

# Absolute Entfernungsmessung über mehrere Millimeter ohne bewegliche Elemente

Martin Sommerfeld, Michael Schulz

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

mailto:Martin.Sommerfeld@PTB.de

Es wird ein Konzept vorgestellt, basierend auf der Weißlichtinterferometrie, mit dem es möglich ist eine Messstrecke von mehreren Millimetern zu vermessen ohne die Referenzstrecke anpassen zu müssen. Dazu wird ein verkipptes Blazegitter verwendet, das in unserem Fall als Stufenspiegel dient.

## 1 Einleitung

Bekannte Konzepte der optischen absoluten Entfernungsmessung basieren auf der Messung von Laufzeiten, der Modulation eines oder mehrerer Laser, oder aber der Weißlichtinterferometrie (WLI). Bei Verwendung einer kurzkohärenten Lichtquelle in der WLI entsteht ein Interferogramm nur in dem Bereich, wo sich Mess- und Referenzarm um weniger als die Kohärenzlänge unterscheiden. Dies wird typischerweise erreicht durch Verschieben eines Referenzspiegels. Hier wird nun ein Konzept vorgestellt, welches auf eine Verschiebung verzichten kann, da als Referenz ein Stufenspiegel (geblazetes IR-Gitter) verwendet wird (Abb. 1).

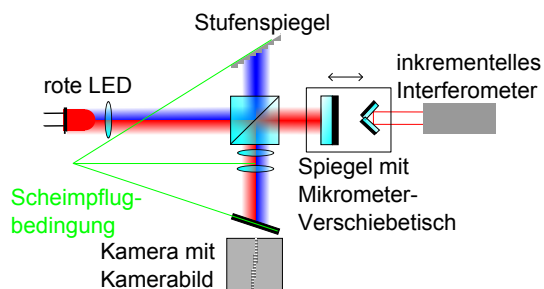


Abb. 1 Mess- und Kalibrieraufbau

## 2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau basiert auf dem Twyman-Green-Interferometer. Das Licht einer roten LED wird durch eine Linse kollimiert, bevor es am Strahlteiler aufgespalten wird in Mess- und Referenzstrahl. Der Messstrahl wird an einem ebenen Spiegel reflektiert, während der Referenzstrahl an einem gestuften Spiegel reflektiert wird. Dadurch werden lateral getrennt verschiedene Entfernungen im Referenzstrahl realisiert. Im Strahlteiler interferieren Mess- und Referenzstrahl wieder und in dem Bereich, wo der zurückgelegte Weg beider Strahlen sich um weniger als die Kohärenzlänge unterscheiden, entsteht ein typisches Weißlichtinterferogramm. Auf der Kamera entsteht somit das in Abb. 2 gezeigte Bild. Durch Einbeziehung der Scheimpflugbedingung wird die Abbildung optimiert, so dass

der ganze Stufenspiegel scharf abgebildet wird. Um Fehler der CCD-Kamera zu eliminieren wird ein Dunkel- und ein Weißabgleich durchgeführt.

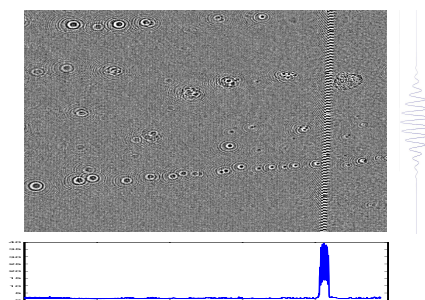


Abb. 2 Kamerabild mit Interferogramm-Linie (rechts). Die Detektion der Interferenz ist unten zu sehen.

Ein vergleichbarer Aufbau wurde bereits 2003 an der RWTH Aachen realisiert [1]. Der dort verwendete Stufenspiegel war im Gegensatz zu Unserem, welcher kommerziell erworben wurde, diamantgedreht und hatte deutlich weniger Stufen und somit einen kleineren Messbereich von 700  $\mu\text{m}$ .

## 3 Auswertung

Im Folgenden werden zwei Auswertestrategien vorgestellt. Für beide wird zuerst spaltenweise die mittlere Helligkeit abgezogen, bevor dann das Signal punktwise quadriert und spaltenweise aufsummiert wird, um das Interferogramm zu finden. Dadurch erhält man ein Signal, welches unter dem Kamerabild (Abb. 2) angedeutet ist. Im Folgenden ist der interessante Ausschnitt aus dem unteren Bild der Abb. 2 und das dazugehörige Interferogramm dargestellt (Abb. 3).

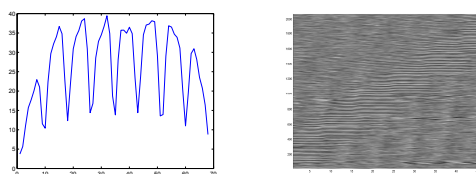


Abb. 3 a) Ausschnitt aus Abbildung 2 unten, b) zugehöriges Interferogramm

Anhand der Maxima der spaltenweisen Summe werden die sechs beleuchteten Stufen identifiziert. Eine Möglichkeit der Auswertung ist die spaltenweise Hilberttransformation [2]. Man erhält zwei Signale die um 90° zueinander verschoben sind. Durch Betragsbildung lässt sich die Einhüllende rekonstruieren und durch Bildung des Tangens, die Phase im Maximum der Einhüllenden bestimmen. An die so bestimmten Positionen der Maxima plus Phase umgerechnet in Pixel wird nun im ersten Schritt eine Gerade gefittet. Da bei der Verschiebung des Spiegels die Interferogramme vertikal verschoben werden, wird also auch diese Gerade vertikal verschoben. Um dies auszugleichen wird die horizontale Position der Geraden in der vertikalen Mitte der Kamera bestimmt. Dies liefert für jedes Bild eine Pixelposition.

Eine andere Art der Auswertung beinhaltet die Rekonstruktion der Topographie des Stufenspiegels nach folgendem Verfahren: Für das Signal in jeder Spalte wird ein Interferogramm der Form  $I = I_0 * (1 + \exp[-4 * (\frac{x-x_0}{l_c})^2]) * \cos(4\pi \frac{x-x_0}{\lambda} - \phi)$  in den Parametern  $x_0$  und  $\phi$  gefittet.  $I_0$ ,  $l_c$  und  $\lambda$  werden einmalig für eine Stufe im Zentrum des Kamerabil-des bestimmt und anschließend für die ganze Auswertung festgehalten. Für jedes Pixel wird die Entfernung zum Maximum der Einhüllenden und die Abweichung vom gefitteten Interferogramm bestimmt.

#### 4 Kalibrierung

Um für die Kalibrierung des Messgerätes die verfahrenere Strecke aufzuzeichnen, befindet sich auf dem Schlitten mit dem Messspiegel ebenso ein Retroreflektor, dessen Entfernung zu einem feststehenden Strahlteiler des inkrementellen Interferometer gemessen wird. Der Brechungsindex der Luft wird über eine Messung der Temperatur, Luft und Feuchte mit Hilfe der Edlén-Formel bestimmt [3]. Aus der vorher beschriebenen Auswertung erhält man durch das erste Verfahren für jedes Bild eine Pixelposition, die zusammen mit den verfahreneren Wegen einen beinahe linearen Zusammenhang erfüllt (Abb 4 a). Es wird eine Gerade angefitet. Um diese Kalibrierung zu überprüfen wurde eine Messung durchgeführt, aus dem Kamerabild nach dem ersten Verfahren eine Pixelposition berechnet, diese mittels der Kalibriergeraden umgerechnet in eine Entfernung und dann verglichen mit der inkrementell gemessenen Entfernung. Die Standardabweichung liegt im Bereich von 385 nm (Abb. 4 b).

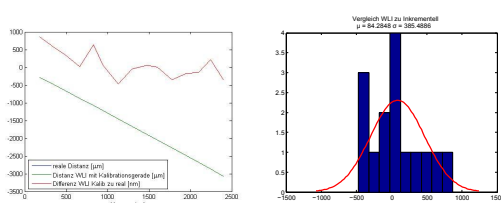


Abb. 4 a) Vergleich inkrementelles Messsignal zu gefitteter Gerade, b) Histogramm der Differenz

Im zweiten Verfahren wurde wie zuvor beschrieben für jedes Pixel die Entfernung vom Maximum der Einhüllenden und die Abweichung vom gefitteten Interferogramm bestimmt. In der Kalibrierung wird nun dem Maximum der Einhüllenden der gemessene Wert zugeordnet und für die benachbarten Pixel die berechnete Pixel-Abweichung in nm umgerechnet. Dadurch entsteht für jede Stufe im Bereich des Interferogramms eine Teiltopographie. Um die Topographie des gesamten Stufenspiegel zu ermitteln, wurden Messungen im Abstand von 250 nm durchgeführt und sämtliche rekonstruierten Teiltopographien mit der jeweils bekannten Position gestitcht. Zur Kontrolle wurde hier ebenso eine Messung nach dem folgenden Verfahren durchgeführt: Aus den aufgenommenen Bildern wurden für die sechs beleuchteten Stufen die Maxima der Einhüllenden wieder mit einem Fit bestimmt. Anschließend wurde an diesen Stellen die Entfernung aus der vorher berechneten Topographie entnommen und darüber gemittelt (Abb. 5).

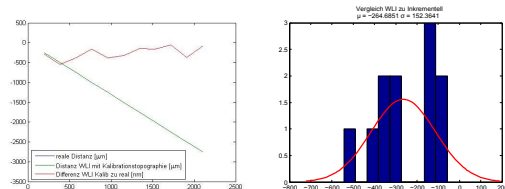


Abb. 5 a) Vergleich inkrementelles Messsignal zu rekonstruierter Topographie des Stufenspiegels, b) Histogramm der Differenz

#### 5 Zusammenfassung

Wie man den Bildern entnehmen kann, liegt die Standardabweichung der Kontrollmessungen im Bereich von einigen hundert Nanometern. Mögliche Ursachen liegen in der Fluktuation der Umweltbedingungen im Weißlichtinterferometer (für das inkrementelle Interferometer, werden diese korrigiert) oder aber einer nicht ganz perfekten Ausnutzung der Scheimpflugbedingung.

#### Literatur

- [1] C. Bosbach, "Miniaturisiertes Weißlicht-Interferometer mit hoher Messfrequenz für die absolute Abstandsmessung," Ph.D. thesis, RWTH Aachen (2003).
- [2] R. W. M. Fleischer, H. Tiziani, "Fast algorithms for data reduction in modern optical three-dimensional profile measurement systems with MMX technology," Applied Optics **39**(8), 1290–1297 (2000).
- [3] E. P. G. Bönsch, "Fit of Edlén's formulae to measured values of the refractive index of air," (SPIE, Conference on Recent Developments in Optical Gauge Block Metrology, 1998).