

# Zahn um Zahn

## Messung an präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern

Karsten Meeß und  
Horst Bodschnwinna, Hannover

Die für die klassische Verzahnungsmesstechnik eingesetzten Geräte, Methoden und geforderten Genauigkeiten beziehen sich meist auf die konventionelle, das heißt spanende Herstellung von Zahnrädern. Im Getriebebau besteht jedoch ein zunehmendes Interesse an Hochleistungsverzahnungen, die durch Präzisionsumformung hergestellt werden, da hierdurch die Bauteileigenschaften entscheidend verbessert werden können. Innovative Prozessketten sehen das Reduzieren auf folgende Prozessschritte vor: endkonturnahes Umformen ohne Grat im geschlossenen Gesenk mit einem Aufmaß im Bereich von wenigen  $1/100$ -Millimetern, energetisch günstige Wärmebehandlung direkt aus der Schmiedehitze und abschließende Hartfeinbearbeitung der Zylinderräder durch Schleifen auf Endkontur.

Neben den Materialeigenschaften stellt die Bauteilgeometrie eine entscheidende Regelgröße innerhalb einer solchen Prozesskette dar. Für die Prozessüberwachung ist eine fertigungsbegleitende Geometrieerfassung des umgeformten Zahnradrohlings vor der Hartfeinbearbeitung erforderlich. Diese prozessbegleitende Prüfung muss zum Erfassen der systematischen Geometrieigenschaften des Schmiederohlings prozessnah und schnell erfolgen.

1 Das Verfahren wird im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Teilprojekt B5 „Schnelle, fertigungsnahe Geometrieprüfung von präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern“ erarbeitet.

Präzisionsgeschmiedete Zahnräder begünstigen durch ihre diffus streuenden Oberflächeneigenschaften den Einsatz optischer Triangulationsmessverfahren. Vorgestellt wird die Entwicklung eines Streifenprojektionsverfahrens, das in Kombination mit einer Präzisionsdrehachse ein schnelles und flächiges Erfassen der gesamten Verzahnungsgeometrie mit Zahnfuß- und Kopfbereichen ermöglicht.<sup>1</sup>

### Anforderungen an das Messsystem

Die geometrische Prüfung spanend oder abwälzend hergestellter Zahnräder erfolgt häufig mit taktilen Koordinatenmessgeräten (KMG) oder speziellen Verzahnungsmessmaschinen. Hiermit ist es möglich, die Verzahnungsgeometrie im Bereich weniger Mikrometer zu bestimmen. Allerdings ist diese Methode sehr

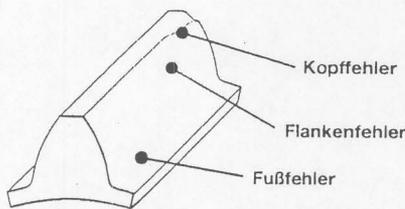


Bild 1. Mögliche individuelle Geometriefehler durch das Schmieden

zeitaufwändig und für abbildend hergestellte Präzisionszahnräder nur bedingt anwendbar. Die genormte Bestimmung der Abweichungen von Verzahnungsgeometrien beschränkt sich bedingt durch die Historie auf ein linienhaftes Erfassen der Abweichungen im Profil und auf der Flanke der Verzahnung. Spanabhebend hergestellte Verzahnungen haben einen unmittelbaren Bezug zu der Bohrung und der Welle, da diese Nebenformelemente fertigungsbedingt vor der eigentlichen Verzahnung erstellt werden [1, 2]. Die Verzahnung als Hauptfunktionselement wird deshalb immer bezogen auf diese Nebenformelemente hergestellt.

Diese Voraussetzungen sind bei dem Fertigungsverfahren der Präzisionsumformung nicht gegeben. Haupt- und Nebenfunktionselemente werden simul-

tan im gleichen Arbeitsgang bei der Umformung im geschlossenen Gesenk erzeugt. Weiterhin werden alle Zähne unabhängig voneinander in der Matrize abgeformt, wodurch individuelle Geometriefehler im Kopf-, Fuß- und Flankenbereich sowie Teilungsfehler entstehen können (Bild 1). Die Ausprägung der auftretenden Geometriefehler unterscheidet sich erheblich von denen der klassischen Verzahnungsherstellung. Die Abweichungen sind in der Regel sehr unsystematisch verteilt. Es ist daher das Prüfen aller Zähne einer Verzahnung erforderlich, wodurch mit taktiler Messtechnik unzumutbar lange Prüfzeiten notwendig werden.

Um die auftretenden individuellen Abweichungen an den Zähnen zu detektieren, ist es weiterhin notwendig, die Verzahnung flächig zu erfassen, um so fertigungsorientiert Korrekturdaten für den eigentlichen Schmiedeprozess mit integrierter Wärmebehandlung abzuleiten. Des Weiteren ist ein Beurteilen der Aufmaßverteilung vor der Hartfeinbearbeitung der Verzahnung unumgänglich, um Prozessdaten für das Weiterverarbeiten zu ermitteln. Die benötigten hohen Umformkräfte haben nicht zu vernachlässigende Lageabweichungen in Form von Taumel und Exzentrizität der Bohrung zur Verzahnung zur Folge. Der zur funktionsorientierten Messung notwendige Bezug ist unbrauchbar. Die Zahnräder müssen daher zunächst nahezu bezugslos, das heißt relativ zur Aufspannung in einem Drehlager gemessen werden. Zum Beurteilen der Geometriefehler ist eine gezielte 3D-Einpassung der gemessenen Verzahnung erforderlich, um Form- und Lagefehler voneinander zu trennen.

Zusammenfassend lassen sich die Anforderungen an das Messsystem wie folgt formulieren: Reduzieren der Prüfzeiten bezogen auf die konventionelle taktile Verzahnungsmessung sowie flächiges Erfassen der Verzahnung und somit eine deutliche Steigerung der Messpunkteanzahl.

Für die schnelle Geometrieprüfung des Zahnradrohrlings ist eine gegenüber Koordinatenmessgeräten deutlich reduzierte Messgenauigkeit hinreichend.

Das Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover entwickelte ein Messsystem, das geschmiedete Verzahnungsrohlinge optisch erfasst. Dieses System bietet eine vollständige flächige Beurteilung der geschmiedeten Verzahnung zum Erkennen von verfahrensspezifischen Geometrieabweichungen.

### Funktion und Kalibrierung des Messsystems

Für ein schnelles und flächiges Erfassen der Verzahnungsgeometrie bietet sich ein berührungsloses optisches Messverfahren mit paralleler Datenerfassung an. Die optisch diffus streuende Oberfläche der endkonturnah geschmiedeten Zahnräder begünstigt ein solches Messverfahren. Das optische Messen der Zahnräder erfolgt daher mit einem Streifenlichtsensor, der aus Projektor und Kamera besteht. Dieser arbeitet nach dem Flächen-triangulationsprinzip und zählt somit zu den bildgebenden optischen 3D-Messverfahren. Für das Bestimmen der Geometriedaten werden Gitter unterschiedlicher Ortsfrequenz (Graycode) und unterschiedlicher Phase (Phaseshift) auf das Messobjekt projiziert (Bild 2). Gleichzeitig werden die durch die Werkstückgeometrie deformierten Projektionsmuster von einer CCD-Kamera beobachtet. Durch das Auswerten dieser Bildsequenz können die 3D-Koordinaten für das gesamte Messfeld nach vorheriger Kalibrierung des Systems bestimmt werden. Die Anzahl der ermittelten Koordinaten entspricht hierbei der Pixelanzahl des in der Kamera verwendeten CCD-Arrays. Mit dem verwendeten System lassen sich so beispielsweise  $1024 \times 1008$  Wertetripel parallel während einer Messung erzeugen.

In Streifenprojektionssystemen werden häufig schaltbare LCD-Gitter zum Erzeugen der strukturierten Beleuchtung eingesetzt. Diese haben den Nachteil, dass die Lichtausbeute für die Mes-

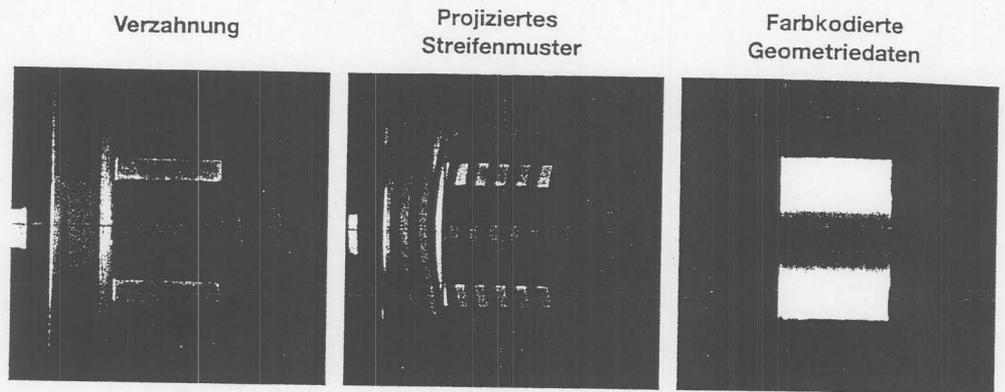


Bild 2. Beispiel eines Streifenprojektionsbilds am Zahnrad und ausgewertete Geometriedaten

sung dunkler Bauteile meist ungenügend ist. Zum Beleuchten der endkonturnah geschmiedeten Zahnradrohlinge wird daher ein Sensor verwendet, der auf einem Mikrospiegel-Array basiert ( $1024 \times 768$  Spiegel, Kantenlänge eines Spiegels rund  $16 \mu\text{m}$ ). Hierdurch werden die Lichtverluste auf etwa 6% minimiert. Außerdem können durch das gezielte Ansteuern der einzelnen Spiegelemente echte  $\cos^2$ -förmige Intensitätsverläufe für das Phaseshift-Verfahren projiziert werden, wodurch zum Beispiel eine Verwendung optischer Tiefpassfilter entfällt. Weiterhin werden zur Steigerung

40 mm und  $z = 16$  mm verwendet. Die Beleuchtung erfolgt zentralperspektivisch, wobei zu beachten ist, dass das gesamte optische System der Scheimflugbedingung genügt. Nach Veränderung des Systems oder Austausch der Optiken muss es neu kalibriert werden. Die der Sensorkalibrierung zugrunde gelegte Strategie wird als so genannte Zwei-Schritt-Prozedur bezeichnet. Ziel ist es, die inneren und äußeren Parameter von Kamera und Projektor und deren geometrische Beziehung zueinander zu ermitteln. Hierzu muss zunächst ein Gitternormal und eine Ebene gemessen werden. Anschlie-

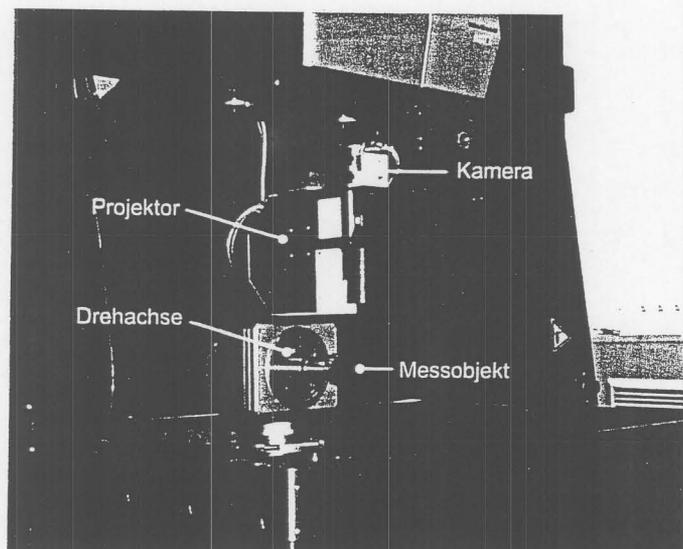


Bild 3. Messaufbau zur optischen Verzahnungsmessung

der Genauigkeit für die Aufnahme telezentrische Objektive eingesetzt. Das verwendete Messfeld wird möglichst klein gehalten und ist auf die Verzahnung optimiert, wobei es maßgeblich von dem vertikalen Messbereich bestimmt wird. Zum Analysieren eines Rads mit  $m_n = 4,5$ ,  $z = 16$ ,  $\alpha_n = 20^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$  wird beispielsweise ein Messvolumen von  $x = 40$  mm,  $y =$

40 mm und  $z = 16$  mm verwendet. Die Beleuchtung erfolgt zentralperspektivisch, wobei zu beachten ist, dass das gesamte optische System der Scheimflugbedingung genügt. Nach Veränderung des Systems oder Austausch der Optiken muss es neu kalibriert werden. Die der Sensorkalibrierung zugrunde gelegte Strategie wird als so genannte Zwei-Schritt-Prozedur bezeichnet. Ziel ist es, die inneren und äußeren Parameter von Kamera und Projektor und deren geometrische Beziehung zueinander zu ermitteln. Hierzu muss zunächst ein Gitternormal und eine Ebene gemessen werden. Anschlie-

### Teilungsbezogene Datenaufnahme durch Drehachse

Für die Verzahnungsmessung wird ein Triangulationssensor bestehend aus Streifenprojektor und Kamera verwendet sowie eine luftgelagerte Präzisionsdrehachse, die manuell schwenkbar ist (Bild 3). Hierdurch wird das Messen von Schrägverzahnungen ermöglicht, da die zu prüfenden Räder entsprechend ihrem Schrägungswinkel zur Beleuchtung verdreht werden (untersuchter Schrägungswinkel  $\beta = 20^\circ$ ). Somit lassen sich Abschattungseffekte bei der Streifenprojektion minimieren, die sonst als Fehlstellen im Messdatensatz vorhanden wären.

normal mit  $r_{Fu\beta} < r_{Normal} < r_{Kopf}$  in Form einer Umschlagmessung. Anschließend erfolgt die Akquisition der Zahnradaten durch Aufnahme von Einzelansichten im Sensorkoordinatensystem und Verdrehen des Werkstücks entsprechend der Teilung.

### Daten aus Einzelansicht zur Gesamtgeometrie zusammenfügen

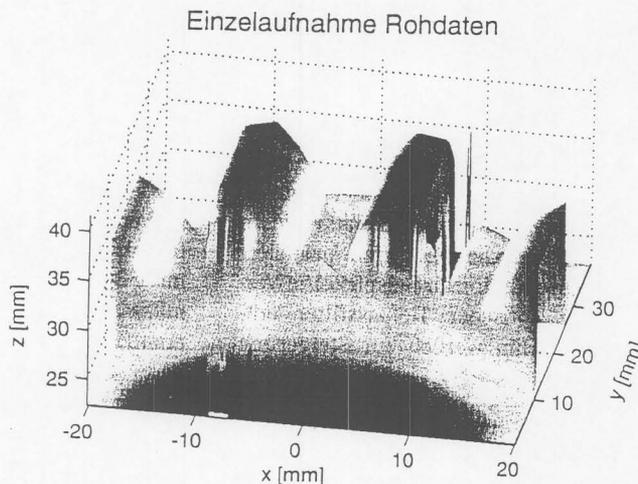
Jeder Rohdatensatz einer Einzelaufnahme enthält Flankenteile verschiedener Zähne sowie Zahnkopf und -fußbereiche (Bild 4). Weiterhin sind Elemente wie zum Beispiel Teile des Spannfutters im Messdatensatz enthalten, die für das Be-

Es ist aufgrund der enormen Messpunktdichte nicht notwendig, fehlende Geometriedaten durch geeignete Verfahren zu interpolieren.

Danach werden alle im Sensorkoordinatensystem vorliegenden Datensätze entsprechend dem Drehwinkel der Drehachse zu einem Gesamtgeometriemodell kombiniert. Hierzu wird eine neue Orthogonalbasis definiert, die direkt aus der eingemessenen Drehachse hervorgeht. Durch eine entsprechende Translation und anschließende Rotation der Wertetripel lässt sich die flächig gemessene Verzahnung vollständig rekombinieren. Das neue Koordinatensystem entspricht noch nicht dem Bezugssystem der Verzahnung, da noch Taumel- und Exzenterfehler der Aufspannung des Werkstücks in den Datensätzen enthalten sind.

Darüber hinaus wurde bereits erwähnt, dass die Bohrung eines endkonturnah geschmiedeten Zahnrades zur Bezugssystembildung durch Aufspannung nur ungenügend ist. Somit muss durch das 3D-Einpassen der Verzahnungsgeometrie auf die Soll-Geometrie ein endgültiges Bezugssystem erzeugt werden, um nachfolgende Untersuchungen an der Verzahnung vornehmen zu können.

Bild 4. Unmaskierte Rohdaten einer Messung mit „bad values“



Für Test- und Entwicklungszwecke sind die Komponenten in ein KMG integriert. Dies gestattet ein flexibles Handling und das exakte Positionieren des Sensors zum Werkstück sowie taktile oder optotaktile Referenzmessungen ohne Umspannen. Ein solcher komplexer Aufbau kann für den Einsatz in der Fertigung nicht akzeptiert werden. Vorrangiges Entwicklungsziel ist deshalb das Messen mit einer fixierten Sensorposition, so dass auf das KMG als flexibles Stativ verzichtet werden kann.

Zum Erfassen von Verzahnungsgeometrien wird der bereits kalibrierte Sensor so positioniert, dass sich nur ein kleiner Bereich der Gesamtverzahnung im Messvolumen befindet. Hieraus folgt, dass die Drehachse außerhalb des Messvolumens liegt und mit einem geeigneten Kalibrierkörper eingemessen werden muss. Dies geschieht einmalig mit einem Zylinder-

urteilen der Verzahnung ohne Bedeutung sind. Daher ist eine sinnvolle Maskierung der Daten notwendig. Diese Maske muss für einen Datensatz manuell erstellt und kann für die folgenden Messungen wiederverwendet werden. Zudem werden in einem ersten Ansatz Ausreißer und Bereiche großer Steigungen (hier  $60^\circ$ ) durch einen Gradientenfilter detektiert und gelöscht, da diese mit dem eingesetzten Sensor nur unzureichend erfasst werden.

Die Datenvorverarbeitung wird durch die Elimination von „bad values“ und eine Vertikaleingrenzung des gültigen Messbereichs abgeschlossen. „Bad values“ sind vereinzelte Messstellen, an denen aufgrund der optischen Eigenschaften des Prüflings oder durch Abschattung keine gültigen Geometriedaten ermittelt werden konnten. Als Ergebnis entstehen bereinigte Datensätze.

### Literatur

- 1 DIN 3960: Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung; 1987
- 2 DIN 3961-3963: Toleranzen für Stirnradverzahnungen; 1978
- 3 W. Nadeborn; P. Andrä; W. Osten: Modell based identification of system parameters in optical shape measurement. In: W. Jüptner; W. Osten (Eds.): Proc. of Fringe 1993, 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, Akademie Verlag Berlin 1993, S. 214-222

### Die Autoren dieses Beitrags

Dipl.-Ing. Karsten Meeß, geb. 1970, studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover.

Prof. Dr.-Ing. Horst Bodschiwinna, geb. 1943, studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und ist Leiter der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover.