

# Zauberspiegel, Brillengläser und Wasserhähne – alte Probleme neu beleuchtet

Markus C. Knauer

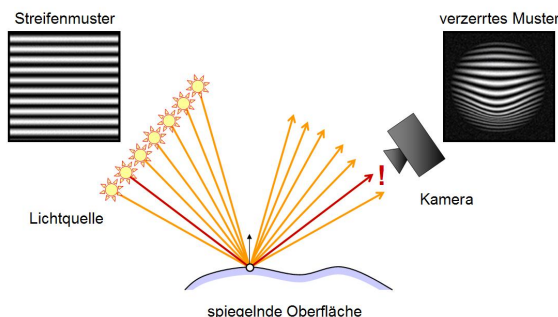
Institut für Optik, Information und Photonik, Max-Planck-Forschungsgruppe, Universität Erlangen-Nürnberg

<mailto:mknauer@optik.uni-erlangen.de>

Mit deflektometrischen Methoden lassen sich spiegelnde Freiformflächen vergleichsweise einfach und schnell messen. Solche Flächen waren bisher oft nicht oder nur mit enormen technischem Aufwand messbar. Wir geben eine Einführung in die Deflektometrie und zeigen Beispielanwendungen.

## 1 Deflektometrie

Unter dem Stichwort „Deflektometrie“ lassen sich alle optischen Verfahren zusammenfassen, die die Ablenkung von Lichtstrahlen durch das (blanke) Messobjekt messen. Dies kann in Transmission oder in Reflexion geschehen, im Folgenden wollen wir uns jedoch auf die Messung in Reflexion beschränken. Da die Ablenkung von der Oberflächennormale abhängt, wird bei der Deflektometrie nicht die Höhe des Objekts sondern die lokale Neigung gemessen. Dies ist zum einen informationstheoretisch günstig [1] und zum anderen bei vielen Messaufgaben sinnvoller als eine Höhenmessung [2].



**Abb. 1** Vollflächige Messung. Durch eine eindeutige Codierung der Lichtquellenpunkte (z. B. mit einem Streifenmuster) kann der reflektierte Strahl zugeordnet werden.

Die deflektometrischen Verfahren lassen sich in punktwise messende ([3, 4, 5]) und flächenhaft messende ([6, 7, 8, 9]) unterteilen. Die flächenhaft messenden Verfahren basieren im Prinzip alle auf dem sogenannten Rasterreflexionsverfahren [10]. Dabei werden Muster auf einem diffus abstrahlenden Schirm erzeugt (z. B. beleuchtete Mattscheibe oder LCD). So können stark gekrümmte spiegelnde Oberflächen gemessen werden, da für alle vorkommenden Oberflächennormalen ein Lichtstrahl angeboten wird, der gemäß dem Reflexionsgesetz in die Kamera gespiegelt wird. In der Kamera entsteht dann ein entsprechend der Form des Objekts verzerrtes Spiegelbild des Musters (Abb. 1).

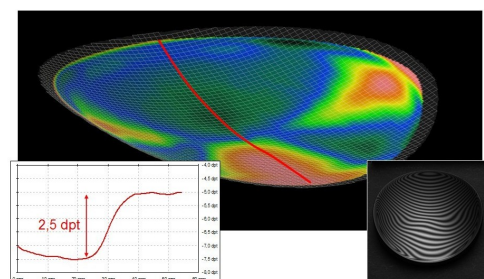
Prinzipiell können beliebige Muster zur Codierung der Mattscheibe verwendet werden, die ei-

ne eindeutige Zuordnung erlauben (Moiré-Muster, Rechteckstreifen/Gray-Code, Farbverläufe, ...). Es hat sich allerdings gezeigt, dass nur Streifen mit sinusförmigem Intensitätsverlauf optimale Ergebnisse ermöglichen. Da man auf das Objekt fokussiert, um eine hohe laterale Auflösung zu erreichen, bildet man die Streifen unscharf ab. Die Phase eines Sinusmusters bleibt jedoch bei unscharfer Abbildung konstant und kann weiterhin ausgewertet werden; daher die Bezeichnung „Phasenmessende Deflektometrie“ (PMD) [7].

Eine wichtige Erweiterung ist die „Stereodeflektometrie“ zum Lösen der fundamentalen Mehrdeutigkeit deflektometrischer Verfahren. Im Allgemeinen tragen sowohl Höhen- als auch Neigungsänderungen zu einer Phasenänderung bei. Durch den Einsatz von zwei Kameras können die beiden Einflussgrößen separiert werden [12, 9].

## 2 Anwendungsbeispiele

Die PMD ist sehr flexibel einsetzbar und kann eine Vielzahl von Objekten vermessen, die bisher nur schwer zugänglich waren. Eine sehr erfolgreiche Anwendung ist die Vermessung von Gleitsichtbrillengläsern [12]. Hier ist eine Absolutgenauigkeit der berechneten Krümmung von 1/100 dpt erreicht (Abb. 2) und das System wird bei Brillenglasherstellern im Labor zur Qualitätssicherung eingesetzt.



**Abb. 2** Messung eines Brillenglasses. Streifenbild (rechts), 3D-Ansicht der Form mit mittlerer Krümmung als Textur (mitte) und Schnitt durch Krümmungskarte (links).

Die Vielseitigkeit wird auch am Beispiel der so genannten (chinesischen) Zauberspiegel deutlich. Die-

se Spiegel sehen auf den ersten Blick wie gewöhnliche Metallspiegel aus, wenn auch mit einer typischerweise schön verzierten Rückseite (Abb. 3). Lässt man jedoch vom Spiegel reflektiertes Licht auf einen Schirm fallen, so erscheint die Struktur der Rückseite als hell-dunkel Struktur im Lichtfleck. (Abb. 4, links). Dieses Phänomen ist seit vielen Jahren immer wieder Gegenstand von Untersuchungen und theoretischen Betrachtungen [13].

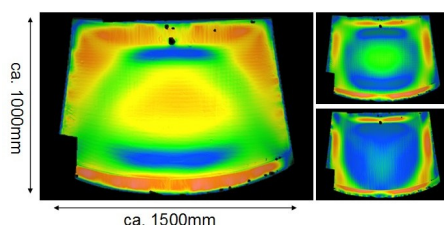


**Abb. 3** Fotografien des Zauberspiegels.



**Abb. 4** Intensitätsbild des durch den Spiegel erzeugten Lichtflecks und PMD-Messergebnis.

Mit dem PMD-Sensor konnte die Form der Oberfläche nun innerhalb weniger Sekunden ohne aufwändige Justage oder Präparation gemessen werden. Vergleicht man das Intensitätsbild des Lichtflecks mit verschiedenen berechneten differentialgeometrischen Parametern, so zeigt sich die beste Übereinstimmung bei der mittleren Krümmung (Abb. 4). Damit konnte die Hypothese von Berry verifiziert werden, dass die Intensität im Bild proportional zur Laplace-gefilterten Höhenkarte der Topographie ist [14]. Es gibt übrigens verschiedene Spiegeltypen: je nach Herstellungsverfahren bildet sich die Struktur der Vorderseite negativ oder positiv ab.



**Abb. 5** Aus sechs Einzelmessungen zusammengesetzte Komplettmessung einer Autoscheibe. Es sind verschiedene Krümmungsparameter dargestellt.

Die oben gezeigten Beispielmessungen wurden alle mit einem Messfeld von ca 100 mm durchgeführt.

Das Messprinzip ist jedoch skalierbar. So kann das Messfeld mit Hilfe einer größeren Lichtquelle erweitert werden. Da das System vollständig kalibriert ist, können auch mehrere Einzelmessungen nahtlos zusammengefügt werden. So lassen sich sogar komplette Autoscheiben vermessen (Abb. 5).

### 3 Danksagung

Ich danke Herrn Dr. Ucke für den geliehenen Zauberspiegel und meinen Kollegen für die Bereitstellung der Ergebnisse.

### Literatur

- [1] C. Wagner, G. Häusler, "Information theoretical optimization for optical range sensors," *Appl. Opt.* **42**(27), 5418–5426 (2003).
- [2] M. C. Knauer, T. Bothe, S. Lowitzsch, W. Jüptner, G. Häusler, "Höhe, Neigung oder Krümmung?" *DGaO-Proc.* 107, B30 (2006).
- [3] R. D. Geckeler, "ESAD: Ein hochgenauer, deflektometrischer Ebenheitsst, ard," *DGaO-Proc.* 107, B26 (2006).
- [4] K. Szwedowicz, W. van Amstel, S. Bäumer, "Extended height resolution in 3D Deflectometry," *DGaO-Proc.* 106, A20 (2005).
- [5] I. Scheele, S. Krey, "Measurement of Aspheric Surfaces with 3D-Deflectometry," *DGaO-Proc.* 106, A18 (2005).
- [6] D. Pérard, J. Beyerer, "Three-dimensional measurement of specular free-form surfaces with a structured-lighting reflection technique," no. 3204 in *Proc. SPIE*, pp. 74–80 (1997).
- [7] C. Horneber, M. Knauer, G. Häusler, "Phase Measuring Deflectometry – a new method to measure reflecting surfaces," *Annual report, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen-Nürnberg* (2000).
- [8] T. Bothe, W. Li, C. von Kopylow, W. P. O. Jüptner, "High Resolution 3D Shape Measurement on Specular Surfaces by Fringe Reflection," no. 5457 in *Proc. SPIE*, pp. 411–422 (2004).
- [9] M. Petz, R. Tutsch, "Deflectometry for quality control of specular surfaces," *Technisches Messen tm* **71**(7-8), 389–397 (2004).
- [10] R. Ritter, R. Hahn, "Contribution to analysis of the reflection grating method," *Opt. Las. Eng.* **4**(1), 13–24 (1983).
- [11] M. C. Knauer, J. Kaminski, G. Häusler, "Phase Measuring Deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces," no. 5457 in *Proc. SPIE*, pp. 366–376 (2004).
- [12] M. C. Knauer, J. Kaminski, G. Häusler, "Absolute Phasenmessende Deflektometrie," *DGaO-Proc.* 105, A15 (2004).
- [13] H.-J. Schlichting, C. Ucke, "Der chinesische Zauberspiegel," *Phys. in uns. Zeit* **33**(3), 138–140 (2002).
- [14] M. V. Berry, "Oriental magic mirrors and the Laplacian image," *Eur. J. Phys.* **27**, 109–118 (2006).