

# Vignettierung als physikalisches Messprinzip zur Charakterisierung von Asphären

E. Hofbauer, R. Kometer  
Hofbauer Optik Mess- und Prüftechnik, Munich, Germany  
mailto: e.hofbauer@hofbauer-optik.de

Bei Anwendungen in der industriellen Bildverarbeitung und Messtechnik mit Autokollimatoren, spielt die Vignettierung eine problematische Rolle. Das physikalische Prinzip des ‚Vignettierenden Feldblenden-Systems‘ VFS löst das Problem, indem das vignettierte Gesichtsfeld ausgewertet wird. Wir zeigen Messprinzip, die Messung des inneren Zentrierfehlers und die Charakterisierung asphärischer Oberflächen.

## 1 Einführung

Hochaperturige Asphären z.B. zur Kollimation von Laserstrahlung sind sehr empfindlich auf Kippwinkeltoleranzen. Es zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Coma vom Flächenkippwinkel der Asphäre bzw. durch einen Keilfehler. Bei nur 0,3 wmin Kippfehler an einer Linse mit  $NA = 0,5$  wird der Strehl von  $S=1$  auf unter 0,8 gedrückt [1].

Asphären unterliegen einer punktuellen Bearbeitungsprozedur und müssen anderen Betrachtungsaspekten unterzogen werden. Beim Umspannen der Halbfertiglinse treten Fehler auf, wenn der Krümmungsmittelpunkt der zuerst gefertigten Sphäre auf die Fertigungsspindeln durch Spannzanze, Vakuumfutter oder HD-Futter nicht auf der Werkstück-Spindelachse sitzt.

## 2 VFS-Prozedur

Das vignettierende Feldblendenverfahren geht aus einer Erfindung in 2004 zurück. Es nutzt die Vignettierung in einer speziellen Autokollimationsanordnung mit einem Planreflektor. Dabei wird die Aperturblende gleichzeitig als Feldblende genutzt [2, 3].

Die Feldblende wird dabei unscharf auf die Kamera abgebildet. Dadurch, dass die Beleuchtungsebene mindestens so groß ist wie die Empfangsebene, entsteht auf der Kamera in jedem Bereich des Gesichtsfeldes ein vignettiert abgebildeter Licht-Spot.

Das Verfahren wird vor allem zur Justierung von Winkel- und Positionsabweichungen an wissenschaftlich optischen Geräten mit bis zu 4 Freiheitsgraden (DoF) und bis zu 6 DoF bei der volumetrischen Maschinenkalibrierung genutzt.

Dadurch, dass der V-SPOT unscharf abgebildet ist, gibt es bei der Anwendung keine Unschärfeproblematik wie bei einer normalen Abbildung (z.B. Fadenkreuzautokollimator). Es gibt also keine begrenzte Schärfentiefe.

Die Intensität im Zentrum des V-SPOT's ist unabhängig vom Abstand des Spiegels nahezu konstant,

da der Lichtstrom des Leuchtpunktes des Hauptstrahls über die feste Aperturblende senkrecht auf den Spiegel trifft und damit in sich selbst reflektiert wird und wieder durch die Aperturblende verläuft.

## 3 VFS-Prozedur an Sphären und Asphären

Abb. 1 zeigt die Anordnung für die Zentriermessung an einer Asphäre. Mit Hilfe einer Vorsatzlinse wird die Wellenfront an die Form des Prüflings angepasst. Es ergibt sich eine Abbildung der Lichtquelle auf dem Detektor mit einem Hauptstrahl, der wie beim Planspiegel senkrecht auf den Prüfling trifft und in sich reflektiert wird.

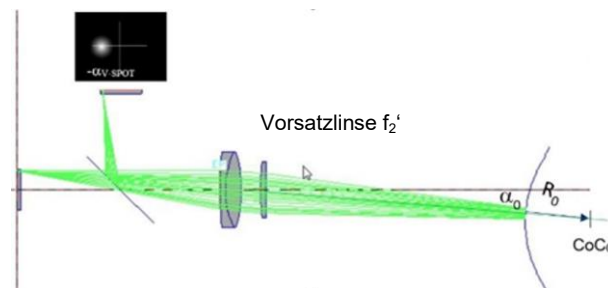


Abb. 1 Anordnung bei der Zentriermessung an einer Asphäre mit Abbildung des verschobenen V-SPOT's.

Die Brennweite der Vorsatzlinse  $f_2'$  im Vergleich zum Prüflingsradius  $R_0$  definiert bei konstanter Aperturblende die Größe des V-SPOT auf dem Detektor (Abb. 2). Die seitliche Verschiebung ( $dx$ ,  $dy$ ) des Konfokalpunktes im Scheitel  $CoCo$  in Relation zum Radius  $R_0$  ergibt den Winkelmesswert des Kippwinkels  $\alpha_{xV-SPOT}$  als Schwerpunktsverschiebung des Lichtkegels bzw. vignettierten, so genannten V-SPOT.

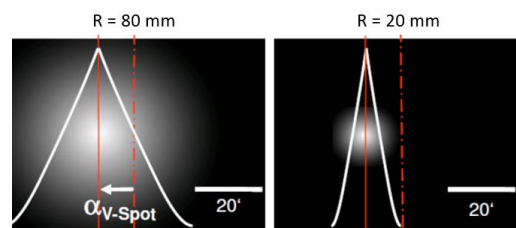


Abb. 2 V-SPOT bei verschiedenen Radien mit einer definierten Vorsatzlinse.

## 4 Zentriermessung an Asphären

Im Gegensatz zu sphärischen Linsen haben Asphären am Rand unterschiedliche Krümmung in zwei zueinander senkrechten Schnitten. Dennoch fällt der Hauptstrahl immer senkrecht auf den Prüfling. Der Schwerpunkt eines entsprechenden V-SPOT's ist über Bildverarbeitungs-Algorithmen hochpräzise bis Pixel/ 80 auswertbar [4].

### 4.1 Two Step Single (einseitige Asphäre)

Ist die Asphäre nahezu perfekt, reicht es, die Zentrierbewegung des Konfokalpunktes an maximal zwei Positionen aufzunehmen - am Scheitel und an einem geeigneten zweiten Ort, bei dem der Konfokalabstand  $CoC_n$  zum Abstand am Scheitel  $CoC_0$  ( $q = CoC_n - CoC_0$ ) möglichst groß ist. Es reicht, entweder die meridionale oder sagittale Strahlrichtung auszuwerten, da sie redundante Ergebnisse liefern. In der Regel ist aber die meridionale Auswertung sicherer, da das  $q_{mer}$  i.d.R. größer ist und deshalb für die Auswertung des Winkels eine geringere Messunsicherheit beinhaltet.

### 4.2 Auswertung ‚innerer‘ Zentrierfehler

Die Auswertung des ‚inneren‘ Zentrierfehlers erfolgt über entsprechende Algorithmen und Mathematisch-geometrische Modelle. Mit nur 2 Auswertungen der asphärischen Fläche einer Asphäre-Sphäre sowie der Messung der Sphäre auf der Rückseite durch die Asphärenfläche hindurch, ermöglicht die eindeutige Bestimmung des inneren Zentrierfehlers. Die gemessene Lage des virtuellen Krümmungsmittelpunktes der Sphäre ergibt über Rückwärtsrechnung die reale Lage bzw. Dezentrierung des Krümmungsmittelpunktes der Sphäre. Der Abstand dieses CoC ergibt sich durch entsprechende Koordinatentransformation bei der Referenzierung auf die Asphärenachse.

### 4.3 High Resolution Surface Scan HRSS

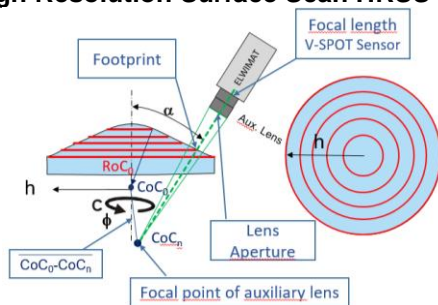


Abb. 3 Setup für Asphärenmessung mit HRSS.

Die Auswertung von mehreren konzentrischen Kreisen über die Variable  $h$  durch unterschiedliche Messpositionen unter entsprechenden Winkeln  $\alpha$  (Abb. 3), ermöglicht eine erhöhte Genauigkeit bei der Bestimmung der Asphärenachse (Abb. 4).

Es ermöglicht außerdem eine Aussage über Unregelmäßigkeiten der Konfokalpositionen der Asphäre und damit einen Rückschluss auf die Asphärenachse und über mögliche Formfehler.

Die Punkte der Dezentrierung entlang der Asphärenachse kann nicht wirklich durch eine Gerade angepasst werden. Dies deutet auf eine Änderung der lokalen Neigung in Abhängigkeit von der Messzone hin. Diesen Effekt nennen wir „Knick in der Optik“.

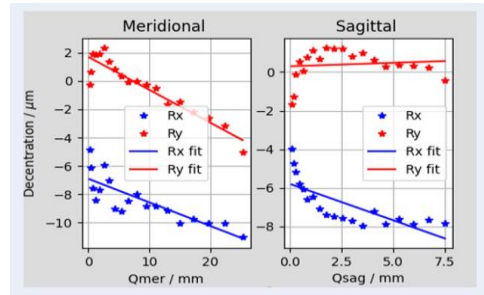


Abb. 4 Konfokalabweichung meridional und sagittal; ein Geradenausgleich ist nicht möglich = „Knick in der Optik“.

## 5 Effekte von lokalen Formabweichungen

Die Oberflächenmessung zeigt ein starkes asymmetrisches Mittenartefakt - d.h. ein ‚lokales Coma‘ höherer Ordnung an der Oberflächenform.

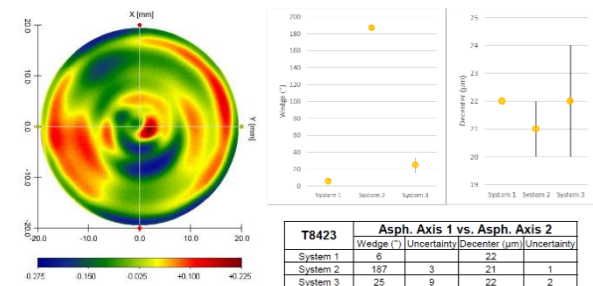


Abb. 5 Oberfläche der Asphäre links und Ergebnis von Zentriermessungen unterschiedlicher Verfahren [5].

Dieses lokale Coma fällt zwischen die klassische Form- und Zentrier-Spezifikation, was beim Vergleich verschiedener Messtechniken deutlich wird, die je nach Auswertverfahren starke Unterschiede im gemessenen Asphärenwinkel zeigen [5].

## Literatur

- [1] E. Hofbauer: Everything you always wanted to know about aspheres, White Paper im Eigenverlag, 2024
- [2] E. Hofbauer: Verfahren und Messvorrichtung zur berührungslosen Messung von Winkeln oder Winkeländerungen an Gegenständen Veröffentlichungs-Nr.: EP 1636542 B1, 2004
- [3] E. Hofbauer, M. Lenz: Vignettierung als physikalisches Messprinzip zur zweidimensionalen Winkelmessung; tm-Technisches Messen, 75 (3), 2008
- [4] E. Hofbauer, R. Rascher, F. Friedke, R. Kometer: Resolution, measurement errors and uncertainties on deflectometric acquisition of large optical surfaces "DaOS", Proc. of SPIE Vol. 10326 1032603-2, 2019
- [5] M. Knobl, J. DeGroote-Nelson et al.: High Order Surface Artifacts on Aspheres and their Interpretation in Metrology and Tolerancing; EOSAM 2024