

# Abschätzung der Messunsicherheit bei der optischen Verzahnungsmessung mit Streifenprojektion

Dipl.-Phys. M. Kästner, Dipl.-Phys. T. Böttner, Dr.-Ing. J. Seewig,  
Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier, Institut für Mess- und Regelungstechnik,  
Universität Hannover

## Kurzfassung

Es wird mit Hilfe eines virtuellen Streifenprojektionssystems (VFPS) die Messunsicherheit eines Streifenprojektionssystems zur optischen Messung von Zahnrädern abgeschätzt. Das VFPS erlaubt die modellbasierte Berechnung von Messunsicherheiten nach GUM. Als Anwendungsbeispiel wird der Einfluss von Temperaturänderungen auf die Messunsicherheit berechnet und mit experimentell gewonnenen Messdaten verifiziert.

## 1. Einleitung

Optische Messverfahren zur berührungslosen Erfassung der Werkstückgeometrie rücken seit einiger Zeit aufgrund ihres enormen Potentials zur Reduzierung der notwendigen Prüfzeiten immer mehr in den Fokus der aktuellen Forschung. Von besonderem Interesse sind hier parallel arbeitende Verfahren, wie zum Beispiel die Streifenprojektionstechnik, mit der Teile der Werkstückoberfläche in wenigen Sekunden mit  $10^6$  oder mehr Messpunkten erfasst werden können. Durch den Einsatz dieser Technologie besteht die Möglichkeit, die gesamte Oberfläche des Messobjekts innerhalb kürzester Zeit mit einer sehr hohen Informationsdichte flächenhaft zu erfassen. Diese Verfahren stellen somit einerseits die Grundlage für eine wirtschaftliche Geometrieprüfung dar, andererseits können so Auswerteverfahren entwickelt und umgesetzt werden, die, basierend auf einem flächenhaften 3D-Ansatz, erheblich mehr Informationen über eventuelle Geometrieabweichungen der Werkstücke liefern.

Für theoretische Untersuchungen eines Streifenprojektionssystems steht ein am IMR entwickeltes virtuelles Streifenprojektionssystem (Virtual Fringe Projection System) zur Verfügung, hierbei handelt es sich um eine numerische Computersimulation [1]. Das VFPS erlaubt es, gezielt den Einfluss von einzelnen Parameteränderungen, z. B. der geometrischen Anordnung der einzelnen Komponenten, auf das Messsystem und damit auf das Messergebnis zu berechnen. In Kombination mit Monte-Carlo-Techniken [7] können Aussagen über den Beitrag einzelner Komponenten oder Parameter auf die Messunsicherheit untersucht werden.

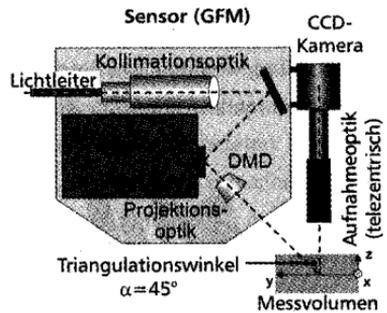
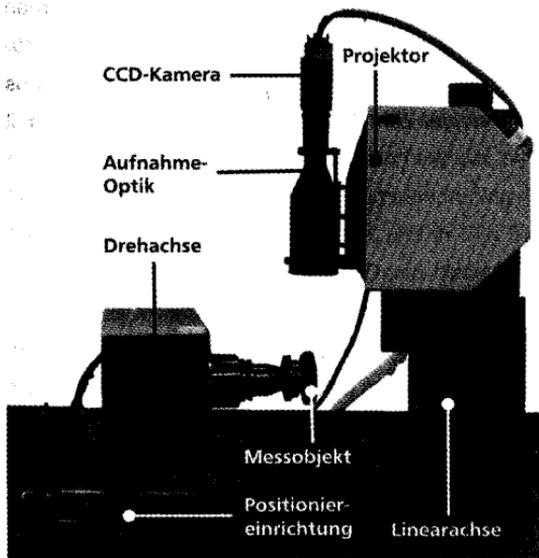
## 2. Optische Zahnradmesstechnik

Ein idealer Anwendungsfall für die Streifenprojektionstechnik ist die Prozesskette für das Präzisionsschmieden von Stirnrädern [2], welche im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 489 am Produktionstechnischen Zentrum Hannover (PZH) in Garbsen aufgebaut wurde. Hier steht besonders die prozessbegleitende und fertigungsorientierte Prüfung der Zwischenprodukte im Vordergrund, wodurch die Genauigkeitsanforderungen geringer sind als bei der Fertigteilprüfung. Neben der schnellen Erfassung aller Zähne ist die flächige Geometrieauswertung von zentraler Bedeutung. Weiterhin sind die zu prüfenden Werkstücke, im Gegensatz zu geschliffenen Verzahnungen, im Hinblick auf die Streifenprojektionstechnik optisch kooperativ.

Präzisionsgeschmiedete Verzahnungsrohlinge weisen für das Fertigungsverfahren typische Geometriefehler, wie beispielsweise Aufmassschwankungen, oder Formfehler auf. Diese Fehlstellen sind im Gegensatz zu der spanenden Zahnradfertigung sehr individuell ausgeprägt und können nicht sicher durch die linienhafte Prüfung einzelner Zähne detektiert werden. Die hochpräzise taktile Zahnradmessung mit Koordinatenmessgeräten ist zudem aufgrund der zu geringen Geschwindigkeit zur prozessbegleitenden Prüfung endkonturnah geschmiedeter Zahnradrohlinge ungeeignet. Besonders die Prüfung aller Zähne einer Verzahnung, die durch die Fehlercharakteristik der umformenden Fertigung zwingend erforderlich ist, kann mit Hilfe der Streifenprojektionstechnik wirtschaftlich erfolgen.

### Aufbau des Messsystems

Zur optischen und flächenhaften Erfassung der Verzahnungsgeometrie wird ein Streifenprojektionssystem der Fa. GFM eingesetzt, durch das eine Erfassung von ca. 106 Messpunkten in einer Belichtungssequenz ermöglicht wird. Das Messsystem verfügt über einen lichtstarken digitalen Mikrospiegelprojektor (DMD - Digital Micromirror Device) zur strukturierten Beleuchtung des Messobjekts. Während die Belichtung zentralperspektivisch erfolgt, werden für die Bildaufnahme telezentrische Optiken verwendet. Die optischen Komponenten sind so angeordnet, dass das System unter Wahrung der Scheimpflug-Bedingung über einen Triangulationswinkel von  $45^\circ$  verfügt. Das Messvolumen zur Erfassung der Verzahnungsgeometrie hat die lateralen Dimensionen  $40 \times 40 \text{ mm}^2$ . Der vertikale Messbereich beträgt 18 mm.



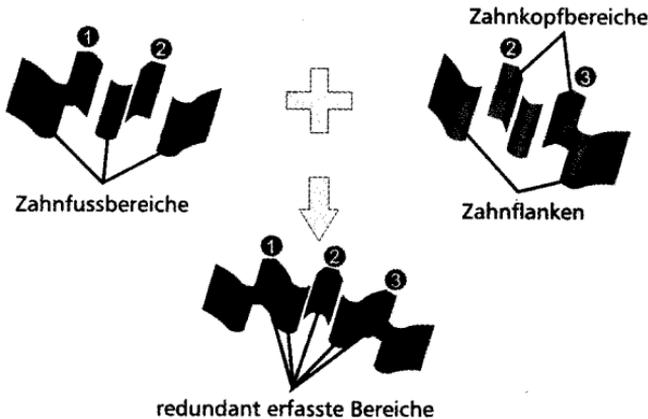
Projektor: 1024x768 Spiegel  
 CCD-Kamera: 1008x1008 Pixel  
 Lateralauflösung: 39  $\mu\text{m}$   
 Vertikalaufösung: 0,44  $\mu\text{m}$

**Bild 1: Messaufbau mit Streifenprojektionssystem**

Der aktuelle Aufbau der Messeinrichtung ist in Bild 1 dargestellt. Der Streifenprojektionssensor ist an einer Linearachse der Fa. Newport angebracht, wodurch eine hochgenaue Positionierung des Sensors in vertikaler Richtung ermöglicht wird. Zur rotatorischen Positionierung des Zahnrades im Messvolumen wird eine luftgelagerte Präzisionsdrehachse der Fa. LT Ultra-Precision Technology verwendet, die ihrerseits auf einer schwenkbaren Positioniereinrichtung montiert ist. Einerseits kann hierdurch das Werkstück lateral im Messvolumen positioniert werden, andererseits können mit Hilfe der Schwenkeinrichtung abgeschattete Bereiche bei der Messung von schrägverzahnten Zahnrädern minimiert werden.

Die Messunsicherheit von bildgebenden Triangulationssensoren verhält sich proportional zur Messfelddiagonalen [3]. Daher bietet es sich an, zur Geometrieerfassung ein möglichst kleines Messfeld bzw. Messvolumen zu verwenden. Zur vollständigen Aufnahme der Verzahnungsgeometrie ist eine Aufnahmeanzahl gleich der Zähnezahzahl des jeweiligen Zahnrades als Kompromiss zwischen Prüfzeit und Informationsdichte sinnvoll [4]. Die Messungen erfolgen durch einen ortsfesten Streifenlichtsensor. Die Positionierung der Werkstücke zwischen den Einzelaufnahmen erfolgt rotatorisch mit Hilfe einer Drehachse. Durch diese teilungsbezogene Vorgehensweise werden einige Geometriebereiche redundant erfasst, wodurch Bereiche mit großen Steigungen, deren Erfassung einerseits problematisch und andererseits mit ei-

ner erhöhten Messunsicherheit behaftet ist, aus den Einzelmessungen eliminiert werden können. Gerade diese Bereiche sind in den benachbarten Aufnahmen unter optisch günstigeren Bedingungen enthalten. Bild 2 verdeutlicht die teilungsbezogene Datenerfassung. Aus der Abbildung wird deutlich, dass kein vollständiger Zahn bzw. keine komplette Evolvente mit nur einer Aufnahme erfassbar ist.



**Bild 2: Prinzip der Rekombination einzelner Messdatensätze zur Gesamtgeometrie**

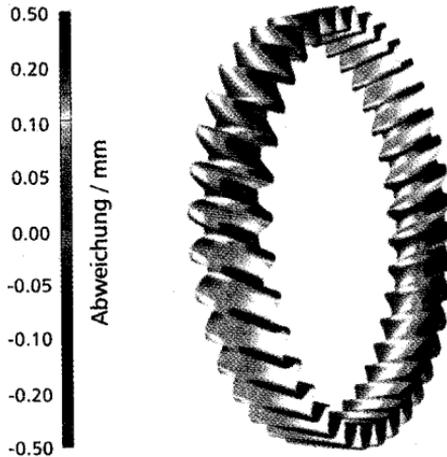
Die Gesamtgeometrie der Verzahnung wird durch Rekombination der Einzeldatensätze erzeugt [5]. Hierzu ist eine genaue Kenntnis der Lage der Rotationsachse des Messsystems notwendig. Als günstige und hinreichend sichere Strategie hierfür haben sich die Verwendung eines optisch kooperativen Zylindernormals und die Durchführung von Umschlagmessungen erwiesen. Anhand der Lage der Drehachse wird ein Erfassungskoordinatensystem aufgebaut, welches anschließend die Grundlage für die Rekombination der einzelnen Messdatensätze bildet. Die Gesamtgeometrie der Verzahnung ergibt sich nun durch einfache geometrische Transformation der Einzeldatensätze unter Berücksichtigung des Rotationswinkels im Erfassungskoordinatensystem.

Bereits vor der Rekombination werden die Einzeldatensätze einer mehrstufigen Datenvorverarbeitung unterzogen. In einem ersten Schritt werden irrelevante Geometriebereiche maskiert und somit aus den Messdatensätzen entfernt. Weiterhin werden Bereiche großer Steigungen, d.h. potentiell unsichere Messpunkte gelöscht. Zusätzlich werden Ausreißer und Einzelpunkte ohne sinnvolle Nachbarschaft eliminiert.

## Abweichungsanalyse

Das aus den Einzeldatensätzen rekombinierte Gesamtmodell der aufgenommenen Verzahnung wird zur Bestimmung der Geometrieabweichungen auf ein CAD-Modell der zu untersuchenden Verzahnung eingepasst. Im Anschluss an die Einpassung werden die Abweichungen der Messdaten vom CAD-Modell orthogonal zur Modelloberfläche berechnet.

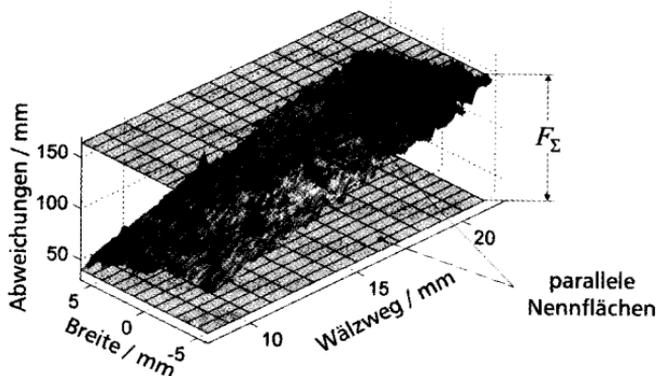
Die Ergebnisse der optischen Geometrieprüfung der präzisionsgeschmiedeten Zahnräder lassen sich besonders übersichtlich, wie in Bild 3 gezeigt, in Form von dreidimensionalen Abweichungsbildern darstellen [6]. Durch diese Darstellung wird bereits eine qualitative Bewertung der Verzahnungsabweichungen ermöglicht. Insbesondere können die für das Präzisionsschmieden typischen lokalen und zufällig verteilten Geometrieabweichungen sowie temperaturbedingte systematische Abweichungen erkannt werden.



**Bild 3: Dreidimensionales Abweichungsbild eines Zahnrades mit ausgeprägten systematischen Abweichungen**

Eine quantitative Analyse der Geometriefehler mit dem Ziel einer objektiven Prüfung, der Festlegung von Grenzabmaßen und zur Rückführung von Fertigungsfehlern geschieht mit Hilfe von flächenbasierten Kenngrößen, die teilweise an die in der Verzahnungsmesstechnik üblichen linienhaften Kenngrößen angelehnt sind [4]. Bild 4 zeigt beispielhaft die Definition der flächenhaften Kenngrößen Flankenflächengesamtabweichung. Die Charakterisierung der Geometrieinformationen mit Hilfe der flächenhaften Kenngrößen gibt Aufschluss über die Art und Ausprägung der Abweichungen und liefert somit die Ist-Daten zur Prozessregelung. Auf diese Weise können z. B. gezielt der Verschleiß der Umformwerkzeuge oder Formfehler in-

folge der integrierten Wärmebehandlung detektiert und durch geeignete Korrekturparameter korrigiert werden.



**Bild 4: Definition der Kenngröße Flankenflächengesamtabweichung**

### 3. Messunsicherheit des Streifenprojektionssystems

Aufgrund des komplexen Aufbaus eines Streifenprojektionssystemes ist eine allgemeingültige Bestimmung der Messunsicherheit äußerst schwierig. Als Beispiele für verschiedene Einflüsse auf die Messunsicherheit seien Abbildungsfehler der Optiken von Kamera und Projektor, aber auch systemimmanente wie Bildverarbeitung oder das verwendete Kalibrierverfahren, genannt.

In dieser Untersuchung liegt der Schwerpunkt auf dem geometrischen Aufbau des Systems. Das Messsystem besitzt einen relativ großen Messkreis (Bild 6) und eine Änderung in der Anordnung der einzelnen Komponenten zueinander bewirkt eine Modifikation gegenüber des Systemzustands während der Kalibrierung. Bei einem Einsatz des Streifenprojektionssystems in der Nähe der Produktion kommt es zu relativ schnellen und großen Temperaturänderungen. Im Weiteren soll der Einfluss von Temperaturänderungen untersucht werden.

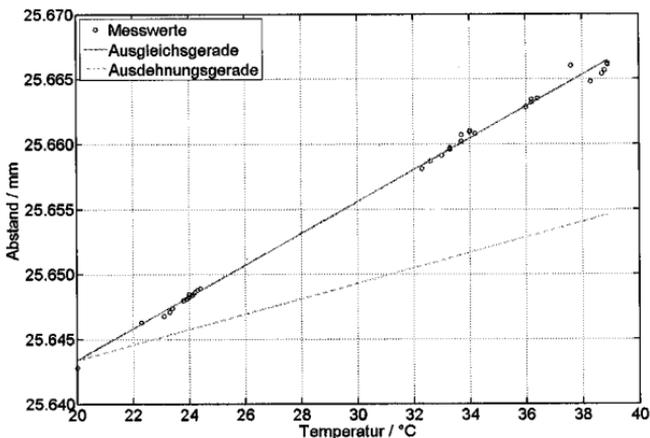
#### 3.1 Experimentelle Untersuchungen

Als Untersuchungsgegenstand wurde der Einfluss der Temperatur auf die Messunsicherheit bei dem Streifenprojektionssystem gewählt. Hierfür wurde für das Streifenprojektionssystem eine temperaturgeregelt Kabine gebaut. Das gesamte Messsystem, mit Ausnahme der Kaltlichtquelle, befindet sich innerhalb der Kabine und wird gleichmäßig durch regelbare Wärme-

quellen erwärmt. Die Messungen erfolgten jeweils im thermodynamischen Gleichgewicht des Gesamtsystems.

Mit dem Streifenprojektionssystem wurde der Abstand der Kugelmittelpunkte zweier optisch kooperative Kugeln für verschiedene Temperaturen gemessen. Die beiden Kugeln sind fest auf einem Aluminiumsockel befestigt und besitzen beide einen Durchmesser von etwa 10 mm. Die große Anzahl von Messwerten auf jeder Kugeloberfläche erlaubt es, den Durchmesser und Mittelpunkt der Kugeln mittels Least Square Verfahren statistisch sicher zu bestimmen.

Bild 4 zeigt die ermittelten Messwerte für die Abstände der Kugeln für Temperaturen im Bereich zwischen 20°C und 39°C. Bild 5 zeigt zusätzlich die Änderung des Kugelabstandes aufgrund der Längenausdehnung des Messobjektes, bezeichnet mit Ausdehnungsgerade. Als Ausgangswert hierfür wurde der Kugelabstand der Ausgleichsgeraden bei 20°C genommen.

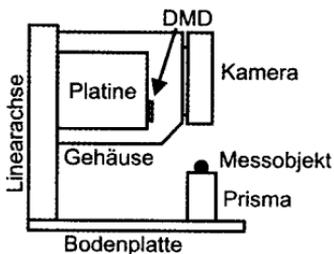


**Bild 5: Abstand der Kugelmittelpunkte bei Temperaturänderungen**

### 3.2 Simulationen mit dem VFPS (Virtual fringe projection system)

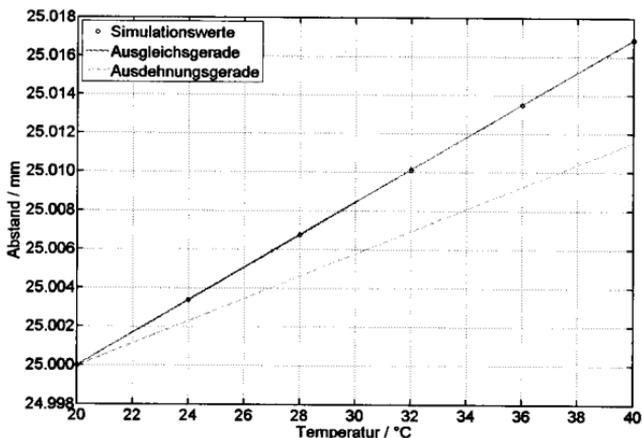
Mit Hilfe des VFPS wurde ebenfalls der Einfluss der Temperatur auf die Messung des Abstandes zweier Kugeln berechnet. Hierfür wurde die geometrische Anordnung des realen Streifenprojektionssystems im VFPS nachgebildet. Als erstes wurde eine „Kalibrierung“ des VFPS bei einer Referenztemperatur von 20°C durchgeführt. Die Kalibrierung des VFPS erfolgt für ein ideales System, d.h. die einzigen Fehler sind numerische Berechnungsfehler sowie der Einfluss des Kalibrierverfahrens.

Als Messobjekt für das VFPS wurde das reale Messobjekt aus zwei Kugeln nachgebildet, der Abstand der Kugelmittelpunkte wurde mit 25 mm vorgegeben, der Kugeldurchmesser zu 10 mm. Die „Messung“ (Berechnung) des Kugelmittelabstandes erfolgte in 4°C Schritten für den Bereich von 20°C bis 40°C. Hierfür wurde die Längenänderung der einzelnen Komponenten des simulierten Streifenprojektionssystems berechnet, welche einen Einfluss auf die relative Lage und Orientierung von Kamera, Projektor und Messvolumen zueinander hat. Die betrachteten Komponenten sind in Bild 6 dargestellt.



**Bild 6: Betrachtete Komponenten des Streifenprojektionssystems bei Erwärmung**

Die einzelnen Komponenten bestehen aus verschiedenen Materialien und besitzen somit unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die Bodenplatte sowie die Sockel der beiden Kugeln bestehen aus Aluminium, der DMD-Chip des Projektors ist auf einer Leiterplatte aus Epoxid befestigt, die restlichen Komponenten bestehen aus Stahl. Die Ausdehnung des CCD-Chips der Kamera, des DMD-Chips sowie der Linsen wurden nicht berücksichtigt.



**Bild 7: Abstand der Kugelmittelpunkte bei Temperaturänderungen (Simulation)**

Bild 7 zeigt das Ergebnis der Simulation, zusammen mit dem theoretischen vorhergesagten Abstand der Kugelmittelpunkte für verschiedene Temperaturen.

### 3.3 Monte-Carlo-Simulation

In einer weiteren Simulation wurde das Streifenprojektionssystem im thermischen Nichtgleichgewichtszustand untersucht. Hierzu wurde das VFPS mit Monte-Carlo-Techniken kombiniert. Für jede einzelne Komponente (Bild 6) des Systems wurde eine normalverteilte Temperaturverteilung mit einem Erwartungswert von 20°C und einer Standardabweichung von 1°C angenommen. Zwischen den einzelnen Komponenten konnte während einer Messung (Simulation) somit eine Temperaturdifferenz bestehen. Bild 8 zeigt die resultierende Verteilung für die Abweichung der Mittelpunktsabstände der beiden Kugeln (theoretischer Wert 25 mm). Für 352 berechnete Werte ergibt sich eine Standardabweichung von 0,394  $\mu\text{m}$ .

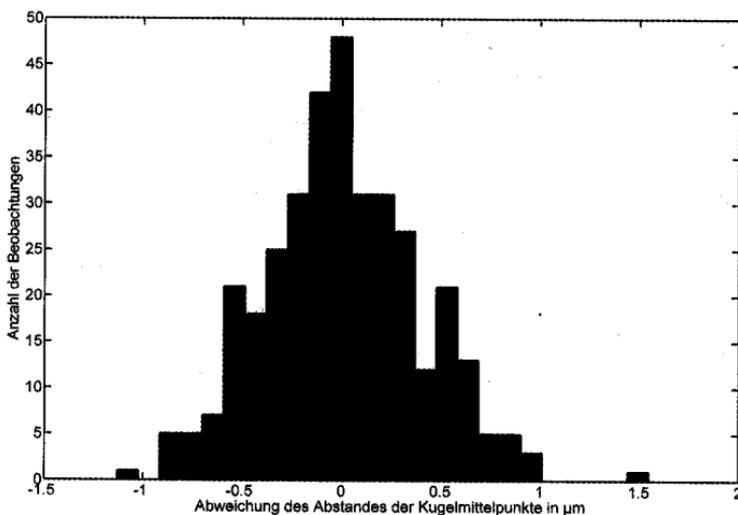


Bild 8: Verteilung der Durchmesserabweichungen

### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die mit dem VFPS berechneten Ergebnisse stimmen gut mit den experimentellen ermittelten überein. Hierfür wurde ausschließlich der Einfluss der Temperatur auf die geometrische Anordnung des Streifenprojektionssystems berücksichtigt. Die Kombination mit Monte-Carlo-Techniken liefert Aussagen über die Messunsicherheit im thermischen Nichtgleichgewicht

des Messsystems, welche experimentell nur schwer zu ermitteln sind. Die bisherigen Untersuchungen zeigen auch, dass kleine Temperaturenderungen nur eine geringe Auswirkung auf das Messergebnis hat.

In weiteren Untersuchungen sollen noch umfassendere Simulationen des Messprozesses durchgeführt werden, um die hier gewonnenen Ergebnisse zu untermauern. Die bisher vernachlässigte Ausdehnung der Linsen und des Kamerachips bzw. DMD sollen in die Berechnungen eingeschlossen werden.

#### Schrifttum:

- [1] Böttner, T.; Seewig, J.: Black box calibration methods investigated with a virtual fringe projection system, Proc. of SPIE, Optical Metrology in Production Engineering 5457, 150-157
- [2] Doege, E. et al: Präzisionsschmieden schrägverzahnter Zahnräder ; Umformtechnik, Band 32, 1998
- [3] Koch, A.; Ruprecht, M.; Toedtler, O., Häusler, G.: Optische Messtechnik an technischen Oberflächen; Expert Verlag, 1998
- [4] Meeß, K.: Flächenhafte Messung optisch kooperativer Stirnräder am Beispiel präzisionsgeschmiedeter Verzahnungen; Dissertation, Universität Hannover, 2005
- [5] Meeß, K.: Schnelle, fertigungsnahe Geometrieprüfung von präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern; Ergebnisbericht SFB 489, 2002
- [6] Kästner, M.; Meeß, K.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: Optische Geometrieerfassung von Zahnrädern; Verzahnungsmesstechnik, 14.-15.06.2005, Stuttgart, VDI-Berichte 1880, 155-163
- [7] Kalos, M.; Whitlock, P.: Monte Carlo methods, Wiley, 1986