

# Vermessung spiegelnder Oberflächen – eine Aufgabe der optischen 3D-Sensorik

Markus Knauer, Institut für Optik, Information und Photonik, Universität Erlangen-Nürnberg  
Klaus Veit, 3D-Shape GmbH, Erlangen

Bei der Vermessung spiegelnder Freiformflächen, beispielsweise Präzisionsoptiken oder Brillengläser mit individuellen Asphären, kann die Phasenmessende Deflektometrie (PMD) eine Seite des Glases unabhängig von der anderen beurteilen. Um die lokale Neigung der Oberfläche zu ermitteln, projiziert eine Beleuchtungseinheit Streifenmuster mit sinusförmigen Intensitätsverteilungen auf eine Mattscheibe. Die gespiegelten Muster auf der Oberfläche des Messobjekts werden dann von einer Kamera aufgenommen und aus der Verzerrung der Muster kann direkt die lokale Neigung gemessen und daraus die lokale Oberflächenkrümmung berechnet werden. Darin liegt der entscheidende Vorteil gegenüber höhenmessenden Verfahren, deren Messdaten zweimal abgeleitet werden müssen, wodurch das hochfrequente Rauschen steigt.

Es gibt eine Vielzahl von Methoden, um die Form von diffus reflektierenden Freiformflächen zu messen, wie z.B. Streifenprojektions- oder Aktive Stereoverfahren [1]. Die Form von spiegelnden Freiformflächen ist jedoch viel schwieriger zu messen, da die Oberflächen selbst nicht sichtbar sind - wir sehen nur die Wirkung, die sie auf einfallendes Licht haben.

Eine Möglichkeit zur Vermessung von optischen Flächen besteht darin, einen optischen Krümmungssensor entlang der Oberfläche zu führen [2]. Ein Nachteil dieser Methode ist die für die Bewegung des Sensors erforderliche Mechanik. Eine weitere Möglichkeit sind interferometrische Methoden, die in der Regel jedoch komplizierte und teure Kompensationsoptiken benötigen [3, 4]. Neben dem Messen von Weglängendifferenzen, wie bei den interferometrischen Methoden, ist es auch möglich, die Ablenkung (engl. deflection) von reflektierten oder transmittierten Lichtstrahlen zu messen. Eine wichtige deflektometrische Methode ist das Shack-Hartmann-Prinzip [5, 6], sie ist jedoch hinsichtlich der Dynamik und der Anzahl von Messpunkten begrenzt. Andere bekannte Verfahren zur Vermessung von asphärischen Flächen sind die Moiré-Deflektometrie oder das Raster-Reflexionsverfahren von Ritter et al. [7], die von mehreren Forschungsgruppen untersucht werden [8, 9].

Deflektometrische Methoden sind im Allgemeinen nicht eindeutig bezüglich der Berechnung der Oberflächennormale. Da die primäre Messgröße die Neigung ist, geht

jede Information über die Objekthöhe verloren. Deshalb können viele deflektometrische Verfahren nur für qualitative Inspektion und nicht für absolute Neigungs- und Höhenmessung verwendet werden. Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf einem Stereoverfahren und hebt diese Mehrdeutigkeit auf [10].

Die **Phasenmessende Deflektometrie (PMD)** kann Oberflächen sehr schnell mit einer Genauigkeit nahe der physikalischen Grenze vermessen. Eine genaue Kalibrieremethode kombiniert Deflektometrie und Photogrammetrie. Das Verfahren eignet sich zur Vermessung verschiedenster spiegelnder Oberflächen. Dies bezieht sich insbesondere auf Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen, wie z.B. die Messung von Wafern oder Präzisionsoptiken. Die Methode kann aber auch für die schnelle



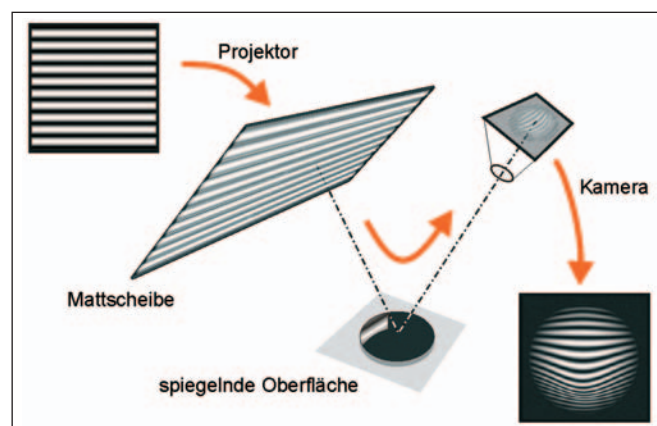
**Bild 1:** Veranschaulichung der Deflektometrie: In einer Glasfassade wird die gegenüberliegende Häuserfront gespiegelt.

Inspektion größerer Objekte angepasst werden, wie z.B. lackierte Autokarosserien oder Scheinwerfer.

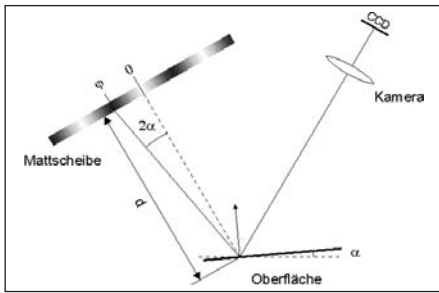
Eine wichtige Anwendung ist die Vermessung von Gleitsichtgläsern. Hier ist insbesondere die lokale Krümmung der Oberfläche von Interesse. Um die Krümmung aus Höhendaten zu berechnen, müsste zweimal abgeleitet werden. Wenn man bereits über Neigungsdaten verfügt, muss nur noch eine Ableitung berechnet werden. Da jede Ableitung das Rauschen verstärkt, sind deflektometrische Methoden hier klar im Vorteil gegenüber höhenmessenden Methoden.

## 1 Messprinzip PMD

**Bild 1** veranschaulicht das Messprinzip: Die Glasfassade reflektiert unterschiedliche Ausschnitte der Häuserwand, je nach lokaler Neigung der Glasscheibe.



**Bild 2:** Der schematische Aufbau eines PMD-Sensors. Mit einem Projektor werden Sinusstreifen auf einer Mattscheibe erzeugt. Eine Kamera beobachtet das an der spiegelnden Oberfläche reflektierte Muster. Je nach Form des Objektes erscheint das beobachtete Streifenmuster verzerrt.



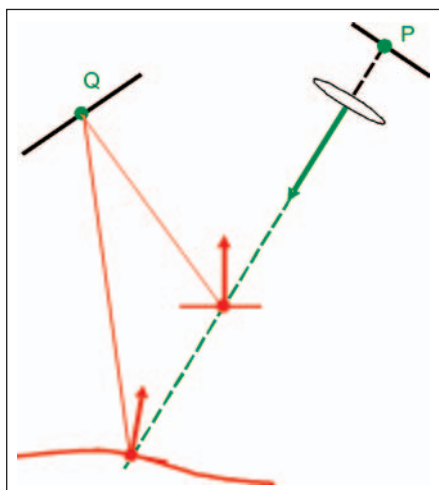
**Bild 3:** Ein Punkt der Mattscheibe, der über die Objektoberfläche in die Kamera reflektiert wird. Die Phase  $\varphi$  ist ein Maß für die lokale Objektneigung  $\alpha$ .

Spiegelnde Oberflächen reflektieren das Licht nur in eine Richtung. Deshalb wird das einfallende Licht mit Hilfe einer großen Mattscheibe aus vielen verschiedenen Richtungen zur Verfügung gestellt. Dadurch wird sichergestellt, dass Licht in die Pupille der beobachtenden Kamera fällt. In **Bild 2** ist der Aufbau eines PMD-Sensors schematisch dargestellt.

**Bild 3** zeigt einen Lichtstrahl, welcher von der Mattscheibe über die Objektoberfläche in die Kamera reflektiert wird. Alle deflektometrischen Methoden sind durch das Schärfentiefeproblem begrenzt, da die Kamera nicht gleichzeitig auf Objekt und Mattscheibe scharf gestellt werden kann. Im Gegensatz zum Rasterreflexionsverfahren [7] werden bei PMD Sinusstreifen projiziert: Die Phase von Sinusstreifen bleibt bei unscharfer Abbildung konstant [11]. Diese Phase  $\varphi$  kann man in jedem Kamerapixel messen. Abhängig von der lokalen Neigung der Oberfläche und dem Abstand  $d$  zwischen Mattscheibe und Objekt verhält sich die Phase gemäß

$$\varphi = d \cdot \tan(2\alpha) \quad (1)$$

Die Auswertung des Sinusmusters erfolgt über bekannte Phasenschiebe-Verfahren.



**Bild 4:** Mehrdeutigkeit der Normalenberechnung. Die Position der Oberfläche ist bei der Messung nicht bekannt.

Um Neigungsvariationen in beiden Azimuten zu detektieren, müssen sowohl horizontale als auch vertikale Streifen projiziert werden. Da die Sinusstreifen unscharf abgebildet werden, sinkt der Streifenkontrast und die Messunsicherheit wird größer. Daraus ergibt sich eine fundamentale Unschärferelation [10]:

$$\tan(\delta\alpha) \cdot \delta x > \pi \lambda / Q \quad (2)$$

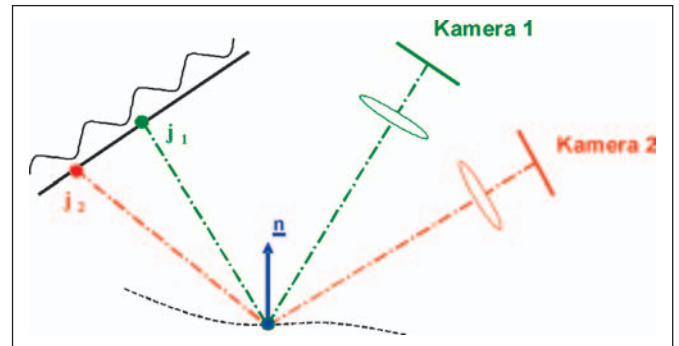
Die erreichbare Messunsicherheit  $\delta\alpha$  hängt von der gewünschten lateralen Auflösung  $\delta x$ , der mittleren Wellenlänge  $\lambda$  und der Qualität der Kamera  $Q$  ab.

## 2 Das Stereo-Messverfahren

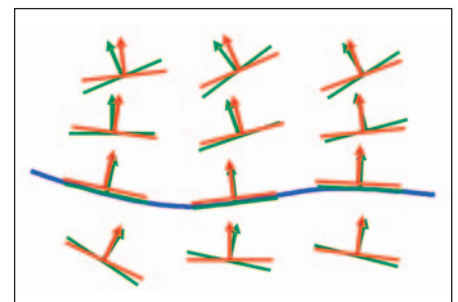
Durch geeignete Kalibrierverfahren können für jedes Pixel  $P$  der Kamera die Sichtrichtung sowie der beobachtete Punkt  $Q$  auf der Mattscheibe bestimmt werden. Aus dem Schnittpunkt des Sichtstrahls mit der Objektoberfläche kann die Oberflächen-Normale berechnet werden. Dieser Schnittpunkt ist jedoch – wie bei allen deflektometrischen Verfahren – nicht eindeutig zu bestimmen (**Bild 4**).

Das Prinzip der **Stereo-Deflektometrie** löst diese Mehrdeutigkeit durch den Einsatz einer zweiten Kamera. Im Gegensatz zu klassischen Stereoverfahren auf diffus streuenden Oberflächen ist es auf spiegelnden Oberflächen nicht trivial, korrespondierende Punkte in beiden Kameras zu finden: In den Punkten der Kameras, die denselben Punkt auf der Objektoberfläche abbilden, werden unterschiedliche Phasen, d.h. Punkte  $Q$  auf der Mattscheibe, gemessen (**Bild 5**). Was für beide Kameras jedoch gleich sein muss, ist die Normale  $n$ .

Im kalibrierten System kann die „potenzielle Normale“ für beliebige Punkte im Messraum berechnet werden, also die Normale einer



**Bild 5:** Stereo-Deflektometrie. In den korrespondierenden Punkten der beiden Kameras werden unterschiedliche Phasen aber die gleiche Oberflächennormale  $n$  gemessen.

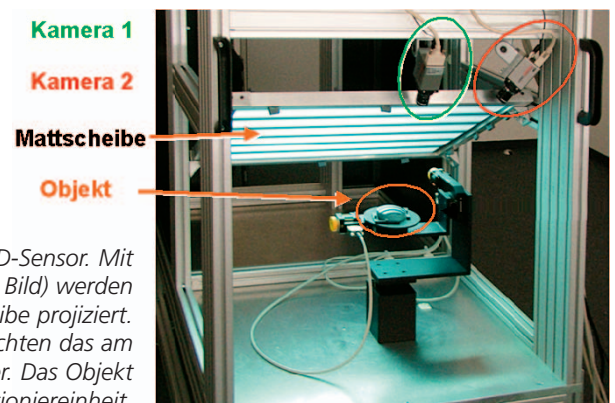


**Bild 6:** Vergleich von potenziellen Normalen im Messvolumen. Nur am richtigen Ort des Messraums sind die berechneten Normalen für Kamera 1 (grün) und Kamera 2 (rot) gleich.

Oberfläche an dieser Stelle. Wegen der unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen sind diese potenziellen Normalen für die beiden Kameras unterschiedlich – außer an den Orten, an denen die Oberfläche tatsächlich liegt (**Bild 6**).

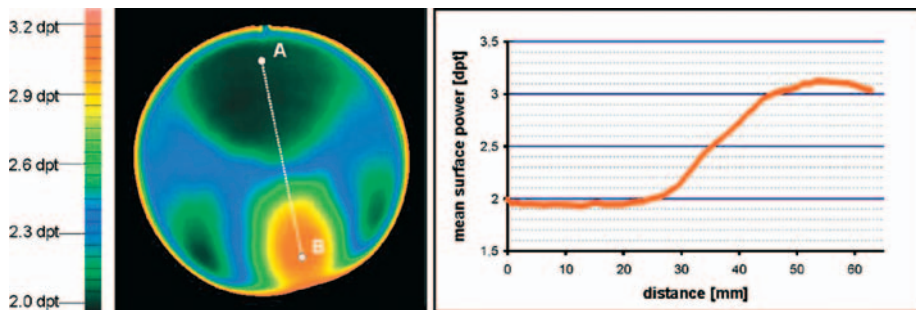
## 3 Messbeispiele

In **Bild 7** ist ein kommerzieller PMD-Sensor mit Positioniereinheit dargestellt, in **Bild 8** die damit ermittelte Flächenbrechkraft eines Gleitsichtglases. Die Berechnung der Krümmung erfolgte auf einer Fläche von  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ . Man kann gut den Verlauf der aus der Krümmung berechneten Brechkraft



**Bild 7:** Kommerzieller PMD-Sensor. Mit einem Projektor (nicht im Bild) werden Streifen auf eine Mattscheibe projiziert. Die beiden Kameras beobachten das am Objekt gespiegelte Muster. Das Objekt liegt auf einer Positioniereinheit.





**Bild 8:** Gemessener mittlerer Flächenbrechwert eines Gleitsichtglases und Schnitt durch die Krümmungskarte.

vom Fernteil (A) zum Nahteil (B) erkennen. Die Sollwerte im Nah- und Fernbezugspunkt wurden bis auf 1/100 dpt erreicht.

Die absolute Genauigkeit wurde mit Hilfe einer Präzisionssphäre überprüft (**Bild 9**), die an zwei verschiedenen Orten im Messraum platziert wurde. Sowohl die absolute Genauigkeit als auch die Welligkeit beider Messungen liegen in der Mitte des Messfelds bei der maximal erlaubten Messunsicherheit von 1/100 dpt. Am Rand des Messfelds liegt die absolute Genauigkeit bei ca. 2/100 dpt.

Die erreichte absolute Genauigkeit von 1/100 dpt auf einer Fläche von 3x3 mm<sup>2</sup> entspricht einer lokalen Neigungsunsicherheit von etwa 6 Bogensekunden, oder für ein höhenmessendes Verfahren einer Messunsicherheit von etwa 20 nm. Über das gesamte Messfeld kann die Neigung mit einer absoluten Genauigkeit von etwa 100 Bogensekunden gemessen werden.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Phasenmessenden Deflektometrie können spiegelnde Oberflächen innerhalb weniger Sekunden vollflächig vermessen werden. Das Messverfahren basiert nicht auf Interferometrie und ist deshalb weniger empfindlich gegenüber Vibrationen und anderen Störeinflüssen. Durch die Entwicklung eines neuen Stereoverfahrens ist es möglich, beliebig im Messraum platzierte

Freiformflächen absolut zu vermessen.

Das Verfahren ist vollständig skalierbar – von einem Messfeld mit 80 mm bei der in Bild 8 gezeigten Anwendung zur Vermessung von Brillengläsern, bis zu einem Messfeld von einigen Metern.

Die Wiederholgenauigkeit ist derzeit etwa fünfmal besser als die absolute Genauigkeit. Deshalb ist damit zu rechnen, dass durch weitere Verbesserungen der Kalibrierung eine noch geringere Messunsicherheit erreicht werden kann.

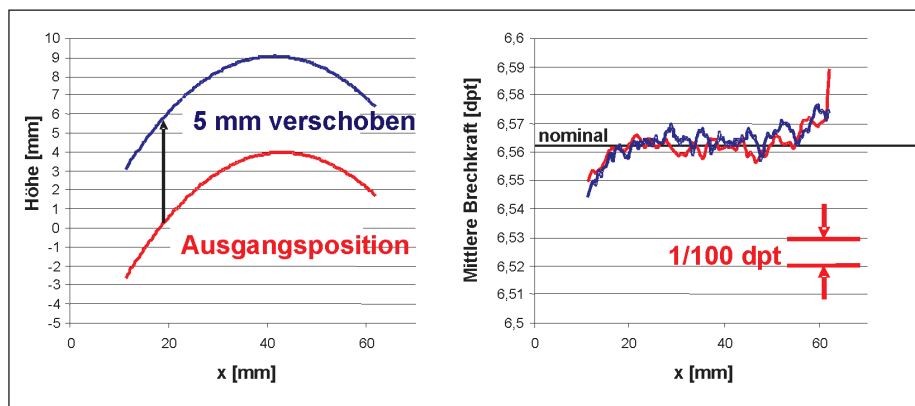
### Literaturhinweise:

- [1] B. Jähne, H. Haußecker, P. Geißler, Hrsg., *Handbook of Computer Vision and Applications*, Vol. 1. *Sensors and Imaging*, Academic Press, Boston, 1999
- [2] I. Weingärtner, M. Schulz, P. Thomsen-Schmidt, C. Elster, *Measurement of steep aspheres: a step forward to nanometer accuracy*, in *Optical Metrology Roadmap for the Semiconductor, Optical, and Data Storage Industries II*, Proceedings of the SPIE 4449, pp. 195–204, 2001
- [3] M. Beyerlein, N. Lindlein, J. Schwider, *Dual-wave-front computer-generated holograms for quasi-absolute testing of aspherics*, *Applied Optics* 41, pp. 2440–7, May 2002
- [4] H. Tiziani, S. Reichelt, C. Pruss, M. Rocktaschel, U. Hofbauer, *Testing of*

- [4] *aspheric surfaces*, in *Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication*, Proceedings of the SPIE 4440, pp. 109–19, 2001
- [5] J. Pfund, N. Lindlein, J. Schwider, R. Burow, T. Blumel, K.-E. Elssner, *Absolute sphericity measurement: a comparative study of the use of interferometry and a shack-hartmann sensor*, *Optics Letters* 23, pp. 742–4, 1998
- [6] J. Pfund, M. Beyerlein, *Shack-Hartmann-Sensoren für Qualitätskontrolle in klassischer und Laser-Optik*, *Photonik* 4, S. 60–62, 2002.
- [7] R. Ritter, R. Hahn, *Contribution to analysis of the reflection grating method*, *Optics and Lasers in Engineering* 4(1), pp. 13–24, 1983
- [8] M. Petz, R. Tutsch, *Measurement of optically effective surfaces by imaging of gratings*, in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection II*, Proceedings of the SPIE 5144, pp. 288–94, 2003
- [9] S. Kammel, *Deflectometry for quality control of specular surfaces*, *Technisches Messen* 70, pp. 193–8, 2003
- [10] M. Knauer, J. Kaminski, G. Häusler, *Phase Measuring Deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces*, *Optical Metrology for Production Engineering*, Proceedings of the SPIE 5457, 2004
- [11] G. Häusler, *Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Form oder der Abbildungseigenschaften von spiegelnden oder transparenten Objekten*, Patentanmeldung DE 19944354 A1, 1999

### Ansprechpartner:

Dr. Klaus Veit  
Projektleiter  
3D-Shape GmbH  
Henkestr. 91  
D-91052 Erlangen  
Tel. 09131/ 977 959-10  
Fax 09131/ 977 959-11  
eMail: veit@3d-shape.com  
Internet: www.3d-shape.com



**Bild 9:** Messungen einer Präzisionssphäre an zwei verschiedenen Orten im Messraum. Links: Schnitt durch die Höhenkarten. Rechts: Schnitt durch die Krümmungskarten.

www.photonik.de ▶ Webcode 4042

### Leserservice – mehr Infos via Webcode

Für weitere Informationen besuchen Sie bitte [www.photonik.de](http://www.photonik.de) und geben Sie dort den Webcode in das vorbereitete Feld ein. Unser Server verlinkt Sie direkt mit der passenden Internet-Seite des betreffenden Unternehmens.