

# Kalibrierung eines multiskaligen telezentrischen Streifenprojektionssensors

Pascal Kern, Philipp Middendorf, Lennart Hinz, Markus Kästner, Eduard Reithmeier  
Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover  
mailto:kern@imr.uni-hannover.de

Zur Inline-Prüfung schmiedewarmer Tailored Forming Wellen wird ein Streifenprojektionssystem mit zwei telezentrischen Stereokamera-paaren in unterschiedlichen Vergrößerungen erforscht. Im Rahmen dieser Studie wird die Herstellung eines 3D-Kalibriernormal für die simultane Kalibrierung in unterschiedlichen Skalen vorgestellt. Dies erhöht die Genauigkeit und Robustheit des Kalibriervorgangs, da Kalibriernormalwechsel vermieden werden.

## 1 Einführung

Innerhalb des Sonderforschungsbereichs 1153 *Prozesskette zur Herstellung hybrider Hochleistungsbauteile durch Tailored Forming* werden Prozessketten zur Herstellung von hybriden Massivbauteilen erforscht. Insbesondere die Prüfung von Tailored-Forming-Wellen direkt anschließend nach dem Umformungsprozess stellt durch den schmiedewarmen Zustand eine besondere Herausforderung an die verwendete Messstechnik dar. Da es sich um hybride Bauteile handelt und die Fügezone der Materialien ein qualitätsbestimmendes Merkmal ist, wird ein Streifenprojektionssensor mit zwei telezentrischen Stereokamera-paaren unterschiedlicher Vergrößerung zur hochgenauen Rekonstruktion erforscht. Zur Kalibrierung des Messsystems muss für jedes Subsystem eine separate Kalibrierung mit unterschiedlich dimensionierten 3D-Kalibriernormalen erfolgen [1]. Diese bestehen aus sich jeweils dachförmig schneidenden Ebenen, welche Merkmale für die unterschiedlichen Vergrößerungen besitzen, sodass eine ausreichende Abtastung des Kamerabil-des vorliegt. Um die fehlende Höheninformation zur triangulierenden Rekonstruktion zu erhalten, wird die Transformation zwischen den Ebenen verwendet. Die Identifikation der sich schneidenden Ebenen wird über die Identifikation von Referenzmarkern durchgeführt. Der Einsatz zweier Kalibriernormale und die präzise Herstellung der eingesetzten Referenzmarker ist aufwändig, teuer und bedingt zusätzliche Unsicherheiten bei der Fusion in einem Weltkoordinatensystem. Ergänzend sind die Kalibriernormale aus Poly-Vinyl-Chlorid (PVC) mit aufgebracht Lackschicht gefertigt, und daher nur eingeschränkt hinsichtlich Präzision und Haltbarkeit dauerhaft einsetzbar. Um einen Wechsel von Kalibriernormalen zu vermeiden und die Herstellungskosten zu minimieren, wird ein neues Kalibriernormal auf Epoxidharzbasis vorgestellt, das mithilfe einer hochmodernen 5-Achs-CNC-Fräsmaschine hergestellt wird. Durch eine angepasste Merkmalsidentifikation und Separation der Ebenen, besitzt das Kalibriernormal keine zusätzlichen Referenzmarker und

kann in unterschiedlichen Skalenbereichen verwendet werden.

## 2 3D-Kalibriernormal Herstellung

Als Grundmaterial für das 3D-Kalibriernormal wird hochwertiges Epoxidharz von der Firma *EPODEX* (Krefeld, Deutschland) verwendet, welches sich durch hohe Festigkeit, Dimensionsstabilität und chemische Beständigkeit auszeichnet und somit besonders gut für Präzisionsanwendungen geeignet ist. Die Herstellung des Kalibriernormal erfolgt mit einem 5-Achs-Ultrapräzisionsbearbeitungszentrum vom Typ *Kugler Micromaster 5* (Salem, Deutschland). Eine Übersicht der technischen Daten der Fräsmaschine sind in Tabelle 1 gegeben.

Lineare X-Achse (300 mm)	
Messsystem / Auflösung	$\leq 0.5 \text{ nm}$
Positioniergenauigkeit, bidirektional	$\pm 0.15 \text{ }\mu\text{m}$
Ablaufgenauigkeit	$\leq 0.15 \text{ }\mu\text{m}$
Geradheitsabweichung	$\pm 300 \text{ mm}$
Luftgelagerte C-Achse (Option)	
Drehzahl	$\text{max. } 200 \text{ min}^{-1}$
Messsystem / Auflösung	$0.02''$
Rund- und Planlauf	$\leq 3 \text{ }\mu\text{m}$
Dreh- / Schwenkeinheit	
Messsystem / Auflösung	$0.018''$
Positioniergenauigkeit, bidirektional	$\pm 3''$
Rund- und Planlauf Drehachse	$1 \text{ }\mu\text{m}$

**Tabelle 1** Technische Daten der Kugler Micromaster 5X.

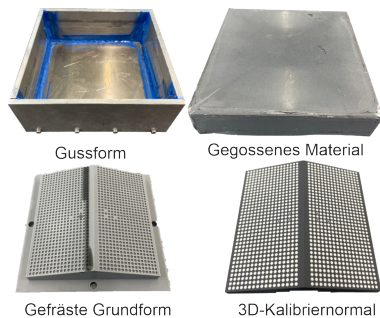
Der Herstellungsprozess untergliedert sich in 4 Teilabschnitte:

1. Grundfarbe Gießen: Zu Beginn des Herstellungsprozesses wird das flüssige Epoxidharz in eine geeignete Form gegossen, um den Grundkörper des Kalibriernormal herzustellen. Dabei wird besonders auf eine blasenfreie Gießtechnik geachtet, um eine homogene Oberfläche zu gewährleisten.
2. Fräsen der Merkmalpositionen: Nachdem das Epoxidharz ausgehärtet ist, wird das Kalibriernormal in die 5-Achs-CNC-Fräsmaschine eingespannt. Die exakten Merkmalpositionen

werden gemäß den gewünschten Spezifikationen programmiert und präzise in das Epoxidharz gefräst.

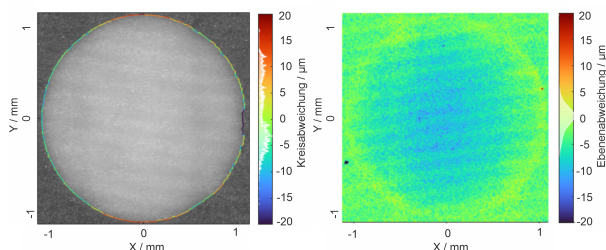
3. Gießen der Merkmalfarbe: Die vorher definierten Merkmalspunkte werden mit einer farblich abweichenden Epoxidharzfarbe gegossen, um sie deutlich sichtbar zu machen. Dieser Schritt erleichtert die spätere bildverarbeitende Marker-Extraktion.
4. Endbearbeitung: Zum Abschluss wird das gesamte Kalibriernormal einer Endbearbeitung unterzogen, um Unebenheiten und potenzielle Frässpuren zu entfernen. Hierbei wird erneut die 5-Achs-CNC-Fräsmaschine eingesetzt, um eine optimale Oberflächenqualität zu erzielen.

Die Abmaße des Kalibriernormals betragen 110mm x 110mm, bei einem Ebenen-Winkel von 150°, einem Punkteabstand von 3mm und einem Punktedurchmesser von 2.25mm. Eine Übersicht über die einzelnen Herstellungsprozesse ist in Abbildung 1 gegeben.



**Abbildung 1** Herstellungsprozess des 3D-Normals.

Nach der Herstellung wurden die Merkmale mit einem Konfokalen Laserscanning-Mikroskop des Typs VK-X 210 von Keyence CLSM (Osaka, Japan) bei 10x Vergrößerung untersucht. Dabei wurde ein Radius von 1.086mm rekonstruiert. Eine beispielhafte Untersuchung der Ebenen- und Kreisabweichung werden in Abbildung 2 dargestellt.

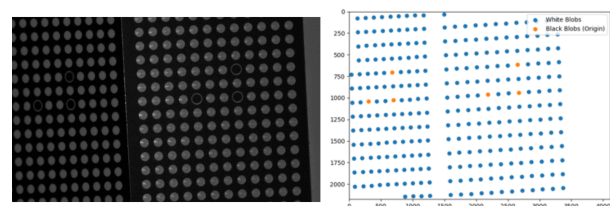


**Abbildung 2** Kreis- und Ebenenabweichung eines beispielhaften Merkmals des Kalibriernormals.

### 3 Angepasste Merkmalidentifikation

Da nach Beermann et al. [1] die Transformationsvorschrift von einer Ebene zur nächsten, als Kalibrierung für das telezentrische Messsystem verwendet wird, ist die präzise Detektion der einzel-

nen Merkmale und Unterscheidung der Merkmalebenen entscheidend. Zunächst werden in der Identifikation die weißen und schwarzen Merkmale getrennt voneinander betrachtet. Über eine mehrfache Binarisierung des aufgenommenen Kamerabildes entsteht ein Bilderstapel, bei dem die Reflexionen auf dem Kalibriernormal vermindert werden. Durch den Vergleich der RGB-Werte der Kamera mit den gesuchten Merkmalfarben werden die unterschiedlichen Merkmale erkannt. Für jedes binarisierte Bild wird darüber hinaus für die erkannten Merkmale vorher definierte Qualitätsmerkmale überprüft. Die Qualitätsmerkmale sind die Zirkularität, Fläche, Konvexität, Radius, Abstand und Wiedererkennung der einzelnen Merkmale. Eine beispielhafte Erkennung der weißen und schwarzen Merkmale ist in Abbildung 3 dargestellt.



**Abbildung 3** Kamerabild und die erkannten schwarzen und weißen Merkmale des Kalibriernormals.

Im Anschluss daran erfolgt die Unterscheidung der beiden Ebenen. Da über die Erkennung der schwarzen Merkmale, die Ursprünge der Ebenen detektiert wurden, werden diese Positionen nachfolgend verwendet. Es werden für beide Ursprünge die nächsten Nachbarn gesucht und im Anschluss daran der Mittelpunkt bestimmt. Zwischen diesen Mittelpunkten wird eine Gerade konstruiert. Durch eine Rotation der Geraden um 90° im Mittelpunkt, verläuft die Gerade in der Mitte der beiden Ebenen. Eine Ebenenzuordnung der Merkmale erfolgt gemäß:

$$\text{sign}((p_{2x} - p_{1x}) \cdot (v - p_{1y}) - (p_{2y} - p_{1y}) \cdot (u - p_{1x})),$$

wobei  $u$  und  $v$  die Pixelkoordinaten des gefundenen Merkmals und  $p_{1x}$ ,  $p_{1y}$  bzw.  $p_{2x}$ ,  $p_{2y}$  die jeweiligen Anfangs- und Endpunkte der Geraden in Pixelkoordinaten sind. Nach dieser Zuordnung der Merkmale sind die Merkmalebenen erkannt und vorbereitet für eine nachfolgende Kalibrierung vorbereitet.

### 4 Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Projekte im Rahmen des SFB 1153 (252662854).

### Literatur

- [1] R. Beermann, L. Quentin, M. Kästner, and E. Reithmeier, "Calibration routine for a telecentric stereo vision system considering affine mirror ambiguity," *Optical Engineering* **59**(5), 054104 (2020). URL <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.5.054104>.