

## Vier-Freiheitsgrad Feinpositioniersystem zur Ausrichtung von präzisionsgeschmiedeten Ritzelwellen

Dipl.-Wirtsch.-Ing. **Rüdiger Gillhaus**, Dr.-Ing. Dipl.-Phys. **Markus Kästner**, Prof. Dr.-Ing. **Eduard Reithmeier**, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Hannover;  
Dipl.-Ing. **Jochen Immel**, Prof. Dr.-Ing. **Berend Denkena**, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, Hannover

### 1. Einleitung

Die Fertigung von Schmiedeteilen für die Automobilindustrie ist für den Wirtschaftsstandort Deutschland von großer Bedeutung, was sich in der führenden Position Deutschlands in diesem Sektor in Europa widerspiegelt [1]. Im Sonderforschungsbereich 489 (SFB 489) „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ werden daher neuartige Fertigungsverfahren exemplarisch an dem Bauteil Ritzelwelle für die Kraftfahrzeugindustrie erforscht.

Der konventionelle Herstellungsprozess einer Ritzelwelle besteht aus vielen Fräs- bzw. Drehprozessen. Das Verfahren hat einen hohen Einsatz an Maschinenzeiten und Werkzeugverschleiß zur Folge. Demgegenüber setzt das im SFB 489 erforschte Präzisionsschmieden auf eine direkte endkonturnahe Erzeugung der Bauteilgeometrie ohne Gratbildung [2]. Die Funktionselemente Verzahnung und Wellenschaft entstehen mit einem minimalen Aufmaß simultan im Schmiedeprozess.

Das direkte Einbringen der Rohteilkontur hat jedoch auch Auswirkungen auf nachgelagerte Endbearbeitungsprozesse wie das Wälzschleifen der Verzahnung. Aufgrund von Gesenkverschleiß oder einer ungleichmäßigen Aufspannung der Ritzelwelle für die Einbringung der Initialreferenz treten Fehlpositionierungen durch Exzenter- und Taumelfehler auf.

Wird der Wellenschaft bei nicht korrigiertem Taumel bearbeitet, folgt daraus ein windschiefer Verlauf der Verzahnungsachse und der Achse des Wellenschafts. Bei exzentrischer Aufspannung verlaufen beide Achsen parallel zueinander. Wird die bearbeitete Fläche des Wellenschafts als Referenz (Einspannung) genutzt, resultiert daraus im folgenden Wälzschleifen der Verzahnung ein ungleichmäßiger Werkstoffabtrag. So wird beispielsweise im Falle des Exzenterfehlers auf einer Seite erheblich mehr Material als erforderlich abgetragen, während auf der gegenüberliegenden Seite teilweise noch kein Eingriff der Schleifschnecke erfolgt. Derartige Fehler bewirken unterschiedliche Oberflächenqualitäten,

unterschiedliche Biegewechselfestigkeiten und damit eine mangelhafte Dauerfestigkeit bei Verzahnungen.

Für die Einbringung der Initialreferenz bei präzisionsgeschmiedeten Ritzelwellen ist somit ein Feinpositionierprozess zwingend erforderlich, der die Werkstückachse auf die Drehachse der Werkzeugmaschine hin ausrichtet. Dabei ist sowohl eine translatorische Verschiebung als auch ein rotatorischer Ausgleich notwendig.

## **2. Prozessintegriertes Feinpositioniersystem**

Ausgehend von dieser Problematik ist gemeinsam am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) und am Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR) ein neuartiges Feinpositioniersystem erforscht und prototypisch umgesetzt worden.

Dieses besteht auf der aktorischen Seite aus dem Spannfutter mit vier Freiheitsgraden, welches eine gezielte translatorische Positionierung in x- und y-Richtung und eine gezielte Rotation um die x- und y-Achse des Bauteils durch Piezoaktoren ermöglicht. Ein feststehender Basisring nimmt die Aktorkräfte auf und stützt die größeren elektronischen Bauteile des Spannfutters ab. Die Energieübertragung in das rotierende System erfolgt berührungslos über Induktion. Der verstellbare Basisring übt die erforderlichen Bewegungen aus, damit das in der Klemmvorrichtung gespannte Bauteil positioniert werden kann. Weitere Spezifikationen und Informationen über das neuartige Spannfutter sind in [3, 4] beschrieben. Auf der Seite der Sensorik sind zwei konoskopische Punktsensoren zur Erfassung von linienhaften Profilschnitten in die Werkzeugmaschine integriert. Diese sind auf einer Linearachse befestigt, um die Sensoren in Längsrichtung des zu messenden Bauteils zu verfahren. So können sowohl die Messpositionen auf dem Bauteil frei gewählt werden als auch mehrere Messschnitte an den Funktionselementen Verzahnung und Wellenschaft aufgenommen und ausgewertet werden. Weitere Spezifikationen und Informationen über die eingesetzte Sensorik, deren Integration und Auswertestrategien sind in [3, 5, 6, 7] beschrieben.

Als Schnittstelle zwischen Sensorik und Aktorik dient ein Korrekturvektor, der durch eine Einpassung auf eine Referenzgeometrie errechnet worden ist. Dieser beinhaltet die erforderlichen Translationen in x- und y-Richtung und die Rotationen um die x- und y-Achse um das Bauteil für die Bearbeitung optimal auszurichten.

Vor dem eigentlichen Feinpositionierprozess ist das Feinpositionierspannfutter an Testwerkstücken verifiziert worden. Die Güte der durch den Drehprozess erzeugten Oberfläche wurde mit Hilfe taktile Messtechnik ermittelt. So konnten ein mittlerer arithmetischer Mittenrauhwert  $R_a$  von  $0,3 \mu\text{m}$  und eine mittlere gemittelte Rautiefe  $R_z$  von



2,52  $\mu\text{m}$  bestimmt werden. Sowohl die gemessenen Rundheiten, deren maximale Formabweichung bei 2,5  $\mu\text{m}$  lag, als auch die maximalen Durchmesserabweichungen von 4,3  $\mu\text{m}$  weisen eine gute und ratterfreie Durchführbarkeit von Drehprozessen mit dem Feinpositionierspannfutter nach. Der Positionierprozess des Spannfutters wurde sowohl mit interferometrischen als auch taktilen Messverfahren (Messuhr) im Prozess überprüft.

Die Verifizierung der Algorithmik ist vorab in einem Laboraufbau durchgeführt worden. Durch einen taktilen Messprozess wurde sowohl ein Durchmesser normal als auch Ritzelwellen exzenter- und taumelfrei auf einem Formtester ausgerichtet. Mit Hilfe eines zusätzlichen mechanischen xy- und Kipptischs sind Fehlpositionierungen des Bauteils eingestellt und mit den errechneten Korrekturvektoren verglichen worden. Dabei wurde eine Übereinstimmung bis auf wenige Mikrometer und Winkelsekunden festgestellt.

Vor dem eigentlichen Feinpositionierprozess in der Werkzeugmaschine muss die Sensorik eingemessen werden. Hierfür wird ein Zylindernormal mit unterschiedlichen Durchmessern in der Klemmvorrichtung des Spannfutters befestigt. Durch gezieltes Positionieren in einer Richtung wird der Winkel zwischen Erfassungskoordinaten- und Positionierkoordinatensystem bestimmt und die erforderliche Transformation berechnet. Durch die nachfolgende Nutzung der Einpassalgorithmik wird das Normal exzenter- und taumelfrei zur Sensorik hin ausgerichtet.

Anhand von am Spannfutter eingestellten translatorischen und rotatorischen Positionierungen wurde das Zusammenspiel zwischen dem errechneten Korrekturvektor der Sensorik und der Positioniervorgänge der Aktorik untersucht. Hier wurde eine mikrometeregenaue Übereinstimmung in der Translation und Abweichungen von wenigen Winkelsekunden bei einer rotatorischen Ausrichtung festgestellt.

### **3. Ergebnisse der Feinpositionierung**

Nachdem die einzelnen Komponenten des Feinpositioniersystems sowohl getrennt als auch zusammen getestet worden sind, kann die Feinpositionierung von präzisionsgeschmiedeten Ritzelwellen durchgeführt werden. Exemplarisch wird der Ablauf an einer Ritzelwelle gezeigt. Die Ritzelwelle wird in dem Feinpositionierspannfutter gespannt und in Rotation versetzt. Die konoskopischen Sensoren nehmen jeweils einen linienhaften Profilschnitt von der Verzahnung und von dem Wellenschaft auf. Nach der Vorverarbeitung der Messdaten werden diese auf eine im Rechner hinterlegte Referenzgeometrie eingepasst. Ziel ist es, die Ritzelwelle für die Bearbeitung so auszurichten, dass das Aufmaß sowohl an allen Zahnflanken als auch auf dem Umfang des Wellenschafts äquidistant verteilt ist.

Um zu der besseren Aufmaßverteilung zu gelangen ist die in Tabelle 1 enthaltene Ausrichtung durch das Feinpositionierspannfutter erforderlich:

Tabelle 1: Korrekturvektor der ersten Einpassung

Ritzelwelle 108	x	y
Rotation	-84''	-24''
Translation	5 $\mu\text{m}$	69 $\mu\text{m}$

Dieser Korrekturvektor wird mit Hilfe der Piezoaktorik vom Feinpositionierspannfutter umgesetzt. Vor der eigentlichen Bearbeitung wird die Position nochmals durch eine Messung und Auswertung überprüft. Tabelle 2 zeigt den neu errechneten Korrekturvektor:

Tabelle 2: Korrekturvektor nach dem ersten Feinpositionierprozess

Ritzelwelle 108	x	y
Rotation	-1''	-5''
Translation	1 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$

Nach der Feinpositionierung wird der Wellenschaft der Ritzelwelle in der Werkzeugmaschine bearbeitet. In nachfolgenden Messungen sind, wie bei dem Testwerkstück, sowohl sehr gute Oberflächenqualitäten als auch sehr geringe Formabweichungen der bearbeiteten Funktionsflächen festgestellt worden.

In dem nachfolgenden Prozess des Wälzschleifens der Verzahnung wird der bearbeitete Schaft als Primärbezugselement genutzt, der durch die Feinpositionierung die optimale Lage zu der Verzahnung aufweist.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ ist ein neuartiges Feinpositioniersystem entwickelt worden. Das Feinpositioniersystem besteht aus einem adaptronischen Spannfutter, welches das Bauteil durch Piezoaktorik in vier Freiheitsgraden ausrichten kann, und einem prozessintegrierten Messsystem, das die Ritzelwelle messtechnisch erfasst und durch Einpassalgorithmen die optimale Position der Bearbeitung ermittelt. Die errechneten Positionskorrekturen werden mittels Korrekturvektor an das Spannfutter übermittelt und dort umgesetzt. Auf diese Weise wird das Bauteil in optimaler Lage bearbeitet. Der Feinpositionierprozess wurde am Beispiel einer Ritzelwelle gezeigt.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Teilprojekts A5 innerhalb des Sonderforschungsbereichs 489.

(Langfassung auf CD: Bilder und zusätzliche Erklärungen, Literaturangaben)