
Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein Aufbau zur hochgenauen Kalibrierung von Wellenfrontsensoren - insbesondere Shack-Hartmann-Sensoren - vorgestellt. Der verwendete Aufbau besteht aus einer Punktlichtquelle, welche durch ein dreidimensionales Bewegungssystem im Raum positioniert werden kann, sowie dem zu charakterisierenden Sensor. Das System ermöglicht es, sowohl die statischen Fehler des Sensors in Form einer fehlerhaften Referenzspotposition zu ermitteln, als auch wellenfrontabhängige Fehler mikrolinsenspezifisch aufzulösen. Die genaue Verschiebeposition der Lichtquelle und die benötigten Auswertalgorithmen, sowie eine Strategie für die Justage des Systems werden ebenfalls dargelegt.

Der zugehörige Aufbau wurde im Rahmen der Arbeit realisiert und zwei unterschiedliche Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren vermessen. Hierzu werden die Ergebnisse für die Kalibrierung dargestellt, sowie die Untersuchung einiger zusätzlichen Effekte auf die Sensoren gezeigt. Für einen der Sensoren wird eine Unsicherheitsanalyse der Restfehler der Kalibrierung vorgestellt sowie eine mögliche Rückführung des Systems dargelegt.

Abschließend wird die Anwendbarkeit des Verfahrens auf weitere Wellenfrontsensoren untersucht, indem ein Shearing-Interferometer vermessen wird.

Abstract

In this thesis a setup for high-precision calibration of wavefront sensors is presented. The setup consists of a point light source, which can be positioned in space by a three-dimensional motion system, and the sensor to be characterized. The system allows to resolve both static errors of the sensor in form of an incorrect reference spot position and wavefront-dependent errors for each microlens. The exact displacement positions of the light source and the required evaluation algorithms as well as a strategy for the adjustment of the system are also described.

The corresponding setup was realized within the scope of this thesis and two different Shack-Hartmann wavefront sensors were measured. For this purpose, the results for the calibration and the investigation of some additional effects on the sensors are shown. For one of the sensors an uncertainty analysis of the residual errors of the calibration is presented, as well as a possible traceability of the system. Finally, the applicability of the method to further wavefront sensors is investigated by measuring a shearing-interferometer.

1 Einleitung

Die hochgenaue Vermessung von Wellenfronten ist für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen notwendig. Insbesondere Shack-Hartmann-Sensoren (SHS) [1] werden für vielfältige Einsatzzwecke verwendet.

In der Astronomie werden mit Hilfe von Wellenfrontsensoren innerhalb einer Regelschleife adaptive Optiken gesteuert, welche Störungen durch Luftturbulenzen aus den Messungen entfernen [2]. Diese Technik ermöglicht es, Teleskope auf der Erde zu bauen, welche erheblich teurere Weltraumteleskope in vielen Anwendungsfällen ersetzen können. Luftturbulenzen spielen nicht nur für die Wellenfrontaberrationen für Weltraumbeobachtung eine Rolle, sondern auch bei der Kommunikation von der Erde zu Satelliten [3]. Auch hier können durch Wellenfrontmessung in Kombination mit adaptiven Optiken Verbesserungen erzielt werden.

Ein weiterer Anwendungsfall für adaptive Optiken findet sich in der aktuellen Biologieforschung. Hier werden Mikroskope mit adaptiven Optiken ausgestattet, um Störquellen zum Beispiel durch Streuung, die durch das Gewebe verursacht werden, zurückzurechnen [4, 5]. Auf diese Weise können tiefe Gewebeschichten besser abgebildet werden.

In der Ophthalmologie werden Wellenfrontsensoren eingesetzt, um die Aberrationen des Auges - insbesondere der Hornhaut- zu bestimmen [6, 7]. Dies ist insbesondere bei der Korrektur von Sehfehlern durch Laseroperationen wichtig.

Weitere Anwendungsbereiche finden sich in der Vermessung von Optiken [8, 9]. Hier werden in Optikfertigung und Qualitätskontrolle Wellenfrontsensoren zur Vermessung von Linsen und Linsensystemen eingesetzt. SHS können auch zur Formmessung schwieriger Objekte wie Freiformflächen eingesetzt werden. Insbesondere der im Vergleich zu interferometrischen Verfahren hohe Winkelbereich erlaubt es ihnen, auch die stark gekrümmten Bereiche von Asphären und Freiformen ohne zusätzliche Anpassung der Wellenfront in Form von Computergenerierten Hologrammen (CGH) oder durch Nachführen zu vermessen. Bei größeren Optiken kann die Form auch durch Stitching bestimmt werden [10]. Aber auch in vielen anderen metrologischen Bereichen kann es notwendig sein, Wellenfronten hochgenau zu vermessen, beispielsweise um die Charakteristika von Lasern [11] zu ermitteln oder zur Bestimmung der

Ausgangswellenfront von Kollimatoren beziehungsweise Interferometern.

Für eine hochgenaue Messung ist es notwendig, die Fehler der Wellenfrontsensoren möglichst exakt bestimmen zu können. In dieser Arbeit wird ein Kalibrieraufbau vorgestellt und untersucht, der eine hochgenaue Kalibrierung von Wellenfrontsensoren - insbesondere SHS - ermöglicht. Das zugehörige Verfahren kann neben einem allgemeinen Offsetfehler der Messung auch wellenfrontabhängige Fehler ermitteln.

Zunächst wird in Kapitel 2 auf den Stand der Technik eingegangen und darauf aufbauend die Aufgabenstellung in Kapitel 3 aufgezeigt. Nachdem die Grundlagen in Kapitel 4 gezeigt werden, ist die genaue Funktionsweise des Verfahrens zur Kalibrierung von SHS in Kapitel 5 beschrieben. Das Verfahren basiert auf dem Prinzip, dass identische Bereiche einer Wellenfront mit unterschiedlichen Bereichen des Wellenfrontsensors vermessen werden. Aus den Messdifferenzen können anschließend Aussagen über systematische Sensorfehler getroffen werden. Hierfür wird eine punktförmige Lichtquelle mittels eines Drei-Achsen-Lineartisches vor dem Sensor verschoben. Die Verschiebung entlang der optischen Achse dient in diesem Fall dazu die absolute Sensitivität des Sensors ermitteln zu können. In Kapitel 6 werden die Messergebnisse für die Kalibrierung anhand von zwei unterschiedlichen Sensoren vorgestellt. Anschließend werden in Kapitel 7 die Unsicherheiten bei diesem Verfahren untersucht und die Hauptfehlerquellen identifiziert.

Die Möglichkeit, weitere Arten von Wellenfrontsensoren mittels des Verfahrens zu charakterisieren, wird in Kapitel 8 anhand eines Shearing-Interferometers untersucht. Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 9 diskutiert, und in Kapitel 10 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst sowie ein kurzer Ausblick auf weitere mögliche Entwicklungen in diesem Themenfeld gegeben.

2 Stand der Technik

Für die Charakterisierung von Wellenfrontsensoren, insbesondere Shack-Hartmann-Sensoren, wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die sich unter anderem in den betrachteten Fehlerquellen unterscheiden.

Die Kalibrierung von Wellenfrontsensoren in der Fertigung von entsprechenden Sensoren erfolgt meist über eine möglichst gute, jedoch in der Regel unbekannte und nicht rückgeführte, Referenzwellenfront. Hierfür können Aufbauten mit hochwertigen Kollimatoren verwendet werden. Die Qualität der Kollimatoroptiken, beziehungsweise die genaue Kenntnis der Restfehler, ist in diesem Fall entscheidend für die Restfehler der Kalibrierung. Da lediglich eine einfache Messung mit dem Sensor durchgeführt werden muss, kann hierdurch eine sehr schnelle Kalibrierung erfolgen, die für viele Bereiche eine ausreichende Genauigkeit aufweist. Dieses Verfahren liefert lediglich eine Kalibrierung der Referenzspotposition. Weitere Fehlerarten, die beispielsweise winkelabhängig sind, können jedoch nicht abgedeckt werden, weshalb gegebenenfalls zusätzliche Kalibrierschritte notwendig sind.

Eine weitere Möglichkeit, eine Referenzwellenfront zu erzeugen, besteht in der Verwendung von Singlemode-Fasern [12]. Die Referenzwellenfront ist auch hierbei unbekannt und nicht rückgeführt. Diese erzeugen eine sehr gute sphärische Wellenfront, welche als Referenz verwendet werden kann.

Um mit einer sphärischen Wellenfront den Sensor zu kalibrieren, muss der Abstand zwischen Sensor, genauer dem Mikrolinsenarray, und dem Faserende sehr genau bekannt sein. Zur hochgenauen Bestimmung des Abstands wird der Sensor auf der optischen Achse verschoben. Währenddessen wird die Verschiebung des Sensors an einem festen Punkt am Gehäuse des Sensors gemessen. Die konstanten Offsetfehler des Sensors weisen keine Abhängigkeit von dieser Verschiebung auf. Entsprechend kann aus der Änderung der gemessenen Krümmung der Absolutabstand durch eine definierte Verschiebung ermittelt werden.

In Abbildung 1 ist ein solcher Aufbau demonstriert. Der Laser 1 erzeugt dabei die für die Kalibrierung benötigte Referenzwellenfront. Der zusätzliche Laser 2 dient zusammen mit einem Strahlteiler und einem Spiegel zur Justage des Sensors. Damit wird die Verkippung des Sensors an jeder Messposition auf der optischen Achse neu eingestellt, um zusätzliche Fehler durch die Verkippung

zu vermeiden. Für die eigentliche Messung wird der Strahlteiler dann aus dem Strahlengang entfernt.

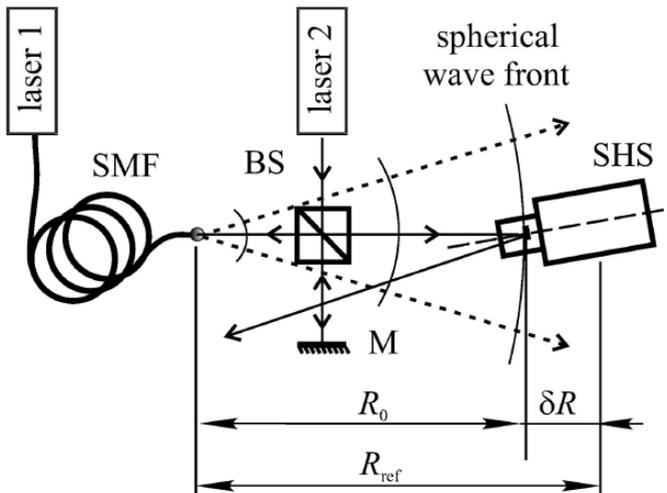


Abbildung 1: Aufbau zur Kalibrierung von Wellenfrontsensoren nach [12]

Auf einem ähnlichen Verfahren beruhen die Ansätze von [13] und [14]; in diesen Fällen erfolgt die Ausrichtung des SHS durch einen Justagelaser und Lochblenden.

Teile dieser Verfahren, die auf der Kalibrierung mit bekannten Abständen und einer Punktlichtquelle arbeiten, können zusätzliche Fehler bestimmen, wie beispielsweise die Sensitivität des Sensors, diese jedoch im Allgemeinen nicht mikrolinsenspezifisch auflösen. Da nur sehr stark eingeschränkte Wellenfrontgradienten auf den Sensor treffen, sind Fehler, die nur für bestimmte Wellenfrontgradienten relevant sind, nicht zu ermitteln.

Ein weiterer Ansatz besteht darin, eine inhärente Kalibrierung der Sensoren zu erzeugen, indem zwischen der Apertur und dem Bildsensor eine Ebene eingefügt wird, auf der die Referenzposition enthalten ist.

Dieses Verfahren wurde von DIOPTIC [15] vorgestellt und basiert darauf, durch lithographische Prozesse hochgenaue Masken zu fertigen. Diese werden sowohl für die Mikrolinse als auch für eine interne Referenzposition verwendet, welche zur Kalibrierung durch spezielle Beleuchtung sichtbar gemacht werden kann [16].

In vielen Einsatzbereichen ist eine Kalibrierung der Offsetfehler eines Wellenfrontsensors nicht notwendig. Dies ist immer der Fall, wenn keine absolute Messung benötigt wird, sondern lediglich die Änderung der Messwerte beziehungsweise gegenüber einer internen Referenz gemessen wird. Jedoch wird in diesen Einsatzbereichen weiterhin eine Kalibrierung der wellenfrontabhängigen Fehler benötigt, da beispielsweise eine fehlerhafte Winkelantwort des Sensors sich weiterhin auf die Messung auswirkt.

Neben der Kalibrierung der Offsetfehler gibt es weitere Fehlerarten, die bereits untersucht wurden [17]. Weitere Betrachtungen beziehen sich auf die Auswertalgorithmen von Shack-Hartmann-Sensoren und analysieren beispielsweise die Fehler unterschiedlicher Spotbestimmungsfunktionen oder Wellenfrontrekonstruktionen.

Insgesamt ist es bei keinem vorhandenen Verfahren möglich, alle für Messungen relevanten systematischen Fehler simultan zu bestimmen. Weiterhin wird zurzeit keine rückgeführte Kalibrierung von Wellenfrontsensoren angeboten. Hiedurch besteht Bedarf an weiterer Forschung in diesem Aufgabengebiet.