

Charakterisierung von Wellenfrontensensoren mittels sphärischer Wellenfronten

J. Bautsch*, G. Ehret*, U. Berg**, J. Pfund**, L. Wagner**

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

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

[mailto: johannes.bautsch@ptb.de](mailto:johannes.bautsch@ptb.de)

Es wird ein Verfahren zur Charakterisierung von Shack-Hartman Wellenfrontensensoren vorgestellt. Hierbei wird eine sphärischen Wellenfront vor einem Shack-Hartman-Wellenfrontsensor definiert verschoben. Neben der Referenzspotposition erhalten wir bei dem verwendeten Verfahren auch die Sensorfehler in Abhängigkeit vom Winkel der einfallenden Wellenfront.

1 Einführung

Eine hochgenaue Bestimmung von Wellenfronten ist für viele Bereiche, wie beispielsweise der von adaptiven Optiken in der Astronomie, in der Optiktferung bzw. der Qualitätskontrolle für Linsen/systeme oder für die hochgenaue Wellenfront- und Laserstrahlungsmessung bedeutsam. Hierfür werden häufig Shack-Hartmann-Wellenfrontensensoren (SHS) [1] eingesetzt. Dabei wird eine einkommende Wellenfront von den Linsen eines Mikrolinsenarrays abgetastet und dadurch eine Punktmuster auf dem Kamerachip erzeugt. Der Kamerachip befindet sich im Brennweitenabstand der Mikrolinsen. Eine Integration der lokal gemessenen Wellenfrontgradienten führt zur Wellenfront.

Für eine hochgenaue Messung ist es notwendig die Fehler der Wellenfrontensensoren möglich exakt bestimmen zu können [2]. Neben der Charakterisierung der Referenzspotposition, welche wir bereits in [3] beschrieben haben, lassen sich durch einen geänderten Aufbau auch die Fehler, die von dem Winkel der einfallenden Wellenfront abhängen, bestimmen. Hierfür werden sphärische Wellenfronten anstatt nahezu ebener verwendet.

2 Grundzüge des Verfahrens

Das Verfahren basiert auf einer definierten Verschiebung einer in erster Näherung sphärischen Wellenfront vor dem zu charakterisierenden Sensor. In Abb. 1 ist der zugehörige Aufbau skizziert.

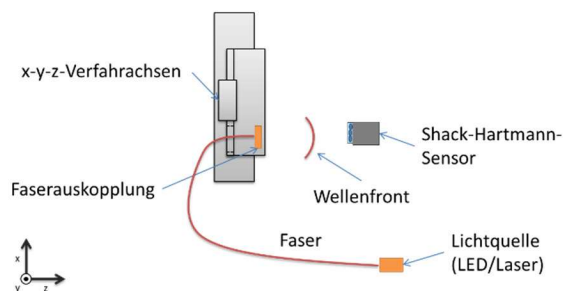


Abb. 1 Verwendeter Aufbau zu Charakterisierung.

Im ersten Schritt wird die Lichtquelle senkrecht zur optischen Achse verschoben. Die Abstände zwischen zwei angefahrenen Positionen entsprechen dem zugehörigen Mikrolinsenpitch. Dadurch werden identische Teile der Wellenfront von unterschiedlichen Mikrolinsen vermessen. Hierdurch lassen sich die einzelnen Mikrolinsen gegeneinander verifizieren, indem die Messergebnisse miteinander verglichen werden. Anschließend wird dieser Schritt an unterschiedlichen Positionen auf der optischen Achse wiederholt. Durch diese bekannte Verschiebung auf der optischen Achse ist es möglich, auch die winkelabhängigen Fehler genau zu charakterisieren ohne dass der Abstand zwischen Lichtquelle und Sensor im Vorfeld bekannt ist.

Entscheidend ist eine korrekte Ausrichtung zwischen dem Sensor und dem Bewegungssystem. Hierfür wurde eine automatisierte Justage entwickelt, welches ein neues Bewegungskoordinatensystem für die Verfahrachsen berechnet.

3 Messergebnisse

Im Folgenden werden beispielhaft einige Messergebnisse vorgestellt. Für die Beleuchtung wurde ein Laser mit einer Wellenlänge von 530 nm verwendet. Die Einflüsse der Lichtquelle wurden von uns bereits in [3] beschrieben. Der Abstand zwischen der Lichtquelle und dem Sensor betrug bei der hier gezeigten Messung ca. 80 cm.

3.1 Konstanter Sensorfehler

In Abb. 2 ist der konstante Fehler des Wellenfrontensensors dargestellt.

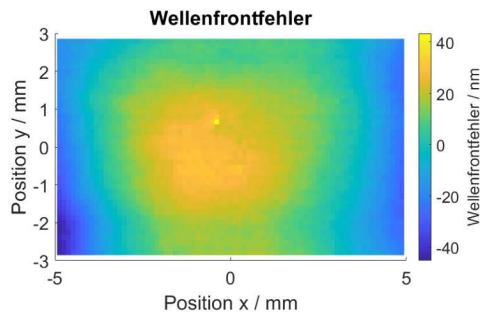


Abb. 2 Konstanter Sensorfehler.

Dieser entsteht durch eine ungenau bestimmte Referenzspotposition. Für eine geeignete Darstellung wurde dieser Fehler aufintegriert, wodurch die daraus resultierende Abweichung in der gemessenen Wellenfront sichtbar wird.

3.2 Wellenfront

Weiterhin erhalten wir durch das Verfahren die Eingangswellenfront. Diese ist in Abb. 3 dargestellt.

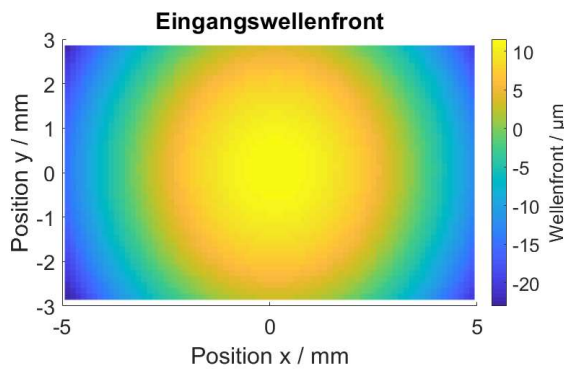


Abb. 3 Messung der Eingangswellenfront.

Da als Lichtquelle der Ausgang einer Singlemode-Faser verwendet wurde, ist die Wellenfront in guter Näherung sphärisch.

3.3 Wellenfrontabhängige Fehler

Abb. 4 zeigt den Winkelfehler für eine einzelne Mikrolinse.

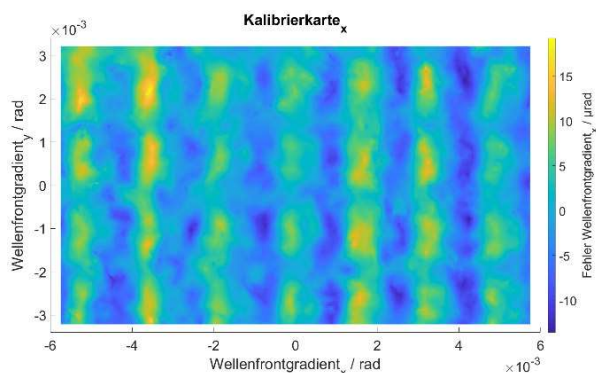


Abb. 4: Zweidimensionale Kalibrierkarte zur Korrektur Wellenfrontabhängiger Fehler.

Die x- und y- Position gibt in dieser Abbildung den Gradienten der eingehenden Wellenfront an. In der zugehörigen Farbkarte lässt sich der zu korrigierende Sensorfehler ablesen. Auffällig hierbei ist das stark periodische Muster, welches durch die Pixeleffekte des Bildsensors bedingt wird.

4 Rückführbarkeit

Für die Rückführung relevant ist primär die Positionierung des Faserendes. So ist vorgesehen, die Rückführung dieser 3D-Positionen auf die SI-Einheit Meter mittels kalibrierter Glasmaßstäbe, Laserinterferometrie und Lasertracer durchzuführen. Die gesamte Rückführungskette ist in Abb. 5 skizziert.

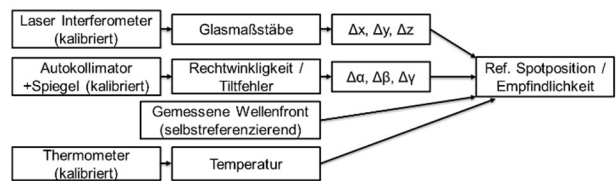


Abb. 5 Schema der Rückführungskette.

Das Verfahren benötigt keine genaue Kenntnis der einfallenden Wellenfront, da diese mitbestimmt wird.

5 Zusammenfassung

Wir haben das Messsystem und das Messprinzip zur Charakterisierung von Wellenfrontsensoren vorgestellt. Dieses kann, neben dem konstanten Fehler für ebene Wellenfronten auch Fehler in der Brennweite der Linsen sowie Fehler, die vom Wellenfrontgradienten abhängen, bestimmen.

An einer genaueren Bestimmung der Fehlereinflüsse für die Charakterisierung und eine damit einhergehende Unsicherheitsanalyse für das Ergebnis wird aktuell gearbeitet.

6 Danksagung

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

Literatur

- [1] R. Shack, B. Platt : "History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing" in *Journal of Refractive Surgery*, 17(10), 573–577 (2001)
- [2] J. Pfund, N. Lindlein, J. Schwider: "Misalignment effects of the Shack–Hartmann sensor", *Applied Optics* 37, 22-27 (1998)
- [3] J. Bautsch et. al.: "Hochgenaue und rückgeführte Charakterisierung von Wellenfrontsensoren" *DGaO Proceeding*, P34 (2018)