

Präzisionsschmieden

Fertigungsintegrierte Messeinrichtung zur Lageerfassung präzisionsgeschmiedeter Ritzelwellen

B.-A. Behrens¹, D. Odening¹, R. Gillhaus², M. Kästner², E. Reithmeier²

¹ Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover

² Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover

Die gratfreie hochpräzise Warmmassivumformung, das Präzisionsschmieden, erlaubt die Fertigung von endkonturnahen, nahezu einbaufertigen Schmiedebauteilen. Nach dem Umformprozess ist oftmals nur noch eine abschließende Hartfeinbearbeitung definierter Funktionsflächen mit minimalen Spanvolumina erforderlich. Die hohen Ansprüche an Maß-, Form- und Lagegenauigkeit beim Präzisionsschmieden stellen erhöhte Anforderungen an die Gestaltung und die Führung des Umformprozesses. Um trotz minimal vorgehaltener Schleifaufmaße einen fertigungsgerechten und vollständigen Materialabtrag innerhalb der abschließenden Hartfeinbearbeitung gewährleisten zu können, sind die Schmiedebauteile vor der weiteren Bearbeitung messtechnisch zu erfassen und aufmaßorientiert auszurichten.

Einleitung

Das Präzisionsschmieden ist ein umformtechnisches Fertigungsverfahren zur endkonturnahen und gratfreien Fertigung hochbelastbarer Bauteile. Im Vergleich zu konventionell umformenden und spanenden Fertigungsverfahren ist durch den Einsatz des Präzisionsschmiedens eine Verkürzung der Prozesskette sowie eine Verbesserung der Material- und Energieeffizienz zu erreichen. Am Beispiel von Zahnradgeometrien haben Kostenvergleichsanalysen einer konventionell spanenden Herstellung und einer umformtechnischen Herstellung Einsparpotentiale von bis zu 50 % bei der Rohteilmasse und eine um 1/6 kürzere Bearbeitungszeit ergeben, wodurch die Fertigungskosten um ca. 30 % gesenkt werden konnten [1]. Die Steigerung der Präzision von Umformteilen in Bezug auf Maßhaltigkeit sowie der Form- und Lagetoleranzen hat zur Folge, dass immer mehr Funktionselemente oder komplette Werkstücke ohne oder mit nur geringer Nachbearbeitung einbaufertig hergestellt werden können. Das Fertigungsverfahren Präzisionsschmieden steht damit vielfach in Konkurrenz zu gesamten Fertigungsfolgen und nicht mehr nur zu einzelnen Fertigungsprozessen [2].

Zur grundlegenden Entwicklung und Qualifikation neuer technologischer und logistischer Verfahren zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen innerhalb der Prozesskette Präzisionsschmieden wurde im Jahr 2000 der Sonderforschungsbereich 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ (SFB 489) mit Beteiligung von sechs Forschungseinrichtungen der Leibniz Universität Hannover initiiert.

Im Mittelpunkt der Forschungsaktivität steht eine Verkürzung der Prozesskette, die unter anderem auf der Substitution der spanenden Weichbearbeitung sowie der Integration der Wärmebehandlung direkt aus der Schmiedewärme beruht (**Abbildung 1**).

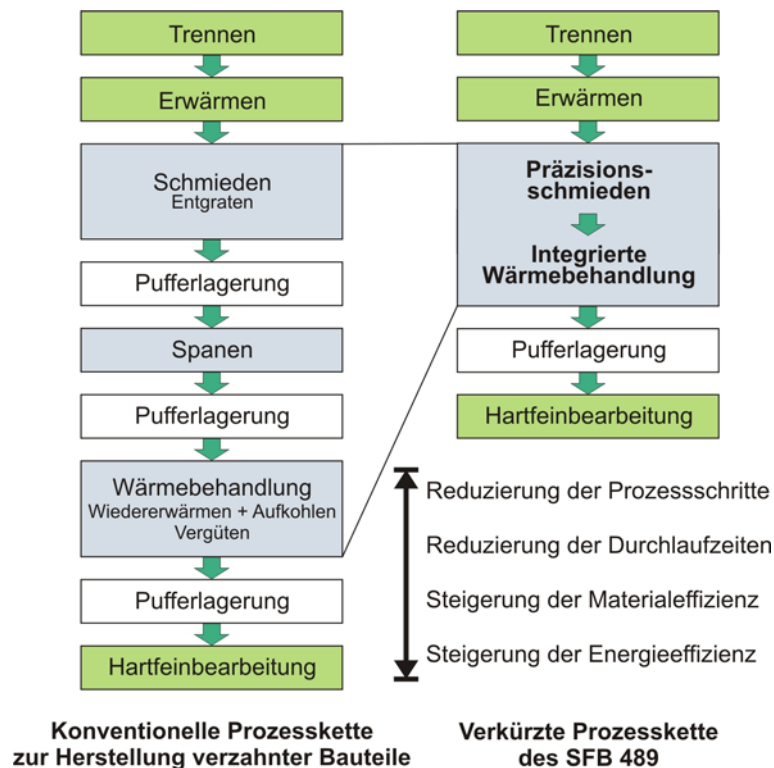


Abbildung 1: Verkürzung der Prozesskette zur Herstellung verzahnter Bauteile

Die betrachtete Prozesskette des SFB 489 umfasst alle Fertigungsschritte von der Bereitstellung und Erwärmung des Rohteils bis zum geschmiedeten und abschließend hartfein nachbearbeiteten Bauteil. Es wird eine umfassende technologische und logistische Betrachtung der Prozesskette angestrebt, um die umfangreichen Wechselwirkungen der einzelnen Teilprozesse vollständig zu erfassen und Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Im Rahmen dieses Artikels wird eine Auswahl aktueller Forschungsergebnisse aus den Teilprojekten B1 „Prozessauslegung für das Präzisionsschmieden“ und A5 „Aufmaßorientierte Feinpositionierung“ vorgestellt.

Prozessauslegung für das Präzisionsschmieden (B1)

Ziel des Teilprojekts B1 „Prozessauslegung für das Präzisionsschmieden“ ist die Entwicklung und Erprobung geeigneter Maßnahmen zur sicheren Prozessauslegung und -führung für das kostenlose Präzisionsschmieden von Hochleistungsbauteilen am Beispiel verzahnter Schmiedebauteile. Auf Grundlage der bisher geschmiedeten gerad- und schrägverzahnten Zahnräder wurde das Bauteilspektrum auf Langteile mit axial ausgeprägter Massenverteilung am Beispiel einer schrägverzahnten Ritzelwelle erweitert. In **Abbildung 2** ist das aktuelle Demonstratorbauteil des Teilprojekts B1 dargestellt.



Kenngößen	
Bauteilmasse	~ 1,5 kg
Werkstoff	42CrMo4
Halbzeug	Vollhalbzeug
Umformstufen	2

Verzahnungsdaten	
Modul (m_n)	2
Zähnezahl (z)	30
Schrägungswinkel (β)	20°
Profilverschiebungsfaktor (x)	0
Eingriffswinkel (α)	20°
Teilkreisdurchmesser (d)	63,85 mm
Kopfkreisdurchmesser (d_k)	67,85 mm
Fußkreisdurchmesser (d_f)	58,85 mm
Grundkreisdurchmesser (d_b)	59,54 mm
Schleifaufmaß (Δs)	150 μ m

Abbildung 2: Präzisionsgeschmiedete Ritzelwelle des SFB 489

Die Formgebung der Ritzelwelle erfolgt in zwei aufeinander folgenden Umformoperationen (**Abbildung 3**). Ausgehend von einem zylindrischen Rohteil wird in einer ersten Vorformoperation die Massenverteilung der Ritzelwellengeometrie durch ein Vorwärts-Fließpressen eingestellt. Der Schaftbereich sowie der Wellenabsatz werden hierbei bereits nahezu vollständig ausgeformt. Die Gestaltung des Übergangs zwischen Wellenabsatz und -schaft sowie die Ausformung der Verzahnung erfolgen in einem zweiten Umformprozess durch Stauchen bzw. Formpressen.

Die schmidgerechte Auslegung und Gestaltung der einzelnen Umformstufen erfolgte invers. Hierzu wurden ausgehend von der vorgegebenen Bauteilgeometrie die optimalen Zwischenform- und Rohteilgeometrien entwickelt und durch FE-Simulationen erprobt. Die Simulationsergebnisse dienen neben der Darstellung und Beurteilung des eingestellten Materialflusses auch zur Abschätzung der aufzubringenden Umform- und Schließkräfte sowie der resultierenden Gesenkbelastungen. Des Weiteren wurde das Auskühlverhalten der warm umgeformten Schmiedebauteile simuliert. Die auf 1200 °C erwärmten Rohteile kühlen bereits während des Umformprozesses prozess- und geometriebedingt ungleichmäßig aus. Die resultierende Temperaturverteilung im Bauteil hat einen wesentlichen Einfluss auf das Umform- und Schrumpfungsverhalten der Schmiedebauteile und muss bei Auslegung der formgebenden Werkzeuggeometrie berücksichtigt werden [3]. Bei mehrstufigen Umformprozessen sind zusätzliche Temperaturverluste während der Transport- und Liegephasen zu berücksichtigen. Die Bewertung der entwickelten Stadienfolge erfolgte auf Grundlage der gewonnenen Simulationsergebnisse hinsichtlich des eingestellten Materialflusses und der erreichten Formfüllung. Mögliche Schmiedefehler, wie Faltenbildung durch Materialüberlappung oder Schädigungen des Werkstoffzusammenhalts durch Störungen im Materialfluss, konnten somit bereits während der Entwicklungsphase identifiziert und durch Umgestaltung einzelner Umformoperationen behoben werden.

Die technische Funktion des Bauteils Ritzelwelle hängt entscheidend von der genauen Lage und Ausrichtung der Funktionsflächen „Verzahnung“ und „Lagersitz“ ab. Im Rahmen der Prozess- und Werkzeuggestaltung waren daher Methoden zu entwickeln, die eine sehr genaue Fluchtung und einen möglichst geringen Taumelfehler der beiden Funktionsflächen „Verzahnung“ und „Lagersitz“ zueinander sicherstellen. Durch einen kompakten Werkzeugaufbau und die Anordnung der gesamten Ritzelwellenkontur in einer Gesenkhälfte

konnte die Anzahl zueinander beweglicher und geführter Werkzeugkomponenten auf ein Minimum reduziert werden. Die vorgegebenen Form- und Lagetoleranzen der Funktionsflächen „Verzahnung“ und „Lagersitz“ werden durch starre, eng tolerierte Führungsflächen der formgebenden Werkzeugelemente sichergestellt. Die Trennebene zwischen Ober- und Unterwerkzeug liegt im Bereich der Stirnfläche der Ritzelwelle. Die Zentrierung und Führung des einfahrenden Oberwerkzeugs wird über eine Gleitbuchse oberhalb der Verzahnungsmatrize im Unterwerkzeug erreicht. In **Abbildung 3** sind die wesentlichen Werkzeugkomponenten der Vor- und Fertigschmiedestufe sowie die entsprechende Stadienfolge abgebildet. Der Teiletransfer zwischen den Umformstufen erfolgt manuell.

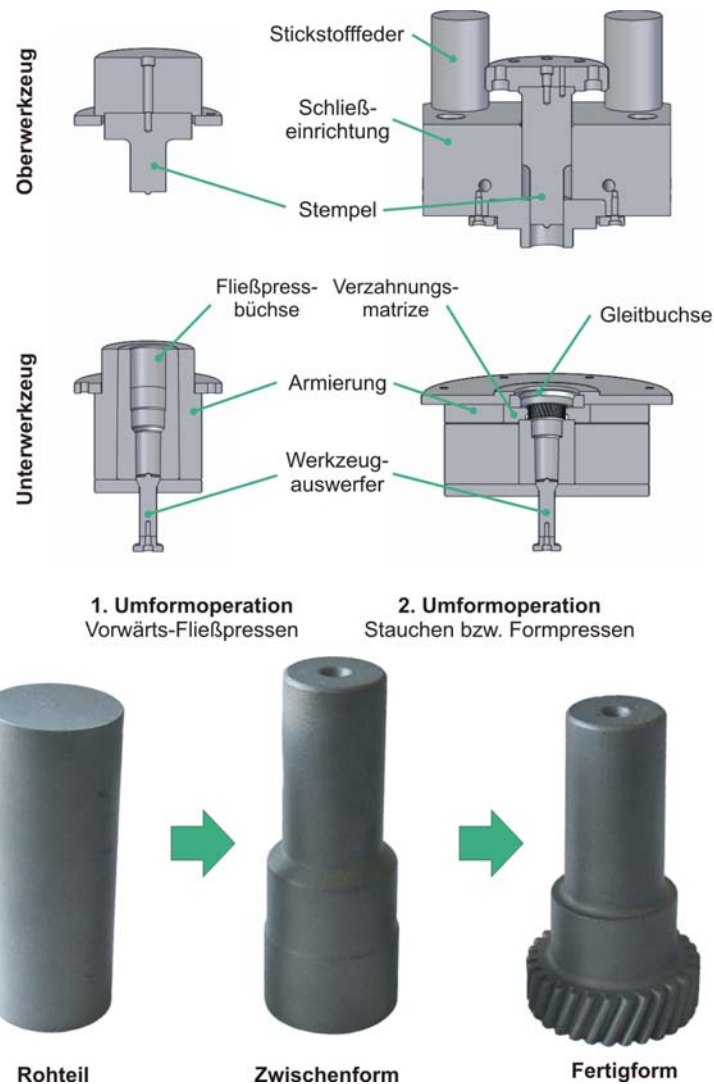


Abbildung 3: Zweistufiger Präzisionsschmiedeprozess (Werkzeug / Stadienfolge)

Durch die Verfahrenskombination Fließpressen und Stauchen bzw. Formpressen wird eine angepasste Massenvorverteilung und Ausformung der Bauteilgeometrie erzielt. Der Bereich der Schrägverzahnung erreicht eine nahezu vollständige Formfüllung. Für die abschließende Hartfeinbearbeitung der Funktionsflächen durch Schleifen wird beim Präzisionsschmieden der Ritzelwellenverzahnung ein Bearbeitungsaufmaß von $150\ \mu\text{m}$ im Bereich der Zahnflanken und des Zahngrundes vorgehalten. Um eine Minderung der Bauteilfestigkeit und

Zahnfußtragfähigkeit durch oberflächige Mikrorisse zu vermeiden, ist ein vollflächiges Schleifaufmaß durch den Schmiedeprozess sicherzustellen.

Nach einer integrierten Wärmebehandlung der geschmiedeten Bauteile aus der Schmiedewärme erfolgt für die abschließende Hartfeinbearbeitung des Lagersitzes sowie der Zahnflanken die optische Erfassung und aufmaßorientierte Feinpositionierung der Bauteile durch das Teilprojekt A5.

Aufmaßorientierte Feinpositionierung (A5)

Das Teilprojekt A5 „Aufmaßorientierte Feinpositionierung“ nimmt eine zentrale Stellung als Schnittstelle zwischen dem Präzisionsschmiedeprozess von Ritzelwellen und deren abschließender Hartfeinbearbeitung ein. Es verfolgt das Ziel, die präzisionsgeschmiedeten Bauteile mit minimalem Aufmaß fertigungsgerecht spannen, messen, positionieren und innerhalb enger Toleranzen bearbeiten zu können. Auftretenden Form-, Maß- und Lageabweichungen, wie sie bei Schmiedeteilen durch Gesenkverschleiß oder den Härteprozess entstehen, wird nicht, wie konventionell üblich, durch eine Erhöhung des Aufmaßes, sondern durch eine optimale Ausrichtung des Bauteils vor dessen Bearbeitung begegnet. **Abbildung 4** zeigt die Fehler, die aufgrund der Abweichungen auftreten können.

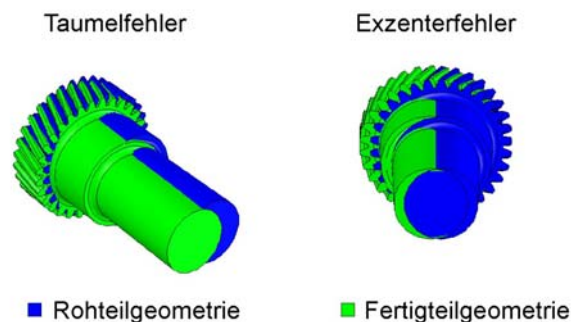


Abbildung 4: Exzenter- und Taumelfehler einer Ritzelwelle (stark überhöht dargestellt)

Bei nicht korrigiertem Taumelfehler wird der Wellenschaft, der spätere Lagersitz, so bearbeitet, dass ein windschiefer Verlauf der Verzahnungsachse zu der Wellenschaftachse auftritt. Bei vorhandenem Exzenterfehler verlaufen beide Achsen parallel zueinander. Beide auftretenden Fehler beeinflussen wesentlich die Qualität der Ritzelwelle, da der bearbeitete Wellenschaft als Primärbezugselement für das folgende Verzahnungsschleifen eingesetzt wird. Eine Nichtübereinstimmung der beiden Achsen führt zu einem ungleichmäßigen Werkstoffabtrag an der Verzahnung.

Innerhalb des Teilprojekts „Aufmaßorientierte Feinpositionierung“ können entstandene Maß-, Form- und Lageabweichungen detektiert und das Bauteil vor der Bearbeitung ausgerichtet werden, so dass das Aufmaß möglichst äquidistant auf den Funktionselementen verteilt ist. Nach Ausrichtung des Bauteils kann in einem ersten Schritt der Wellenschaft bearbeitet werden, so dass durch die vorherige Ausrichtung die noch zu bearbeitende Verzahnung optimal zu dem Wellenschaft liegt und dieser als Bezugselement für das abschließende Verzahnungsschleifen genutzt werden kann.

Um Fehlpositionierungen detektieren und das vorhandene Aufmaß optimal über die präzisionsgeschmiedete Ritzelwelle verteilen zu können, werden beide Funktionselemente mit mindestens einem linienhaften Profilschnitt innerhalb einer Drehmaschine erfasst. Die fertigungsintegrierte Messeinrichtung ist in **Abbildung 5** ersichtlich.

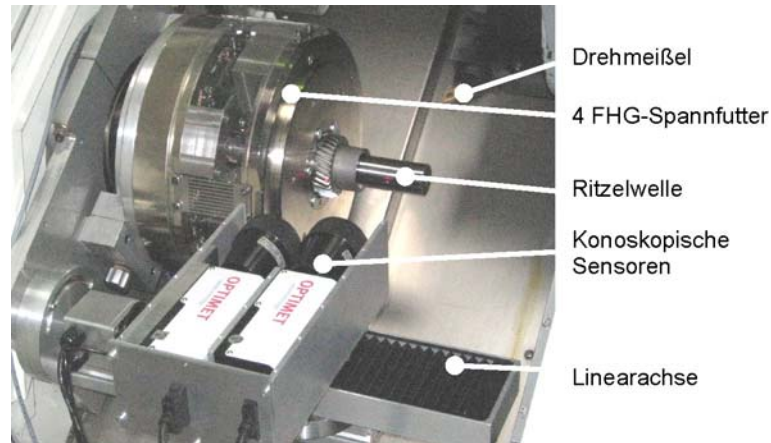


Abbildung 5: Fertigungsintegrierte Messeinrichtung

Wie in Abbildung 5 gezeigt, werden für die Messdatenaufnahme zwei konoskopische Sensoren der Firma Optimet Ltd. genutzt. Die auf dem Prinzip der holografischen Interferometrie basierenden Punktsensoren eignen sich hervorragend zur Erfassung von Verzahnungen, da sie bis zu einem Winkel von $\pm 85^\circ$ zur Oberflächennormalen des Messobjekts Daten erfassen können. Mit Hilfe des unteren Sensors werden Profilschnitte der Verzahnung aufgenommen, während mit dem oberen Sensor der Wellenschaft gemessen wird. Weitere Spezifikationen der Sensorik können [4] und [5] entnommen werden. Um mit den Sensoren an unterschiedlichen Stellen des Bauteils messen zu können, ist eine hochpräzise Linearachse in die Werkzeugmaschine integriert worden. Mit dieser kann die notwendige Bewegung in Längsrichtung der zu messenden Ritzelwelle durchgeführt und eine „Parkposition“, die möglichst weit von der Bearbeitung der Ritzelwelle entfernt liegt, angefahren werden. Die integrierte Linearachse verfügt über einen Verfahrweg von 150 mm mit einer Auflösung von $0,1 \mu\text{m}$ und einer Genauigkeit von $0,75 \mu\text{m}$. Mit Hilfe von zwei Ausrichtmöglichkeiten kann die Sensorik orthogonal zur Drehachse ausgerichtet und mit einem geeigneten Ritzelwellennormal eingemessen werden.

Bei den optischen Sensoren kommen so genannte „Extended“-Linsen zum Einsatz. Diese weisen gegenüber den normalen Linsensystemen einen wesentlich größeren Arbeitsabstand auf. Dieser ist hinsichtlich der Einspannung des Bauteils in der Feinpositioniervorrichtung notwendig, um eine Kollision von Sensorik und 4-FHG-Spannfutter, welches in [6], [7] und [8] ausführlich beschrieben ist, zu vermeiden. Aufgrund des Durchmessers des Spannfutters, des Kopfkreisdurchmessers der Verzahnung und des Durchmessers des Wellenschafts werden die Extended-Linsensysteme mit einer Fokusslänge von 75 mm gewählt, da diese über den erforderlichen Arbeitsabstand von etwa 130 mm bei einem Messbereich von 17,5 mm verfügen. Zusätzlich sind die beiden Sensoren zueinander versetzt, um im optimalen Messbereich der Sensoren arbeiten zu können. So können mit diesem Linsensystem Genauigkeiten von unter $10 \mu\text{m}$ erreicht werden.

Die Sensorik ist innerhalb der Werkzeugmaschine vor Späneflug, der während der Bearbeitung des Wellenschafts auftritt, durch eine aus Aluminium gefertigte Schutzumhausung geschützt.

Für die erforderlichen Korrekturbewegungen zur Ausrichtung der Ritzelwelle wird ein Korrekturvektor errechnet. Dieser beinhaltet die notwendigen Translationen in x- und y-Richtung und die Rotationen um die x- und y-Achse. Hierfür werden die Abstandsdaten der optischen Sensoren mit den Drehwinkeldaten des Drehwinkelencoders der Werkzeugmaschine synchronisiert und mit Hilfe der Position der Linearachse zu einem dreidimensionalen Datensatz fusioniert. Für die Auswertung der Profilschnitte der Funktionselemente präzisionsgeschmiedeter Ritzelwellen sind unterschiedliche Auswertelgorithmen (L_1 -, L_2 -, L_∞ -Norm) implementiert worden, um die Messdaten dreidimensional auf eine hinterlegte Referenzgeometrie einzupassen, damit die Ritzelwelle optimal für die Bearbeitung ausgerichtet ist. Hierfür werden die Messdaten vorerst gefiltert, maskiert und eingepasst, so dass das vorhandene Aufmaß an den Funktionselementen Verzahnung und Wellenschaft optimal verteilt ist [9]. So stellt die Feinpositionierung durch Bearbeitung des Wellenschafts eine optimale Aufmaßverteilung für eine Feinbearbeitung der Verzahnung in einem Wälzschleifprozess sicher, da der bearbeitete Wellenschaft als Referenz- bzw. Einspannfläche dient. In **Abbildung 6** ist beispielhaft die Verteilung des Aufmaßes vor und nach der Feinpositionierung an der Verzahnung und des Wellenschafts der Ritzelwelle 91 ersichtlich.

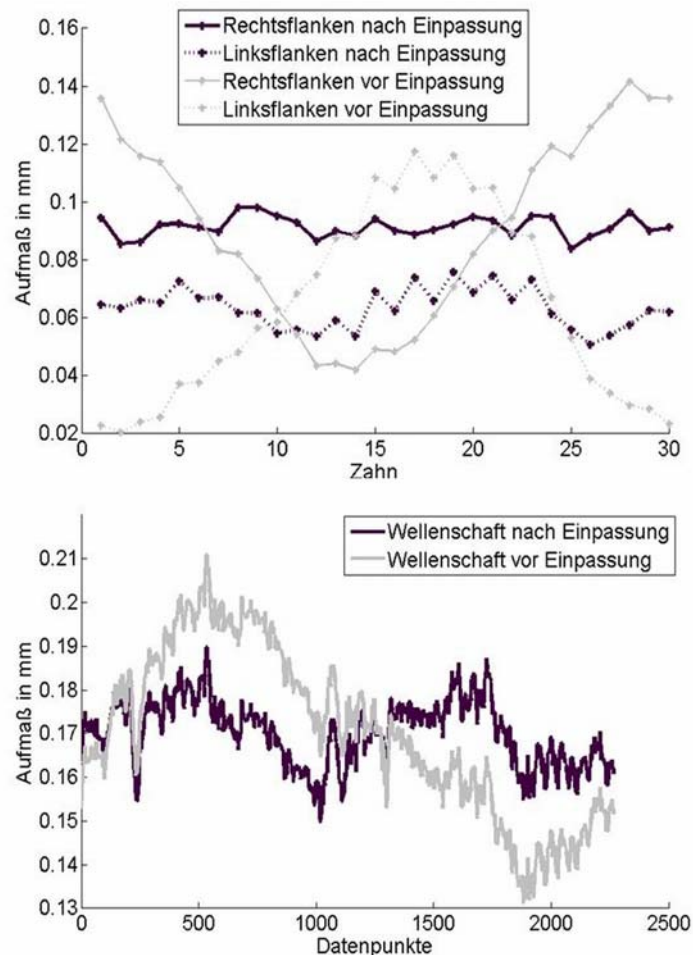


Abbildung 6: Aufmaßverteilung vor und nach der Einpassung (Verzahnung / Wellenschaft)

Das an beiden Funktionselementen vorgehaltene Aufmaß ist nach der Einpassung wesentlich gleichmäßiger verteilt als vor der Einpassung. Für die Ausrichtung der Ritzelwelle war in diesem Beispiel der in Tabelle 1 enthaltene Korrekturvektor erforderlich.

Tabelle 1: Erforderliche Korrekturen vor der Bearbeitung

Ritzelwelle 91	x	y	z
Rotation	-31''	72''	(6073'')
Translation	-41 µm	-30 µm	(0 µm)

Durch die Umsetzung des oben errechneten Korrekturvektors, ist das Bauteil optimal für die Bearbeitung der Funktionselemente positioniert. Der in dem Drehprozess bearbeitete Wellenschaft kann nachfolgend für das Verzahnungsschleifen als Referenz genutzt werden. In **Abbildung 7** sind Ritzelwellen in den drei entscheidenden Bearbeitungsstadien dargestellt, welches als Endergebnis eine fertig bearbeitete präzisionsgeschmiedete Ritzelwelle zeigt.

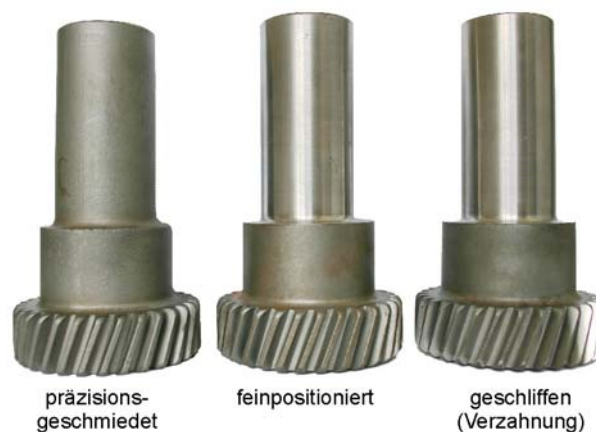


Abbildung 7: Präzisionsgeschmiedete Ritzelwellen in verschiedenen Bearbeitungsstadien

Zusammenfassung

Geschmiedete und wärmebehandelte Bauteile können durch auftretenden Gesenkverschleiß und durch Härteverzüge Schwankungen in der Maßhaltigkeit der Bauteile aufweisen. Bei einer weitgehenden Reduzierung des vorgehaltenen Schleifaufmaßes führen bereits geringfügige Fehlpositionierungen zu einem ungleichmäßigen und unvollständigen Materialabtrag innerhalb der abschließenden Hartfeinbearbeitung. Eine Minderung der Oberflächengüte sowie eine Schwächung der Bauteilbelastbarkeit durch verbleibende oberflächige Mikrorisse sind die Folge. Im Rahmen des SFB 489 ist am Beispiel einer Ritzelwellengeometrie ein zweistufiger Präzisionsschmiedeprozess umgesetzt worden, der eine endkonturnahe und gratfreie Fertigung mit geringen Maß-, Form- und Lageabweichungen ermöglicht. Um trotz der prozessbedingt nicht gänzlich vermeidbaren Schwankungen der Maßhaltigkeit geschmiedeter Bauteile einen gleichmäßigen und vollständigen Materialabtrag innerhalb der abschließenden Hartfeinbearbeitung zu erreichen, ist eine fertigungsintegrierte Mess- und Positioniereinrichtung entwickelt worden. Mit dieser

werden in kürzester Zeit die Funktionsflächen „Verzahnung“ und „Wellenschaft“ der präzisionsgeschmiedeten Ritzelwellen profillinienhaft erfasst. Ausgehend von diesen Messdaten erfolgt die Ermittlung der optimalen Bauteilposition zur weiteren Bearbeitung. Durch Einbindung dieser optischen Bauteilmessung und aufmaßorientierten Feinpositionierung der geschmiedeten Bauteile zur Fertigbearbeitung ist es gelungen, geringfügige Schwankungen in der Schmiedequalität aktiv auszugleichen und so das erforderliche Schleifaufmaß auf ein Minimum zu reduzieren. Die präzisionsgeschmiedeten Bauteile können somit nahezu einbaufertig hergestellt werden. Aktuell konnte bei der vorliegenden Ritzelwellengeometrie ein Schleifaufmaß im Bereich der Zahnflanken von 150 µm realisiert werden.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und promovierte am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Universität Hannover. Seit 2004 ist er Direktor des IFUM.

Dipl.-Ing. Dirk Odening studierte Maschinenbau an der Universität Hannover. Seit 2006 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFUM in der Abteilung Massivumformung.

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Rüdiger Gillhaus studierte Wirtschaftsingenieur an der Universität Hannover. Seit 2006 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR) in der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik.

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Markus Kästner studierte Physik an der Universität Hannover und promovierte am IMR der Leibniz Universität Hannover. Seit 2008 ist er Arbeitsgruppenleiter der Fertigungsmess- und Prüftechnik am IMR.

Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier studierte Maschinenbau und Mathematik an der Technischen Universität München und promovierte am Lehrstuhl Mechanik B der Technischen Universität München. Seit 1996 ist er Institutsleiter des IMR.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“.

Literatur

- [1] Jütte, F., et. al.: Fließpressen von Verzahnungen mit hoher Genauigkeit ist eine Alternative zum Spanen, Maschinenmarkt 105, Heft 29, 1999
- [2] Klocke, F.; König W.: Fertigungsverfahren 4 - Umformen, 5. neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, 2006
- [3] Behrens, B.-A.; Odening, D.: Process and Tool Design for Precision Forging of Geared Components. The 12th International ESAFORM Conference on Material Forming, University of Twente, The Netherlands, April 27-29, 2009
- [4] NN: Conoprobe - True 3D Free-Form Absolute Measurement with μm Resolution. OPTIMET Optical Metrology, 2001
- [5] NN: Conoprobe OEM Manual Version 2.1, Manual Version 2.1c. OPTIMET MANUAL P/N 3J06001. OPTIMET Optical Metrology, 2001
- [6] Gillhaus, R.; Immel, J.; Kästner, M.; Reithmeier, E.; Denkena, B.: Vier-Freiheitsgrad Feinpositioniersystem zur Ausrichtung von präzisionsgeschmiedeten Bauteilen, VDI-Tagung "Automation 2009", 16-17.06.2009, Baden-Baden, VDI Berichte 2067, S. 335-338, 2009
- [7] Denkena, B., Immel, J., Gillhaus, R., Seewig, J., Reithmeier, E.: In-Process Measurement and Positioning of Precision-forged Gear Shafts in 4 DOF, 10th anniversary international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology (euspen), May 18th - May 22nd 2008, Zürich, Switzerland, Volume II, S. 240-244, 2008.
- [8] Denkena, B., Immel, J.: Feinpositionierspannfutter mit vier Freiheitsgraden. Anforderungen, Konstruktion und Optimierung, wt Werkstattstechnik online, 97 H. 11/12, S. 890-894, 2007.
- [9] Gillhaus, R.; Kästner, M.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: 3D-Data Acquisition, Processing and Analysis of Gear Shaft Measurements Using Optical Sensors, Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biela, Poland, pp.270-278, 2008