

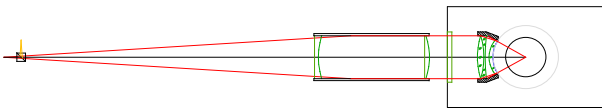
# Messung ausgedehnter Wellenfronten mit einem Shack–Hartmann Sensor

Arnold Nicolaus, Michael Schulz, Ingolf Weingärtner  
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig  
 mailto: Arnold.Nicolaus@ptb.de

Für die Wellenfrontmessung von Prüflingen großen Durchmessers wird ein neues subapertures Wellenfrontmessverfahren vorgestellt. Verwendung findet ein kommerzieller Shack-Hartmann-Sensor, der mit großem Überlappungsbereich über die zu messende Wellenfrontfläche geführt wird. Die gesamte Wellenfront wird aus den Spotverschiebungen der Einzelbilder zusammengesetzt.

## 1 Einführung

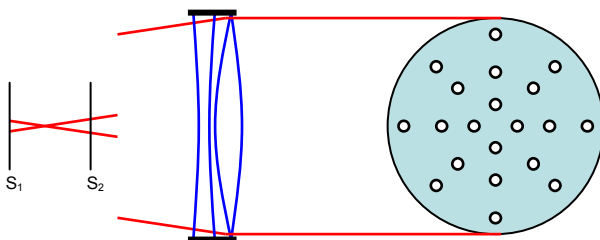
Ein Beurteilungskriterium für ein optisches System ist neben der allgemeinen Abbildungsleistung die Wellenfront. Sollen bei Hochleistungsobjektiven Angaben im  $\lambda/100$ -Bereich gewonnen werden und sind gleichzeitig große Durchmesser zu beurteilen, ist eine Messung sehr aufwändig, bzw. gar nicht durchführbar. Im Rahmen der Neubestimmung der Avogadro-Konstanten wurde in der PTB ein Kugelinterferometer aufgebaut [1, 2], mit dem Unsicherheiten interferometrischer Längenmessungen erreicht werden ( $< 1 \text{ nm}$ ), die eine genauere Betrachtung der optischen Eigenschaften der Beleuchtungs- und Abbildungssysteme erforderlich machen.



**Abb. 1** Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlengang des Kugelinterferometers der PTB. Durchmesser des kollimierten Strahls 130mm.

So soll zunächst das Kollimator-Objektiv untersucht werden, um durch eine optimierte Justage des Objektivs (Fraunhofer-Typ) oder ggf. den Einsatz einer Korrekturlinse eine optimale Wellenfront zu erreichen.

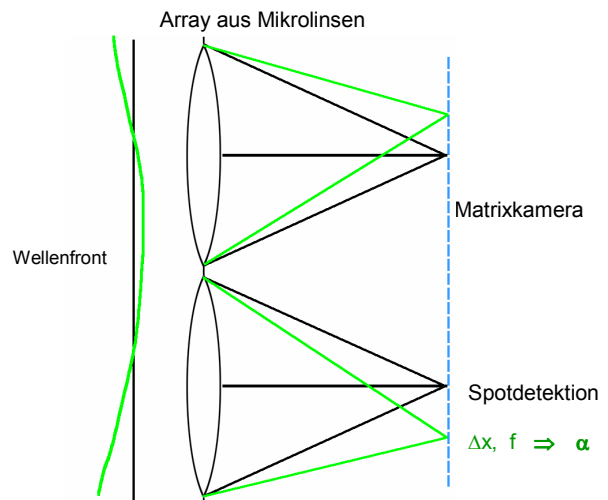
Bereits 1904 hat Hartmann ein Verfahren zur Beurteilung allgemeiner optischer Instrumente vorgeschlagen [3]. Um die Abbildungsleistung eines Objektivs in Abhängigkeit von der Einfallshöhe  $r$  und



**Abb. 2** Blende nach Hartmann [3]. Die Lage des Bildpunktes jedes Strahlenbündels wird aus zwei Messungen vor und hinter dem Fokus gewonnen.

der Position  $\varphi$  zu bestimmen, wird vor das Objektiv eine Blende gesetzt, die nur bestimmte Strahlenbündel auswählt, deren Bild dann mittels zweier extrafokaler Messungen bestimmt wird.

Für die Messung von Wellenfronten werden heute Shack-Hartmann Sensoren eingesetzt. Hier erfolgt die Auswahl der Strahlenbündel durch ein sehr gleichabständiges Array aus Mikrolinsen (typisch etwa  $20 \times 30$  Linsen), deren Foki auf einer Matrixkamera abgebildet werden. Aus der Verlagerung des Fokus  $\Delta x$  lässt sich die differentielle Winkeländerung  $\alpha$  der Wellenfront bestimmen.



**Abb. 3** Prinzip des Shack-Hartmann-Sensors SHS

Kommerzielle Geräte sind allerdings in den Lateraldimensionen auf einige mm beschränkt (Größe der CCD-Sensoren), so dass für große Strahldurchmesser ein Objektiv empfohlen wird, das die Strahldurchmesser adaptiert.

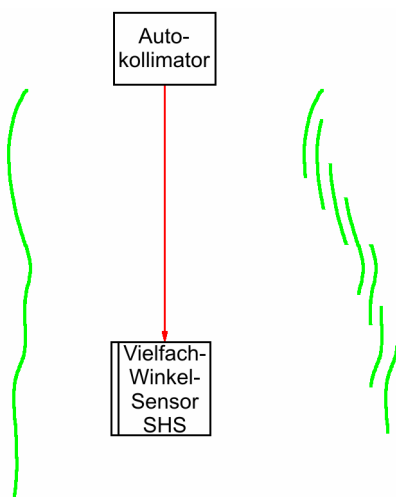
## 2 Subaperture Messung

Bei der Beurteilung eines Hochleistungsobjektivs wird das Ergebnis von den Wellenfrontaberrationen des Adapters für die Strahlquerschnittsanpassung dominiert. Es soll im Folgenden ein Verfahren vorgestellt werden, das es gestattet, ausge-

dehnte Wellenfronten ohne zusätzliche Optik zu erfassen.

Tastet man die Wellenfront durch einen subaperturen Winkelsensor in Einzelschritten ab, so lassen sich die einzelnen Ergebnisse nur aneinander ansetzen und die Wellenfront rekonstruieren, wenn die zusätzliche Neigung des Sensors durch die Stellungsfehler bei jeder einzelnen angefahrenen Position bestimmt wird. Dies kann z.B. durch ein Autokollimationsfernrohr (AKF) erfolgen, das die Winkelabweichung des Sensors in jeder Position aufnimmt. Man erhält dann eine in erster Ordnung fehlerfreie Messung des ‚slope‘ [4]. Die Genauigkeit ist durch die Unsicherheit der Winkelbestimmung des Winkelsensors sowie des AKF bestimmt.

Ersetzt man in diesem Messaufbau den Einzel-Winkelsensor durch einen Vielfach-Winkelsensor wie den Shack-Hartmann-Sensor, so gewinnt man



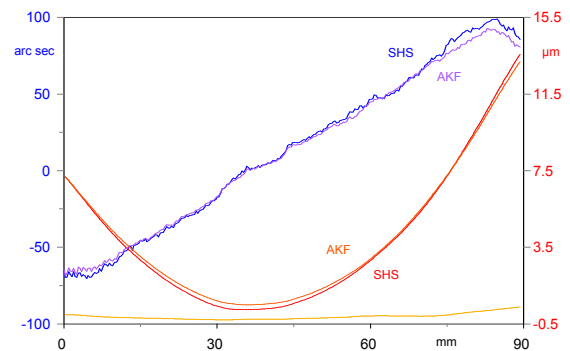
**Abb. 4** Zusammensetzen der Wellenfront aus überlappenden Teilmessungen

zusätzliche Information aus dem Bezug der benachbarten Zellen des SHS zueinander.

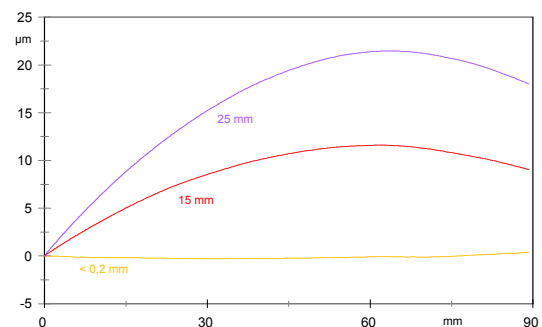
### 3 Experiment und Messergebnisse

Es wurde ein Optocraft SHS mit 20x28 Mikrolinsen ( $f = 26 \text{ mm}$ ) eingesetzt. Bei einem Durchmesser der Linsen von 0,32 mm und einem Kamerachip mit 572 x 736 Pixeln kann jeder Mikrolinse ein Spotdetektionsbereich von etwa 30 Pixel Durchmesser zugeordnet werden. Der SHS wurde in einer Spiegelhalterung auf einem motorisch angetriebenen X-Y-Tisch montiert und das Mikrolinsenarray senkrecht zur optischen Achse des zu prüfenden Kollimators justiert. Direkt an das Gehäuse des SHS wurde der Hilfsspiegel des AKF montiert und senkrecht zum AKF justiert. Das AKF wurde auf die Verschieberichtung des X-Y-Schlittens ausgerichtet. Für einen x-Scan wurde eine Position in x-Richtung angefahren, die AKF-Anzeige eingelesen, für eine x-Zeile des SHS die Spotverschiebungen aufgenommen und die zugehörigen Winkel

berechnet. Das Inkrement der Verschiebung wurde gleich dem Durchmesser einer Mikrolinse gewählt, der Überlapp beträgt also  $N - 1 = 27$  Mikrolinsen. Die Ergebnisse für willkürlich erzeugte Wellenfrontkrümmungen zeigen die Abb. 5 und 6. Dazu wurde die Lichtquelle (Faserende) in drei Stufen aus dem Fokus des Kollimators gerückt.



**Abb. 5** ‚Slope‘, gemessen mit dem AKF (lila) und dem SHS (blau). Die Kurve rührt im Wesentlichen von der Bahnkurve des X-Y-Schlittens her. Die Differenz (gelb) der integrierten Kurven (rot, orange) ist ein Maß für die Wellenfront.



**Abb. 6** Gemessene Wellenfront für drei extrafokale Positionen des Faserendes

Im Hinblick auf höchstauflösende Wellenfrontmessungen ist eine spezifische Anpassung des SHS erforderlich. Die weiteren Planungen zielen auf eine Erhöhung der Empfindlichkeit durch langbrennweitige Linsen und eine Reduzierung der Pixeleffekte durch eine höhere Pixelzahl pro Linse und einen größeren Kamerachip.

### Literatur

- [1] R. A. Nicolaus, G. Bönsch "A Novel Interferometer for Dimensional Measurement of a Silicon Sphere", IEEE Trans. Instrum. Meas. 46, (1997), 563-565
- [2] P. Becker, H. Bettin, H.-U. Danzebrink, M. Gläser, U. Kuetgens, A. Nicolaus, D. Schiel, P. de Bièvre, S. Valkiers, P. Taylor „Determination of the Avogadro constant via the silicon route“, Metrologia 40, (2003), 271-287
- [3] J. Hartmann „Objektivuntersuchungen“, Zeitschrift für Instrumentenkunde 24, (1904), 1-21
- [4] I. Weingärtner, M. Schulz