

# Eine neue Methode zur Lösung des Höhenproblems in der Deflektometrie

Hanning Liang\*, Alexander Zimmermann\*\*, Reiner Kickingeder\*\*\*, Christian Faber\*

\*Hochschule Landshut – University of Applied Sciences

\*\*Universität Passau FORWISS

\*\*\*Micro Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG

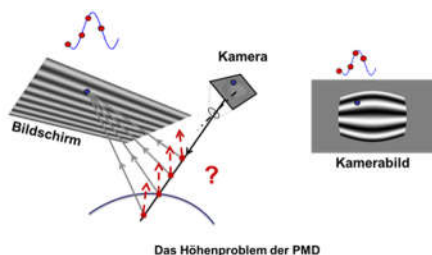
[mailto: hanning.liang@haw-landshut.de](mailto:hanning.liang@haw-landshut.de)

Phasenmessende Deflektometrie (PMD) ist ein etabliertes Messverfahren zur Bestimmung der Topographie spiegelnder Freiformflächen. Da jedoch in jedem Kamerapixel nur Information über den Ort des beobachteten Schirmpunktes, nicht aber über dessen Abstrahlrichtung vorliegt, kann die Neigung ohne eine bekannte Höhe nicht eindeutig bestimmt werden – das sogenannte „Höhenproblem“ in der PMD. In dieser Arbeit wird ein neuartiges Verfahren vorgestellt, welches das Höhenproblem ohne weitere Anforderung an Hardware löst.

## 1 Einführung

Die Topographiemessung optisch blanker Oberflächen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Phasenmessende Deflektometrie (PMD) ist aufgrund ihrer Robustheit gegen mechanische Vibrationen und Temperaturschwankungen eines der im industriellen Umfeld in diesem Bereich am häufigsten eingesetzten Messverfahren. Ein Nachteil der PMD ist jedoch, dass sowohl die Oberflächenhöhe als auch die Oberflächenneigung Einfluss auf die jeweils gemessene Phase haben und nicht gleichzeitig eindeutig bestimmt werden können. Ein neuer Ansatz zur Lösung dieses Problems wird in dieser Arbeit vorgestellt.

## 2 Das Höhenproblem der PMD



**Abb. 1** PMD Aufbau und Höhenproblem der PMD.

Ein bekanntes (häufig sinusförmiges) Muster wird auf einem Monitor angezeigt. Die Reflektion des Musters wird von einer Kamera aufgenommen. Mit Hilfe bekannter Phasenschiebverfahren wird die Phase des beobachteten Schirmpunktes ausgewertet, durch welche die Korrespondenz zwischen Bildschirm und Kamera (Punkt zu Punkt) bestimmt wird. Da jedoch die Richtungsinformation des einfallenden Strahls fehlt, kann die Oberflächenneigung nur unter einer Höhenannahme ausgewertet werden. Die Höhe und die Neigung der Oberfläche können ohne geeignete Zusatzmaßnahmen nicht gleichzeitig eindeutig bestimmt werden.

## 3 Stand der Technik

Eine mögliche Lösung des Höhenproblems besteht darin, die einfallende Richtung durch Verschieben des Bildschirms zu bestimmen [1]. Hierfür sind jedoch eine präzise mechanische Bildschirmverschiebung sowie eine Kalibrierung von zwei Bildschirmpositionen erforderlich. Eine weitere Lösung ist, alle Bildschirmpunkte durch eine Kollimationslinse sowie eine telezentrische Beobachtungsoptik rein über die Strahlrichtung zu kodieren („Richtungscodierte Deflektometrie RCD“) [2], welche aber kostenintensiv ist und die Winkeldynamik stark begrenzt. Ein weiterer Ansatz ist die Stereo-PMD [3]. Die Höhe und die Neigung der Objekt-oberfläche werden aus zwei Kameraperspektiven eindeutig bestimmt. Eine zweite Kamera ist aber nicht in allen Fällen verfügbar, wie z.B. bei der PMD mit Smartphones oder Tablets. Darüber hinaus schränkt der erforderliche Überlappbereich der beiden Sichtfelder in Verbindung mit dem benötigten Stereowinkel die praktische Anwendung ein.

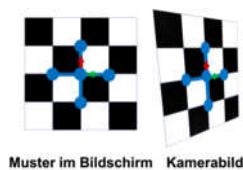
## 4 Lösung

Wie in Kapitel 3 diskutiert, erfordern alle bestehenden Methoden unterschiedliche Arten von Änderungen an der Hardware. Wir präsentieren einen neuen Lösungsansatz ohne Hardwareänderungen durch Erweiterung der von Savarese [4] vorgeschlagenen Methode auf die PMD.

### 4.1 Savarese's Methode [4]

In Savarese's Auswertung wird ein Schachbrettmuster verwendet. Für jeden Messwert werden je fünf benachbarte Punkte betrachtet (Abb. 2), wodurch zwei Schnittlinien definiert werden. Im Vergleich zu PMD wird nicht nur die Korrespondenz des Schnittpunktes in der Auswertung verwendet, sondern auch die Korrespondenz der abgebildeten Kurvenvektoren dieser beiden Schnittli-

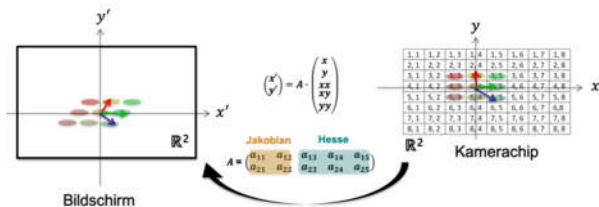
nien (rot und grün in Abb. 2). Dieser Ansatz erlaubt eine simultane Höhen- und Neigungsbestimmung an diskreten Punkten aus einer diskretisierten Umgebungsinformation. Einzelheiten hierzu können [4] entnommen werden.



**Abb. 2** Muster und entsprechendes Kamerabild in Savarese's Ansatz

#### 4.2 Erweiterung des Savarese-Ansatzes auf PMD

Der Schirmpunkt ist in der PMD-Messung kontinuierlich und vollflächig in der Phase des Streifenmusters kodiert. Die laterale Korrespondenz lässt sich somit viel genauer und effizienter ermitteln, wenn zur mathematischen Modellierung eine Abbildung von  $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  in kontinuierlicher Kodierung verwendet wird (Abb. 3).



**Abb. 3** Die laterale Korrespondenz wird durch eine Abbildung von  $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  bestimmt.

Wir benutzen für jedes Kamerapixel und seinen korrespondierenden Bildschirmpunkt jeweils ein lokales zweidimensionales Koordinatensystem  $(x, y)$  und  $(x', y')$ . Die laterale Abbildung von  $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  der Bildebene  $(x, y)$  zur Bildschirmenebene  $(x', y')$  wird bis zur zweiten Ordnung durch eine Abbildungsmatrix mit zehn Parametern beschrieben:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{mit } \begin{cases} x' = a_{11}x + a_{12}y + a_{13}xx + a_{14}xy + a_{15}yy, \\ y' = a_{21}x + a_{22}y + a_{23}xx + a_{24}xy + a_{25}yy. \end{cases} \quad (2)$$

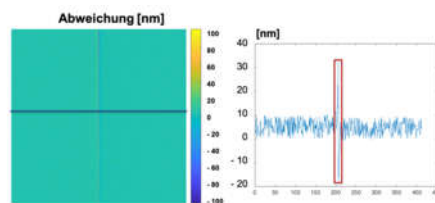
Wird jeweils eine lokale Umgebung von  $n^2 - 1$  ( $n = 3, 5, 7 \dots$ ) benachbarten Pixeln verwendet, kann die Abbildungsmatrix  $A$  durch ein einfaches lineares Ausgleichsproblem bestimmt werden.

Vorteil der Anwendung der Abbildungsmatrix ist erstens, dass sich diese durch einen linearen Least-Square-Fit schnell und robust bestimmen lässt. Zweitens, im Gegensatz zu Savarese's Ansatz, beinhaltet die Abbildungsmatrix Information über die Abbildung von Vektoren in *allen* Richtungen und damit die vollständige laterale Korrespondenz in der Umgebung. Drittens wird die laterale Korrespondenz bei diesem Ansatz aus der gesam-

ten kontinuierlichen Umgebung ermittelt. Dies ermöglicht eine stabilere und genauere Messung.

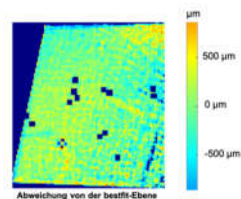
## 5 Ergebnis

Eine konvexe Oberfläche ( $z = -0,25x^2 + 0,001xy - 0,25y^2$ ) und ihre PMD-Phasenkarte werden bei einem vorgegebenen Aufbau (die digitale Version des Laboraufbaus) simuliert. Die Oberfläche wird wiederum durch die simulierten Phasendaten ausgewertet. Die Differenz der ausgewerteten Oberfläche von der gegebenen Oberfläche („Ground Truth“) variiert zum Großteil unter 10 nm (Abb. 4), wobei jedoch an einer Stelle große Abweichungen zu verzeichnen sind (rot markiert in Abb. 4 rechts). Der Grund dafür ist mit einer ungünstigen Objekt-Bildschirm Geometrie korreliert. Eine solche Geometrie kann durch eine geeignete Wahl des Aufbaus im Vorfeld vermieden werden.



**Abb. 4** Simulationsergebnis: Abweichung der ausgewerteten Oberfläche von der („Ground Truth“).

Ein erstes Messergebnis eines  $\lambda/10$  Planspiegels ist in Abb. 5 gezeigt. Die Abweichung zu einer Best-Fit-Ebene variiert zwischen  $-500 \mu\text{m}$  und  $+500 \mu\text{m}$ . Der Schmutz und die Kratzer der Oberfläche wurden ausmarkiert. Dieses Ergebnis ist der erste experimentelle Beweis des Konzepts für eine vollflächige kontinuierliche monokulare deflektometrische Höhenmessung.



**Abb. 5** Vermessung eines Planspiegels.

## Literatur

- [1] T. Bonfort, P. Sturm, P. Gargallo: „General specular surface triangulation“ in: Computer Vision - ACCV 2006, 872-881, Springer Berlin Heidelberg (2006).
- [2] R. Seßner, G. Häusler: „Verfahren zum optischen Messen der Form spiegelnder Oberflächen“, DE Patent 10014964C2 (2002).
- [3] M. C. Knauer, G. Häusler, R. Lampalzer: „Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Form und der lokalen Oberflächennormalen spiegelnder Oberflächen“, DE Patent 102004020419 B3, (2014).
- [4] S. Savarese, M. Chen, P. Perona: „Local Shape from Mirror Reflections“, International Journal of Computer Vision, 64, 31-67, (2005)