

Absolute Längenmessung in einem polarisationsoptischen Weißlichtinterferometer

Vinzenz Ullmann, Eberhard Manske

Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau

<mailto:vinzenz.ullmann@tu-ilmenau.de>

Für die Untersuchung achromatischer Polarisationsoptiken zum Einsatz in der interferometrischen Längenmesstechnik wurde ein fasergekoppeltes Tandeminterferometer aufgebaut und getestet. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Detektion und der rechnergestützten Verarbeitung der charakteristischen Interferenzsignaturen kurzkohärenter Lichtquellen.

1 Einleitung

In der Mikro- und Nanomesstechnik haben sich seit vielen Jahren laserinterferometrische Planspiegelinterferometer etabliert [1]. Sie zeichnen sich vor allem durch eine hohe Messauflösung ($<0,1\text{nm}$), hohe Dynamik ($v=500\text{mm/s}$), große Messbereiche ($>15\text{m}$) [2] und Nichtlinearitäten $<0,3\text{nm}$ [3] aus. Allerdings gibt es ohne festen Bezugspunkt keine Möglichkeit, absolute Strecken zu bestimmen. Hier bietet die Kombination mit einem Weißlichtinterferometer eine Lösung des Problems, indem durch den Einsatz einer kurzkohärenten Lichtquelle eine örtlich begrenzte Interferenzsignatur als feste Marke erzeugt und erfasst wird [4].

2 Experimentalaufbau und Funktionsprinzip

Für die Realisierung eines Weißlichtinterferometers zur Messung absoluter Strecken wurde ein Tandemaufbau nach Matsumoto et al. [5] adaptiert und mit achromatischen Verzögerungsplatten und achromatisch polarisierenden Strahlenteilern ausgestattet. Des Weiteren konnte ein Planspiegelinterferometer der Firma Sios Meßtechnik GmbH in den Tandemaufbau integriert werden. Der Aufbau ist in Abb. 1 dargestellt. Das kollimierte Strahlenbündel (1) der verwendeten LED wird im breitbandig-polarisierenden Strahlteiler (3) geteilt. Die erste linear polarisierte Wellenfront durchläuft den Teilerwürfel direkt und trifft auf die achromatische $\lambda/2$ -Platte, wodurch sie im zweiten Teilerwürfel reflektiert wird. Die zweite linear polarisierte Wellenfront wird bereits im ersten Teilerwürfel reflektiert, durchläuft je zweimal zwei achromatische $\lambda/4$ -Platten und folgt daraus resultierend der ersten Wellenfront mit einem Phasenversatz von $2\cdot d$ nach. Aufgrund der Drehung in der $\lambda/2$ -Platte kann sie den zweiten Teilerwürfel direkt in Richtung der CCD-Kamera durchlaufen. Die erste Wellenfront erhält nun ihrerseits einen Phasenversatz von $2\cdot a$. Die durchlaufenen Glaswege sind für beide Wellenfronten nahezu gleich, woraus sich nun für den Fall, dass a und d gleich groß sind, eine Weißlicht-

interferenzsignatur auf der CCD-Matrix ergibt. Damit beide Wellenfronten nach dem zusammenführenden miteinander interferieren, kommt ein dritter Teilerwürfel zum Einsatz, der um 45° und -45° zu den beiden senkrecht stehenden Polarisations Ebenen der Wellenfronten geneigt ist.

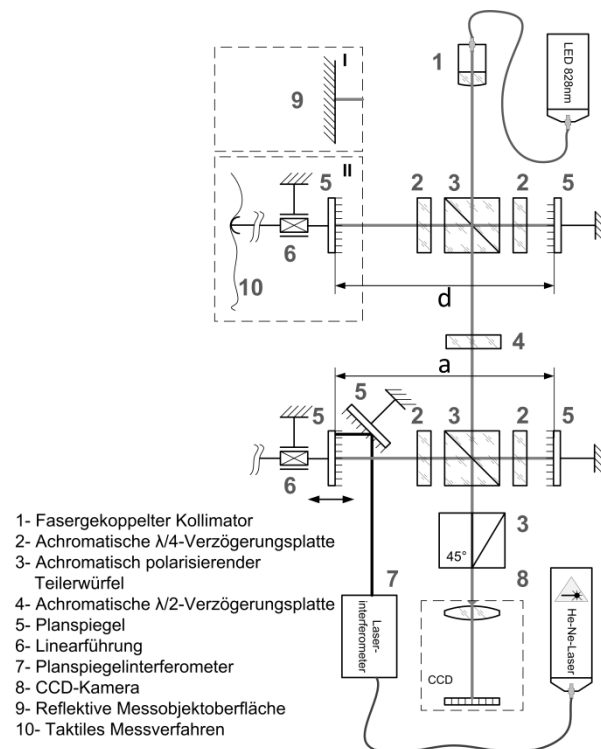


Abb. 1 Optisches Schema des adaptierten Tandeminterferometers.

3 Achromatische Polarisationsoptik

Um die Lichtausbeute zu erhöhen und um die Anzahl an Nebensignaturen zu reduzieren, die bei der gekoppelten Weißlichtinterferenz [6] entstehen, wurde das in der Laserinterferometrie genutzte Prinzip der Strahlführung linear polarisierter Lichtwellen auf das Weißlichtinterferometer übertragen. Dies ermöglicht auch den Einsatz vergleichsweise leistungsschwacher fasergekoppelter Infrarotdioden aus dem Bereich der Kommunikationstechnik,

welche gegenüber der üblicherweise eingesetzten SLDs eine technisch einfachere Umsetzung der Ansteuerung bieten und sich durch eine hohe Langlebigkeit und einen kostengünstigen Preis auszeichnen. Aufgrund der höheren Lichtausbeute im polarisationsoptischen Interferometer erhält man auch beim Einsatz einfacher LEDs ein rauscharmes, kontrastreiches Bild.

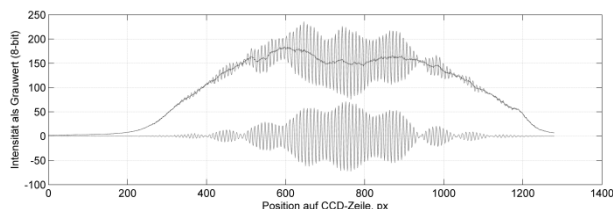


Abb. 2 Signatur auf der CCD-Matrix (8-bit), dargestellt ist die Grundhelligkeit (dunkelgrau) die reale Weißlichtsignatur (oben) und Differenz aus beiden (unten).

In Abb. 2 ist diese im experimentalen Aufbau erzeugte Weißlichtinterferenzsignatur dargestellt.

4 Signaturdetektion und -auswertung

Die nichtlinearen Eigenschaften der achromatischen Optiken wirken sich auf die Form der Signatur und den Interferenzkontrast aus. Die Signatur in Abb. 2 weist eine Deformation durch Phasensprünge auf, sodass deren Form unsymmetrisch ausgeprägt ist. Allerdings ändern sich nur die Amplituden der Signatur nicht jedoch die Phasenlage der Knotenpunkte bei einer Lageänderung auf der CCD-Matrix. Die besten Ergebnisse für die Nullpunktdetektion der Signatur ergaben sich durch eine Kreuzkorrelation mit einer synthetischen Weißlichtsignatur. Der Nullpunkt ist durch die Totstrecke $t=0$ definiert, was erfüllt ist, wenn die Strecken a und d die gleiche optische Länge besitzen. Bei Reproduzierbarkeitsmessungen zur Nullpunktdetektion wird der mit dem Laserinterferometer angetastete Spiegel im zweiten Interferometersegment in $1\mu\text{m}$ -Schritten verfahren. Die genaue Position des Spiegels wird durch das Laserinterferometer erfasst und in jeder angefahrenen Spiegelposition mit einer ermittelten Nullpunktposition der Signatur auf der Matrix verknüpft. Nach einem Intervall von $30\mu\text{m}$ wird nicht genullt, sondern wiederholend am Startpunkt gemessen. Im Ergebnis lässt sich so für jedes Messintervall eine Regressionsgerade erstellen, die den Zusammenhang zwischen der Spiegelposition und dem Nullpunkt der Signatur auf der CCD-Matrix beschreibt. Für 10 Intervalle und einer Messstrecke von $d=190\text{mm}$ konnte eine Detektionsreproduzierbarkeit von $\Delta x < 154\text{nm}$ ermittelt werden.

5 Kurzkohärente Lichtquelle

Bei der verwendeten Lichtquelle handelt es sich um eine fasergekoppelte Infrarotdiode mit einer mittleren Wellenlänge von $\lambda_c=828\text{nm}$. Die spektrale

Halbwertsbreite (FWHM) des nahezu gaußförmigen Spektrums beträgt 83nm . Damit besitzt sie ein breiteres Spektrum als SLDs mit vergleichbarer mittlerer Wellenlänge, z.B. $49,6\text{nm}$ FWHM bei $840,2\text{nm}$ [7]. Dies wirkt sich positiv auf die Breite der Interferenzsignatur aus, da eine größere spektrale Breite die Kohärenzlänge verkürzt. Eine schmalere Signatur verbessert wiederum die Reproduzierbarkeit der Nullpunktdetektion, da sich die Amplitude vom Nullpunkt aus stärker verringert.

6 Zusammenfassung

Am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik konnte ein fasergekoppeltes Weißlichtinterferometer mit achromatischer Polarisationsoptik in Betrieb genommen werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich achromatische Teilerwürfel und Verzögerungsplatten für die Umsetzung eines Verfahrens zum Messen absoluter Längen eignen. Dadurch entstehen neue, kostengünstigere Möglichkeiten bei der Wahl einer geeigneten kurzkohärenten Lichtquelle.

7 Danksagung

An dieser Stelle gilt allen Kollegen und Kooperationspartnern besonderer Dank für ihr Mitwirken bei der Erarbeitung der hier veröffentlichten Ergebnisse. Des Weiteren wird dem BMWi/AIF gedankt, der die im Rahmen eines Kooperationsprojektes entstandenen Ergebnisse finanziell gefördert hat.

Literatur

- [1] G. Jäger, T. Hausotte, E. Manske, H.-J. Büchner, R. Mastyló, N. Dorozhovets, N. Hofmann: „Nanomeasuring and nanopositioning engineering“ in: *Measurement* **43**, 1099-1105 (2010)
- [2] Sios Meßtechnik GmbH, „Dreistrahlinterferometer für große Meßbereiche – SP 15000 TR“, www.sios.de
- [3] H.-J. Büchner, G. Jäger, „A novel plane mirror interferometer“ in: *Measurement Science and Technology* **17**, 746-752 (2006)
- [4] S. A. H. Emam, „Investigation and Optimization of Detection Algorithms in White Light Interferometers“, *TU Ilmenau* (2014)
- [5] K. Matsumoto et al.: „Dimension Measuring Device and Method“, *Patent No. J2009186191* (2009)
- [6] F. Depiereux, N. König, T. Pfeifer, R. Schmitt, „Fiber-Based White-Light Interferometer With Improved Sensor Tip and Stepped Mirror“, in: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **23**(6), 2279-2283 (2007)
- [7] F. Depiereux, P. Lehmann, T. Pfeifer, R. Schmitt, „Fiber-optical sensor with miniaturized probe head and nanometer accuracy based on spatially modulated low-coherence interferogram analysis“, in: *Applied Optics* **46**(17), 3425-3431 (2007)