

Diese Berechnung erfolgt für jede Lücke separat. Am Ende stehen die Koordinaten aller Messstück-Mittelpunkte der theoretischen Rundlaufmessung. Mit diesem Ergebnis ist es möglich, entsprechend den Berechnungen im Anschluss an Bild 4 fortzufahren und ein Rundlaufdiagramm zu erzeugen.

7. Zusammenfassung

Die Rundlaufauswertung am Kegelrad auf Basis von Teilungs- oder Zahndicken-Messpunkten ist weder in den Normen, noch in den Richtlinien des VDI beschrieben. Die hierfür zum Einsatz kommenden, verschiedenen Auswertungsalgorithmen der einzelnen Messgeräthehersteller sind nicht publiziert. Da es auf der anderen Seite auch keine zertifizierten Kegelräder gibt, hat der Anwender keine Möglichkeit, diese Auswertungen zu überprüfen.

Dieser Beitrag stellt einen mögliche Ansatz zur Lösung dieses Problems vor. Kernpunkt ist die Approximation von verschiedenen Standard-Geometrieelementen in die Flanken-Sollpunktgitter, welche die anschließende Berechnung der Eintauchtiefe eines theoretischen Messstücks erlauben.

Da die Rundlaufabweichung ein Beurteilungskriterium eines Kegelrades hinsichtlich seiner Genauigkeitsklasse ist und ihr somit technische und wirtschaftliche Bedeutung zukommt, sollte dieses Problem zwischen Herstellern und Anwendern von Verzahnungsmessgeräten kritisch diskutiert und einer einvernehmlichen Lösung zugeführt werden.

8. Literatur

- [1] Günther, A.: Verbesserung der Antasistategie und Messdatenauswertung bei der Geometrieprüfung von Kegelrädern. Universität Bremen, Diss. erscheint voraussichtlich Dez. 2005
- [2] VDI/VDE-Richtlinie 2613: Teilungs- und Rundlaufprüfung an Verzahnungen – Zylinderräder, Schneckenräder, Kegelräder. Beuth Verlag, Düsseldorf, 2003
- [3] DIN 3971: Begriffe und Bestimmungsgrößen für Kegelräder und Kegelradpaare. Beuth Verlag, Berlin-Köln, 1980
- [4] DIN 3965: Toleranzen für Kegelradverzahnungen. Beuth Verlag, Berlin-Köln, 1986
- [5] Bronstein, Semendjajew: Taschenbuch der Mathematik. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart-Leipzig, 1991
- [6] Benetschik, P.: Kegelrad-Verzahnungsmessung auf Koordinatenmessgeräten Berichte aus der Produktionstechnik. RWTH Aachen, Diss. 1996
- [7] Goch, G.: Theorie der Prüfung gekrümmter Werkstück-Oberflächen in der Koordinaten-Meßtechnik. Hochschule der Bundeswehr, Hamburg, Diss. 1982

Optische Geometrieauffassung von Zahnradern

Flächenhafte Detektion von Verzahnungsabweichungen

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

Kurzfassung:

Aufgrund der Möglichkeit zur schnellen und flächenhaften Messdatenaufnahme gewinnen optische Messverfahren, im Vergleich mit taktilen Methoden, bei der Prüfung von Zahnradern immer mehr an Bedeutung. Daher wurde auf Basis strukturierter Beleuchtung (Streifenprojektion) ein Messverfahren für Zahnradern mit optisch kooperativen Oberflächen entwickelt, welches eine flächenhafte Erfassung der gesamten Verzahnungsgeometrie zur Analyse von Abweichungen zur Sollgeometrie erlaubt. Einen zentralen Aspekt stellt hierbei die Auswertung der flächenhaft erfassten Messdaten dar. Hierzu wurden innovative Methoden zur Quantifizierung und zur Visualisierung der berechneten Abweichungen entwickelt. Zudem wird die Anwendung standardisierter Auswertemethoden durch Reduktion der flächigen Messdaten auf Linienprofile (Flanken- und Profillinien) ermöglicht.

1. Einleitung

Aufgrund ihrer hohen Taktraten werden material- und energiesparende umformtechnische Prozesse, wie z.B. das Präzisionsschmieden, für eine Serienfertigung von hochbelasteten Zylinderrädern immer bedeutender und können in Teilbereichen die herkömmliche spanende Verzahnungsherstellung ersetzen. Für eine zuverlässige Regelung solcher Prozesse mit wenigen hochkomplexen Fertigungsschritten ist eine prozessnahe Prüfung der Zwischenprodukte unerlässlich. Bei der umformenden Zahnradherstellung ergeben sich teilweise sehr individuelle und zufällig verteilte Geometriefehler an der Verzahnung der Zahnradrohlinge, die sich dadurch grundlegend von den systematischen Abweichungen bei der spanenden Fertigung unterscheiden. Für eine sichere Detektion dieser individuellen Verzahnungsabweichungen ist eine flächenhafte Erfassung der gesamten Verzahnungsgeometrie notwendig, die nicht durch die herkömmliche taktilen und linienhafte Verzahnungsmessung geleistet werden kann.

Aufgrund der vorteilhaften optischen Eigenschaften der Oberfläche umformend hergestellter Zahnradern bietet sich insbesondere die Streifenprojektionstechnik als bildgebendes Triangu-

lationsverfahren an. Dieses optische Messverfahren zeichnet sich neben der schnellen und flächenhaften Erfassung der Oberflächengeometrie des Messobjektes auch durch eine extrem hohe Messpunktdichte aus. Durch die optische Geometrieerfassung können die Prüfzeiten, im Vergleich zur taktilen Prüfung, drastisch reduziert werden.

2. Aufbau des Messsystems

Zur optischen und flächenhaften Erfassung der Verzahnungsgeometrie wird ein Streifenprojektionssystem der Fa. GFM eingesetzt, durch das eine Erfassung von ca. 10^6 Messpunkten in einer Belichtungssequenz ermöglicht wird. Das Messsystem verfügt über einen lichtstarken digitalen Mikrospiegelprojektor (DMD - Digital Micromirror Device) zur strukturierten Beleuchtung des Messobjekts.

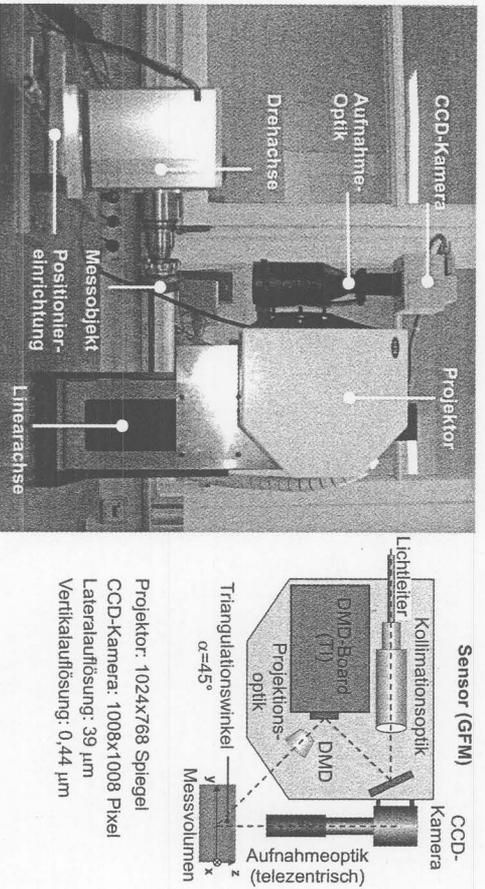


Bild 1: Messaufbau mit Streifenprojektionssystem

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 positio-

niert werden, andererseits können mit Hilfe der Schwenkeinrichtung abgeschattete Bereiche bei der Messung von schrägverzahnten Zahnrädern minimiert werden.

3. Erfassung der Verzahnungsgeometrie

Die Messunsicherheit von bildgebenden Triangulationssensoren verhält sich proportional zur Messfelddiagonalen. Daher bietet es sich an, zur Geometrieerfassung ein möglichst kleines Messfeld zu verwenden [1]. Zur vollständigen Aufnahme der Verzahnungsgeometrie ist eine Aufnahmeanzahl gleich der Zähnezahl des jeweiligen Zahnrades sinnvoll [2]. Durch diese Vorgehensweise werden einige Geometriebereiche redundant erfasst. Hierdurch können Bereiche mit großen Steigungen, die maßgeblich zur Messunsicherheit beitragen, aus den Einzelmessungen eliminiert werden, da gerade diese Bereiche in den benachbarten Aufnahmen unter optisch günstigeren Bedingungen enthalten sind.

3.1 Positionierung des Werkstücks im Messvolumen

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, ist die Präzisionsdrehachse auf einer manuellen Schwenkeinrichtung montiert. Hierdurch kann das Zahnrad in Abhängigkeit vom Schrägungswinkel so im Messvolumen positioniert werden, dass die strukturierte Beleuchtung, wie in Bild 2 gezeigt, orthogonal zum Normalschnitt durchgeführt wird. Auf diese Weise wird eine Abschattung relevanter Geometriebereiche vermieden. Zwischen zwei Belichtungssequenzen wird das Zahnrad automatisch mit Hilfe der Präzisionsdrehachse um den Teilungswinkel gedreht.

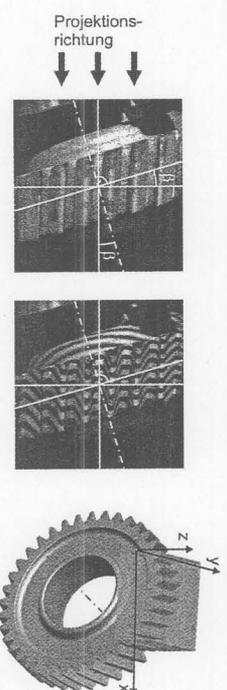


Bild 2: Schrägverzahnung im Messvolumen ($z = 37$, $m_n = 2$ mm, $b = 15$ mm, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 20^\circ$)

3.2 Erfassung und Weiterverarbeitung von Teilansichten der Verzahnung

Die Erfassung der Einzelansichten erfolgt mit dem Streifenlichtsensor durch die Projektion einer Gray-Code-Sequenz zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten gefolgt von einer Phase-Shift-Sequenz zur Optimierung der lateralen Auflösung. Aus der Deformation und der Phasenlage der projizierten Streifen lassen sich die Geometriekoordinaten ermitteln.

Eine Einzelmessung (ca. 10^6 Messpunkte) wird wie folgt weiterverarbeitet und je nach Verzahnung auf erheblich weniger Messpunkte reduziert (siehe Bild 3):

- Maskierung nicht relevanter Geometriebereiche
- Ausblendung von Bereichen großer Steigung und Auswellern (Gradientenfilter)
- Eliminierung einzeln liegender Messpunkte durch morphologische Operationen

Es ist zu beachten, dass eine von Artefakten befreite Einzelmessung die Geometrieinformationen mehrerer unvollständig gemessener Zähne enthält und nicht direkt ausgewertet werden kann. Die Zahnflanken, Kopf- und Fussbereiche werden erst durch die Rekombination der Einzeldatensätze zur Gesamtgeometrie vervollständigt.

3.3 Rekombination der Gesamtgeometrie

Die Erzeugung der Gesamtgeometrie erfolgt durch rein geometrische Transformationen der Messpunkte. Es werden weder rechenintensive Matching-Operationen noch Registrierungen der Einzeldatensätze durchgeführt, um die Datenverarbeitungszeit zu minimieren [3]. Dieser Ansatz erfordert jedoch eine sehr exakte Bestimmung der Drehachse, die außerhalb des eigentlichen Messvolumens liegt.

Die Strategie zur Bestimmung der Drehachse basiert auf der Durchführung mehrerer Umschlagsmessungen an einem optisch kooperativen Zylindernormal und anschließender Ausmittelung der Achse [4]. Der Durchmesser des Referenzzylinders entspricht in etwa dem Teilkreisdurchmesser der zu messenden Verzahnung. Die Drehachse dient als vorläufige Verzahnungsachse des rekombinierten Zahnrades.

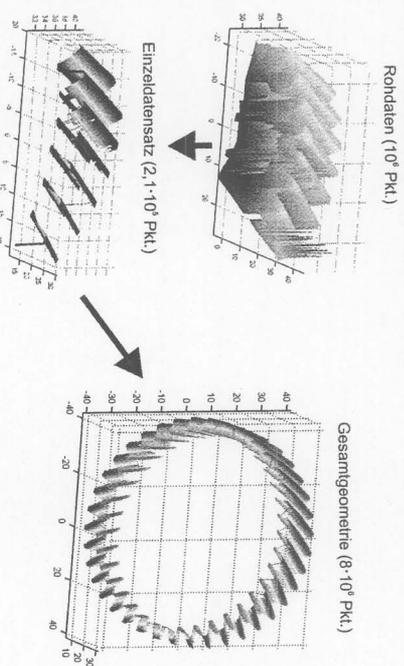


Bild 3: Rekombination der Gesamtgeometrie

Bild 3 veranschaulicht den Vorgang der Gesamtgeometrieerzeugung. Nach der Vorverarbeitung der Rohdaten reduziert sich die Anzahl der Messpunkte auf ca. $2,1 \cdot 10^6$ pro Einzelmessung. Durch Rotation und Translation der Einzeldaten bezogen auf ein vorläufiges Werkstückkoordinatensystem, welches auf der Drehachse basiert, wird die Verzahnungsgeometrie bestehend aus ca. $8 \cdot 10^6$ Punkten rekombiniert.

4. Berechnung und Darstellung der Abweichungen

Durch die in Kapitel 3 beschriebene Rekombination der Gesamtgeometrie steht nun die vollständige Verzahnungsgeometrie zur Berechnung der Verzahnungsabweichungen zur Verfügung. Somit lassen sich neben den eigentlichen Funktionsflächen auch die Kopf- und Fußbereiche des Zahnrades bewerten. Zur Abweichungsanalyse bietet sich insbesondere ein CAD-basierter Soll-Ist-Vergleich an, bei dem die rekombinierten Messdaten zunächst auf ein CAD-Modell der Verzahnung eingepasst und anschließend die Abweichungen durch die Bestimmung des orthogonalen Abstandes der Messdaten zur Referenz (CAD-Modell) berechnet werden. Zur Durchführung des Soll-Ist-Vergleichs wird das kommerziell erhältliche Softwarepaket Polyworks (InnovMetric) verwendet.

4.1 Einpassung der Messdaten auf das CAD-Modell

Zur Reduzierung der Datenmenge und zur Ausdünnung der Überlappungsbereiche werden die rekombinierten Messdatensätze mit dem Polyworksmodul IMMerge polygonisiert und zu einem Datensatz zusammengefasst. Als vorläufige Verzahnungsachse der Messdaten wird, genau wie als Verzahnungsachse des CAD-Modells, die y-Achse eines kartesischen Koordinatensystems gewählt. Die Einpassung der Messdaten auf das CAD-Modell findet also durch Translation und Rotation in der xz-Ebene statt und geschieht mit Hilfe des Best-Fit-Verfahrens des Polyworksmoduls IMInspect. Durch die Einpassung wird zum Einen die endgültige Verzahnungsachse und somit auch das endgültige Werkstückkoordinatensystem festgelegt. Weiterhin dient die Einpassung zur Trennung von Form- und Lageabweichungen durch falsche Aufspannung oder fehlerhaften Bohrungsbezug.

4.2 Darstellung der Abweichungen

Die Beurteilung der flächenhaften Verzahnungsmessdaten erfolgt zunächst visuell. Hierzu werden die zur Oberfläche des CAD-Modells orthogonalen Abstände der Einzelmesspunkte ermittelt und in Form eines dreidimensionalen Differenzbildes der Verzahnung dargestellt. Die in Bild 4 gezeigte Falschfarbendarstellung des Differenzbildes erlaubt eine erste qualitative Einschätzung der Verzahnungsabweichungen.

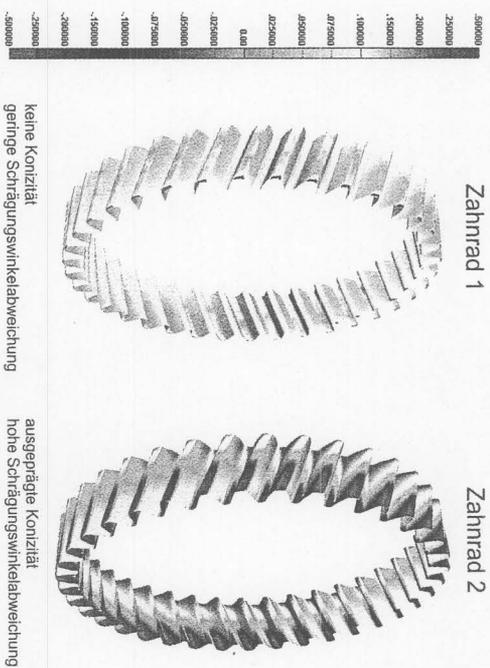


Bild 4: Dreidimensionale Darstellung der Geometrieabweichungen unterschiedlicher Zahnrad-der

Durch diese Darstellungslösung lassen sich sowohl individuelle, wie z.B. die Abweichungen der Zahnkopfbereiche von Zahnrad 1, als auch systematische Fehler, wie die Konizität und die Schrägungswinkelabweichung von Zahnrad 2, erkennen.

4.3 Quantifizierung der Abweichungen

Für eine Quantifizierung der Abweichungen an den Funktionsflächen (Evolvertenflächen) werden diese aus den Messdatensätzen extrahiert und in Abhängigkeit von Wälzweg dargestellt [5].

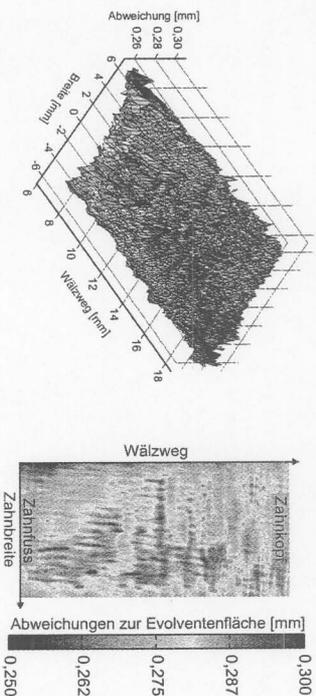


Bild 5: Abweichungen an einer Evolvertenfläche

Durch die Einpassung einer Ausgleichsebene in die Messdaten wird die Bestimmung einer Reihe relevanter Parameter ermöglicht. Der Ebenenabstand von der Nullebene, welche durch die Evolvertenfläche des CAD-Modells gegeben ist, entspricht der mittleren Zahnradckenabweichung. Die Lageparameter der Ebene, bezogen auf den Wälzweg und die Zahnbreite, geben Auskunft über die mittlere Profil- und Flankenabweichung. Ein weiterer Ansatz zur Beurteilung der Zahnflankenmorphologie ist der Separationsansatz [6]. Hier werden die Abweichungen Ersatzflächen erster und zweiter Ordnung zugeordnet. Die optische Erfassung der Zahnräder stellt für dieses Verfahren eine optimale Datenbasis mit einer hinreichend großen Anzahl an Messpunkten zur Verfügung.

5.1 Linienhafte Auswertung und Vergleich mit taktilen Referenzmessungen

Der beschriebene Versuchsaufbau ermöglicht, optisch kooperative Verzahnungen flächig zu erfassen und eine entsprechende Datenbasis für die Auswertung bereitzustellen. Um die Güte des Verfahrens einzuschätzen, werden taktil Referenzmessungen durchgeführt, die mit den optischen Messungen verglichen werden.

5.1 Reduzierung der flächigen Messdaten auf Profil- und Flankenlinien

Für einen Vergleich taktiler und optischer Messungen werden die flächigen Verzahnungsgeometriedaten auf genormte Linienprofile reduziert. Messpunkte, die in unmittelbarer Nähe der Profil- bzw. Flankenlinie liegen, werden hierzu auf diese projiziert. Weiterhin werden durch lineare Interpolation äquidistante Punkte über dem Wälzweg und der Zahnbreite erzeugt und in das GDE-Dateiformat konvertiert [7].

Die Vergleichsmessungen werden auf einem Verzahnungsmesszentrum ZMC 550 der Fa. Zeiss durchgeführt. Die Rohdaten (Tastermittelpunktkoordinaten) der Profil- und Flankenliniennennmessung werden ohne Auswertung exportiert und ebenfalls im GDE-Format abgespeichert.

Zur Bestimmung von Rundlauf, Dicke, Teilung sowie Profil- und Flankenlinienabweichungen erfolgt die Auswertung der Daten mit der Analysesoftware Abwan der Fa. Klingelberg [8]. Während die Messpunkte der optischen Messungen direkt verarbeitet werden können, müssen die Rohdaten der taktilen Messungen noch um den Tastkugelradius korrigiert werden.

5.2 Ergebnisse des direkten Vergleichs

Eine Vergleichsmessung einer geschmiedeten Verzahnung ist in Bild 6 dargestellt. Die Rundlauf- und Teilungsabweichungen wurden softwareseitig durch virtuelle Antastung auf

Basis der Profilvergessionsgeraden ermittelt [9]. Der Unterschied zwischen taktiller und optischer Messung beträgt nur ca. 2 – 3 μm . Die Unterschiede bei den Profilabweichungen sind mit ca. 5 – 10 μm etwas größer. Bei Betrachtung der Profilabweichung fällt ein systematischer Lagefehler auf, dessen Ursache die unterschiedliche Bezugsbildung ist. Die Verzahnungsachse (Bezug) bei der taktillen Messung wurde aus den Linienprofilen bestimmt. Bei der optischen Messung wird die Verzahnungsachse aus den flächigen Daten ermittelt. Eine erneute Einpassung mit den reduzierten Linienprofilen erfolgt nicht.

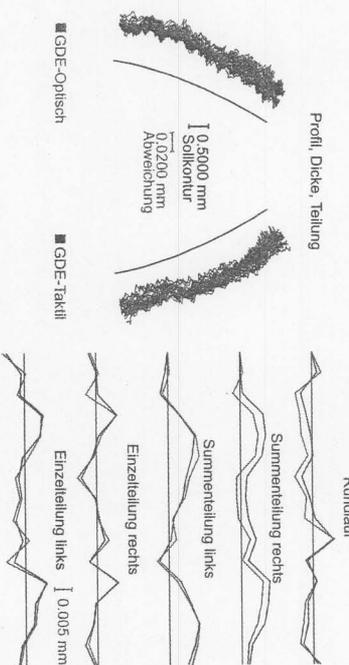


Bild 6: Linienhafte Auswertung und Vergleich einer optischen und taktillen Verzahnungsmessung ($z = 16$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$, $b = 16 \text{ mm}$, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0^\circ$)

Der Vergleich der Kennwerte für die Profilabweichung liefert signifikante Unterschiede, da die optischen Messdaten verrauscht sind [10]. Die festgestellten Unterschiede von maximal ca. 10 μm sind ein Hinweis für die Richtigkeit und Anwendbarkeit des optischen Messverfahrens. Die Anforderungen an das Messverfahren zur Prüfung von präzisionsgeschmiedeten Verzahnungsrohlingen werden erfüllt, obwohl die festgestellten Unterschiede noch keine Aussage zur Messunsicherheit sind. Eine Absicherung durch Messungen an Lehrzahnradern muss noch erfolgen.

6. Zusammenfassung

Das beschriebene Verfahren zeigt die Möglichkeiten und das Potential des Einsatzes der Streifenprojektionstechnik zur flächenhaften Verzahnungsmessung an optisch kooperativen Zahnradern. Neben der drastischen Verkürzung der Messzeit und der deutlich höheren Informationsdichte im Vergleich zu taktillen Messverfahren bietet die optische Messtechnik den Vorteil, dass die detektierten Verzahnungsabweichungen topologisch analysiert werden können. Die Messung von Verzahnungsgeometrien mit Hilfe strukturierter Beleuchtung kann

daher wirtschaftlich und fertigungsnahe eingesetzt werden und liefert wertvolle Hinweise auf Verfahrensfehler.

Die Grenzen des Verfahrens sind klar bei der Beurteilung von Fertigteilen zu sehen, da die geforderten Genauigkeiten verglichen mit der taktillen Verzahnungsmesstechnik derzeit nicht erreicht werden und es mit dem bildgebenden Triangulationsverfahren nicht möglich ist, Verzahnungen normgerecht (linienhaft) zu erfassen.

In dem Bereich der flächigen Verzahnungsauswertung und Systemkalibrierung besteht noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf. Allerdings sind die bisher erzielten Ergebnisse sehr ermutigend.

7. Literaturangaben

- [1] Koch, A.; Ruprecht, M.; Toedler, O., Häusler, G.: Optische Messtechnik an technischen Oberflächen, Expert Verlag, 1998
- [2] Meelf, K.: Flächenhafte Messung optisch kooperativer Stirnräder am Beispiel präzisionsgeschmiedeter Verzahnungen; Dissertation, Universität Hannover, 2005
- [3] Meelf, K.: Schnelle, fertigungsnahe Geometrieprüfung von präzisionsgeschmiedeten Zahnradern; Ergebnisbericht SFB 489, 2002
- [4] Kästner, M.; Meelf, K.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: Calibration of an Optical 3D Triangulation Sensor for the Evaluation of Precision-Forged Gearwheels; Journal of Physics: Conference Series, ISMTII Huddersfield, 2005 (in Vorbereitung)
- [5] Meelf, K.; Kästner, M.; Böttner, T.; Seewig, J.: Use of Fringe Projection in the Testing of Precision-Forged Gearwheels; VDI-Berichte, Band 1860, 2004
- [6] Pfeiffer, T.; Napierrala, A.; Mandt, D.: Function-Oriented Evaluation of Modified Tooth Flanks; VDI-Berichte, Band 1665, 2002
- [7] VDI/VDE 2610: Format für den Austausch von Verzahnungsdaten - Gear Data Exchange-Format (GDE-Format); 2003
- [8] Gravel, G.: Schnelle und sichere Fertigungskorrekturen; Quality Engineering, 2003
- [9] Gravel, G.: Beurteilung abbildend hergestellter Stirnräder mit Hilfe der Koordinatenmesstechnik; Dissertation, Universität Hannover, 1996
- [10] VDI/VDE 2607: Rechnerunterstützte Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderzahnradern mit Evolventenprofil; 2000