

# Chromatische Aberrationen in der Weißlichtinterferometrie

Reinhard Berger, Klaus Körner, Wolfgang Osten

Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

[mailto: berger@ito.uni-stuttgart.de](mailto:berger@ito.uni-stuttgart.de)

Bei der Weißlichtinterferometrie werden vertikale Auflösungen von bis zu 0,1 nm erzielt. Zur Beleuchtung wird eine breitbandige Lichtquelle eingesetzt. Somit stellen sich folgende Fragen: Wie wirken sich bei einem Weißlichtinterferometer chromatische Aberrationen auf die gemessenen Topografiewerte aus? Inwiefern muss das optische System chromatisch korrigiert sein?

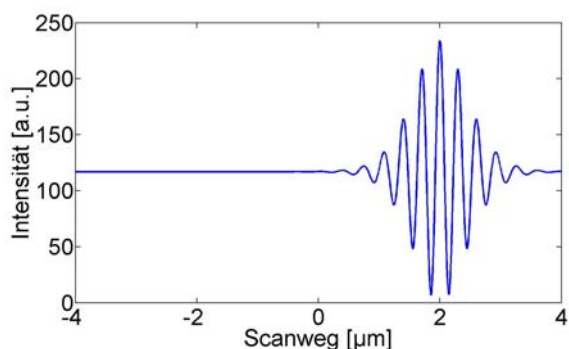
## 1 Einführung

Interferometrische Messverfahren zeichnen sich durch sehr hohe z-Auflösungen aus. Neben der klassischen Interferometrie, bei der eine monochromatische Lichtquelle eingesetzt wird, hat sich insbesondere auch die Weißlichtinterferometrie durchgesetzt. Hierbei wird eine breitbandige Lichtquelle mit typischerweise einigen 50 nm spektraler Breite verwendet. Vorteile gegenüber der klassischen Interferometrie ergeben sich dadurch, dass bei einem Weißlichtinterferometer die Höhenstufen zwischen zwei Pixel nur durch den Arbeitsabstand begrenzt sind und auch Objekte mit rauen Oberflächen vermessen werden können. Damit lassen sich unterschiedliche Messaufgaben aus der Mikrosystemtechnik, dem Maschinenbau, der Waferinspektion und der Nanotechnik durchführen.

Im Folgenden wird der Einfluss von chromatischen Aberrationen auf die Messunsicherheit bei der Weißlichtinterferometrie untersucht.

## 2 Signalentstehung

Bei der vertikal scannenden Weißlichtinterferometrie wird während einer Messung das Objekt relativ zum Objektiv, schrittweise in z-Richtung verschoben. Es ergibt sich ein Bilderstapel, der für jeden einzelnen Pixel ein sogenanntes Korrelogramm über dem Scanweg enthält (Abb. 1).



**Abb. 1** Berechnetes Weißlichtinterferenz-Signal (Korrelogramm) in einem Pixel der Kamera nach dem Durchscannen des Messobjekts.

Im vorliegenden Fall weist der zugehörige Objektpunkt eine Höhe von 2 µm auf. Dieser Wert kann aus der Lage des Korrelogramms ermittelt werden. In einem ersten Schritt wird hierzu mittels eines Algorithmus z.B. die Lage des Einhüllendenschwerpunkts numerisch bestimmt. Auffällig ist, dass die Phase am Einhüllendenschwerpunkt bei jeder beliebigen Objekthöhe idealerweise null ist. Unsicherheiten bei der Detektion der Einhüllendenposition führen dazu, dass sich bei der Auswertung idealer Signale dort kleine Phasenwerte ergeben. Diese Phasenwerte entsprechen im besten Fall genau den Unsicherheiten des ersten Auswerteschritts. Bei der Phasenauswertung werden deshalb die ermittelten Phasenwerte verwendet, um diese Unsicherheiten durch Subtraktion der Einhüllenden- und Phasenwerte zu minimieren.

## 3 Unsymmetrie bezüglich Dispersion

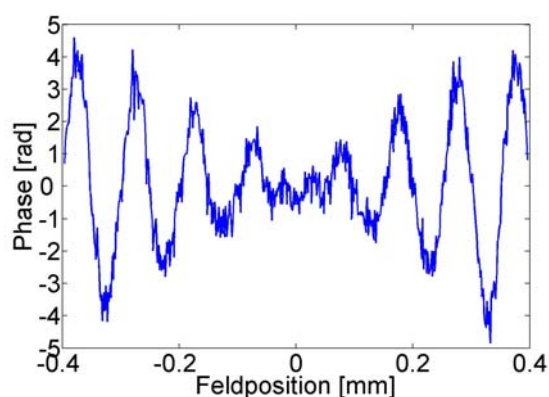
Bei unkompenzierten Weißlichtinterferometern kann in den beiden Interferometerarmen unter anderem eine Unsymmetrie bezüglich Dispersion vorliegen. Solche Unsymmetrien ergeben sich bei realen Systemen z.B. durch Imperfektionen bei deren Herstellung. Bei einem Linnik-System mit zwei völlig separaten Interferometerarmen bedeuten Unsymmetrien bezüglich Dispersion einen erheblichen systematischen Einfluss auf die Messunsicherheit [1]. Bei Mirau-Systemen jedoch handelt es sich um Common-Path-Interferometer, bei denen sich Imperfektionen des optischen Systems weitaus geringer bemerkbar machen.

## 4 Auswirkungen auf die Signalentstehung

Sind bei einem Weißlichtinterferometer Objekt- und Referenzarm bezüglich Dispersion unkompenziert, so werden auch die ermittelten Signale unsymmetrisch. Dabei ändert sich die Phasenlage des hochfrequenten Signalanteils bezüglich des Einhüllendensignals. Als Folge werden am Einhüllendenschwerpunkt Phasenwerte detektiert, die deutlich von null abweichen. Außerdem unterscheiden sich die ermittelten Höhenwerte bei Einhüllenden- und Phasenauswertung merklich.

## 5 Messungen

Es wurden experimentelle Untersuchungen mit einem Mirau-Weißlichtinterferometer bei einer numerischen Apertur von 0,4 und mit einer Weißlicht-Leuchtdiode mit ca. 200 nm spektraler Breite durchgeführt. Messungen an Objekten mit geneigten, spiegelnden Oberflächen zeigten, dass sich Einhüllenden- und Phasenauswertung deutlich unterscheiden. Wie in Kap. 4 diskutiert, weist dies auf eine unkompenzierte Dispersion in den beiden Interferometerarmen des Weißlichtinterferometers hin. Messungen an einem geneigten Spiegel, an einer Wälzlagerkugel und an einem spiegelnden Sinusnormal ergaben, dass die ermittelte Phase am Einhüllendenschwerpunkt mit der Form der Objekte korreliert. Zusätzlich konnte eine Feldabhängigkeit festgestellt werden (Abb. 2).



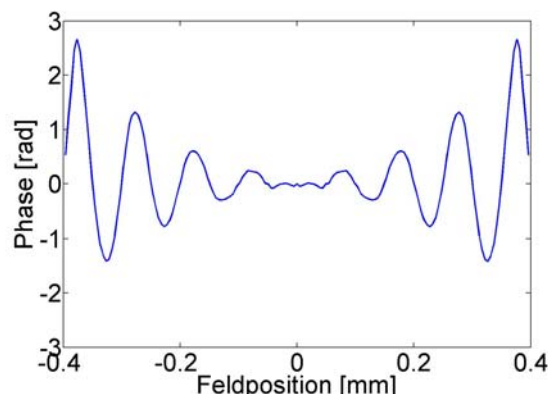
**Abb. 2** Gemessene Phase mit Unwrapping am Einhüllendenschwerpunkt eines spiegelnden Sinusnormals mit 100 µm Periode und 0,5 µm Amplitude.

## 6 Physikalisches Modell

Am Institut konnte durch Simulationen gezeigt werden, dass solche systematisch abweichenden Signale, welche auf eine Feld- und Objektabhängige Unsymmetrie bezüglich Dispersion hinweisen, auch bei vollständig kompensierten Mirau-Weißlichtinterferometern auftreten [2]. Mittels strahlenoptischer Simulation wurden dazu die optischen Pfadlängen für verschiedene Feld- und Pupillenpunkte durch das optische System ermittelt. Das untersuchte System weist – für beide Interferometerarme identisch – chromatische Aberrationen auf. Für den Objektpunkt auf der optischen Achse ergab sich ein sphärochromatischer Fehler (= sphärische Aberration in Abhängigkeit der Wellenlänge). Für Objektpunkte zum Rand des Feldes hin wurde ein zunehmender Farbquerfehler ermittelt.

Bei der Abbildung von geneigten, spiegelnden Oberflächen durch das Mirau-Weißlichtinterferometer haben die optischen Strahlen im Vergleich zum Referenzarm einen anderen Verlauf durch das optische System. Die Pupille im Objektarm wird unsymmetrisch ausgeleuchtet. Die Simu-

lation in Abb. 3 zeigt, dass dies bei einem Weißlichtinterferometer in Kombination mit den für Objekt- und Referenzarm identischen chromatischen Aberrationen zu der gemessenen Phase führt.



**Abb. 3** Simulierte Phase am Einhüllendenschwerpunkt eines spiegelnden Sinusnormals mit 100 µm Periode und 0,5 µm Amplitude.

## 7 Betrachtungen zur Messunsicherheit

Die durch die Einhüllenden- und Phasenauswertung ermittelten Höhenwerte des vermessenen Sinusnormals weichen bis zu +/- 200 nm voneinander ab. Durch numerische Simulation konnte gezeigt werden, dass die Phasenauswertung Messabweichungen aufweist, die etwa um den Faktor 25 kleiner sind als die Messabweichungen bei der Einhüllendenauswertung.

## 8 Möglichkeiten zur Reduktion

Die Untersuchungen zur Optimierung des optischen Systems erfolgten anhand von Simulationen. Durch Ablenden können die beschriebenen Effekte reduziert werden. Ist für alle Feldpunkte die gleiche sphärochromatische Aberration vorhanden, gehen die Effekte sehr deutlich zurück. Weiterhin konnte durch Simulation gezeigt werden, dass bei einem Weißlichtinterferometer ohne chromatische Aberrationen die hier untersuchten systematischen Messabweichungen vollständig beseitigt werden können.

## 9 Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung (FKZ: 16SV1945) und Herrn Prof. Dr. Thomas Sure für die strahlenoptische Simulation.

## Literatur

- [1] A. Pförtner, J. Schwider: "Dispersion error in white-light Linnik interferometers and its implications for evaluation procedures", *Applied Optics*, Vol. 40, 6223-6228 (2001)
- [2] R. Berger, T. Sure, W. Osten: "Measurement errors of mirrorlike, tilted objects in white-light interferometry", *Proc. SPIE*, Vol. 6616, 66162E (2007)