

Hochgenaue und rückgeführte Charakterisierung von Wellenfrontsensoren

Johannes Bautsch*, Gerd Ehret*, Ulrich Berg**, Lorenz Wagner**, Johannes Pfund**

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany

**Optocraft GmbH, Am Weichselgarten 7, 91058 Erlangen, Germany

johannes.bautsch@ptb.de

Im Rahmen eines Transfer-Projektes zwischen PTB und Optocraft GmbH wird eine rückführbare Kalibrierung von Wellenfrontsensoren (WS) entwickelt. Hierzu werden im folgenden erste Ergebnisse, bei denen insbesondere die Einflüsse der Lichtquelle untersucht werden, vorgestellt.

1 Einführung

Die hochgenaue Bestimmung von optischen Wellenfronten ist bei vielen optischen Anwendungen von großer Bedeutung, z.B. für adaptive Optiken, in der Ophthalmologie, bei der interferometrischen Topographiemessung oder bei der Messung des Strahlprofils von Lasern. Wellenfrontsensoren wie z. B. Shack-Hartmann-Sensoren müssen auf Grund von nicht perfekter Optik sowie nicht perfekter Ausrichtung zwischen Bildsensor und Mikrolinsenarray kalibriert werden [1]. Im Rahmen eines Transfer-Projektes zwischen PTB und Optocraft GmbH wird eine rückführbare Kalibrierung von Wellenfrontsensoren (WS) basierend auf dem Traceable Multi Sensor (TMS) Verfahren [2] entwickelt. Dieses Verfahren wurde an der PTB ursprünglich zur interferometrischen Flächenmessung entwickelt und eingeführt. Mit diesem TMS-Verfahren kann sowohl der systematische Sensorfehler als auch die Eingangswellenfront simultan ermittelt werden. Die Rückführung auf die SI-Einheit „Meter“ ist durch einen Referenzspiegel mit bekannter Topographie und einem Autokollimationsfernrohr gegeben. In diesem Beitrag stellen wir Ergebnisse hierzu und insbesondere auch die Einflüsse der verwendeten Beleuchtung sowie der Kohärenz der Beleuchtung vor.

2 Messaufbau

Der verwendete Messaufbau zur Charakterisierung von Wellenfrontsensoren ist in Abb. 1 dargestellt.

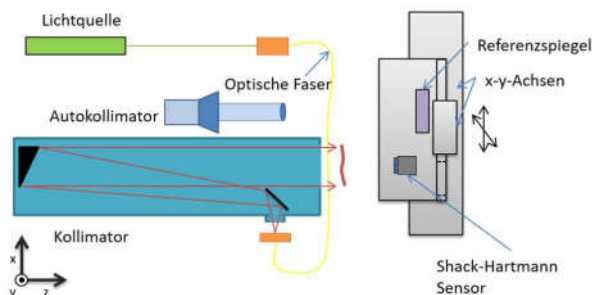


Abb. 1 Messaufbau

Als Lichtquelle wurden ein roter He-Ne Laser bei 633 nm, ein grüner Laser bei 532 nm sowie LEDs mit den Wellenlängen 405 nm, 530 nm, 625 nm, 850 nm verwendet. Die Lichtquelle wird in eine optische Faser eingekoppelt und über einen off-axis Spiegel-Kollimator mit einer Brennweite von 1 m kollimiert. Vor dieser nahezu ebenen Wellenfront befindet sich der Sensor auf einer x-, y- Stage. Zusätzlich befindet sich an dieser x-, y- Stage auch ein kalibrierter Referenzspiegel über den die Achsverkippungen mittels eines Autokollimators ermittelt werden.

3 Messverfahren

Die Idee hinter diesem Messprinzip ist, dass mehrere Mikrolinsen die gleiche Position auf der Wellenfront messen können. Unter der Annahme, dass die Wellenfront während der Messung konstant bleibt, lässt sich aus den Messunterschieden der Sensorfehler für jede Mikrolinse berechnen. Hierfür wird der Sensor vor der Wellenfront mäanderförmig verfahren. Die Schrittweiten zwischen den Messpositionen entsprechen hierbei dem Abstand der Mikrolinsen. An jeder Messposition wird zusätzlich die Verkippung der Verfahrachsen bestimmt und das Messergebnis korrigiert um eine Vergleichbarkeit sicherzustellen. Um zufällige Fehler hier zu minimieren werden ca. 2500 Positionen auf der Wellenfront von sämtlichen Mikrolinsen gemessen und an jeder Messposition achtmal gemittelt.

4 Messergebnisse

In Abb. 2 sind die Messergebnisse einer Charakterisierung dargestellt. Abb. 2 (oben) zeigt den gemessenen Sensorfehler und Abb. 2 (unten) den gemessenen Gradienten der Eingangswellenfront in Einheiten der Spotverschiebung an.

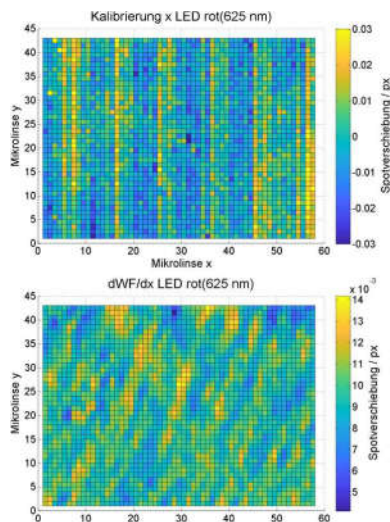


Abb. 2 Sensorfehler und Wellenfrontgradient

Hier - wie auch in den folgenden Abbildungen - beschränken sich die gezeigten Werte auf die x-Ablenkung der Spotpositionen, die y-Werte weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Der verwendete Sensor hat eine Mikrolinsenbrennweite von 2,4 mm und eine Pixelgröße von 4,65 μm . Dies entspricht einem Winkel von ca. 1,9 mrad pro Pixel. Für diese Messung wurde eine rote LED (625 nm) verwendet.

Anschließend wurde die Stabilität der Charakterisierung untersucht. Hierbei wurden zwei Messungen unter gleichen Bedingungen wiederholt und die Differenz gebildet. Die gemessenen Werte sind im Bereich von unter 10^{-3} Pixel. Eine mögliche Ursache des Fehlers liegt in Driteffekten des Aufbaus (insbesondere Wellenfront und Sensor).

5 Vergleich zwischen Lichtquellen

Abb. 3 zeigt den Einfluss der Wellenlänge auf die Sensorcharakterisierung.

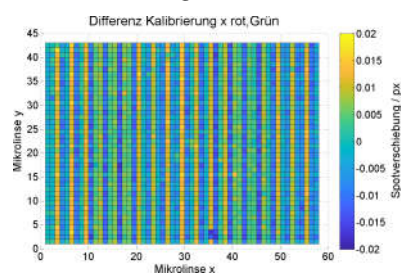


Abb. 3 Vergleich roter und grüner LED

Dieses Muster entsteht vermutlich durch die Pixelstruktur des CCD-Chip. Durch die verschiedenen Wellenlängen wird der Spotdurchmesser beeinflusst und dadurch unterschiedliche Pixelbereiche angesprochen. Abhängig von dem Pixelbereich kommt es zu einem systematischen Fehler in der Schwerpunktberechnung, welcher sich in der Messung widerspiegelt. Die periodische Struktur hierbei ist durch das Verhältnis des Abstandes der Mikrolinsen (Pitch = 0,11 mm) und der Pixelgröße zu erklären. Dieses Verhältnis beträgt 23,656 px/ML.

Durch das ungerade Verhältnis sind in etwa bei jeder dritten Mikrolinse die gleichen Bereiche eines Pixels im Spotschwerpunkt (das Verhältnis im Nachkommabereich entspricht ca. 2/3).

Diese Effekte entstehen auch, wenn die Messung mit einem Sensor gemacht wird, der leicht zur Wellenfront gekippt ist, da auch hier die Pixelstruktur das Messergebnis verfälscht. Deswegen sollte der Sensor vor Beginn der Charakterisierung senkrecht zur optischen Achse ausgerichtet werden.

Im Folgenden wurde der Einfluss der Kohärenz des Lichtes auf die Messung untersucht. Hierfür wurde eine Messung mit einer roten LED (625 nm) und eine Messung mit einem He-Ne-Laser (632 nm) verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt.

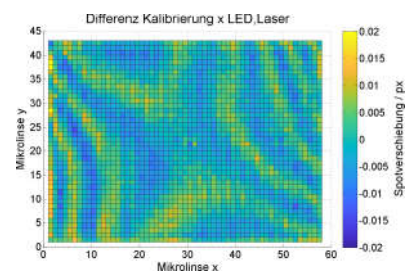


Abb. 4 Vergleich von rotem Laser und roter LED

Diese Fehler entstehen vermutlich durch Lichtreflexe innerhalb des Sensors (zwischen CCD und Mikrolinsen-Array), die bei kohärentem Licht Interferenzen auf der Sensorebene bilden.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Messplatz und das Messprinzip zur Charakterisierung von Wellenfrontsensoren vorgestellt. Weiterhin wurde Untersuchungen zur Wiederholbarkeit, sowie der Auswirkungen unterschiedlicher Lichtquellen gezeigt. Diese sind bei unseren Messungen im Bereich von einigen hundertstel Pixeln und für eine hochgenaue Wellenfrontmessung relevant. Daher sollten sie bei Messungen und Kalibrierungen von Wellenfrontsensoren mitberücksichtigt werden.

7 Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung dieser Forschungsarbeit durch das TransMeT Programm (Transfer Metrologischer Technologien) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

8 Literatur

- [1] J. Pfund, N. Lindlein, J. Schwider: "Misalignment effects of the Shack-Hartmann sensor", Applied Optics 37, 22-27 (1998)
- [2] A. Wiegmann: „Multiple Sensorsysteme zur Topographiebestimmung optischer Oberflächen“, Dissertation (2009)