

Kalibrierung von Wellenfrontensensoren mit ebenen und sphärischen Wellenfronten

Gerd Ehret, Johannes Bautsch, Michael Schulz

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

<mailto:gerd.ehret@ptb.de>

An der PTB wird aktuell ein Messsystem aufgebaut, um Wellenfrontensensoren mit ebenen und sphärischen Wellenfronten rückgeführt zu kalibrieren. In diesem Beitrag stellen wir die Messprinzipien vor und zeigen den aktuellen Stand und Möglichkeiten zur weiteren Optimierung.

1 Einführung

Wellenfrontensensoren, wie Shack-Hartmann-Sensoren (SHS) werden vielfältig eingesetzt, z. B. in der Interferometrie, der Ophthalmologie oder bei adaptiven Optiken. Shack-Hartmann-Wellenfrontensensoren bestehen aus einem Mikrolinsenarray (MLA) und einem sich dahinter befindendem Bildsensor. Bedingt durch das nicht perfekte Mikrolinsenarray oder Ausrichtungsfehler zwischen Mikrolinsenarray und Bildsensor, müssen die SHS kalibriert werden. Typische Ausrichtungsfehler sind laterale Translation zwischen MLA und Bildsensor bzw. eine axiale Rotation zueinander [1]. Dadurch entstehen systematische Sensorfehler, wie z. B. eine mikrolinsenspezifische Referenzspotposition, die im Rahmen einer Kalibrierung bestimmt werden. Zur Bestimmung der systematischen Sensorfehler werden sowohl ebene als auch sphärische Wellenfronten verwendet. Dabei werden ebene Wellenfronten durch Kollimatoren und sphärische Wellenfronten durch optische Fasern erzeugt. Für eine rückgeführte Charakterisierung der Wellenfrontensensoren müssen die Unsicherheiten bzw. Abweichungen der genutzten Wellenfronten von der idealen Form bekannt sein. Bei dem hier genutzten Verfahren werden die aktuell vorliegenden Wellenfronten während der Messungen selbst mitgemessen, so dass hochgenaue Kalibrierungen von Wellenfrontensensoren möglich sind.

An der PTB wurden zwei Verfahren entwickelt, mit denen sowohl die verwendete optische Eingangswellenfront (d. h. eine nominell ebene oder sphärische Wellenfront) als auch der systematische Sensorfehler gleichzeitig bestimmt werden kann. Diese beiden Verfahren stellen wir im Folgenden kurz vor.

2 Kalibrierung mit ebenen Wellenfronten

Ein Kollimator erzeugt dazu eine nahezu ebene Wellenfront, die mit dem zu kalibrierenden Wellenfrontsensor gescannt wird. Die Lichtquelle besteht entweder aus einem Laser oder einer LED mit der gewünschten Wellenlänge. Der Sensor wird senk-

recht zur optischen Achse verschoben. Der Scanbereich entspricht der doppelten Sensorgröße in der jeweiligen Dimension. Innerhalb des Scanbereichs werden die Positionen etwa im Mikrolinsenabstand angefahren. An jeder Position wird der Wellenfrontgradient durch den Wellenfrontsensor gemessen und zusätzlich wird die Verkippung durch das Autokollimationsfernrohr aufgezeichnet. Basierend auf dem Traceable Multi-Sensor-Verfahren (TMS) [2] werden aus den Messdaten die Eingangswellenfront und der systematische Sensorfehler bestimmt. Entscheidend dabei ist, dass keine Vorkenntnisse der Test- / Eingangswellenfront notwendig sind. Einzige Voraussetzung ist, dass sich die Wellenfront während dem Scanvorgang nicht ändert.

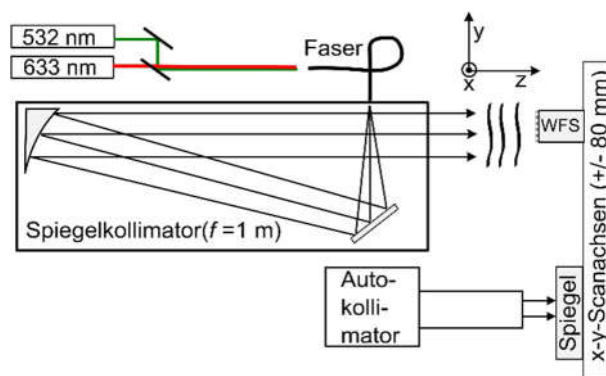


Abb. 1 Prinzipskizze für die Kalibrierung mit ebenen Wellenfronten.

Ein Vergleich dieses Kalibrierverfahrens mit einer roten und grünen LED wurde auf der DGaO 2018 vorgestellt [3]. Aktuelle Abschätzungen ergeben, dass die mikrolinsenspezifische Referenzspotposition mit einer Messunsicherheit von ca. 2 μrad für $k=2$ bestimmt werden kann.

3 Kalibrierung mit sphärischen Wellenfronten

Hier wird eine nahezu punktförmige Lichtquelle verwendet. Diese wird durch den Faserausgang einer optischen Faser realisiert. Es können auch hier wahlweise Laser oder LEDs verwendet werden. Laser haben den Vorteil, dass diese in Singlemode-

Fasern eingekoppelt werden können, die einen kleinen Kerndurchmesser besitzen, was einer idealen Punktlichtquelle nahekommt. LEDs benötigen Multimodefaser, haben jedoch den Vorteil der geringeren Kohärenz und damit verbunden das geringere Auftreten von Störinterferenzen. Der entsprechende Aufbau ist in Abb. 2 skizziert und wurde u. a. auf der DGaO 2019 vorgestellt [4]. Im ersten Schritt wird die Lichtquelle senkrecht zur optischen Achse verfahren. Der Scanbereich entspricht auch hier der doppelten Sensorgröße in der jeweiligen Dimension. In diesem Scanbereich wird ein Raster entsprechend dem Mikrolinsenpitch angefahren.

Um Drifteffekte zu minimieren erfolgt das Anfahren der jeweiligen Positionen pseudozufällig. Zwischen den einzelnen Durchläufen wird zusätzlich die Position auf der optischen Achse variiert, hierbei werden drei Positionen auf der z-Achse in jeweils drei Durchläufen angefahren, typischerweise -50 mm, 0 mm und +50 mm. Der absolute Abstand zwischen der Lichtquelle und dem Wellenfrontsensor liegt bei ca. 70 cm. Durch das Scannen in x- und y-Richtung sowie durch die verschiedenen z-Positionen wird der Wellenfrontsensor mit sphärischen Wellenfronten verschiedener Krümmungen beleuchtet. Dadurch wird zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse möglich.

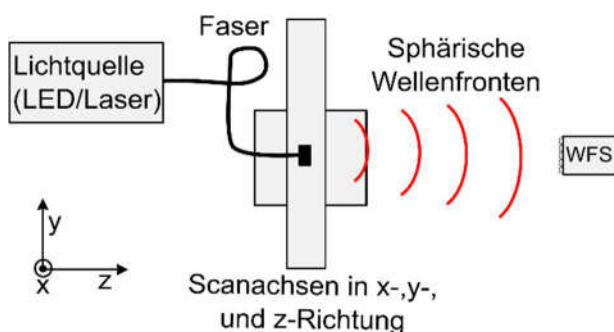


Abb. 2 Prinzipskizze für die Kalibrierung mit sphärischen Wellenfronten.

Für die Charakterisierung ist eine gute Justage notwendig. Zudem ist wichtig, dass der Aufbau stabil ist und während der Messung die Wellenfront zeitlich konstant ist. Auch dieses Verfahren ermöglicht die gleichzeitige Bestimmung von Test- / Eingangswellenfront sowie der mikrolinsenspezifischen Referenzposition [5]. Abschätzungen für die Messunsicherheit der mikrolinsenspezifischen Referenzspotposition ergeben mit dem aktuellen Aufbau einen Wert von etwa 4 μm ($k=2$) [5].

Um diesen Messaufbau kompakter, stabiler und vor allem rückführbar zu gestalten, werden wir den Aufbau entsprechend Abb. 3 modifizieren. Für die Rückführung ist es notwendig, dass die x-, y- und z-Positionen auf das Meter zurückgeführt werden. Dafür sollen u. a. Längeninterferometer (LI) eingesetzt werden. Die Position und die Drehung des

Zerodurkörpers bzw. der Lichtquelle wird mit den beiden Längeninterferometern LI-1 und LI-2 (siehe Abb.3) gemessen. Das LI-1 ist als Dreistrahlinterferometer ausgelegt und misst die x-Position sowie die Rotationswinkel um y- und z-Achse. Das LI-2 ist ebenfalls als Dreistrahlinterferometer ausgelegt und misst die y-Position sowie die Rotationswinkel um die x- und z-Achse. Die z-Position wird mit dem kalibrierten Linearmaßstab der z-Stage bestimmt.

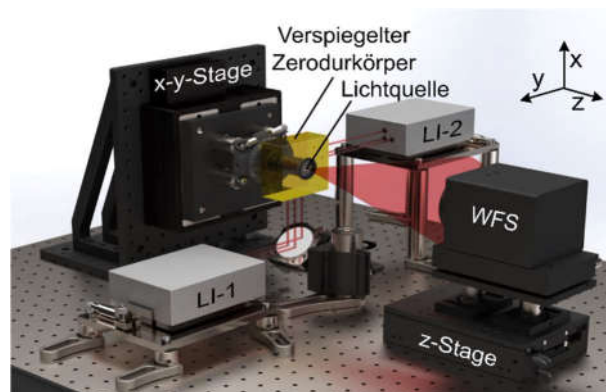


Abb. 3 Skizze für einen modifizierten Aufbau zur rückgeführten Charakterisierung mit sphärischen Wellenfronten.

4 Diskussion und Ausblick

Sowohl für die Charakterisierung mit ebenen als auch mit sphärischen Wellenfronten haben wir Messkonzepte und Demonstratoren für eine rückgeführte Wellenfrontmessung gezeigt. Im Bereich der sphärischen Wellenfrontkalibrierung werden wir die Idee in Abb.3 realisieren und das dazugehörige Messunsicherheitsbudget aufstellen. Damit haben wir gute Voraussetzungen geschaffen, um hochgenaue Kalibrierungen für Wellenfrontsensoren anzubieten.

Literatur

- [1] J. Pfund, N. Lindlein, J. Schwider, "Misalignment effects of the Shack-Hartmann sensor," *Applied Optics*, Vol. 37, No. 1, pp. 22-27 (1998)
- [2] A. Wiegmann: „Multiple Sensorsysteme zur Topographiebestimmung optischer Oberflächen“, Dissertation (2009)
- [3] J. Bautsch, G. Ehret, U. Berg, L. Wagner, J. Pfund, „Hochgenaue und rückgeführte Charakterisierung von Wellenfrontsensoren,“ https://www.dgao-proceedings.de/download/119/119_p34.pdf (2018)
- [4] J. Bautsch, G. Ehret, U. Berg, L. Wagner, J. Pfund, „Charakterisierung von Wellenfrontsensoren mittels sphärischer Wellenfronten,“ https://www.dgao-proceedings.de/download/120/120_b12.pdf (2019)
- [5] J. Bautsch, M. Schake, G. Ehret, U. Berg, L. Wagner, J. Pfund, R. Tutsch, „Traceable calibration of Shack-Hartmann wavefront sensors employing spherical wavefronts,“ *Optical Engineering* (2020), accepted