

# Vignettierung als physikalisches Messprinzip zur 3D-Messung

Engelbert Hofbauer\*, Mathias Lenz\*\*, Felix Friedke\*, Thomas Stubenrauch\*, Konrad Wühr\*, Benjamin Pastötter\*, Roland Maurer\*

\* Technische Hochschule Deggendorf

\*\* HOFBAUER OPTIK Mess-&Prüftechnik, München

mailto:engelbert.hofbauer@th-deg.de

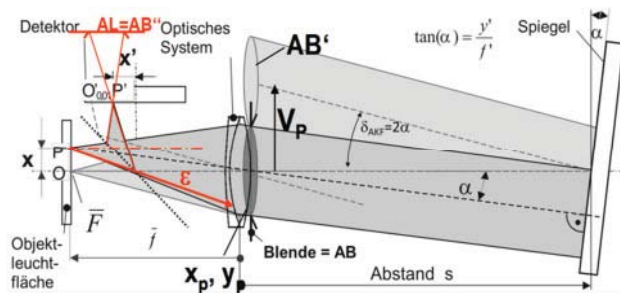
Ein neu entwickeltes V-Spot-Verfahren nutzt Vignettierung als physikalisches Messprinzip. Winkeländerungen, laterale Positionsabweichungen longitudinale Positionen über Triangulation sowie Rollwinkelerfassung ermöglicht 3D-Messungen bei 6 Freiheitsgraden. Nebenbei hat der Sensor das Potential zur 3D-Rekonstruktion sphärischer, asphärischer und Freiform-Flächen  $< \lambda/10$ .

## 1 Einführung

Autokollimationsfernrohre haben aufgrund des Messprinzips eine doppelte Empfindlichkeit gegenüber einfachen Abbildungsverfahren, sind aber in Punkto Messabstand und Messbereich durch Abschattung begrenzt. Das „Vignettierende Feldblendenverfahren“ [1] ermöglicht durch die Anordnung eines optischen Systems mit Planspiegel bzw. Retroreflektor die Nutzung der Vignettierung als physikalisches Messprinzip zur Winkelmessung bei großen Winkeln und großen Messabständen sowie Sondermessungen bis zu 6 Freiheitsgrade.

## 2 Physikalische Grundlagen

Bild 1 zeigt die Prinzipskizze zur zweiachsigen Winkelmessung mit ausgedehntem Objektleuchtfeld und die Wirkung der körperlichen Blende (=AB) als Apertur- und Feldblende bei ausreichend großem Abstand  $s$ . Am Detektor wird die Austrittsluke als Abbild der Aperturblende an Spiegel und optischem System unscharf abgebildet.



**Abb. 1** Prinzipskizze des optischen Systems mit Brennweite  $f'$ , Aperturblende  $AB$  und Planspiegel als Reflektor. Punkt  $P$  wird mit maximaler Helligkeit in  $P'$  abgebildet.

Die Beleuchtungsstärkeverteilung in der Bildebene ist neben den geometrischen Einflüssen (Abbildungsmaßstab  $\beta'$ , Brennweite  $f'$ , Winkel  $\alpha$  bzw. Lage  $x', y'$ , sowie Blendendurchmesser auch von lichttechnischen Effekten beeinflusst. Diese im Normalfall nichtlinearen Einflüsse wie Leuchtdichteverteilung in Abhängigkeit des Ortes  $L(x,y)$ ,

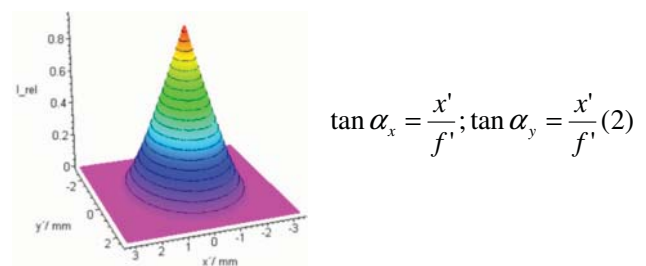
sowie Lichtstärkeverteilung in Abhängigkeit des Winkels  $l(\epsilon)$  definieren im Wesentlichen die Präzision des Sensors und müssen näher betrachtet werden. Ggf. müssen diese eingestellt und Abweichungen kompensiert werden. Die Beleuchtungsstärkeverteilung für jeden einzelnen Bildpunkt in Abhängigkeit von  $s$  und  $\alpha$  ergibt sich durch Gleichung 1. Die Integration erfolgt über die Grenzen der geometrischen Schnittmenge von Austrittspupille  $AB'$  mit der körperlichen Blende  $AB$  [1].

$$E(x', y') = \frac{L(x, y) \cdot \Omega_0}{f'^2 \beta'^2} \iint_{AB' \cap AB} \frac{1}{\left(1 + \frac{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2}{f'^2}\right)^{\frac{p+4}{2}}} dx_p dy_p \quad (1)$$

mit:

$$y = f' \cdot \frac{f' \cdot \sin(2\alpha) - y' \cdot \cos(2\alpha)}{f' \cdot \cos(2\alpha) + y' \cdot \sin(2\alpha)} \quad x = f' \cdot \frac{-y'}{f' \cdot \cos(2\alpha) + y' \cdot \sin(2\alpha)}$$

Über die gesamte Bildfläche betrachtet, ergibt sich dann eine sog. V-SPOT-Verteilung, aus deren Lage  $x', y'$  sich der Winkel nach Gl. 2 errechnet.

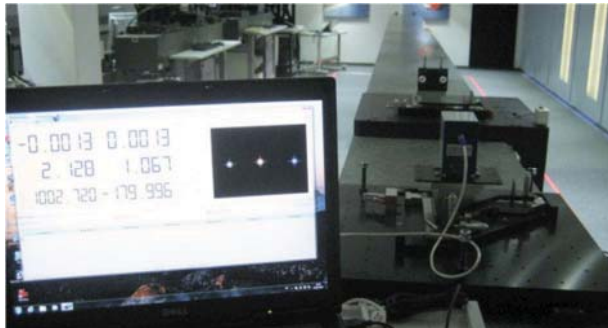


**Abb. 2** V-Spot-Verteilung in 3D-Darstellung bei kurzem Abstand und Winkel  $\alpha = 0^\circ$ .

## 3 Applikationen zur 3D-Messung

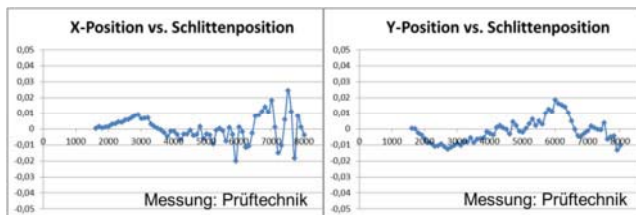
Mit Hilfe eines Tripelreflektors kann die laterale Position über Triangulation bestimmt werden. Verwendet man zwei Tripel, wird zusätzlich über den bekannten Basisabstand  $b$  die Entfernung und der Rollwinkel bestimmt. Das ganze erfolgt gleichzeitig mit nur 3 V-Spots in einer Bild-Abtastung. Bild 3 zeigt den Messaufbau an einer 8 m Granitbank im klimatisierten Messlabor. Der Sensor befindet sich

am ortsfesten Schlitten, der Spezialreflektor mit zentral angeordnetem  $\varnothing$  38 mm Planspiegel und zwei Tripelprismen, auf dem Messschlitten. Dieser ist luftgelagert, wird in Schritten von 100 mm auf der Präzisionsbank (Abweichung  $< 10 \mu\text{m}$ ) verschoben und die Lage mit dem Sensor bzw. PC-Auswertesoftware ausgewertet.



**Abb. 3** Messaufbau an 8m-Granitbank mit Spezialreflektor (1 Spiegel, 2 Tripel) zur 3-D-Messung mit 3 V-Spot's.

Bild 4 zeigt das Ergebnis der Positionsabweichung in X- und Y-Richtung, gemessen über die Tripelreflektoren. Dies entspricht der Geradheitsmessung nach der Höhenmethode bzw. einer Fluchtungsmessung. Es zeigt sich eine max. Abweichung von  $25 \mu\text{m}$  bei Position 7,5 m in X- und  $20 \mu\text{m}$  bei Position 6 m in Y-Richtung.

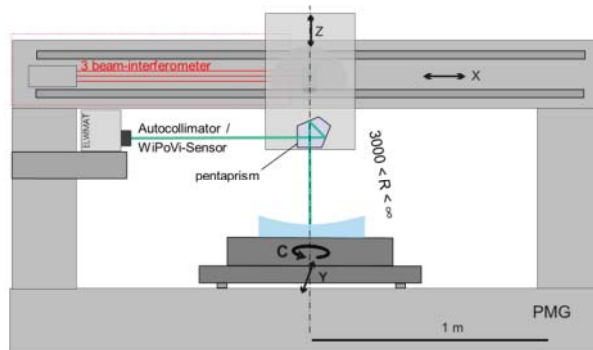


**Abb. 4** Flucht-Geradheitsmessung nach der Höhenmethode an 8m-Präzisions-Granitbank mit Spezialreflektor.

Im vorderen Bereich ist eine gewisse Nichtlinearität erkennbar, welche durch ungleichmäßige Leuchtdichteverteilung in der Objektebene hervorgerufen wird. Diese Verteilung kann in Zukunft kompensiert werden. Im hinteren Bereich ist die Streuung aufgrund Luftbewegung größer. Außerdem nimmt die Messunsicherheit bei großem Abstand zu bzw. die Auflösungsgrenze linear mit dem Abbildungsmaßstab ab. Der max. Abstand beim verwendeten Sensor (mit  $f' = 46 \text{ mm}$ ) wird mit  $\leq 4 \text{ m}$  empfohlen.

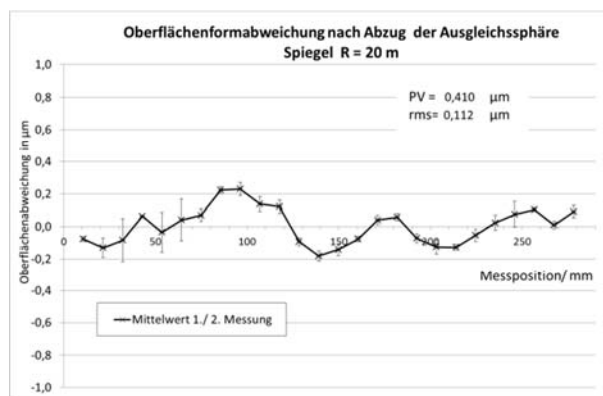
#### 4 DSR-Verfahren zur 3D-Rekonstruktion

Abgeleitet vom Ebenheitsverfahren über Autokollimator und Pentaprisma [2], lassen sich mit dem Deflectometric Surface Reference Verfahren aus Bild 5 unter Zuhilfenahme des neuen Vignettierungsverfahrens auch gekrümmte Flächen absolut und ohne Referenzfläche vermessen. Vor allem bei asphärischen Flächen mit variablen Krümmungen ist die unscharfe Austrittsluke Bedingung.



**Abb. 5** Messprinzip Deflectometric Surface Reference mit Vignettierungssensor am a-sphärischen Prüfling.

Eine erste Messung am verspiegelten Prüfling ( $R = 20 \text{ m}$ ) mit 2 gegenläufig gemessenen Einzelschnitten (zur Korrektur systematischer Einflüsse des Aufbaus) ist in Abb. 6 gezeigt. Der rms-Wert liegt bei  $112 \text{ nm}$  ( $\lambda/5 @546$ ). Der mittlere Fehler des Mittelwertes aus beiden Durchläufen ist als Fehlerbalken in der Grafik dargestellt. Der maximale Wert liegt bei  $\pm 110 \text{ nm}$ , der mittlere bei  $\pm 45 \text{ nm}$  ( $k=1$ , Wahrscheinlichkeit 68%).



**Abb. 6** Ergebnis der Oberfläche des Prüflings  $R = 20 \text{ m}$  im Schnitt nach Abzug der Ausgleichssphäre

#### 5 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem vignettierenden Feldblendenverfahren 3D-Messwerte in 6 Freiheitsgraden ermittelt werden. Experimentelle Ergebnissen in der Höhenmethode von kleiner  $25 \mu\text{m}$  pro  $8 \text{ m}$  Messlänge werden erreicht. In Kombination mit dem neuen DSR-Verfahren lassen sich auch Radien- und Formabweichung an großen Sphären bereits jetzt im Bereich von  $< \lambda/5 \text{ rms}$  in einem Scan (Schnitt) vermessen.

#### Literatur

- [1] E. Hofbauer, M. Lenz: „Vignettierung als physikalisches Messprinzip“, in Technisches Messen 75, 3/2008
- [2] E. Debler, K. Zander: „Ebenheitsmessung an optischen Planflächen mit Autokollimationsfernrohr und Pentagonprisma“, PTB Mitteilungen Forschen + Prüfen, 89. Jahrgang, 1997