

# Unsicherheitsanalyse von Keilwinkelmessungen mit einem wellenlängenschiebenden Interferometer

M. Schulz, H. Reinsch

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

mailto: Michael.Schulz@ptb.de

Zur Kalibrierung kleiner Keilwinkel von Planplatten wird ein Wellenlängenschiebendes Interferometer eingesetzt, das es erlaubt, mit einer Messung die Relation der äußeren Keilflächen zu ermitteln. Für das Messverfahren wird eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt.

## 1 Einführung

Planplatten mit kleinem Keilwinkel in der Größenordnung weniger Winkelminuten werden z.B. bei der Kalibrierung von Zentrierprüfgeräten eingesetzt. Während sich größere Keilwinkel hochgenau mittels eines Goniometers mit Autokollimator bestimmen lassen, sind Messungen bei kleinen Keilwinkeln in der Regel nicht möglich, da sich die Reflexe der beiden Prüflingsflächen nicht trennen lassen. Diese Trennung kann ein wellenlängenschiebendes Interferometer leisten.

## 2 Messung des äußeren Keilwinkels

Das verwendete Interferometer (Zygo VeriFire MST) hat eine Arbeitswellenlänge von ca. 633 nm, die um 0,2 nm (150 GHz) variiert werden kann. Bei der Messung wird eine Vielzahl von Interferogrammen bei unterschiedlichen Wellenlängen aufgenommen [1]. Jedes dieser Interferogramme stammt von der Überlagerung aller Kavitäten (siehe Abb. 1 und 2).

TF: Transmission flat  
P1: Prüflingsfläche 1  
P2: Prüflingsfläche 2  
Ref: Referenzfläche (plan)  
M: Messungen

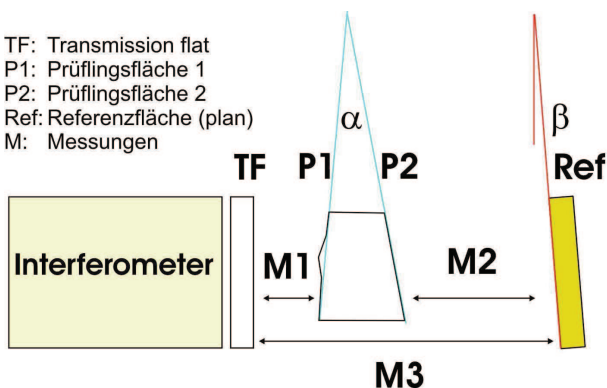


Abb. 1 Schematische Darstellung des optischen Aufbaus. Zu ermitteln ist der Keilwinkel  $\alpha$ .

Durch Analyse im Frequenzraum werden die einzelnen Kavitäten selektiv ausgewertet (Ergebnisse: M1, M2, M3). Der Verlauf der äußeren Keilflächen zueinander (K, siehe Abb. 3) ergibt sich aus der Kombination der einzelnen Kavitäten, wobei ggf. die Topografien der Referenzflächen (TF, Ref) berücksichtigt werden müssen.

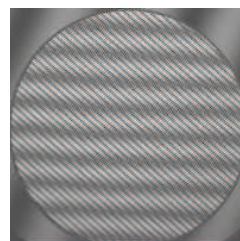


Abb. 2 Interferogramm mit mehreren Streifenmustern.

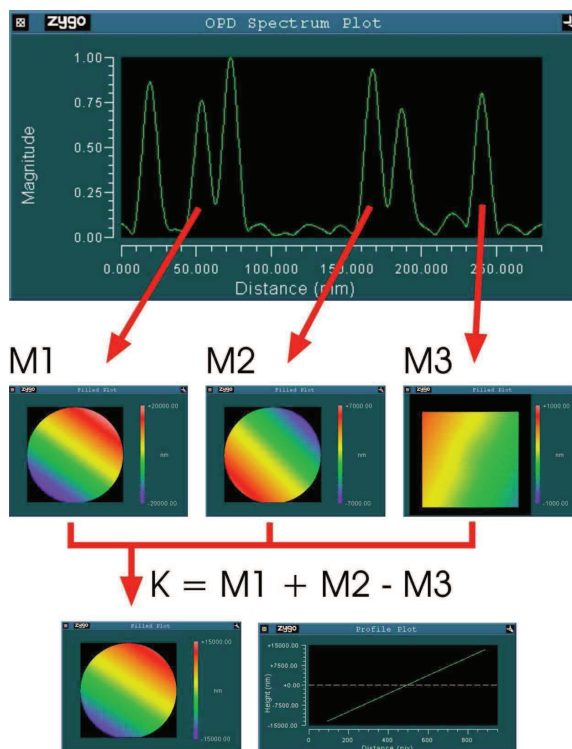


Abb. 3 Spektrum der verschiedenen Ortswellenlängen im Frequenzraum, Auswertung der einzelnen Kavitäten und Keilbestimmung.

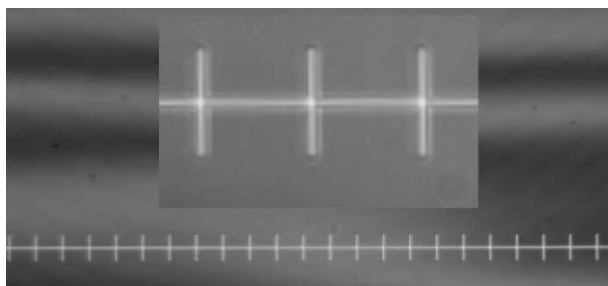
## 3 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit [2] wird wesentlich durch die Unsicherheit der interferometrischen Höhenbestimmung und die Unsicherheit der Lateralkoordinate festgelegt. Für die Ermittlung der Unsicherheit kann der funktionale Zusammenhang  $\alpha = \tan(h/l)$

$\approx h/l$  für eine Höhendifferenz  $h$  entlang der lateralen Ausdehnung  $l$  herangezogen werden. Im Folgenden werden zunächst relative Unsicherheiten betrachtet. Da das Interferometer eine Zoom-Optik besitzt und an den jeweiligen Prüfling angepasst wird, sind die verschiedenen Einflüsse so einfacher darzustellen und zu vergleichen.

Für einen typischen Prüfling (Durchmesser 50 mm, Keilwinkel 1 Winkelminute) ist die Höhendifferenz der beiden Seiten ca. 15  $\mu\text{m}$ . Bei der interferometrischen Höhenbestimmung lässt sich die Kombination von M1, M2 und M3 mit einer typischen Unsicherheit von 9 nm bestimmen, was einer relativen Unsicherheit von  $6 \cdot 10^{-4}$  entspricht.

Zur Bestimmung der Lateralkoordinate kann eine Kalibrierung der Kamera (1000•1000 Pixel) bei der jeweiligen Vergrößerung mittels eines Maßstabes vorgenommen werden. Dies ist in einem ausgewerteten Interferogramm nur schlecht möglich, da interne Routinen die Ortsauflösung begrenzen. Die vom Hersteller angegebene Kalibrierung über das Anklicken markanter Punkte im Kamerabild ist vom Operateur abhängig, wird durch die Interferenzstreifen beeinträchtigt und führt zu einer Unsicherheit von ca. 2 Pixel. Um diese Unsicherheit zu verringern, wird die Vielzahl der Einzel - Interferogramme mit einem externen Programm gemittelt. Die Interferenzstreifen werden unterdrückt und das Strichmuster des Maßstabs wird auswertbar (Abb. 4). Dadurch ist eine Abstandsbestimmung mit einer Unsicherheit von einem Pixel (oder besser) möglich, d.h. die relative Unsicherheit beträgt  $10^{-3}$ .



**Abb. 4** Mittelung vieler Interferogramme mit verschiedener Wellenlänge für einen konventionellen Maßstab (Unebenheit ca. 10  $\mu\text{m}$ ). In der Vergrößerung (oben) ist zu erkennen, dass eine Subpixel – Auswertung möglich ist.

Eine andere Möglichkeit der Bestimmung des Keilwinkels ist der Vergleich mit einer bekannten Keilplatte. Dazu wurde eine Keilplatte beidseitig mit einer dünnen Aluminiumschicht bedampft und der Keilwinkel mit einem Goniometer bestimmt. Danach wurde die Schicht entfernt. Die relative Unsicherheit der Winkelmessung an der Keilplatte ist  $8 \cdot 10^{-4}$ . Mit der Keilplatte können auch das common path - Prinzip und die Verzeichnung überprüft werden. Bezieht man ein, dass die Messung nach Abb. 1 in diesem Fall zweifach durchgeführt werden muss, erreicht man ähnliche Unsi-

cherheiten wie bei der zuvor beschriebenen Lateralkalibrierung.

Eine weitere Alternative ist, eine Planfläche vor dem Interferometer zu verkippeln und den Kippwinkel mit Hilfe eines Autokollimators hochgenau zu messen. Die Differenz der Topografien bei zwei Kippwinkeln kann dann einem Winkelwert zugeordnet werden. Die Unsicherheit hochgenauer Autokollimatoren kann weniger als  $2 \cdot 10^{-4}$  Winkelminuten (nach Kalibrierung) betragen [3] und führt bei dem hier angenommenen Keilwinkel von einer Winkelminute zu einer relativen Unsicherheit von  $2 \cdot 10^{-4}$ . Da ein zusätzlicher kalibrierter hochgenauer Autokollimator benötigt wird, wird das Verfahren in der Regel nicht eingesetzt.

#### 4 Weitere Unsicherheitseinflüsse

Bei der Messung der Keilflächen mit dem Interferometer treten prinzipbedingt hohe Streifendichten auf. Für die verwendete Apertur von weniger als 100 mm führt die dabei entstehende Verletzung des common path – Prinzips zwar zu Einflüssen von einigen Nanometern, die allerdings gegenüber den anderen Unsicherheitsbeiträgen des Interferometers vernachlässigbar sind. Einflüsse der Verzeichnung können aus Abb. 4. abgeschätzt werden. Der Effekt ist für das verwendete Gerät mit 100 mm Apertur allerdings deutlich weniger als  $10^{-3}$ .

#### 5 Zusammenfassung

Mit der Möglichkeit, mehrere Kavitäten gleichzeitig zu messen, erlaubt das in der PTB eingesetzte wellenlängenschiebende Interferometer eine Messung von Keilwinkeln im Bereich weniger Winkelminuten. Bei typischen Kalibrierungen wird eine Bestimmung der Lateralkoordinate mittels eines Maßstabes oder Referenzkeils vorgenommen. In die Messunsicherheit gehen wesentlich die Einflüsse der interferometrischen Höhenbestimmung und die Bestimmung der Lateralkoordinate ein. Die sich aus der Kombination ergebende Messunsicherheit liegt bei einem Keilwinkel von einer Winkelminute für den Erweiterungsfaktor  $k = 2$  bei einem relativen Wert von  $2,4 \cdot 10^{-3}$  bzw. einem absoluten Wert von 0,0024 Winkelminuten.

#### Literatur

- [1] L.L. Deck, „Fourier-Transform Phase-Shifting Interferometry,“ Appl. Opt. **42** (2003) 2354-2365
- [2] BIPM/JCGM: „Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement“, JCGM **100** (2008), <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>
- [3] R.D. Geckeler, A. Just: „Optimaler Einsatz und Kalibrierung von Autokollimatoren zur Formmessung mittels hochgenauer Deflektometrie“, DGaO Proc. **108** (2007), <http://www.dgao-proceedings.de>