

Verringerung und Abschätzung der Messunsicherheit bei der optischen Verzahnungsmessung mit Streifenprojektion

Karsten Meeß, Markus Kästner, Jörg Seewig, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Hannover

Manuskripteingang: 11. Januar 2006; zur Veröffentlichung angenommen: 08. August 2006

Für die fertigungsnahe Prüfung Präzisionsgeschmiedeter Verzahnungen bietet sich der Einsatz der Streifenprojektionstechnik als bildgebendes Triangulationsverfahren an. Im Gegensatz zu der konventionellen Verzahnungsprüfung steht bei dem vorgestellten Ansatz die flächige Erfassung der Verzahnungsgeometrie bei gleichzeitiger Reduzierung der erforderlichen Messzeiten im Vordergrund. Anhand einer ausgewählten Verzahnung wird erstmals mithilfe taktiler Referenzmessungen die Messunsicherheit des Gesamtsystems experimentell geschätzt. Dabei wird deutlich, dass die numerische Korrektur der Messwerte einen entscheidenden Anteil zur Verringerung der Unsicherheit beiträgt.

Schlagwörter: Verzahnungsmesstechnik, Streifenprojektion, Messunsicherheit, Kalibrierung, Präzisionsschmieden

Reduction and Evaluation of the Uncertainty of Measurement of Optical Gear Measurement using Fringe Projection

The application of a fringe projection system, which works as a 3D imaging device based on triangulation and phase shift technique, is particularly suitable for in-line testing of precision-forged gearwheels. In contrast to the conventional gearwheel testing, the approach introduced deals with an 2D acquisition of the whole gearing geometry with simultaneous reduction of the measuring time. On the basis of one selected gearing geometry, the measuring uncertainty of the optical measuring system was estimated experimentally by means of tactile reference measurements. The results show, that the numerical correction of the measuring values contributes dramatically to the decrease of the measuring uncertainty.

Keywords: Gear measurement, fringe projection, uncertainty of measurement, calibration, precision-forging

1 Einleitung

Optische Messverfahren zur berührungslosen Erfassung der Werkstückgeometrie rücken seit einiger Zeit auch in dem Bereich der Verzahnungsmesstechnik immer mehr in den Fokus aktueller Forschungen. Sie besitzen prinzipiell ein enormes Potenzial, die notwendigen Prüfzeiten drastisch zu verringern. Von besonderem Interesse sind hier parallel arbeitende Verfahren, wie zum Beispiel die Streifenprojektion, die Teile der Werkstückoberfläche in wenigen Sekunden mit 10^6 oder mehr Messpunkten digitalisieren. Durch den Einsatz dieser Technologie besteht die Möglichkeit, die gesamte Verzahnung innerhalb kürzester Zeit mit einer sehr hohen Informationsdichte, d. h. flächig, zu erfassen. Damit stellen diese Verfahren zum einen die Grundlage für eine wirtschaftliche Prüfung der Verzahnungsgeometrie dar. Zum anderen können so Auswerteverfahren entwickelt und umgesetzt werden, die im Gegensatz zu der genormten linienhaften Prüfung auf einem flächigen 3D-Ansatz basieren und erheblich mehr Informationen über eventuelle Defekte der Werkstücke liefern.

Bisherige Bemühungen, neue optische Verfahren für die Verzahnungsmessung zu etablieren, scheiterten meist an den erzielbaren Genauigkeiten, die angesichts der geringen Toleranzen bei der Verzahnungsherstellung für einen Qualitätsnachweis nicht ausreichend waren und auch heute im Hinblick auf eine Fertigteilprüfung nicht sind. Zudem führen die optischen Eigenschaften der Bauteile häufig zu Problemen.

Ein idealer Anwendungsfall für optische Verzahnungsmesstechnik dagegen ist die Prozesskette für das Präzisionsschmieden [3] von Stirnrädern. Hier steht besonders die prozessbegleitende und fertigungsorientierte Prüfung der Zwischenprodukte im Vordergrund, wodurch die Genauigkeitsanforderungen deutlich geringer sind als bei der Fertigteilprüfung. Von zentraler Bedeutung ist neben der schnellen Erfassung aller Zähne die flächige Geometrieauswertung. Weiterhin sind die zu prüfenden Werkstücke im Gegensatz zu geschliffenen Verzahnungen im Hinblick auf die Streifenprojektion optisch kooperativ.

Präzisionsgeschmiedete Verzahnungsrohlinge weisen für das Fertigungsverfahren typische Geometriefehler auf, wie zum Beispiel Aufmaßschwankungen oder Formfehler. Diese Fehlstellen sind im Gegensatz zu der spanenden Zahnradfertigung teils individuell ausgeprägt und können nicht sicher durch linienhafte Prüfung einzelner Zähne detektiert werden. Die hochpräzise taktile Zahnradmessung mit Koordinatenmessgeräten ist aufgrund der zu geringen Geschwindigkeit zur prozessbegleitenden Prüfung endkonturnah geschmiedeter Zahnradrohlinge demnach ungeeignet. Besonders die Prüfung aller Zähne einer Verzahnung, die durch die Fehlercharakteristik der

umformenden Fertigung zwingend erforderlich ist, kann mithilfe der Streifenprojektionstechnik wirtschaftlich erfolgen.

2 Optische Messung außenverzahnter Stirnräder

Zur Erzielung optimaler Ergebnisse bei der optischen Verzahnungsmessung ist der Aufbau des Messsystems und die Auswahl der Systemkomponenten sehr stark von der zu prüfenden Bauteilgeometrie abhängig. Speziell die eingesetzten Projektions- und Beobachtungsoptiken wirken durch das resultierende Messvolumen als limitierender Faktor hinsichtlich einer universellen Messeinrichtung. Die Objektive beeinflussen entscheidend sowohl die erreichbare laterale als auch die vertikale Auflösung des Gesamtsystems. Daher müssen die vorgestellten Ergebnisse immer im Kontext der untersuchten Verzahnungsgeometrie, deren relevante Geometrieparameter Tabelle 1 zusammenfasst, gesehen werden.

Die Geometrie der Verzahnung entspricht dem FZG Prüfritzel Verzahnung C für standardisierte Tragfähigkeits- und Schmieröluntersuchungen. Die Verzahnung stellt aufgrund des relativ großen Normalmoduls und der dadurch bedingten Zahnhöhe erhebliche Anforderungen an den vertikalen Messbereich des optischen Systems, siehe Abschnitt 3.1.

Normalmodul m_n	4,5
Zähnezahl z	16
Eingriffswinkel α	20°
Schrägungswinkel β	0°
Profilverschiebungsfaktor x	0,1817
Zahnbreite b	14 mm
Grundkreisdurchmesser d_b	73,43 mm
Fußkreisdurchmesser d_f	61,12 mm
Kopfkreisdurchmesser d_a	82,45 mm

Tabelle 1: Geometriedaten der für die Untersuchung betrachteten Verzahnung.
Table 1: Geometry data of the investigated gearwheel.

2.1 Teilungsbezogene Datenerfassung und Rekombination

Zur optischen und flächenhaften Erfassung der Verzahnungsgeometrie wird ein Streifenprojektionssystem eingesetzt. Die Messunsicherheit von bildgebenden Triangulationssensoren verhält sich proportional zur Messfelddiagonalen [6]. 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 [8]. Die Messungen erfolgen durch einen ortsfesten Streifenlichtsensor. Die Positionierung der Werkstücke zwischen den Einzelaufnahmen erfolgt rotatorisch mithilfe einer Drehachse. Durch diese teilungsbezogene Vorgehensweise werden einige Geometriebereiche redundant erfasst. Hierdurch können Bereiche mit großen Steigungen orthogonal zur Beobachtungsrichtung, deren Erfassung zum einen problematisch und zum anderen mit einer erhöhten Messunsicherheit behaftet ist, aus den Einzelmessungen eliminiert werden. Gerade diese Bereiche sind in den benachbarten Aufnahmen unter optisch günstigeren Bedingungen enthalten. Bild 1 verdeutlicht die teilungsbezogene Datenerfassung. Aus dem Bild wird deutlich, dass kein vollständiger Zahn bzw. keine komplette Evolvente mit nur einer Aufnahme erfassbar ist.

Die Gesamtgeometrie der Verzahnungen wird durch Rekombination der Einzeldatensätze erzeugt [7]. Hierzu ist es notwendig, die Lage der Rotationsachse zu er-

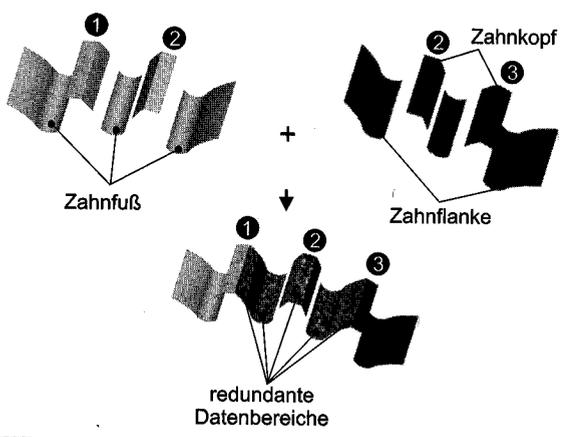


Bild 1: Teilungsbezogene Datenerfassung und Rekombination zweier Einzeldatensätze.
Figure 1: Division-related data capture and recombination of two single data records.

mitteln. Als günstige und hinreichend sichere Strategie hierfür hat sich die Verwendung eines Zylindernormals und die Durchführung mehrerer Umschlagmessungen erwiesen. Auf der Lage der Drehachse wird ein Erfassungskoordinatensystem (EKS) für die Rekombination aufgebaut. Daher ergibt sich die gesamte Verzahnungsgeometrie durch einfache geometrische Transformation der Einzeldatensätze unter Berücksichtigung des Rotationswinkels in dem EKS.

Bereits vor der Rekombination werden die Einzeldatensätze einer intensiven Datenvorverarbeitung unterzogen. Es wird zunächst die relevante Verzahnungsgeometrie aus den Datensätzen isoliert. Weiterhin werden Bereiche großer Steigungen, d. h. potenziell unsichere Messpunkte, gelöscht. Zusätzlich werden Ausreißer und Einzelpunkte ohne sinnvolle Nachbarschaft eliminiert.

2.2 Aufbau des optischen Messsystems

Als Kernstück des Messsystems wird ein Streifenprojektionssystem der Fa. GFM eingesetzt, durch den eine Erfassung von ca. 10^6 Messpunkten in einer Belichtungssequenz ermöglicht wird. Der Sensor 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° verfügt. Das Messvolumen zur Erfassung der Verzahnungsgeometrie gemäß

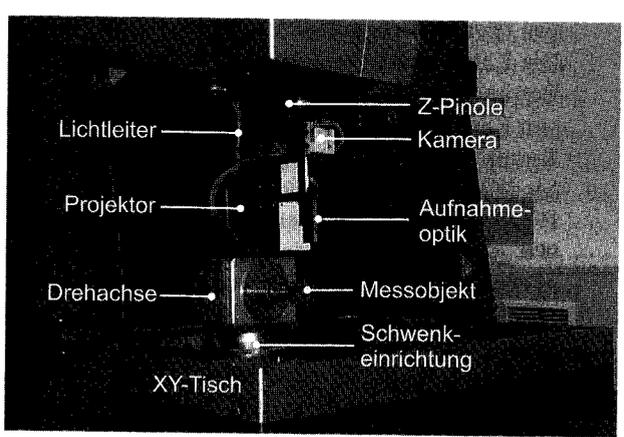


Bild 2: KMG mit integriertem Streifenprojektionssystem und Drehachse.
Figure 2: CMM with integrated fringe projection system and revolving stage.

Tabelle 1 hat die lateralen Dimensionen $40 \times 40 \text{ mm}^2$. Der vertikale Messbereich beträgt $\pm 9 \text{ mm}$.

Der experimentelle Aufbau der Messeinrichtung ist in Bild 2 dargestellt. Der Streifenprojektionssensor ist in ein opto-taktils Koordinatenmessgerät (Werth VideoCheck IP 1000) integriert, wodurch eine hochgenaue Positionierung des Sensors entlang der Führungen des KMG für weitere Untersuchungen 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 mithilfe der Schwenkeinrichtung abgeschattete Bereiche bei der Messung schrägverzahnter Zahnräder minimiert werden.

3 Kalibrierung des Streifenlichtsensors

Zur Erfassung der Makrogeometrie von Verzahnungen ist ein Messvolumen notwendig, welches einen deutlich ausgeprägten Vertikalbereich in z -Richtung aufweist. Daher unterscheiden sich die Anforderungen und die Art der Kalibrierung signifikant von anderen Anwendungen, wie zum Beispiel der bildhaften Erfassung von Oberflächentopographien, welche meist in unmittelbarer Nähe der Referenzebene erfolgen.

Die Kalibrierung des eingesetzten Streifenprojektionssensors erfolgt mithilfe einer vom Hersteller entwickelten Mehrebenenkalibrierung. Der verwendete Kalibrieransatz nutzt als Basis ein photogrammetrisches Grundmodell [1], welches aufgrund der Verwendung von telezentrischen Aufnahmeoptiken modifiziert ist. Die Kalibrierung des Sensors dient in diesem Fall zur Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung von Kamera und Projektor sowie von System- und Korrekturparametern auf der Basis eines physikalischen Modells. Allgemeines Ziel der Kalibrierung ist das Projektor- und das Kamerakoordinatensystem mithilfe von Abbildungsfunktionen in einem Weltkoordinatensystem in Beziehung zu setzen, um mit dem System absolut zu messen.

3.1 Numerische Korrektur der vertikalen z -Komponente

Grundsätzlich zeichnet sich die herstellerseitige Kalibrierung durch die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse besonders im Hinblick auf Ersatzformelemente aus. Durch die hohe Informationsdichte, mit der die

Geometrielemente erfasst werden, und der anschließenden Ausgleichsrechnung erfolgt eine Mittelung der aus dem Rauschverhalten des Sensors resultierenden Antastabweichungen. Trotzdem zeigen Referenzmessungen an unterschiedlichen Prüfkörpern besonders in Vertikalrichtung für die Verzahnungsmessung störende Längenmessabweichungen und Nichtlinearitäten innerhalb des Messvolumens [8].

Zur Steigerung der Genauigkeit wird daher die vertikale z -Komponente nach jeder Messung numerisch korrigiert. Basierend auf einer Serienmessung quasi-paralleler Ebenen, deren Abstand voneinander durch die Positionierung des Sensors mithilfe der z -Pinole des KMG hinreichend genau bekannt ist, werden für den gesamten vertikalen Messbereich Korrekturwerte ermittelt. Die Einzelflächen werden nicht über den gesamten lateralen Messbereich ausgewertet, sondern in Teilflächen zerlegt, um die räumliche Verteilung der Abweichungen besser zu erfassen und wiederzugeben. Die Korrekturwerte für jede Teilfläche ergeben sich aus dem Vergleich des theoretischen Abstands mit dem tatsächlichen Abstand, bezogen auf die Nullebene, und werden als Stützpunkte in einem dreidimensionalen Korrekturtensor zusammengefasst. Die gültigen Korrekturwerte für jede z -Koordinate eines Gesamtdatensatzes werden aus dem Korrekturtensor mit den Stützpunkten anhand trilinearer Interpolation bestimmt und mit den Messdaten verrechnet.

Bild 3 zeigt die lokal ermittelten vertikalen Längenmessabweichungen, bezogen auf die Referenzebene an den Rändern des Messvolumens. Es ist deutlich zu

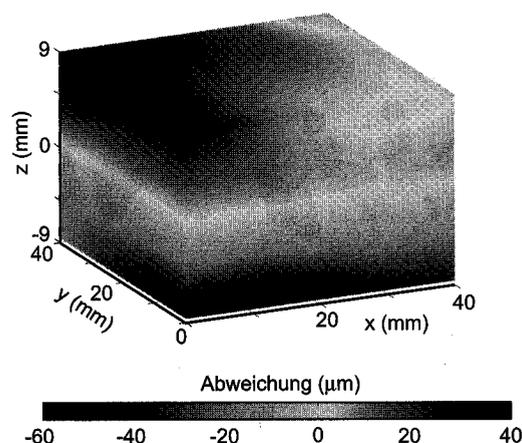


Bild 3: Visualisierung der vertikalen Längenmessabweichungen bezogen auf die Referenzebene an den Rändern des Messvolumens.

Figure 3: Visualization of the vertical length error of measurement in relation on the reference plane on the boundary of the measuring volume.

erkennen, wie inhomogen die Abweichungen verteilt sind. Eine systematische Abhängigkeit von der Projektionsrichtung ist nicht zu erkennen. Die Art und Ausprägung der Abweichungen wird vielmehr durch die Lage der Referenzebene im Telezentriebereich der Sensorkamera bei der Erstkalibrierung beeinflusst.

Eine erneute Überprüfung des Messsystems beweist, dass die numerische Korrektur äußerst effektiv ist. Die ursprünglichen Abweichungen werden um deutlich mehr als eine Größenordnung reduziert. Speziell bei Messungen mit einem optisch kooperativen Stufenendmaß sind über den gesamten Messbereich keine systematischen Abweichungen mehr erkennbar. Neben den vertikalen Längenmessabweichungen werden gleichzeitig vorhandene Winkelfehler kompensiert. Tabelle 2 stellt die Intervalle der maximal ermittelten Abweichungen für die herstellerseitige und numerisch korrigierte Kalibrierung des Systems vergleichend gegenüber.

	original	korrigiert
ΔL_z	$[-65; 40] \mu\text{m}$	$[-1,5; 1] \mu\text{m}$
$\Delta \vartheta_x$	$[-1; 6]'$	$[-0,1; 0,04]'$
$\Delta \vartheta_y$	$[-9; 0]'$	$[-0,15; 0,05]'$

Tabelle 2: Intervalle der vertikalen Abweichung ΔL_z und der Winkelabweichungen $\Delta \vartheta_x$ und $\Delta \vartheta_y$.
Table 2: Intervals of the vertical error of measurement ΔL_z and the angular deviations $\Delta \vartheta_x$ and $\Delta \vartheta_y$.

4 Abschätzung der Messunsicherheiten

Das beschriebene Messsystem und die teilungsbezogene Datenerfassung mit anschließender Rekombination ermöglichen optisch kooperative Verzahnungen flächig zu erfassen und eine Datenbasis hoher Informationsdichte für die Auswertung bereitzustellen. Um die Güte bzw. die Messunsicherheit des Verfahrens einzuschätzen, werden taktile Referenzmessungen an Verzahnungen durchgeführt, die im Folgenden mit den optischen Messungen sowohl qualitativ als auch quantitativ verglichen werden.

4.1 Vergleich optischer und taktile Verzahnungsmessungen

Aufgrund erheblich unterschiedlicher Messpunktverteilungen, Datendichten und Messpositionen ist der direkte Vergleich taktile Verzahnungsmessungen mit

flächenhaft optischen Messungen nicht möglich. Daher wird die folgende Vorgehensweise gewählt, um eine möglichst geräteneutrale und messverfahrenunabhängige Vergleichbarkeit der Messungen zu erreichen. Hierbei stehen folgende Aspekte im Vordergrund:

- Die Gegenüberstellung der Messungen erfolgt auf Basis genormter Profil- und Flankenlinien, damit die Verzahnungsabweichungen mithilfe standardisierter Methoden bestimmbar und durch genormte Kennwerte beschreibbar sind.
- Die Auswertung sowohl der optischen als auch der taktile Messungen erfolgt mit einer unabhängigen Software, um die Datenanalyse strikt von der Datenerfassung zu trennen und um die Ergebnisse mit den gleichen Algorithmen zu erzeugen.

Für den angestrebten Vergleich ist es folglich notwendig, die flächigen Verzahnungsgeometriedaten nach der Rekombination auf genormte Linienprofile zu reduzieren. Hierzu werden die Messpunkte, die in unmittelbarer Nähe der Profil- bzw. Flankenlinie liegen, auf diese projiziert, um möglichst viele Stützpunkte für die Weiterverarbeitung der Messdaten zur Verfügung zu stellen. Durch lineare Interpolation und gleitende Mittelwertbildung zur Glättung werden äquidistante Punkte über den Wälzweg und die Zahnbreite erzeugt und in das als VDI-Richtlinie verabschiedete GDE-Dateiformat [10] konvertiert. Somit ist eine objektive und geräteunabhängige Auswertung gewährleistet. Neben den eigentlichen Messdaten werden in der Datei beispielsweise auch die Verzahnungsparameter und Auswertebereiche strukturiert abgelegt, sodass für die Auswertung keine weiteren Zusatzinformationen benötigt werden.

Die taktile Vergleichsmessungen werden auf einem Verzahnungsmesszentrum ZMC 550 der Fa. Zeiss mit Rundtisch auf konventionellem Wege durchgeführt. Die Gerätesoftware wird im Wesentlichen nur zur rechnerischen Ausrichtung des Werkstücks und zur Datenerfassung eingesetzt. Zur Bestimmung von Rundlauf, Dicke, Teilung sowie Profil- und Flankenlinienabweichungen erfolgt die Auswertung der Daten mit einer geräteunabhängigen Analysesoftware für Verzahnungen [5] der Fa. Klingelberg, die den Import des universellen GDE-Formats unterstützt. Die grundlegenden Verfahren, mit denen die Verzahnungsabweichungen mithilfe der Analysesoftware berechnet werden, sind in [4] beschrieben.

Die Zahnräder werden für die optischen und taktile Vergleichsmessungen so positioniert, dass die Messungen jeweils in der gleichen Lücke beginnen. Durch einen nahezu identischen Messablauf wird sichergestellt, dass bei der externen Auswertung ein direkter Vergleich der identischen Zähne jeder Verzahnung erfolgt. Die Ergebnisse einer entsprechenden Vergleichsmessung einer geschmiedeten Verzahnung der Geometrie entsprechend Tabelle 1 ist in Bild 4 dargestellt.

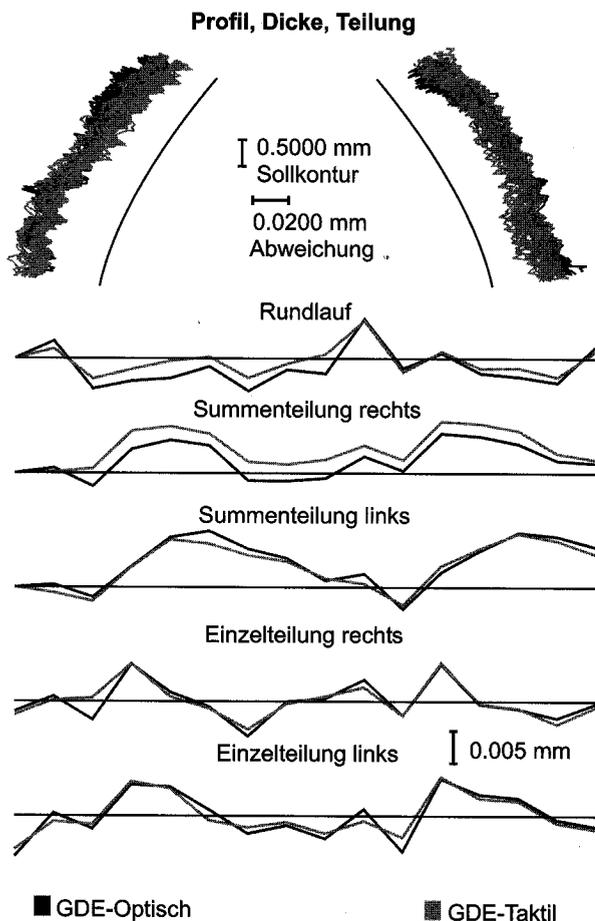


Bild 4: Vergleich einer optischen und taktile Verzahnungsmessung.
Figure 4: Comparison of an optical and tactile measurement.

Der Vergleich der Kenngrößen für die Profilabweichung nach [9] ergibt, dass sich die Profilwinkelabweichung $f_{H\alpha}$ zwischen der optischen und taktile Messung eher geringfügig unterscheidet. Die Gesamtform- und Formabweichung (F_α u. $f_{f\alpha}$) liefern signifikante Unterschiede, da die optischen Messdaten veräuscht sind. Der Betrag dieser Prüfmaße hängt sehr von Einzelmesspunkten, d. h. Ausreißern, ab, während $f_{H\alpha}$ von der Regressionsgeraden der Messpunkte abgeleitet wird und somit weniger anfällig auf extreme Einzelpunkte ist. Diese Aussagen sind auch auf die in Bild 4 nicht dargestellten Flankenlinienabweichungen bzw. deren Prüfmaße übertragbar, sodass für weitere quantitative Untersuchungen nur die Winkelabweichungen $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ im Mittelpunkt stehen. Da die Teilungs- und Rundlaufabweichungen auf Basis der Regressionsgeraden der Profilabweichungen berechnet werden und somit direkt von $f_{H\alpha}$ abhängig sind, erübrigt sich eine gesonderte Betrachtung dieser Größen.

4.2 Experimentelle Bestimmung der Unsicherheiten für $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$

Mithilfe weiterer Vergleichsmessungen werden das optische Verfahren und die resultierenden Unsicherheiten für die Verzahnungsgeometrie untersucht und abgeschätzt. Neben einer idealgeometrischen Verzahnung stehen hierfür zwei Stirnräder mit definierten Fehlern für die Referenzmessungen zur Verfügung.

Die Abschätzung der Messunsicherheit für die Geometriemerkmale $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ erfolgt experimentell auf der Basis der vorgestellten Messungen durch den Vergleich der taktile und optisch ermittelten Kenngrößen und in Anlehnung an [2]. Es wird davon ausgegangen, dass die taktile ermittelten Prüfmaße mit einer Standardunsicherheit u_c den wahren Werten entsprechen. Daher ist der Wert der kalibrierten Messgröße $x_c = 0$ zu setzen. Die in die Unsicherheitsbetrachtung eingehenden Messwerte für das jeweilige Merkmal ergeben sich aus den Differenzen der taktile und der optischen Messungen.

Da bei der Messung bzw. dem Vergleich eines Lehrzahnrades die Profil- und Flankenwinkelabweichungen aller Zahnflanken betrachtet werden, gehen auch etwaige Spannfehler der Werkstücke mit in die Untersuchung ein und haben einen erheblichen Einfluss auf die ermittelte Messunsicherheit. Auftretende systematische Abweichungen werden nicht korrigiert und werden daher zur Unsicherheit addiert. Die einzelnen Schritte zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit für $k = 2$ und die hierzu notwendigen Größen für die Merkmale $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Die experimentell ermittelten Unsicherheiten für $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$ unterscheiden sich deutlich und zeigen, dass die Genauigkeit des optischen Messverfahrens sehr differenziert zu sehen ist. Während die Flankenlinien nahezu parallel zur Referenzebene liegen und somit von den lateralen x - und y -Komponenten vorgegeben werden, hängen die Profillinien zusätzlich maßgeblich von der vertikalen z -Komponente ab und weisen in manchen Bereichen erheblich größere Steigungen als die Flankenlinien auf, wodurch die optische Erfassung erschwert wird und mit einer größeren Unsicherheit behaftet ist. Aufgrund der verschiedenen räumlichen Ausrichtung der Geometriemerkmale im Messvolumen kommt es daher zu den relativ unterschiedlichen Unsicherheiten.

4.3 Einfluss der numerischen Korrektur

Abschließend verdeutlicht Bild 5 den Einfluss der in Abschnitt 3.1 beschriebenen vertikalen Korrektur der

Berechnung der Unsicherheit	$f_{H\alpha}$	$f_{H\beta}$
Angenommene Standardunsicherheit u_c für das jeweilige taktil gemessene Merkmal:	$u_c = 1,5 \mu\text{m}$	$u_c = 1,5 \mu\text{m}$
Bestimmung des arithmetischen Mittels \bar{y} aller Messwerte je Merkmal: $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	$\bar{y} = -1,6 \mu\text{m}$	$\bar{y} = -3,6 \mu\text{m}$
Die Messwerte y_i ergeben sich aus der Differenz der taktilen und optischen Messungen.		
Bestimmung der Standardunsicherheit u_p je Merkmal: $u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$	$u_p = 8,0 \mu\text{m}$	$u_p = 3,7 \mu\text{m}$
Bestimmung der systematischen Abweichung E für $x_c = 0$ je Merkmal: $E = \bar{y} - x_c$	$E = -1,6 \mu\text{m}$	$E = -3,6 \mu\text{m}$
Die erweiterte Messunsicherheit U jeder Messgröße wird aus den Standardunsicherheiten und der systematischen Abweichung für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% wie folgt berechnet: $U = 2 \cdot \sqrt{u_c^2 + u_p^2} + E $	$U = 17,9 \mu\text{m}$	$U = 11,6 \mu\text{m}$

Tabelle 3: Zusammenfassung der Unsicherheitsberechnung für $f_{H\alpha}$ und $f_{H\beta}$.
Table 3: Summary of the uncertainty of measurement calculation for $f_{H\alpha}$ and $f_{H\beta}$.

Messdaten auf die Messergebnisse. Es sind die resultierenden Verzahnungsabweichungen aller Profil- und Flankenlinien im Vergleich gegeneinander aufgetragen.

Die Korrektur der Messdaten bezieht sich sowohl auf die Verzahnungsmessung selbst als auch auf die Geometriedaten für das Zylindernormal zur Bestimmung der Drehachse. Erwartungsgemäß sind die Flankenlinien nahezu deckungsgleich, da die Korrektur nur in der vertikalen z-Richtung wirksam ist. Bei den Profillinien ergibt sich visuell ein signifikanter Unterschied, der betragsmäßig zu einer Abweichung von ca. 40 μm bei den Profilwinkelabweichungen führt.

Hieraus wird ersichtlich, wie die Unsicherheit des Verfahrens durch geeignete Maßnahmen im Bereich der Datenakquisition und Verarbeitung der Rohdaten erheblich verbessert werden kann. Daher sollte es auch in Zukunft möglich sein, die Unsicherheit für die optische Verzahnungsmessung mithilfe verbesserter Projektionstechniken, Kalibrierstrategien und Datenverarbeitungsalgorithmen deutlich zu verringern.

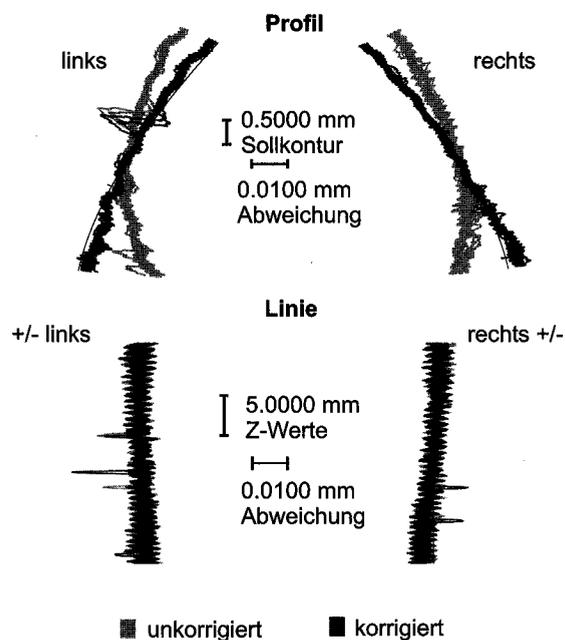
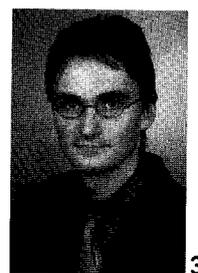


Bild 5: Einfluss der numerischen Korrektur des Messvolumens in Vertikalrichtung auf die Profil- und Flankenlinie.
Figure 5: Influence of the numerical correction of the measuring volume in vertical direction on the profile and helix lines.

Literatur

- [1] Chen, M.; Frankowski, G.: *Kalibrierstrategie für optische 3D-Koordinatenmessgeräte basierend auf streifenprojektionstechnischen und fotogrammetrischen Algorithmen*. Technisches Messen, Band 69, 2002.
- [2] DIN 32881-3: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) – Teil 3: Unsicherheitsermittlung mit kalibrierten Werkstücken*. Ausgabe: 2000-12.
- [3] Doege, E. et al.: *Präzisionsschmieden schrägverzahnter Zahnräder*. Umformtechnik, Band 32, 1998.
- [4] Gravel, G.: *Beurteilung abbildend hergestellter Stirnzahnräder mit Hilfe der Koordinatenmesstechnik*. Dissertation Universität Hannover, 1996.
- [5] Gravel, G.: *Schnelle und sichere Fertigungskorrekturen*. Quality Engineering, 2003.
- [6] Koch, A.; Ruprecht, M.; Toedtler, O.; Häusler, G.: *Optische Messtechnik an technischen Oberflächen*. Expert Verlag, 1998.
- [7] Meeß, K.; Bodschwinn, H.: *Zahn um Zahn, Messung an präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern*. Qualität und Zuverlässigkeit, Band 47, 2002.
- [8] Meeß, K.: *Flächenhafte Messung optisch kooperativer Stirnräder am Beispiel präzisionsgeschmiedeter Verzahnungen*. Dissertation, Universität Hannover, 2005.
- [9] VDI/VDE 2607 Blatt 1: *Rechnerunterstützte Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil*. Ausgabe: 2000-02.
- [10] VDI/VDE 2610: *Format für den Austausch von Verzahnungsdaten – Gear Data Exchange Format (GDE-Format)*. Ausgabe: 2003-09.



1 Dr.-Ing. Karsten Meeß arbeitete als Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover und hat auf dem Gebiet der optischen Verzahnungsmesstechnik promoviert. Seitdem ist er als Geräteentwickler für optische Messtechnik bei der Fa. Hommelwerke GmbH im Werk Jena tätig.
Adresse: Hommelwerke GmbH, Prüssingstraße 41, 07745 Jena, E-Mail: karsten.meess@hommelwerke.de

2 Dipl.-Phys. Markus Kästner erhielt 2003 sein Diplom an der Universität Hannover. Seit 2004 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover. Aktuell befasst er sich im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 mit der Entwicklung und Erprobung von Methoden zur optischen Geometrieprüfung präzisionsgeschmiedeter Bauteile.
Adresse: Institut für Mess- und Regelungstechnik, Nienburger Straße 17, 30167 Hannover, E-Mail: kaestner@imr.uni-hannover.de

3 Dr.-Ing. Jörg Seewig ist Leiter der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover.
Hauptarbeitsgebiete: optische und taktile Makro-, Mikro- und Nanomesstechnik, Rauheitsmesstechnik, Signalverarbeitung
Adresse: Institut für Mess- und Regelungstechnik, Nienburger Straße 17, 30167 Hannover, E-Mail: seewig@imr.uni-hannover.de