

Dreistrahlaserinterferometrie zur Topografievermessung ebener Flächen

Johannes Liebl, Hochschule Deggendorf, Technologicampus Teisnach

Bei der Vermessung von Geradheit und Ebenheit nahezu planer Flächen und Führungen werden vorrangig Autokollimationsfernrohre oder elektronische Neigungsmessgeräte eingesetzt. Eine weitere geeignete Messtechnik ist die Dreistrahlaserinterferometrie. Mit ihr können ebenso Winkel mit hoher Genauigkeit erfasst werden. Vor dem Einsatz neuer Techniken muss deren Eignung bezüglich Wiederholbarkeit und Genauigkeit in verschiedenen Anwendungsgebieten überprüft werden.

Laserinterferometer werden seit über 100 Jahren für die hochgenaue Vermessung von Wegstrecken eingesetzt und bis heute hat sich am grundsätzlichen Aufbau, der auf eine Entwicklung des Physikers Albert Abraham Michelson zurück geht, nichts geändert. Durch den verstärkten Einsatz elektronischer Detektoren und prozessorgesteuerter Auswerteeinheiten konnte die Genauigkeit weiter verbessert werden. Speziell in den letzten Jahren wurden Laserinterferometer immer schneller und durch die Trennung von Laserquelle und Messkopf, die nun durch Lichtwellenleiter verbunden sind, auch kompakter. Die Kompensation störender Umwelteinflüsse wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck geschieht bei aktuellen Geräten automatisch und verbessert die Genauigkeit der Geräte zusätzlich. Daher werden Laserinterferometer heutzutage als Referenzmessgeräte für andere Längenmessverfahren eingesetzt. Bei der Geradheits- und Ebenheitsbestimmung nahezu planer Flächen und Führungen werden jedoch vorrangig Autokollimationsfernrohre oder elektronische Neigungsmessgeräte verwendet. Die Eignung eines Dreistrahlaserinterferometers für diese Messaufgabe wurde am Technologicampus Teisnach empirisch überprüft und ausgewertet.

1 Autokollimatorfernrohr (AKF)

Bei einem AKF (Bild 1) wird ein paralleles (kollimiertes) Strahlenbündel auf einen Planspiegel abgebildet. Bei rechtwinkliger Ausrichtung von Strahl und Reflektor laufen die Strahlen in sich zurück. Das reflek-

tierte Licht wird fokussiert und von einem Detektor erfasst. Durch die Verkippung des Reflektors entsteht ein lateraler Versatz d der mit der Brennweite f zum Winkel α führt:

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \arctan \left(\frac{d}{f} \right) \quad (\text{Gl. 1})$$

Um hohe Auflösungen zu erzielen, wird die Brennweite f des Systems möglichst groß gewählt. In Kombination mit dem wenige Millimetern großen CCD-Chip ergibt sich ein relativ geringer Winkelmessbereich,

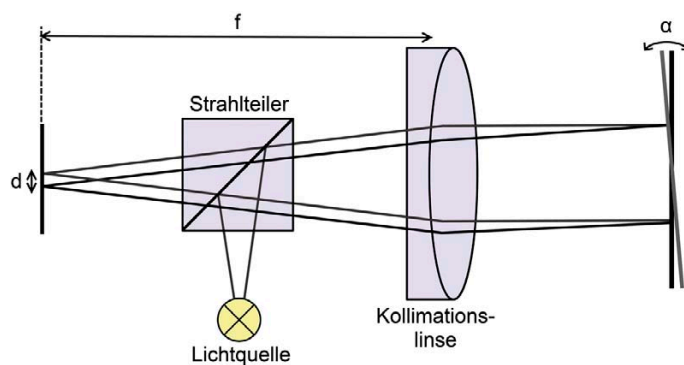
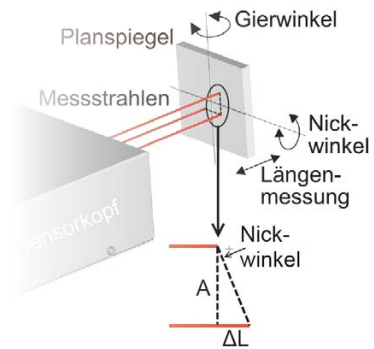


Bild 1: Prinzipskizze eines Autokollimators

der es erlaubt, die Kleinwinkelnäherung anzuwenden. Damit kann Gl. 1 weiter vereinfacht werden:

$$\alpha = \frac{d}{2 \cdot f} \quad (\text{Gl. 2})$$

Der technische Vorteil eines Autokollimators besteht darin, dass nach einer kurzzeitigen Strahlunterbrechung die Messung fortgesetzt werden kann. Dies ist bei einem Dreistrahlaserinterferometer nicht möglich, da hier stets Längenänderungen zu einer anfangs festgelegten Nullposition gemessen werden. Demnach führt ein kurzzeitiger Signalverlust zu einem Positi-



onsfehler der sich nur durch die Wiederholung der Messung beheben lässt. Ein weiterer Vorteil ist der über die Brennweite des Systems beliebig anpassbare Messbereich (Gl. 2). So kann für unterschiedliche Aufgaben ein individuell passendes Messgerät erstellt werden, das entweder einen großen Messbereich oder eine hohe Auflösung bietet.

2 Aufbau eines Michelson-Interferometers

Bei einem Michelson-Interferometer wird monochromatisches Licht der Wellenlänge λ an einem halbdurchlässigen Spiegel aufgeteilt (Bild 2). Dabei entstehen zwei Strahlen, die an Planspiegeln reflektiert werden, um anschließend an der Strahlteilerfläche miteinander zu interferieren. Bei einem Phasenversatz der beiden Strahlen von 180° ergibt sich eine destruktive Interferenz, was zur gegenseitigen Auslöschung führt. Liegt hingegen kein Phasenversatz vor, so spricht man von konstruktiver Interferenz. Bewegt man den Reflektor, so entsteht am Detektor ein sinusförmiges Signal, bei dem der Abstand zwischen zwei Maxima der halben Wellenlängen λ entspricht. Durch eine analoge Auswertung mit ausreichender Quantisierung n des so erhaltenen Signals lassen sich Auflösungen im Subnanometerbereich erzielen:

$$\Delta s = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{2^n} \quad (\text{Gl. 3})$$

Für einen roten He-Ne-Laser ($\lambda = 632 \text{ nm}$) ergibt sich mit einem 12Bit-Analog-Digitalwandler ($n = 12$) eine theoretische Auf-

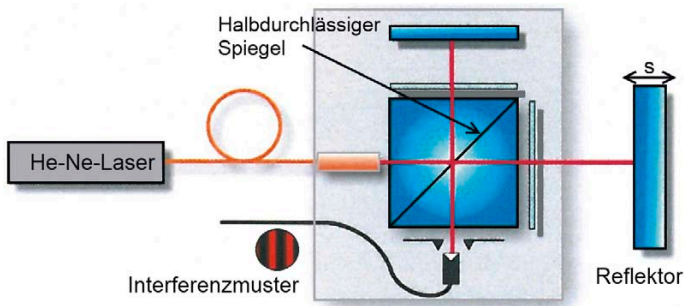


Bild 2: Aufbau eines Michelson-Interferometers

lösung des Laserinterferometers von $\Delta s = 0,077 \text{ nm}$. In der Praxis ist dieser Wert jedoch von weiteren Parametern, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, elektronisches Rauschen des Detektors und anderen Störfaktoren abhängig. Unter realen Testbedingungen ergibt sich dadurch eine reduzierte Genauigkeit, die sich im zweistelligen Nanometerbereich befindet. Diese kann aber durch die Reduzierung von Störeinflüssen noch verbessert werden.

2.1 Dreistrahlaserinterferometrie (DSI)

Bei einem Dreistrahlaserinterferometer handelt es sich um ein Längen- und Winkelmessgerät, bestehend aus drei einzelnen Michelson-Interferometern. Als Lichtquelle wird ein stabilisierter He-Ne-Laser verwendet, wodurch allen Messungen dasselbe Wellenlängennormal zugrunde liegt. Damit können gleichzeitig drei Positionen hochgenau vermessen werden [1]. Über die Strahlabstände A und die Längendifferenz ΔL der Messstrahlen kann nach der Durchführung der Messung Nick- und Gierwinkel anhand der folgenden Formel bestimmt werden (Bild 3):

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta L}{A}\right) \quad (\text{Gl. 4})$$

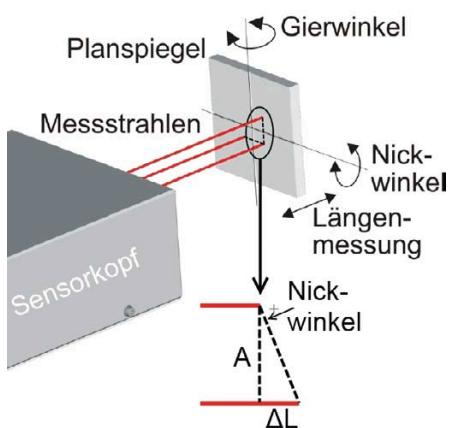


Bild 3: Messverfahren eines Dreistrahlinterferometers: Nick- und Gierwinkel sowie Position werden zeitgleich aufgenommen [1]

Der große Vorteil des Dreistrahlaserinterferometers ist die zusätzliche Erfassung der aktuellen Position des Reflektors, wodurch die im Folgenden beschriebene kontinuierliche Vermessung der Topografie erst möglich wird. Dieses neue Verfahren der Topografie-

bestimmung bietet vor allem bei schwer automatisierbaren Messaufgaben Vorteile hinsichtlich Genauigkeit und Zeitaufwand. Zusätzlich kann ein Dreistrahlaserinterferometer für verschiedenste andere Aufgaben verwendet werden, wie die Abnahme von Werkzeugmaschinen oder die Kalibrierung von Wegmesssystemen.

3 Topografiebestimmung mittels Winkelmessung

Die Methode zur Bestimmung der Oberflächentopografie mittels Winkelmessung ist für AKF und DSI gleich. Zunächst erfolgt die parallele Ausrichtung des Strahlengangs zum Messobjekt. Dazu wird der Reflektor zwischen Anfangs- und Endposition verschoben und die dabei entstehenden Winkelwerte durch Kippen des Messgeräts minimiert. Als Nächstes erfolgt die eigentliche Messreihe, in der ein Reflektor auf dem Prüfling in vorher definierten Abständen ΔL positioniert wird (Bild 4). Hier wird in den Punkten $P_n(x_n, y_n)$ der Nickwinkel α der vermessenen Topografie bestimmt, mit Hilfe dessen die Y-Position des jeweils nächsten Punkts berechnet werden kann:

$$X_n = X_{n-1} + \Delta L \quad (\text{Gl. 5})$$

$$Y_n = Y_{n-1} + \Delta L \cdot \tan(\alpha_{n-1}) \quad (\text{Gl. 6})$$

Unter Zuhilfenahme der Kleinwinkelnäherung kann Gl. 5 weiter vereinfacht werden:

$$Y_n = Y_{n-1} + \Delta L \cdot \alpha_{n-1} \quad (\text{Gl. 7})$$

Um Flächenstücke zu vermessen kann auch ein Raster orthogonaler Linien über den

Prüfling gelegt werden. Dies führt zu einer vollständigen dreidimensionalen Beschreibung der Topografie. Im Sinne eines Vergleichs zwischen AKF und DSI ist dies jedoch nicht nötig.

Durch die meist großen Abstände ΔL weist die ermittelte Oberfläche Unstetigkeitsstellen auf, die sie kantig erscheinen lässt (Bild 6).

4 Vergleichsmessungen

Um eine statistische Auswertung anfertigen zu können, wurde mit einem AKF und einem DSI jeweils fünf Mal eine Granitbank über eine Länge von 3,6 m vermessen. Verwendung findet ein Dreistrahlinterferometer von SIOS, Modell SP 2000 TR, mit einer Wegauflösung von 0,1 nm und einer Winkelauflösung von 0,02 arcsec. Durch den speziellen Kugelreflektor erhöht sich der maximale Messbereich des Dreistrahlinterferometers. Zum Vergleich dient ein Autokollimationsfernrohr mit Planspiegel von Möller Wedel, Modell Elcomat 2000, Typ 21970, mit einer Winkelauflösung von 0,05 arcsec. Der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten beträgt $\Delta L = 100 \text{ mm}$. Um möglichst gleiche Bedingun-

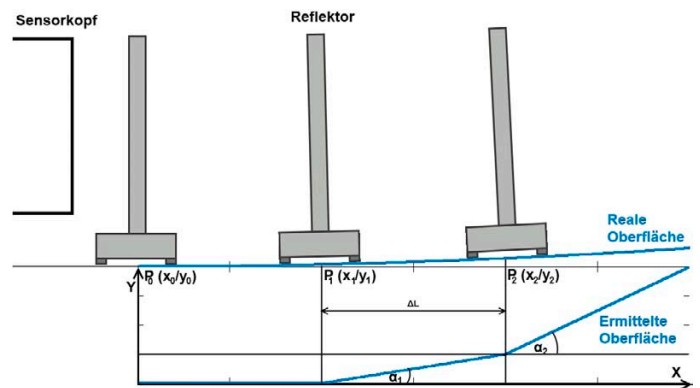


Bild 4: Topografievermessung mittels Winkelmessung an diskreten Reflektorpositionen

gen zu schaffen, war es nötig, den Kugelreflektor des DSI mittels eines Adapters an den Planspiegelreflektor des AKF anzubringen (Bild 5). Der Prüfling befindet sich in einem klimatisierten Messraum mit einer Temperaturstabilität von $\pm 0,5 \text{ K}$. Die beiden Messungen aus Bild 6 wurden an aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt.

4.1 Messergebnisse – Diskrete Messung

Für die Bestimmung der Oberfläche des Prüflings wurden Anfangs- und Endpunkte der durchgeführten Messungen zu null gesetzt und fünf Messungen zu einer Kurve gemittelt. Die in Bild 6 erkennbare, hohe Übereinstimmung beider Kurven zeigt, dass beide Messmethoden vergleich-



Bild 5: Messaufbau mit Verfahrslitten, Laserinterferometer und Granitbank

Ergebnisse erzielen. Die resultierenden Standardabweichungen der DSI- und AKF-Messung liegen jeweils bei zwei Mikrometern.

Die höchste Abweichung zwischen AKF- und Interferometermessung befindet sich bei einem Verfahrweg von 500 mm und liegt damit genau am Auflagepunkt des als Prüfling verwendeten Granitbalkens. Sie resultiert damit nicht aus einem systematischen Fehler der beiden Messverfahren, sondern aus unterschiedlichen Umwelteinflüssen an den beiden Messtagen, die eine Änderung der vermessenen Topografie hervorrufen. Die resultierende Verbiegung des Granitbalkens ist am Auflagepunkt am deutlichsten erkennbar.

4.2 Messergebnisse – Kontinuierliche Messung

Dreistrahlaserinterferometer bestimmen nicht nur der aktuelle Winkel, sondern gleichzeitig auch die Entfernung des

Reflektors. Wegen der kontinuierlichen Erfassung der Abstände ist eine „diskrete“ Verschiebung um bestimmte Abstände ΔL nach Gl. 4 nicht notwendig. Nach dem Start einer Messung muss lediglich der Verfahrslitten verschoben werden, während das DSI kontinuierlich Messwerte erfasst. Die Einstellungen des Interferometers waren:
Messfrequenz: 10 kHz
Mittelungen: 512
Abtastfrequenz: 19,53 Messwerte pro Sekunde

Als Resultat dieser Abtastfrequenz wird eine große Anzahl an Messpunkten aufgenommen (Bild 7) und der Abstand ΔL verringert sich von 100 mm auf 5 bis 6 mm, abhängig von der Verfahrensgeschwindigkeit des Reflektors. Dadurch werden die unter Kapitel 3 beschriebenen Unstetigkeitsstellen eliminiert. Die Standardabweichung der fünf aufgenommenen kontinuierlichen Topografien liegt wieder bei zwei Mikrometern was beweist, dass diese Methode des Messens keinen Einfluss auf den zufälligen Fehler der Messung hat.

5 Fazit und Ausblick

Mit der Durchführung der hier beschriebenen Messungen konnte gezeigt werden, dass neben einem Autokollimationsfernrohr auch ein Dreistrahlaserinterferometer für Winkelmessungen eingesetzt werden kann. Es weist bei dieser Anwendung keine erkennbaren Nachteile auf und bie-

tet mit der „kontinuierlichen“ Vermessung von Topografien zusätzlich die Möglichkeit, eine Fläche in sehr viel kürzerer Zeit und mit einer höheren lateralen Auflösung zu vermessen. Daraus ergibt sich eine hervorragende Eignung in Messmaschinen zur Echtzeiterfassung von Achsfehlern. Die Tauglichkeit zur Topografievermessung im einstelligen Mikrometerbereich muss noch in einem eigenen Versuchsaufbau geprüft werden. Hierbei ist ein größerer Aufwand bezüglich der Vermeidung störender Umwelteinflüsse nötig, um die Standardabweichung der Messung reduzieren zu können. Des Weiteren müssen die Auflagepunkte des vermessenen Prüflings beachtet werden, um den in Kapitel 4.1 beschriebenen Fehlereinfluss aufgrund sich ändernder Umgebungsbedingungen zu vermeiden.

Literaturhinweise:

- [1] Dreistrahlinterferometer mit Planspiegelreflektor, SIOS Messtechnik GmbH, www.sios.de/DEUTSCH/PRODUKTE/Sp-tr_d.pdf, Juli 2004
- [2] M. Weck, C. Brecher, *Werkzeugmaschinen – Messtechnische Untersuchungen und Beurteilungen, dynamische Stabilität*, 7. Auflage, S. 103

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing.(FH)
Johannes Liebl
Hochschule Deggendorf
– Technologicampus
Teisnach
Technologicampus 1
D-94244 Teisnach
Tel.09923/8045-412
Fax 0/9923/8045-421
eMail: johannes.liebl@hdu-deggendorf.de
Internet:
<http://tc-teisnach.hdu-deggendorf.de>



www.photonik.de ▶ Webcode 4003

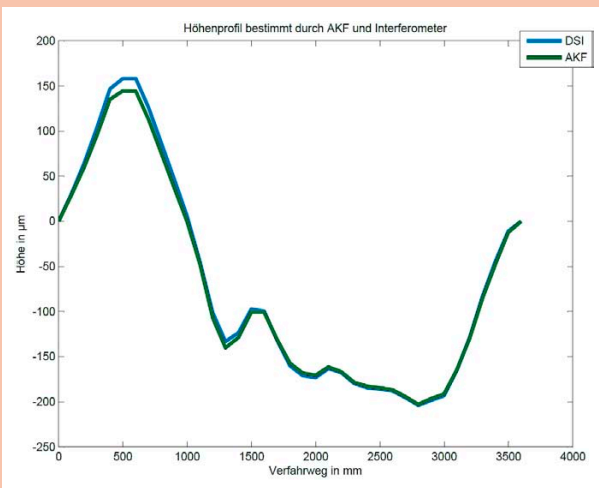


Bild 6: Höhenprofil bei diskreten Messungen mittels AKF und DSI; Gemitteltes Resultat aus fünf Messungen

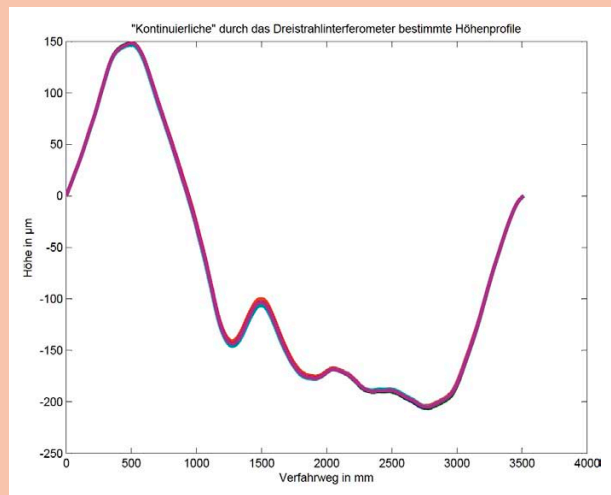


Bild 7: Höhenprofil bei kontinuierlicher Messung mittels DSI. Darstellung von fünf Einzelmessungen