

# Hochgenaue Kalibrierung eines Multipoint-Positionsmesssystems

Simon Hartlieb\*, Michael Tscherpel\*, Flavio Guerra\*, Tobias Haist\*, Wolfgang Osten\*, Michael Ringkowski\*\*,  
Oliver Sawodny\*\*

\*Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

\*\*Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart

mailto:simon.hartlieb@ito.uni-stuttgart.de

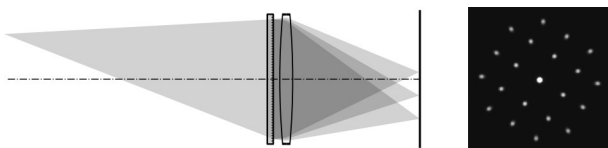
Vorgestellt wird die Kalibrierung eines Multipoint-Positionsmesssystems mit Hilfe einer Nanomess- und Positioniermaschine (NPMM-200). Als Kalibrierfunktion wird ein allgemeines zweidimensionales Polynom verwendet. Die erzielte Standardabweichung ( $\sigma$ ) des Restfehlers beträgt objektseitig  $0,31 \mu\text{m}$  und bildseitig  $0,034 \mu\text{m}$ , was  $6/1000$  Pixel entspricht (Pixelgröße =  $5,86 \mu\text{m}$ , Polynomgrad = 9).

## 1 Einleitung

Die hochgenaue Messung von Positionen spielt in vielen industriellen Anwendungen, wie beispielsweise Koordinatenmess-, Fräs-, oder Drehmaschinen eine bedeutende Rolle. Dabei ist vor allem die Relativposition zwischen dem Werkzeug und einem zu bearbeitenden Werkstück relevant. Mit zunehmender Dynamik und großen bewegten Massen kann es vorkommen, dass die von der Maschine gemessene von der realen Position abweicht. Das Multipoint-Positionsmesssystem ermöglicht eine direkte optische Messung dieser Relativposition mit einer Messunsicherheit ( $\sigma$ ) von unter  $1/100$  Pixel [1]. Um diese Genauigkeit im gesamten Messraum anwenden zu können, ist eine hochgenaue Kalibrierung nötig.

## 2 Multipoint-Methode

Die Multipoint-Methode basiert auf einer einfachen Erweiterung des optischen Abbildungssystems um ein diffraktives optisches Element (DOE), wodurch ein einzelner leuchtender Objektpunkt auf dem Bildsensor als ein Muster von  $N$  Bildpunkten erscheint (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1** Links: Multipoint-Aufbau bestehend aus Lichtquelle, DOE, Linse und Sensor. Rechts: Spotmuster mit  $N = 21$  Spots.

Die verbesserte Genauigkeit der Positionsbestimmung kommt dadurch zustande, dass über alle Einzelspotschwerpunkte des Musters gemittelt werden kann, wodurch sich Störeinflüsse wie Diskretisierungsfehler, Photonenrauschen sowie Quantisierungsfehler ausmitteln. In experimentellen Untersuchungen konnte eine Verbesserung der RMS-Abweichung von  $0,01$  Pixel auf  $0,0028$  Pixel bei

$N = 16$  nachgewiesen werden [1].

## 3 Kalibrierfunktionen

In diesem Abschnitt werden zwei Kalibrierfunktionen beschrieben und simulativ untersucht, welcher Ansatz geeigneter für die Kalibrierung ist.

### 3.1 Ansatz 1: Physikalisch

Von Brown [2] und später von Weng u.a. [3] wurde ein physikalischer Kalibrieransatz beschrieben, bei dem die in einem optischen System vorkommenden Verzeichnungsursachen mit speziell dafür vorgesehenen Polynomtermen korrigiert werden. Mit den Polynomen lassen sich radiale, Prismenkeil- sowie Dezentrierungsverzeichnungen kompensieren. Radiale Verzeichnung wird beispielsweise beschrieben durch

$$\delta_{pr} = k_1 \rho^3 + k_2 \rho^5 + k_3 \rho^7 + \dots \quad (1)$$

Dabei ist  $\rho = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}$  der Abstand zur optischen Achse und  $k_1, k_2, k_3, \dots$  die Koeffizienten der radialen Verzeichnung. Die weiteren Terme für Prismenkeil- und Dezentrierungsverzeichnung werden aus Platzgründen hier nicht aufgeführt, können jedoch in [3] nachgeschlagen werden.

### 3.2 Ansatz 2: Phänomenologisch

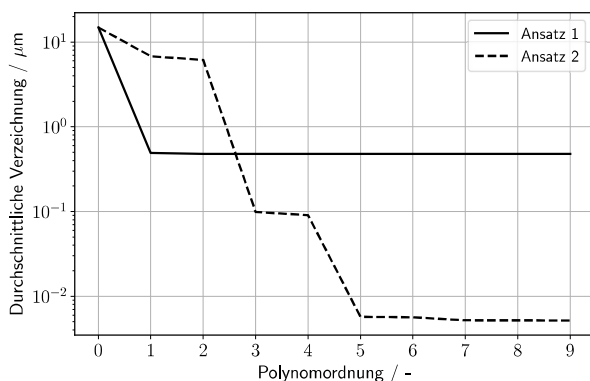
Demgegenüber beim phänomenologischen Ansatz werden die Korrekturterme unabhängig von den erwarteten Verzeichnungen gewählt [4]. Eine Möglichkeit ist die Beschreibung der verzeichneten Bildkoordinaten  $x_d$  und  $y_d$  durch ein allgemeines zweidimensionales Polynom:

$$\begin{aligned} x_d &= \sum_{i=0}^{n_{order}} \sum_{j=0}^{n_{order}} L_{ij} X_W^i Y_W^j \\ y_d &= \sum_{i=0}^{n_{order}} \sum_{j=0}^{n_{order}} M_{ij} X_W^i Y_W^j \end{aligned} \quad (2)$$

Darin sind  $L_{ij}$  und  $M_{ij}$  die Koeffizientenmatrizen,  $X_W$  und  $Y_W$  die Weltkoordinaten des Objektpunktes und  $n_{order}$  die maximale Ordnung des Polynoms.

### 3.3 Simulation

Zunächst wurde mittels Simulation in Zemax<sup>®</sup> untersucht, welcher Ansatz eine höhere Genauigkeit liefert. Hierzu wurde ein telezentrisches Linsensystem designt und die bildseitige Linse dezentriert und verkippt, um Radial-, Dezentrierungs-, sowie Prismenkeilverzeichnung zu erzeugen. Die Koeffizienten der Kalibrierpolynome wurden für beide Ansätze anhand der Verzeichnung von 100 x 100 Punkten mittels Least-Squares-Optimierung bestimmt. Die Simulationsergebnisse in Abbildung 2 beziehen sich auf die durchschnittliche Verzeichnung im Bildraum. Auffällig ist, dass bei Ansatz 1 die Verzeichnung zwischen der Polynomordnung 1 und 3 nur noch minimal abnimmt und danach konstant bei 0,156  $\mu\text{m}$  bleibt. Bei einer Pixelgröße von 5,86  $\mu\text{m}$  entspricht dies etwa 1/37 Pixel. Der allgemeine Polynomansatz erzielt hingegen 0,0052  $\mu\text{m}$ , was etwa 1/1000 Pixel entspricht. Aufgrund der besseren Verzeichnungskorrektur des allgemeinen Polynomansatzes wird dieser im nachfolgenden Abschnitt angewendet.



**Abbildung 2** Durchschnittliche Verzeichnung im Bildraum für beide Ansätze.

## 4 Messungen

Die Kalibriermessungen wurden an einer Nanomess- und Positioniermaschine (NPMM-200) durchgeführt [5]. Das Kamerasystem besteht aus einem telezentrischen Objektiv der Firma Vico (DTCM110-150,  $NA = 0,0085$  und  $\beta' = 0,11$ ) und einer CMOS-Kamera von Ximea (MC023MG-SY, Pixelgröße = 5,86  $\mu\text{m}$ ). Zur Kalibrierung wurde eine LED (SMB1N-700) mit unmittelbar davor angebrachter Kreisblende ( $D = 200 \mu\text{m}$ ) im Objektraum mäanderförmig verfahren. Die Position der NPMM sowie die gemittelte Position des Spotmusters wurde für mehr als 500 Messpunkte in einem Bereich von 87 mm x 67 mm gespeichert. Aus den so ermittelten Punktepaaren wurden mittels Least-Squares-Optimierung die Parameter der Koeffizientenmatrizen bestimmt. Für das Multipoint-Messsystem ist die Darstellung der Weltkoordinaten in Abhängigkeit der

verzeichneten Koordinaten relevant. Daher wurde das Polynom aus Gleichung 2 entsprechend umgeformt.

In Tabelle 1 ist der Restfehler für die Polynomordnungen 1, 5 und 9 des allgemeinen Polynoms dargestellt. Der Restfehler errechnet sich aus der Distanz zwischen dem vom Polynom vorhergesagten und dem "wahren" Wert der NPMM.

Ordnung	Restfehler im Objektraum [ $\mu\text{m}$ ]			
	Max.	$\emptyset$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1	22,98	7,33	4,88	6,55
5	3,27	0,58	0,47	0,54
9	2,73	0,29	0,27	0,31

**Tabelle 1** Restfehler im Objektraum für verschiedene Ordnungen des allgemeinen Korrekturpolynoms.

## 5 Diskussion und Fazit

Es wurde simulativ gezeigt, dass die Kalibrierung mit speziellen Korrekturtermen nicht ausreichend genau ist, weshalb ein allgemeiner Polynomansatz für die Kalibrierung gewählt wurde. Um die Ergebnisse aus Tabelle 1 mit der Simulation zu vergleichen, müssen die Werte mit Hilfe der Objektivvergrößerung  $\beta'$  in den Bildraum projiziert werden. Die bildseitige Restverzeichnung liegt somit im Bereich von  $\sigma_x = 0,030 \mu\text{m}$  und  $\sigma_y = 0,034 \mu\text{m}$ , was in Pixeln ausgedrückt 5/1000 Pixel beziehungsweise 6/1000 Pixel entspricht.

Wir bedanken uns bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Projekts "Dynamische Referenzierung von Koordinatenmess- und Bearbeitungsmaschinen" (OS 111/42-2).

## Literatur

- [1] T. Haist, S. Dong, T. Arnold, M. Gronle, and W. Osten, "Multi-image position detection," *Optics express* **22**, 14,450–14,463 (2014).
- [2] D. C. Brown, "Close-range camera calibration," *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING* **37**(8), 855–866 (1971).
- [3] J. Weng, P. Cohen, M. Herniou, *et al.*, "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* **14**(10), 965 – 980 (1992).
- [4] W. Förstner and B. P. Wrobel, *Photogrammetric Computer Vision: Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction*, pp. 505–513, 1st ed. (Springer Publishing Company, Incorporated, 2016).
- [5] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte, A. Müller, and F. Balzer, "Nanopositioning and nanomeasuring machine NPMM-200—a new powerful tool for large-range micro- and nanotechnology," *Surface Topography: Metrology and Properties* **4**(3), 034,004 (2016).