$  können dann mittels der korrespondierenden Sensor-/ Mustergeber-Koordinaten für den

entsprechenden Oberflächenpunkt dessen Normalenwinkel und daraus in einem iterativen Verfahren Gradienten und Formdaten für die gesamte Oberfläche berechnet werden. Die Positionierung des Objekts wurde bisher manuell mit visueller Kontrolle mittels zweier sich im Raum kreuzender Laserstrahlen aus handelsüblichen Laserpointern durchgeführt. Die Ungenauigkeit des so eingestellten Abstands  $d$  wird auf  $\pm 250 \mu\text{m}$  geschätzt. Zur Verringerung dieser Ungenauigkeit wurde in den SRT-Messaufbau ein Distanzsensor [4] integriert (siehe Abb.1), mit dem der Abstand  $d$  mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 1 \mu\text{m}$  ermittelt werden kann.

## 3 Experimentelle Ergebnisse

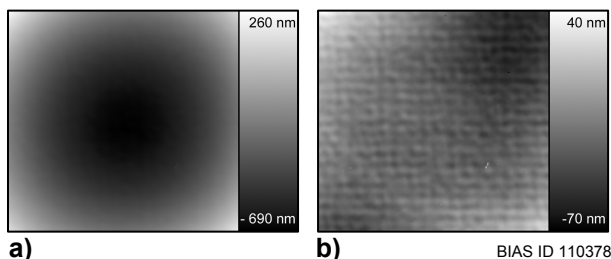
Zur Qualifizierung des oben beschriebenen Aufbaus wurde mit diesem eine Referenzmessung an einem ebenen Spiegel mit Oberflächenebenheit von  $\lambda/10$  (bei  $\lambda=632,8 \text{ nm}$ ) durchgeführt. Das Objekt wurde hierfür jeweils mit korrekt eingestelltem Abstand  $d_1$ , sowie mit Abstand  $d_2$  ( $= d_1 - 250\mu\text{m}$ ) vermessen, die Berechnung der Formdaten wurde unter Verwendung des Rekonstruktionsabstands  $d_1$  durchgeführt. Bei Auswertung der mit  $d_2$  erzeugten Messdaten ist ein ausgeprägter systematischer Fehler mit einer Amplitude von  $950 \text{ nm}$  zu erken-



BIAS ID 110748

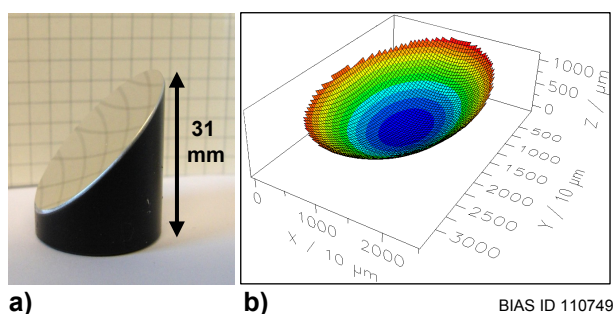
Abb.2 Streifenreflexions - Messaufbau. In den Messkopf bestehend aus Kamera und TFT-Monitor ist ein hochpräziser Distanzsensor integriert.

nen (siehe Abb.3 a). Bei Verwendung des korrekten Abstands  $d_1$  hat das berechnete Höhenbild nur noch eine Gesamtdynamik von 110 nm (siehe Abb.3 b). Es kann also angenommen werden, dass der systematische Messfehler durch Verwendung des neuartigen Aufbaus mit Distanzsensoren auf unter 110 nm reduziert werden konnte. Die in Abb.2 b erkennbaren verbleibenden Strukturen sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.



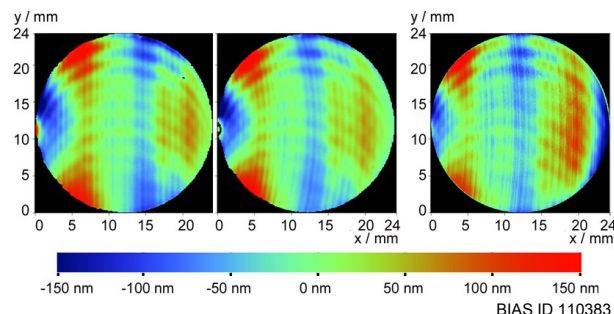
**Abb.3** Mit Referenzabstand  $d_1$  berechnete Höhenbilder (laterale Ausdehnung des Messfelds: 47 mm x 50 mm): **a)** mit um -250  $\mu\text{m}$  verstellten Abstand  $d_2$  (Dynamik: 950 nm), **b)** mit korrektem Abstand  $d_1$  (Dynamik: 110 nm).

Zur Qualifizierung des SRT-Systems anhand eines Objekts mit bekannter Oberfläche wurde mit diesem ein sog. 90°-Off-Axis Parabolspiegel (siehe Abb.4 a) vermessen. Dieser Parabolspiegel wurde bereits bei Untersuchungen des CSIRO unter Verwendung von zwei unterschiedlichen interferometrischen Nulltest-Aufbauten vermessen ([5], [6]). Für die Messung wurde das Objekt mit korrektem Abstand  $d_1$  zum Messkopf, und der mittleren Oberflächennormale in etwa parallel zur optischen Achse der Messkamera ausgerichtet. Die aus der Messung berechneten Höhendaten sind in Abb.4 b dargestellt. Um die Formabweichungsdaten aus den interferometrischen Messungen (Abb. 5, linke Bilder) mit den aus der SRT-System-Messung berechneten Höhendaten vergleichen zu können, wurde für letztere ein numerisches Fitting unter Verwendung einer Rotationsparaboloid-Form als Modell durchgeführt. Für den so berechneten nativen Fokus des Fit-Rotationsparaboloids ergibt sich ein Wert von 25,5 mm, der sich innerhalb der vom Hersteller angegebenen Toleranz ( $f_{\text{Nativ, Hersteller}} = 25,4 \text{ mm} \pm 0,254 \text{ mm}$ ) befindet. Die nach Abzug der berechneten Modellform von den Messdaten erhaltene Feinstruktur ist zu Vergleichszwecken



**Abb.4** Vermessener Off-Axis Parabolspiegel: **a)** Foto des Spiegels, **b)** Höhendaten, gemessen mit Streifenreflexionsaufbau incl. Abstandssensor.

entlang der x-Achse gestaucht, in Abb. 5 (rechtes Bild) dargestellt. Das Ergebnis stimmt in Dynamik und Struktur gut mit den ebenfalls in Abb. 5 (linke Bilder) dargestellten interferometrisch gemessenen Formabweichungen überein. Die unterschiedliche Durchbiegung der vertikal verlaufenden Rillen resultiert aus der unterschiedlichen Perspektive bei den Aufnahmen (siehe [5], [6]).



**Abb. 5** Linke Bilder: Ergebnisse der interferometrischen Nulltest-Messungen. Rechtes Bild: berechnete Feinstruktur aus Streifenreflexionsmessung (in x-Richtung gestaucht). Linke Bilder aus: J.Burke [5], [6].

#### 4 Zusammenfassung

Für Messungen mit der Streifenreflexionstechnik (SRT) konnte durch präzisere Bestimmung des Abstands von Messkopf zu Objekt mittels eines Abstandssensors im gemessenen Formbild eine Verbesserung des systematischen Fehlers von 950 nm auf unter 110 nm erreicht werden. Aus mit dem modifizierten Aufbau gemessenen Formdaten konnten nach Ausgleichsrechnung Formabweichungsdaten generiert werden, die eine hohe Übereinstimmung bezüglich Dynamik und Struktur zu interferometrisch gemessenen Formabweichungsdaten desselben Objekts aufweisen.

#### Literatur

- [1] T. Bothe, W. Li, C. von Kopylow, W. Jüptner: „High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection“, Optical Metrology in Production Engineering. Proceedings of the SPIE, Volume 5457, pp. 411-422, 2004
- [2] M. Knauer, J. Kaminski, G. Häusler: „Absolute Phasenmessende Deflektometrie“, DGaO Proceedings 2004
- [3] M. Heizman: „Moderne Methoden für bildaufnehmende 3-D-Inspektion für Oberflächen“, 37. Heidelberger Bildverarbeitungsforum, 2008
- [4] <http://www.micro-epsilon.de/download/products/cat-optoNCDT-24xx-konfokal-de.pdf>
- [5] J. Burke, K. Wang, A. Bramble: „Null test of an off-axis parabolic mirror. I. Configuration with spherical reference wave and flat return surface“, Optics Express, Vol. 17, Issue 5, pp. 3196-3210, 2009
- [6] J. Burke: „Null test of an off-axis parabolic mirror. II. Configuration with planar reference wave and spherical return surface“, Optics Express, Vol. 17, Issue 5, pp. 3242-3254, 2009