

Sensorintegration zur Feinpositionierung von präzisionsgeschmiedeten Bauteilen

Sensor integration for fine positioning of precision forged components

Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Rüdiger Gillhaus**, Dipl.-Phys. **Markus Kästner**, Dr.-Ing. **Jörg Seewig**, Prof. Dr.-Ing. **Eduard Reithmeier**, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover

Kurzfassung

Die 100%-Kontrolle bei der Herstellung von Bauteilen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Ein wichtiges Prüfmerkmal ist hier die Form- und Lageüberprüfung von Bauteilen vor entscheidenden Bearbeitungsschritten. Aufgrund der im Prozess erforderlichen schnellen Messdatenaufnahme werden zusehends optische Sensoren verwendet, die beispielsweise in Werkzeugmaschinen integriert werden müssen. Am Beispiel zweier präzisionsgeschmiedeter Bauteile wird die Notwendigkeit der Messdatenaufnahme und der Integration der Sensorik vorgestellt.

Abstract

Within the scope of innovative process chains 100% control during the manufacture of components gains in importance. A basic inspection feature is the form and position examination of components before the crucial machining steps. Because of the quick measuring data acquisition during the production process, optical sensors are used, which have to be integrated into machine tools. At the example of two precision-forged components the necessity of the measuring data acquisition and the integration of optical sensors into the machine tool are pointed out.

1. Einleitung und Problemdefinition

An der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover wird innerhalb des Sonderforschungsbereichs 489 (SFB 489) eine „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ aufgebaut. Diese weist gegenüber der konventionellen Prozesskette eine wesentliche Verkürzung der Durchlaufzeit der Bauteile auf, da durch innovative Verfahren Prozessschritte eingespart oder substituiert werden [1].

So wird beispielsweise das herkömmliche Schmieden und die nachfolgende Härtung durch erneute Erwärmung des Bauteils durch das Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung aus der Schmiedewärme ersetzt. Des Weiteren wird die Hartfeinbearbeitung durch eine aufmaßorientierte Feinpositionierung unterstützt, welche das Bauteil vor der Bearbeitung der jeweiligen Funktionselemente translatorisch und rotatorisch ausrichtet.

Die aufmaßorientierte Feinpositionierung ist innerhalb dieser Prozesskette ein bedeutender Prozessschritt, denn aufgrund der simultanen Herstellung aller Funktionselemente besteht für die nachgelagerte Hartfeinbearbeitung kein Primärbezugselement. Des Weiteren weisen alle Bauteilgeometrien, sowohl durch mechanische und thermische Belastungen beim Schmiedeprozess, als auch durch Wärme- und Härteverzüge während der Wärmebehandlung, Maß-, Form- und Lageabweichungen auf [2]. Mit Hilfe der Feinpositionierung ist es möglich, dass durch Nachbearbeitung eines Geometrieelements ein geeigneter Primärbezug für die nachfolgenden Prozessschritte eingebracht werden kann. Als Nebenbedingung dieser Vorgangsweise ist ein hinreichendes, aber minimales Aufmaß an den Funktionsflächen des präzisionsgeschmiedeten Bauteils erforderlich.

Um eine schnelle und hundertprozentige Erfassung aller gefertigten Bauteile umsetzen zu können, greift die aufmaßorientierte Feinpositionierung auf optische Sensoren zurück, die in den Bearbeitungsprozess integriert werden müssen. Die Vorteile der optischen gegenüber der taktilen Messtechnik, wie die höhere Datendichte und der schnellere Messvorgang, können in diesem Fall ausgenutzt werden, da die präzisionsgeschmiedeten Bauteile aufgrund des Fertigungsprozesses optisch kooperative Oberflächen aufweisen [3].

Die Integration der passenden optischen Sensorik in den Prozess wird an zwei Beispielbauteilen des SFB 489, Zahnrad und Ritzelwelle, gezeigt.

2. Der konoskopische Sensor

Bei der Suche nach einer geeigneten Sensorik für das Feinpositioniersystem ist die Wahl auf konoskopische Punktsensoren der Firma Optimet (Optical Metrology Ltd.) gefallen, die gerade hinsichtlich der innerhalb des SFB 489 gewählten Beispielbauteile, Zahnrad und Ritzelwelle, wesentliche Vorteile gegenüber anderen Sensoren aufweisen. Der Aufbau und die Funktionsweise ist in Abbildung 1 gezeigt.

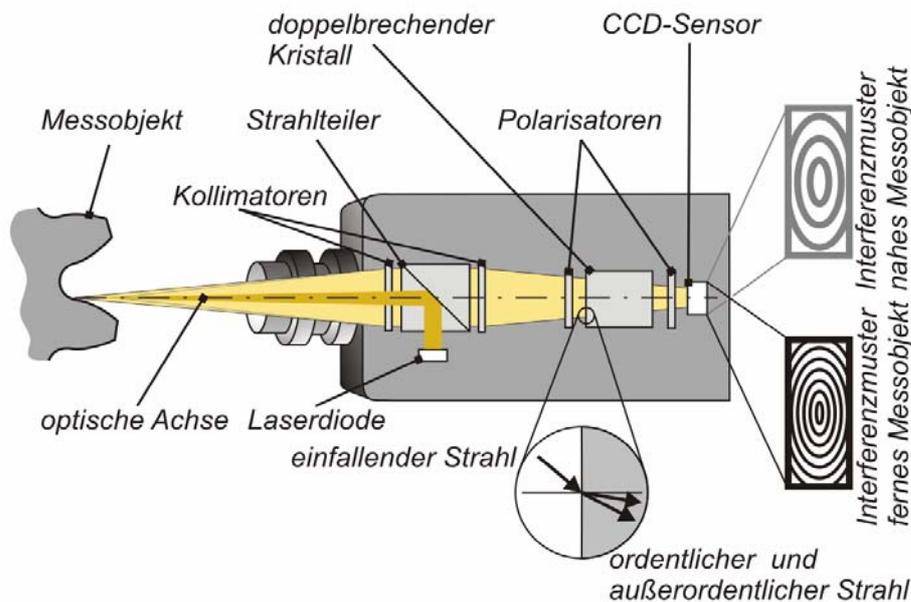


Abbildung 1: Aufbau und Funktionsweise des konoskopischen Punktsensors [4]

Das aus einer Laserdiode emittierte Licht wird mit Hilfe eines Strahlteilers und eines Linsensystems auf die Oberfläche des Messobjektes projiziert. An dieser wird das Licht gestreut und gelangt nach dem Durchgang durch Kollimatoren und einem Polarisator auf einem doppelbrechenden Kristall. Abhängig vom Abstand des Sensors zu dem Messobjekt fällt das Licht in unterschiedlichen Winkelstellungen auf den Kristall. Die einfallenden Strahlen werden dort aufgrund der verschiedenen Brechungsindizes des Kristalls für unterschiedliche Polarisationsrichtungen in einen ordentlichen und außerordentlichen Strahl gebrochen. In Abhängigkeit vom Winkel des einfallenden Lichtes, und somit von der Entfernung des Messobjektes zum Sensor, weisen die beiden Strahlen einen Gangunterschied nach der Doppelbrechung auf. Nach dem Durchlauf durch einen weiteren Polarisator zur Kontrastverbesserung führen die optischen Weglängendifferenzen zu einem ringförmigen Interferenzmuster auf dem CCD-Sensor. Der Abstand der Streifen zueinander ist dabei Träger der Abstandsinformation: Je engmaschiger das ringförmige Interferenzmuster, desto größer, und je weitmaschiger, desto kleiner ist der Abstand zwischen Messobjekt und Sensor. Unter Zuhilfenahme einer Fouriertransformation wird die Frequenz des jeweiligen Interferenzmusters ermittelt. Dieser wird, durch eine von dem Hersteller vorgenommene Weglängenkalibrierung, ein Abstand zwischen Sensor und Messobjekt zugeordnet [5].

Der konoskopische Sensor arbeitet mit einer Frequenz von 850 Hz und kann in einem Temperaturbereich von 18-35°C eingesetzt werden. Durch die Auswahl von geeigneten Linsensystemen kann der Sensor auf die jeweilige Messaufgabe ausgelegt werden. Beispielsweise wird mit einem Linsensystem der Fokusslänge 50 mm eine erweiterte Messunsicherheit von 6 µm und eine Wiederholbarkeit von 1 µm bei einem Messbereich von 8 mm erreicht. Der Arbeitsabstand von 42 mm kann durch eine Extended-Version auf 85 mm erhöht werden. Ein Linsensystem mit einer Fokusslänge von 75 mm weist demgegenüber eine höhere erweiterte Messunsicherheit von 10 µm bei einem größeren Messbereich von 18 mm auf. Eine Auswahl von Linsensystemen mit einigen Kennwerten enthält Tabelle 1.

Tabelle 1: Technische Spezifikationen für verschiedene Linsentypen

Fokusslänge Linse	25 mm	50 mm	50 mm (Extended)	75 mm
Messunsicherheit (k=3)	<3 µm	<6 µm	<6 µm	<10 µm
Wiederholbarkeit	<0,4 µm	<1 µm	<1 µm	<2 µm
Messbereich	1,8 mm	8 mm	8 mm	18 mm
Arbeitsabstand	15 mm	42 mm	85 mm	65 mm

Wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Sensoren ist jedoch der erfassbare Winkelbereich von +/- 85°, der hinsichtlich der Messung von Verzahnungen, wie sie sowohl bei einem Zahnrad, als auch bei einer Ritzelwelle vorliegen, vorteilhaft ist. Weitere Details und technische Spezifikationen zu dem konoskopischen Sensor sind in [6], [7], [8] beschrieben.

3. Integration der Sensorik

Um innerhalb der Prozesskette eine 100%-Prüfung umsetzen zu können, wird die aufmaßorientierte Feinpositionierung in den Bearbeitungsprozess integriert, der für das Einbringen des Primärbezuges erforderlich ist. Hinsichtlich der zwei Beispielbauteile Zahnrad und Ritzelwelle erfordert sowohl die Integration als auch die aufmaßorientierte Feinpositionierung unterschiedliche Lösungsansätze.

Aufmaßorientierte Feinpositionierung

Das in die Prozesskette integrierte Feinpositioniersystem besteht aus einem sensorischen und aktorischen Teil. Mit Hilfe der Sensorik wird die Bauteilgeometrie durch ein oder mehrere Messschnitte erfasst und ausgewertet. Als Resultat ergibt sich ein Korrekturvektor. Dieser

beinhaltet je nach Bedarf die notwendigen Translationen und Rotationen, um die die Lage des Bauteils für das Einbringen eines Primärbezugs geändert werden muss. Der Korrekturvektor wird an den aktorischen Teil des Feinpositioniersystems übermittelt, welcher das Bauteil translatorisch und rotatorisch ausrichtet, wodurch der Primärbezug durch einen Drehprozess hergestellt werden kann. Abbildung 2 zeigt das Vorgehen der aufmaßorientierten Feinpositionierung.

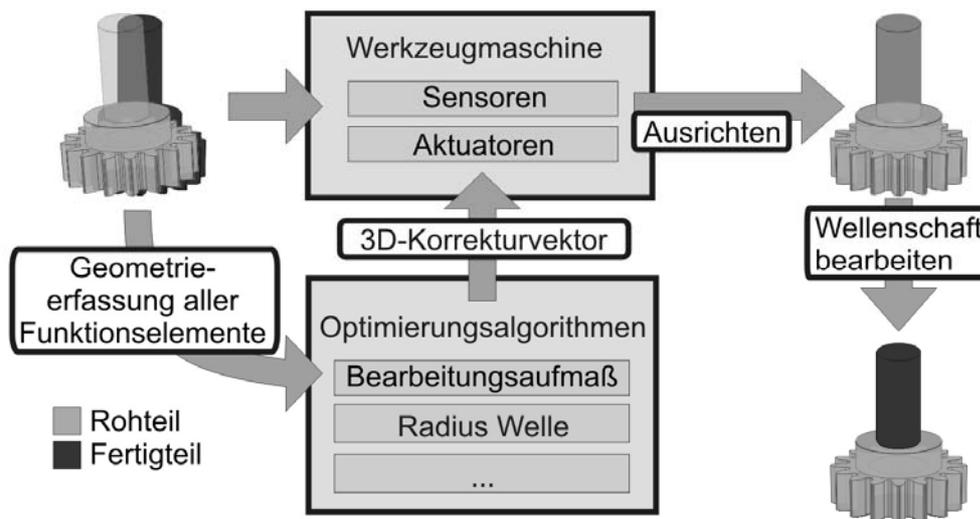


Abbildung 2: Aufmaßorientierte Feinpositionierung

Hinsichtlich des Bauteils Zahnrad reicht aufgrund seiner gedrungenen Bauweise der Ausgleich von Exzentrizitätsfehlern aus, während bei der Ritzelwelle als rotationssymmetrisches Langbauteil der Taumels nicht mehr vernachlässigt werden darf [9]. Somit stellen die beiden Bauteile unterschiedliche Forderungen an die Aktorik sowie die Sensorik und Algorithmik.

Zahnrad

Das im SFB 489 präzisionsgeschmiedete schrägverzahnte Zahnrad dient als Beispielbauteil für gedrungene Hochleistungsbauteile (Abbildung 3).



Abbildung 3: Präzisionsgeschmiedetes Zahnrad des SFB 489

Bei diesen treten aufgrund der simultanen Herstellung der Funktionselemente Bohrung und Verzahnung, Fehlpositionierungen in Form von Exzenter zwischen diesen beiden auf. Ohne Ausgleich des bis zu 80 μm großen Exzenterfehlers durch die aufmaßorientierte Feinpositionierung kann der Hartfeinbearbeitungsschritt des Verzahnungsschleifens nicht korrekt durchgeführt werden und es entstehen unvollständig geschliffene Zahnflanken und Zahnlückengründe, welche die Qualität des Zahnrades erheblich vermindern [4].

Um den Exzenterfehler eines präzisionsgeschmiedeten Zahnrades ermitteln zu können, ist ein Messschnitt über die Verzahnung ausreichend. Abbildung 4 zeigt die Integration der Sensorik in die Werkzeugmaschine, um im Prozess messen zu können.

Aufgrund der in Tabelle 1 ersichtlichen Messfrequenz der Sensorik von 850 Hz ist in die Werkzeugmaschine ein externer Motor integriert, um eine Drehfrequenz der Positioniervorrichtung während des Messvorganges von $100^\circ/\text{s}$ zu gewährleisten. Um den Sensor für die Messung korrekt zu positionieren, sind drei Ausrichtmöglichkeiten (Pfeile in Abbildung 4) gegeben, um den Sensor anhand eines Zylindernormals einmessen zu können. Hierfür ist die Sensorik sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung bewegbar und um die vertikale Achse verkippar. Auf diese Weise kann die optische Achse des Messsystems so ausgerichtet werden, dass die Rotationsachse der Positioniervorrichtung annähernd orthogonal geschnitten wird. Zusätzlich ist der Sensor während des Bearbeitungsvorganges mechanisch gekapselt, um Beschädigungen z. B. durch Späneflug zu vermeiden.

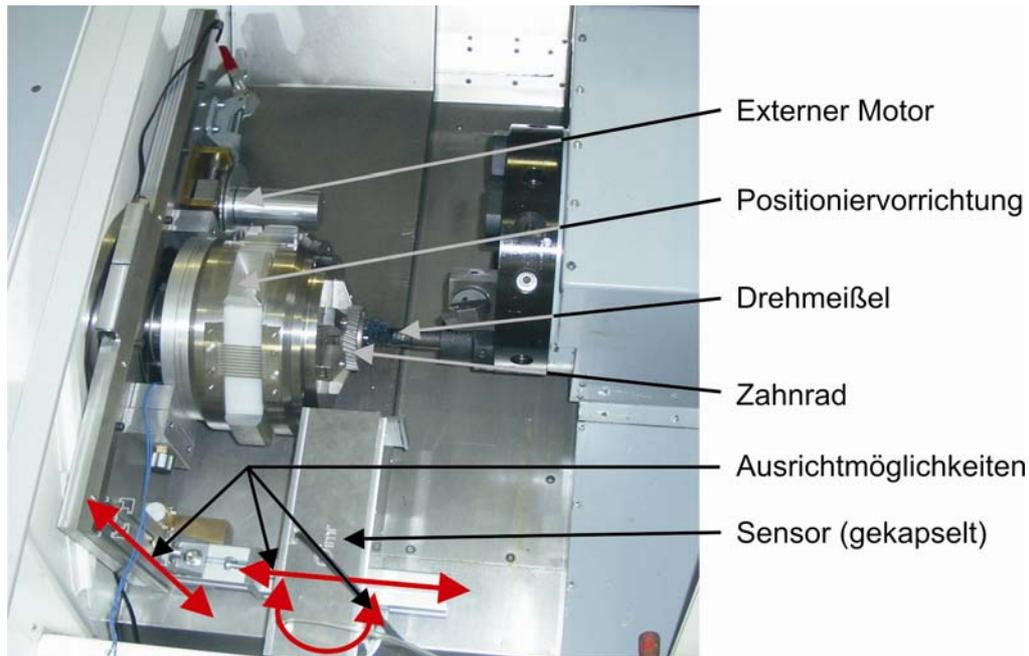


Abbildung 4: Integration der Sensorik in die Werkzeugmaschine (Zahnrad) [4]

Der nach dem Einmessen erfasste Messschnitt des Zahnrades kann nach verschiedenen Einpasskriterien (L_1 -, L_2 - und L_∞ -Einpassung) auf ein 2D-Referenzmodell bezogen werden. Wesentliches Ergebnis der Einpassung ist der 2D-Korrekturvektor, der die erforderliche Verschiebung des Zahnrades in x- und y-Richtung beinhaltet. Dieser wird an die Aktorik in der Positioniervorrichtung weitergegeben und umgesetzt. Somit ist das Zahnrad ausgerichtet und es wird sowohl die Bohrung als auch die Anlagefläche bearbeitet, die für den nachgelagerten Schleifprozess der Verzahnung als Primärbezugselement genutzt werden. Ein endbearbeitetes Zahnrad nach Bearbeitung der Bohrung, der Anlagefläche und der Verzahnung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Ritzelwelle

Die Ritzelwelle dient innerhalb des SFB 489 als Beispielbauteil für rotationssymmetrische Hochleistungs-Langbauteile. Bei diesem treten ähnlich, dem Zahnrad, Fehlpositionierungen zwischen den Funktionselementen Verzahnung und Welle auf, die gleichermaßen die Güte der Bearbeitungsprozesse und somit die Bauteilqualität beeinflussen. Abbildung 5 zeigt eine konventionell gefertigte Ritzelwelle nach den Geometrien der im SFB zu fertigenden Ritzelwellen vor und nach dem Härteprozess.



Abbildung 5: Ritzelwelle (konventionell gefertigt)

Aufgrund der Länge der Ritzelwelle muss, im Gegensatz zum Zahnrad, die zusätzliche Fehlpositionierung durch Taumel beachtet werden. Dieses erfordert gegenüber dem Zahnrad wesentliche Änderungen hinsichtlich Messdatenschnittmenge, Sensorik, Algorithmik und Aktorik.

Für eine sichere Identifizierung eines Taumelfehlers sind pro Funktionselement mindestens zwei Messschnitte erforderlich. Somit muss die Sensorik innerhalb der Werkzeugmaschine verfahrbar sein, um in verschiedenen Positionen der Funktionselemente messen zu können. Hierfür wird eine Präzisionslinearachse der Firma Aerotech integriert.

Die konoskopischen Punktsensoren weisen nur bei Linsensystemen mit geringer Fokusslänge eine ausreichende Genauigkeit auf. Da jedoch der Messbereich nur eines Sensors zu gering ist, um die beiden Funktionselemente Wellenschaft und Verzahnung erfassen zu können, werden zwei Sensoren in die Werkzeugmaschine verwendet. Abbildung 6 zeigt die Integration der Sensorik für Ritzelwellenmessungen mit den wesentlichen Änderungen hinsichtlich der Messdatenerfassung.



Abbildung 6: Integration der Sensorik in die Werkzeugmaschine (Ritzelwelle)

Ersichtlich sind zwei leicht versetzte konoskopische Sensoren, die auf einer Linearachse befestigt sind, um mehrere Messschnitte pro Funktionselement aufnehmen zu können. Diese sind ebenfalls vor Späneflug geschützt und werden vor dem Messvorgang mit Hilfe von drei Ausrichtmöglichkeiten (Pfeile in Abbildung 6) an einem geeigneten Ritzelwellennormal eingemessen.

Für die Auswertung der notwendigen Messschnitte pro Ritzelwelle und der Berücksichtigung von Taumel kann auf die 2D-Zahnradalgorithmik nicht zurückgegriffen werden. Aus diesem Grund ist eine 3D-Algorithmik umgesetzt worden, die sowohl Exzenter als auch Taumel ausgleichen und mehrere Messschnitte verarbeiten kann [9]. Das Ergebnis der Einpassung auf ein hinterlegtes Ritzelwellenreferenzmodell ist ein 3D-Korrekturvektor, der die notwendige Verschiebung und Verkippung der Ritzelwelle vor der Bearbeitung beinhaltet. Dieser Vektor wird an die Aktorik der Positioniervorrichtung übermittelt und die Ritzelwelle wird so ausgerichtet, dass der Wellenschaft nach der Bearbeitung nahezu exzenter- und taumelfrei zur Verzahnung steht. Somit kann der bearbeitete Wellenschaft als Primärbezugselement für das Verzahnungsschleifen genutzt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Umsetzung der Integration von optischer Sensorik in einen Bearbeitungsprozess ist hinsichtlich des Bauteils Zahnrad umgesetzt und bereits verifiziert worden. Die Notwendigkeit des Prozessschrittes aufmaßorientierte Feinpositionierung innerhalb der gesamten Prozesskette ist aufgrund der wesentlich besseren Bearbeitung der Verzahnung nachgewiesen worden. Die Integration der Sensorik hinsichtlich der Ritzelwellenmessung im

Prozess steht kurz vor ihrer ersten Testphase. In einem fertigungsnahen Versuchsaufbau ist die Vorgehensweise jedoch schon erfolgreich getestet worden. Die Ansteuerung aller benötigten Hardwareelemente funktioniert einwandfrei und die Algorithmik ermittelt sowohl an Simulations- als auch Messdaten richtige Korrekturvektoren.

Hinsichtlich des prozessintegrierten Systems müssen noch weitere Schritte erforscht werden, wie beispielsweise das Verhalten der Integration während des Messablaufes, die Messunsicherheitsbetrachtung des Einmessvorganges der Sensoren oder auch das Schwingungsverhalten der Messvorrichtung während einer Messung.

- [1] Kerber, K.; Specker, A.: Geschmiedete Präzision – Der Sonderforschungsbereich 489. phi 1 (2006) S. 14-17
- [2] Behrens, A.; Dähndel, H., Schmidt, I.: Präzisionsschmieden – aktueller Stand und Perspektiven. 9. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt (2006) S. 67-78
- [3] Meeß, K.: Flächenhafte Erfassung optisch kooperativer Stirnräder am Beispiel präzisionsgeschmiedeter Zahnräder. Universität Hannover Diss. 2005
- [4] Haase, R.: Einrichtung zur schnellen Messung optisch kooperativer Zahnräder. Universität Hannover Diss. 2006
- [5] Kästner, M., Gillhaus, R., Seewig, J., Reithmeier, E., Frankowski, G.: Optische Multisensortechnik zur Geometrieerfassung präzisionsgeschmiedeter Bauteile. VDI-Tagung "Optische Messtechnik technischer Oberflächen in der Praxis", 09.-10.10.2007 Hannover, VDI-Berichte 1996, S. 89-100
- [6] NN: OPTIMET - Non-Contact Dimensional Measurement. Standard Version 2. OPTIMET Optical Metrology, 2001
- [7] NN: Conoprobe OEM Manual Version 2.1, Manual Version 2.1c. OPTIMET MANUAL P/N 3J06001. OPTIMET Optical Metrology
- [8] NN: Conoprobe - True 3D Free-Form Absolute Measurement with μm Resolution. OPTIMET Optical Metrology
- [9] Gillhaus, R.: Dreidimensionale Einpassung einer präzisionsgeschmiedeten schrägverzahnten Ritzelwelle. Diplomarbeit. Hannover 2006