

Luca Spani Molella  
Herausgeber

Hannoversches Zentrum für optische Technologien

# Vierter Workshop Optische Technologien

Tagungsband

## 12. Virtuelle Messgeräte als Tool zur Abschätzung von Messunsicherheiten

**Abstract:** Virtuelle Messsysteme eignen sich für die systematische Analyse von Messprozessen. Beispielsweise lässt sich der Einfluss der Systemparameter auf die erreichbare Messgenauigkeit abschätzen. Ein weiterer Anwendungsfall liegt in der Auslegung von optimalen Messstrategien bzgl. verschiedener Kriterien, wie einer unsicherheitsminimierten oder einer vollständigen Messung. Mit der Fragestellung der „optimalen“ Messstrategie befasst sich das Teilprojekt B5 des Sonderforschungsbereichs 489. Im Rahmen des Teilprojekts soll ein virtuelles Multisensorassistenzsystem, bestehend aus einem Schattenprojektionssystem, einem Streifenprojektionssystem und diversen Rotations- und Linearachsen zur Zustellung der Messgeräte, entwickelt werden. In diesem Bericht soll der Ablauf der Einzelsimulationen von Streifen- und Schattenprojektion vorgestellt werden. Des Weiteren wird die Methodik vorgestellt, die zur Abschätzung von Messunsicherheiten für eine feste Bauteilausrichtung implementiert wurde.

K. Haskamp<sup>1</sup>, M. Kästner<sup>1</sup>, E. Reithmeier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Leibniz Universität Hannover, Institut für Mess- und Regelungstechnik  
Nienburgerstrasse 17, 30167 Hanover  
CONTACT: Klaus Haskamp, Tel.: 0511 762-4284,  
Mail: klaus.haskamp@imr.uni-hannover.de

### Motivation

Aufgrund von ständig ansteigenden Bauteiltoleranzen tritt die Unsicherheitsanalyse in der Messtechnik immer stärker in den Vordergrund. Der Grund hierfür liegt darin, abschätzen zu können, ob die erreichbare Messunsicherheit weit unterhalb der vom Konstrukteur vorgegebenen Bauteiltoleranzen liegt. Das Messobjekt bzw. die Ausrichtung des Messobjekts im Messvolumen nimmt dabei einen wesentlichen Einfluss auf die erreichbare Messgenauigkeit.

Um zu gewährleisten, dass die Geometriemerkmale sicher erfasst werden können, muss für jeden messtechnischen Einzelfall eine umfangreiche und oftmals kosten- und zeitintensive Unsicherheitsanalyse durchgeführt werden, um die für

die Messaufgabe optimale Messstrategie festlegen zu können. Mit der optimalen Messstrategie ist dabei das Festlegen von Messpositionen gemeint, mit denen sich die Geometriemerkmale, wie Rundheit oder Zylindrizität, vollständig und unsicherheitsminimiert erfassen lassen.

Mittels virtueller Messtechnik lässt sich der Zeit- und Kostenaufwand und der Einfluss des Anwenders auf die Messunsicherheit erheblich reduzieren [7]. Hierfür ist es notwendig, den Messprozess vollständig im Rechner nachzubilden und alle modellierten Systemparameter durch eine geeignete Kalibrierstrategie zu identifizieren. Neben dem virtuellen Messgerät umfasst der Messprozess auch eine virtuelle Beschreibung des Messobjekts und den physikalischen Wechselwirkungen zwischen Messgerät und Messobjekt [4].

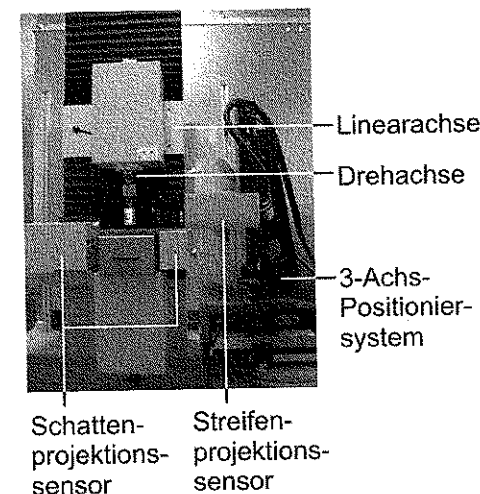


Abbildung 12.1.: Versuchsstand

Im Rahmen des Teilprojekts B5 „Vollständige fertigungsnahe Geometrieprüfung“ des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ wird ein virtuelles Multisensorassistenzsystem entwickelt. Die messtechnischen Komponenten des Assistenzsystems sind eine Schattenprojektionseinheit und ein Streifenprojektionssensor.

Die Schattenprojektionseinheit erfasst lediglich 1D-Daten und ist daher zur Erzeugung von 3D-Messdaten mit einer Rotationsachse und einer Linearachse gekoppelt. Der Streifenprojektionssensor kann über ein 3-Achs-Positioniersystem zu dem Messobjekt zugestellt werden. Der reale Versuchsaufbau ist in Abbildung 12.1 dargestellt. Durch die Achsen kann eine flexible Sensorausrichtung, und damit verbunden ein unsicherheitsminimierter Messablauf realisiert werden.

Die Fragestellung des Teilprojekts B5 zielt nun auf die intelligente Auslegung von bauteilspezifischen Messstrategien hinsichtlich verschiedener Kriterien ab:

- Messbarkeitsprüfung
- Vollständige Erfassung der Geometriemerkmale
- Unsicherheitsoptimierte Messungen
- Auswahl der für die Messaufgabe geeignetsten Messtechnik (Schatten- oder Streifenprojektion oder eine kombinierte Messung mit anschließender Datenfusion)

Beispielsweise könnte für die in Abbildung 12.2 dargestellte Einzylinderkurbelwelle berechnet werden, ob sich die Schattenprojektion oder die Streifenprojektion zur Zylindrizitätsprüfung der Haupt- und Hublager eignet und welche Messpositionen angefahren werden müssen, um das Formelement sicher erfassen zu können.

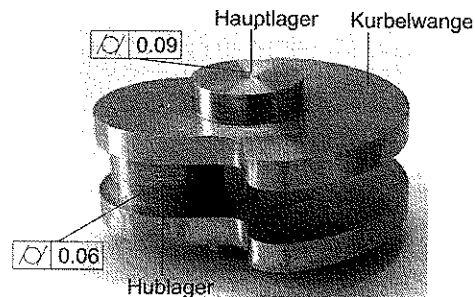


Abbildung 12.2.: Bauteil mit Form- und Lagetoleranzen

Um die Messbarkeitsprüfung und das Kriterium unsicherheitsoptimal programmiertechnisch realisieren zu können, muss es mit dem virtuellen System möglich sein, Unsicherheiten für eine fixe Bauteilausrichtung abschätzen zu können. Hierfür bietet sich aufgrund der Komplexität der abgebildeten Messtechniken die Verwendung von Monte-Carlo-Methoden an. In diesem Beitrag sollen die Abläufe der Simulationen der Streifen- und der Schattenprojektion näher erläutert werden. Weiterhin soll ein kurzer Überblick in die verwendete Methodik gegeben werden, die zur Abschätzung von Messunsicherheiten implementiert wurde.

### Virtuelle Streifenprojektion

Das verwendete Streifenprojektionssystem ist aus einer Kamera und einem Projektor aufgebaut, siehe Abbildung 12.3. Der Projektor beleuchtet das Messobjekt mit einem codierten Lichtmuster. Die Kamera erfasst die vom Messobjekt deformierten Streifen [6]. Mittels Bildverarbeitung wird für jedes Kamerapixel  $\{i, j\}$  die Projektorphase  $\Phi$  ermittelt und zur Objektrekonstruktion mittels Triangulation verwendet.

Das Modell des Streifenprojektionssystems basiert auf den physikalischen Grundlagen der geometrischen Optik [1, 5]. Der geometrische Aufbau und die Position und Orientierung der Koordinatensysteme, die zur Beschreibung der linearen Transformationen notwendig sind, ist in [2] dargestellt. Eine Besonderheit des Modells ist, dass die objektseitige Telezentrie der Kamera mit berücksichtigt wurde. Eine Beschreibung der Abbildungen zwischen den einzelnen Koordinatensystemen ist in [2] detailliert aufgeführt.

Am Beginn einer Simulation wird das virtuelle Bauteil, basierend auf der Beschreibung von Polygonmodellen, geladen. Anschließend erfolgt eine Segmentierung des Körpers in vorher definierte Primitive, wie Zylinder, Ebene, Kugel oder Freiformfläche. Der Benutzer hat anschließend die Möglichkeit, für ein segmentiertes Primitiv Form- und Lagetoleranzen vorzugeben. Die Größe der Form-/Lagetoleranz dient am Ende der Simulation zum Vergleich mit der erreichbaren Messunsicherheit.

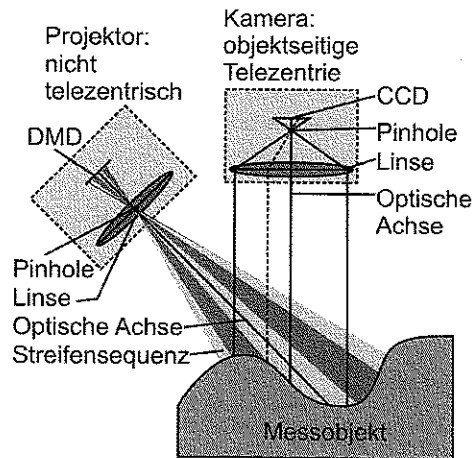


Abbildung 12.3.: Modell des Streifenprojektionssystems

Im nächsten Schritt werden die identifizierten Parameter des Modells geladen und mit geeigneten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen versehen. Auf Basis der Parameter und der Dichtefunktionen werden dann viele Einzelsimulationen durchgeführt, wobei sich die Parameter in jeder Simulation (auf Basis der Dichtefunktionen) unterscheiden. Eine Einzelsimulation gestaltet sich dabei wie folgt. Zunächst werden die Kamerapixel ins Objektkoordinatensystem transformiert. Anschließend erfolgt das sog. Ray-Tracing vom CCD-Chip der Kamera bis zum DMD des Projektors. Danach werden die 3D-Projektorkoordinaten in diskrete Projektorpixel umgewandelt. Somit steht für die virtuelle Belichtung der Zusammenhang, welches Projektorpixel welchen Kamerapixel beleuchtet, zur Verfügung. Um ein möglichst realistisches Sensorverhalten zu simulieren, wurden verschiedene Beleuchtungsmodelle implementiert. Am Ende der virtuellen Beleuchtungsphase stehen dann - wie beim realen Messsystem - Kamerabilder zur Phasenauswertung und Triangulation zur Verfügung.

Aufgrund der Streuung der Systemparameter streut der 3D-Objektpunkt für jeden einzelnen Kamerapixel. Aus der Streuung der 3D-Punkte kann dann für jeden einzelnen Pixel die Messunsicherheit und der zu erwartende Mittelwert

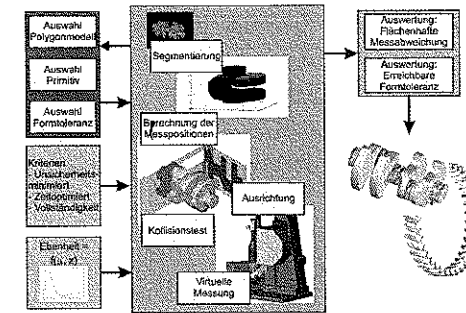


Abbildung 12.4.: Ablaufplan zur Unsicherheitsabschätzung

angegeben werden. Um die zu erwartende Unsicherheit der Form-/Lagetoleranz für eine feste Bauteilausrichtung abschätzen zu können, wird für jede Einzelmessung der Parameter der Form-/Lagetoleranz durch eine entsprechende Ausgleichsrechnung ermittelt. Die Unsicherheit des Parameters kann dann durch die Standardabweichung abgeschätzt werden.

### Virtuelle Schattenprojektion

Schattenprojektionssysteme werden häufig zur Konturmessung von Bauteilen eingesetzt [3]. Hierfür wird das Messobjekt von einer Seite mit parallelem monochromatischem Laserlicht beleuchtet, wie in Abbildung 5 gezeigt. Das Licht wird von der Kante des Objekts unterbrochen und gebeugt. Das resultierende Beugungsmuster wird von einem CCD-Zeilensensor, welcher mit einer telezentrischen Aufnahmeoptik ausgestattet ist, erfasst. Zur Berechnung der Ausdehnung des projizierten Schattens werden die Schattengrenzen extrahiert. Hierfür werden die Grauwerte der Hell-Dunkel-Übergänge durch Polynomfunktionen interpoliert und anschließend die Stelle gesucht, die einen zuvor definierten Schwellwert unterschreitet bzw. überschreitet. Dadurch kann die Schattengrenze subpixelgenau ausgewertet werden.

Das virtuelle Schattenprojektionssystem basiert auf den Prinzipien der Wel-

lenoptik, um die für die Messunsicherheit nicht unerhebliche Lichtbeugung an Kanten mit zu berücksichtigen.

Am Beginn einer Simulation wird - wie bei der Streifenprojektion - zunächst das virtuelle Bauteil auf Basis von Polygonmodellen geladen. Anschließend werden die modellierten Systemparameter gesetzt und die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen geladen. Das Ziel einer Einzelsimulation besteht in der Berechnung der Intensität auf dem CCD-Sensor. Hierfür wird das elektrische Feld für verschiedene Ebenen sukzessive von der Beleuchtungseinheit bis zum CCD-Sensor durch Lösen des Helmholtz-Kirchhoff-Integrals mittels der Rayleigh-Sommerfeld-Lösung berechnet. Damit steht - wie bei der realen Messung - die Intensitätsverteilung des CCD-Sensors für weitere Auswertungen zur Verfügung.

Aufgrund der Streuung der Systemparameter streut die Position der „detektierten“ Kante, woraus sich dann die Unsicherheit und der zu erwartende Mittelwert abschätzen lassen. Damit kann dann - ähnlich wie bei der Streifenprojektion - eine flächenhafte Messunsicherheit des Bauteils angegeben werden, wenn das Bauteil in mehreren Positionen virtuell gemessen wird. Zur Abschätzung der Unsicherheit des Form-/Lageparameters wird dieser für jede Einzelsimulation durch eine entsprechende Ausgleichsrechnung ermittelt und danach die Unsicherheit ermittelt.

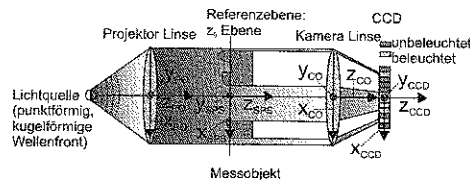


Abbildung 12.5.: Modell des Schattenprojektionssystems

## Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Bericht wurden die Simulationsabläufe des Streifen- und der Schattenprojektionssystem erläutert. Weiterhin wurde dargelegt, wie sich die flächenhafte Messunsicherheit und die Unsicherheit von Form-/Lagetoleranzen abschätzen lassen.

Aufbauend auf der Ermittlung der Unsicherheit für eine feste Bauteilausrichtung kann dann die Berechnung der „optimalen“ Messpositionen erfolgen. Hierbei stellen die Rotations- und Linearachsen die Freiheitsgrade des Systems dar. Der Güteparameter wird durch die Summe der Unsicherheiten von jedem Messpunkt verkörpert. Mit Hilfe von numerischen Optimierungsmethoden - wie Nelder-Mead - und unter Berücksichtigung von Randbedingungen, wie beispielsweise Kollisionstests, kann dann iterativ von einer Startposition beginnend die für ein Geometriemerkmal optimale Messposition berechnet werden.

## Danksagung

Die Autoren möchten der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung des Teilprojekts B5 „Vollständige fertigungsnahe Geometrieprüfung“ des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ danken.

## Literaturverzeichnis

- [1] Richard Hartley and Andrew Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2004.
- [2] K. Haskamp, M. Kästner, and E. Reithmeier. Modellbasierte Kalibrierung von streifenprojektionssystemen mit telezentrischer Kamera. *Technisches Messen*, 77:590 – 600, 2010.
- [3] M. Kästner. *Optische Geometrieprüfung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile*. Universität Hannover, 2008.
- [4] R. Schmitt, F. Koerfer, O. Sawodny, J. Zimmermann, R. Krüger-Sehm, T. Dziomba, L. Koenders, G. Goch, A. Tausendfreund, S. Patzelt, S. Simon, L. Rockstroh, C. Bellon, A. Staude, P. Woias, M. Goldschmidtbing, and M. Rabold. Virtuelle Messgeräte. *Technisches Messen*, 75:298 – 310, 2008.
- [5] O. Schreer. *Stereosynthese und Bildanalyse*, Springer Verlag Berlin. Springer Verlag Berlin, 2005.
- [6] R.J. Valkenburg and A. M. Mc Ivor. Accurate 3d measurement using a structured light system. *Image and Vision Computing*, 16:99 – 110, 1998.
- [7] Albert Weckenmann, Wito Hartmann, and Johannes Weickmann. Model and simulation of fringe projection measurements as part of an assistance system for multi-component fringe projection sensors. In Angela Duparre and Roland Geyl, editors, *Optical Fabrication, Testing, and Metrology III*, volume 7102, page 71020N. SPIE, 2008.

## 13. Wellenlängenmultiplex im sichtbaren Spektrum für optische Polymerfaser-Systeme

M. Haupt<sup>1</sup>, U. Fischer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Harz,  
Friedrichstraße 57-59, 38855 Wernigerode  
CONTACT: Mathias Haupt, Tel.: 03943 659-368,  
Mail: mhaupt@hs-harz.de

Die Polymerfasertechnik für optische Datenübertragung hat sich in den letzten fünf Jahren sehr dynamisch entwickelt. Beginnend mit einfachen Übertragungsmöglichkeiten für den Consumerbereich, wie den digitalen Links zwischen DVD-Player und Vorverstärker im Heim-Multimediabereich (TOSLINK-System) mit Datenraten von einigen Mbit/s, hat sich die Technologie inzwischen im Heim- und Automotive-Bereich etabliert. Hier wird im sichtbaren Wellenlängenbereich POF (polymeroptische Faser oder optische Polymerfaser) und LED-Technik eingesetzt, da für diese Anwendungsgebiete die Bauteile möglichst kostengünstig für den Endanwender hergestellt werden müssen. Besondere Bedeutung aufgrund ihrer Stückzahl erhalten mobile Multimedia-Anwendungen im Automotive-Bereich. Neben der höheren Datenrate und der damit verbesserten Integration multimedialer Anwendungen in den Automobilen werden zudem erhebliche Gewichtsreduzierungen des Kabelbaums realisiert. Aus diesen Gründen findet die optische Datenübertragung über POF zunehmend im Nahbereich Anwendung, wie beispielsweise in der Büro- und Haus-Kommunikation, bei Produktionseinrichtungen, in der Medizintechnik oder in Bus-Systemen für Autos, Züge und Flugzeuge. Die eigenen Forschungsergebnisse sind dabei auf die Standard-POF (SI-POF) ausgerichtet, welche aus PMMA (Polymethylmethacrylat) gefertigt werden, einen Kerndurchmesser von 0,98 mm aufweisen und ein Bandbreitenlängenprodukt von 50 MHz auf 100 m besitzen. Der Brechungsindex ist dabei über den gesamten Kernquerschnitt konstant. Dieser Typus ist der am preiswertesten herzustellende und wird daher in der überwiegenden Anzahl aller kommerziellen Anwendungen verwendet.

Die Vorteile der SI-POF liegen in der weiten Verfügbarkeit, dem sehr geringen Preis, dem günstigen Dämpfungsverhalten im sichtbaren Wellenlängenbe-