

Automobilindustrie, Schmieden, Werkzeugmaschinen

Kürzere Prozessketten durch Feinpositioniersysteme *

Ein innovativer Lösungsansatz zur Substitution des Auswuchtens von Kurbelwellen

R. Haase, M. Kästner, J. Immel, J. Seewig, E. Reithmeier, B. Denkena

Im Rahmen der Entwicklung kürzerer Prozessketten gewinnt das Präzisionsschmieden zunehmend an Bedeutung. Schmiedetechnologisch bedingt treten aber Form- und Lageabweichungen sowie ungleichmäßige Masseverteilungen auf. Diesen Fehlern wird mit einer innovativen Feinpositionierung vor der Endbearbeitung begegnet. Am Beispiel präzisionsgeschmiedeter Kurbelwellen wird ein Lösungsansatz zur Feinpositionierung vorgestellt und dessen Potential zur Verkürzung der Prozesskette aufgezeigt.

Shorter process chains by means of fine-positioning systems – An innovative approach to the substitution of balancing crankshafts

Precision forging is becoming increasingly interesting in the context of developing shorter process chains. Due to the forging technology, however, deviations on form and position as well as an unbalanced mass distribution occur. In order to compensate these deviations a fine-positioning system is mandatory. As an example, the approach to the fine-positioning of precision forged crankshafts is presented. Furthermore, its potential of shortening process chains is pointed out.

1 Einleitung

Die derzeit übliche Fertigung vieler Bauteile aus dem Kfz-Antriebsstrang, wie Zahnräder oder Kurbelwellen, ist durch eine große Anzahl an Fertigungsschritten gekennzeichnet.

Dipl.-Ing. Rainer Haase M.Sc., Dipl.-Phys. Markus Kästner, Dr.-Ing. Jörg Seewig, Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
 Institut für Mess- und Regelungstechnik (imr)
 Universität Hannover
 Nienburger Str. 17, D-30167 Hannover
 Tel. +49 (0)511 / 762-4284 (R. Haase, M. Kästner)
 oder +49 (0)511 / 762-4286 (J. Seewig)
 Fax +49 (0)511 / 762-3234
 E-Mail: rainer.haase@imr.uni-hannover.de
 oder markus.kaestner@imr.uni-hannover.de
 oder joerg.seewig@imr.uni-hannover.de
 Internet: www.imr.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Jochen Immel, Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena
 Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)
 Universität Hannover
 Schönebecker Allee 2, D-30823 Garbsen
 Tel. +49 (0)511 / 762-3024, Fax +49 (0)511 / 762-5115
 E-Mail: immel@ifw.uni-hannover.de
 Internet: www.ifw.uni-hannover.de

Info

* Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen „reviewten“ Fachaufsatz: Autoren-unabhängig von Experten auf diesem Fachgebiet wissenschaftlich begutachtet und freigegeben.

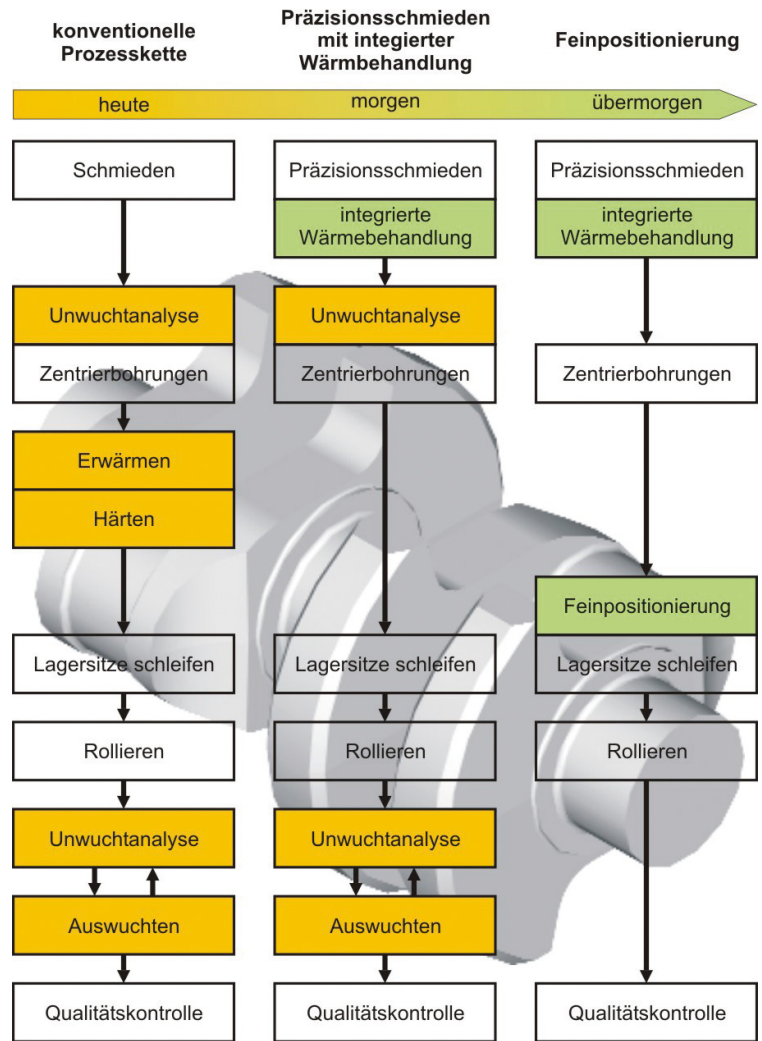


Bild 1. Entwicklung der Prozessketten zur Herstellung von Kurbelwellen

Die Folge sind lange Prozessketten mit entsprechend langen Durchlaufzeiten. Diese stehen jedoch im Widerspruch zu Forderungen nach wirtschaftlicheren Fertigungsverfahren und kurzen Durchlaufzeiten. Zudem werden technologisch günstige Bauteileigenschaften verlangt [1, 2].

Um diesen Forderungen gerecht zu werden, wird im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereiches (SFB 489) im Produktionstechnischen Zentrum Hannover (PZH) in Zusammenarbeit mit weiteren Instituten der Universität Hannover erstmals eine geschlossene „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ aufgebaut. Das Potential dieser Prozesskette wird im Folgenden exemplarisch anhand präzisionsgeschmiedeter Kurbelwellen aufgezeigt.

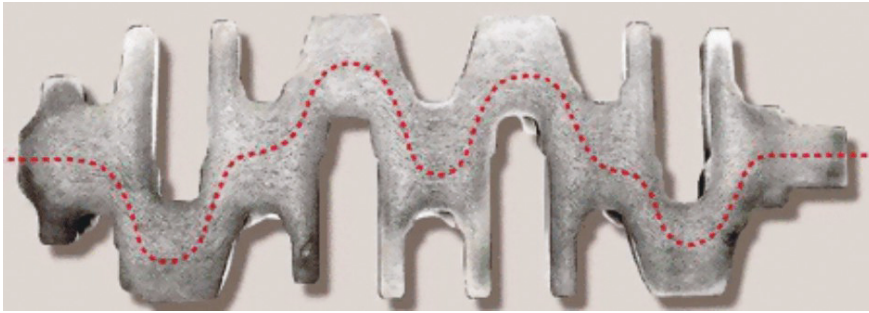


Bild 2. Faserverlauf (rot gekennzeichnet) einer geschmiedeten Kurbelwelle [7]

2 Integrierte Prozesse für kürzere Prozessketten

Der Einsatz innovativer Technologien gestattet das schrittweise Verkürzen der Prozesskette zur Herstellung von Kurbelwellen. Die heute übliche konventionelle Prozesskette sowie die künftig mögliche Entwicklung und industrielle Umsetzung verkürzter Prozessketten sind in **Bild 1** dargestellt. Dabei wird deutlich, dass einzelne Prozesse oder Prozessschritte substituiert werden, was zu einer Verkürzung der Prozesskette führt.

So kann in einem ersten Schritt das Schmieden sowie das spätere Erwärmen und Härten durch das Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung ersetzt werden. In einem zweiten Schritt wird die Feinpositionierung zur Unterstützung der Hartfeinbearbeitung (Schleifen der Lagersitze) eingeführt. Die Feinpositionierung besteht dabei aus einem messtechnischen und einem aktorischen Teil. Der messtechnische Teil erfasst die Werkstückgeometrie und wertet diese aus. Das Ergebnis wird dann dem aktorischen Teil übermittelt, der das Werkstück translatorisch und rotatorisch ausrichtet. Die Feinpositionierung wird als integrierter Prozess mit dem Schleifen der Lagersitze realisiert. Wird die Feinpositionierung nach wuchtrelevanten Kriterien durchgeführt, so substituiert sie die anfängliche Unwuchtanalyse vor dem Einbringen der Zentrierbohrungen sowie den abschließenden iterativen Prozess aus Unwuchtanalyse und Auswuchten.

Durch diese zwei innovativen integrierten Prozesse lässt sich die Prozesskette also deutlich verkürzen. Die Vorteile dieser verkürzten Prozesskette werden anhand der beiden integrierten Prozesse beschrieben.

3 Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung

Die rein zerspanende Fertigung ist gekennzeichnet durch vergleichsweise lange Bearbeitungszeiten und einen hohen Materialeinsatz. Das Material wird dabei meist in mehreren Bearbeitungsschritten sowohl vor als auch nach der Wärmebehandlung abgetragen. Vor der Wärmebehandlung erfolgt die spanende Weichbearbeitung (beispielsweise durch Drehen oder Fräsen), nach der Wärmebehandlung die qualitätsbestimmende spanende Hartfeinbearbeitung (zum Beispiel Schleifprozesse) [1, 2].

Mit der Substitution abtragender durch umformende Fertigungsverfahren kann die Bearbeitungszeit verkürzt und der Materialeinsatz bereits reduziert werden [1]. Um eine vollständige Formfüllung während des Umformvorgangs zu erreichen, ist beim konventionellen Schmieden aber noch ein Mas-

seüberschuss von 20 % bis 30 % notwendig. Dieser Masseüberschuss bildet einen Grat zwischen den Gesenkhälften, der entfernt und zur erneuten Nutzung recycelt wird [3].

Demgegenüber verlangt das Präzisionsschmieden in einem geschlossenen Gesenk einen sehr exakten Massezuschnitt, da eine Überfüllung des Gesenkes nicht durch Gratbildung kompensiert werden kann und damit das Gesenk unter Umständen überlastet, das heißt zerstört würde. Als alternative Strategie ist eine gezielte Unterfüllung des Gesenkes zu sehen. Diese Unterfüllung muss dabei aber auf nicht funktionsrelevante Bereiche, beispielsweise die Kurbelwangen, beschränkt werden [4]. Auf diese Weise ist noch einmal eine Verringerung der Rohteilmasse möglich. Die Forschungsarbeiten im Bereich der Präzisionsschmiedetechnologie werden durch das Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Universität Hannover und das Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH) gGmbH durchgeführt.

Das Schmieden und die Wärmebehandlung (Erwärmen, Härten) sind bei der konventionellen Prozesskette zeitlich getrennt (siehe Bild 1). Das erneute Erwärmen der Bauteile benötigt somit einen erneuten Energieeinsatz. Abhilfe kann hier die integrierte Wärmebehandlung schaffen, die unmittelbar im direkten Anschluss an das Präzisionsschmieden erfolgt. Hierbei wird die Restwärme im Schmiedeteil genutzt, um es in einem Sprayfeld mit einem Wasser-Luft-Spray gezielt abzukühlen. Diese gezielte Abkühlung erlaubt weiterhin ein Anlassen aus der Restwärme. Auf diese Weise lassen sich sowohl die Härte und Einhärttiefe der Randschicht als auch die Duktilität des Kerns steuern [1, 5]. Diese Vorgehensweise erlaubt den Einsatz von Vergütungsstählen anstatt der üblichen Einsatzstähle. Durch die Kombination der drei energieintensiven Fertigungsschritte Umformung, Härten und Anlassen übrig bleibt sich ein mehrmaliges erneutes Erwärmen. So können die Energiekosten wirtschaftlich signifikant verringert werden [5, 6]. Im Bereich der integrierten Wärmebehandlung werden die Forschungsarbeiten vom Institut für Werkstoffkunde (IW) der Universität Hannover durchgeführt.

Ein weiterer Vorteil präzisionsgeschmiedeter Bauteile sind ein ausgeprägtes Feinkorn sowie der schmiedetypische Werkstofffluss. Am Beispiel der in **Bild 2** dargestellten geschmiedeten Kurbelwelle wird deutlich, dass der Faserverlauf (Textur) der Bauteilkontur folgt. Durch diesen ununterbrochenen und damit beanspruchungsgerechten Faserverlauf werden insbesondere die dynamischen Festigkeitseigenschaften positiv beeinflusst [7, 8].

Wesentliche Vorteile des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung sind damit der verminderte Einsatz von Ressourcen (wie Material und Energie) sowie kürzere

Durchlaufzeiten bei gleichzeitig gesteigerter Produktqualität. Aus wirtschaftlicher Sicht ergibt sich beispielsweise durch den Einsatz des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung zur Zahnradfertigung ein Einsparpotential von rund 35 % der Kosten [2].

4 Feinpositionierung

Die Feinpositionierung bildet zusammen mit dem Schleifen der Haupt- und Hublagersitze der Kurbelwelle einen integrierten Prozess. Es wird zunächst gezeigt, dass dieser innovative Prozess beim Präzisionsschmieden von Kurbelwellen zwingend erforderlich ist, bevor die Feinpositionierung beispielhaft vorgestellt wird.

4.1 Notwendigkeit der Feinpositionierung

Aufgrund thermischer und mechanischer Belastungen beim Schmiedeprozess kommt es zu Prozessstreuungen, zum Beispiel durch Verlagerungen der Teilwerkzeuge oder durch einen ungleichmäßigen Verschleiß des Schmiedegesenks. Darüber hinaus treten auch kaum zu vermeidende Wärme- und Härteverzüge während des Schmiedens und der anschließenden Wärmebehandlung auf [1, 9]. Diese Effekte führen zu Maß-, Form- sowie insbesondere zu Lageabweichungen von Funktionsflächen zueinander. So äußern sich beispielsweise für gedrungene, schrägverzahnte Zylinderräder im Wesentlichen Lageabweichungen in Form eines Exzenters, das heißt, die Achse der Verzahnung ist mit der durch die Aufspannung definierten Bearbeitungsachse nicht identisch [10]. Zur Korrektur dieses Exzenters konnte bereits im Rahmen der gemeinsamen Forschung – Institut für Mess- und Regelungstechnik (imr) sowie Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) an der Universität Hannover – ein Feinpositioniersystem mit zwei Freiheitsgraden erfolgreich aufgebaut werden [11, 12].

Auch bei Kurbelwellen führen insbesondere Lageabweichungen zu einem wie in **Bild 3 a)** dargestellten Exzenter. Da es sich bei Kurbelwellen um Langteile handelt, ist zusätzlich ein wie in **Bild 3 b)** dargestellter Taumel ausgeprägt. Taumel und Exzenter überlagern sich zu einer geometrischen Gesamtabweichung.

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal ist die Unwucht einer Kurbelwelle. Als letzter Schritt der Fertigung erfolgt daher das Auswuchten. In diesem Zusammenhang ist die bereits beschriebene gezielte Unterfüllung des Gesenkes beim Präzisionsschmieden von entscheidender Bedeutung. Die Unterfüllung ist dabei auf nicht funktionsrelevante Bereiche, wie die Kurbelwangen, beschränkt. Damit tragen insbesondere die Kurbelwangen zur Ausprägung der Unwucht der Kurbelwelle bei.

Innovative Prozesse zur frühzeitigen Korrektur der Unwucht innerhalb der Fertigungskette sind in diesem Kontext bisher nicht erforscht, besitzen aber ein hohes Potential, wenn deren Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit nachgewiesen werden können.

4.2 Messtechnik zur Feinpositionierung präzisionsgeschmiedeter Kurbelwellen

Die im Rahmen der Feinpositionierung erforderliche Erfassung der Messdaten und deren Auswertung wird durch das In-

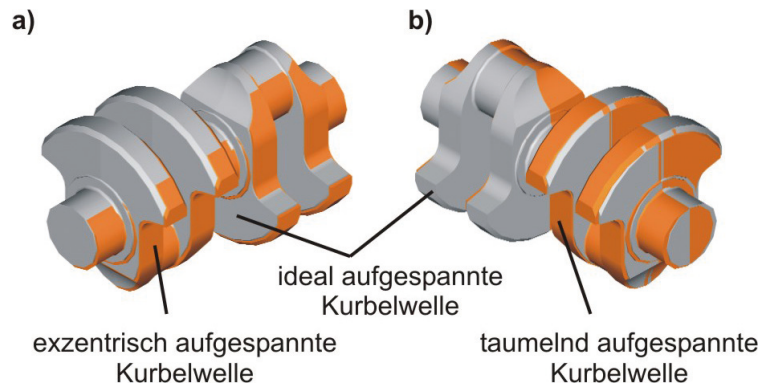


Bild 3. Exzenter und Taumel einer Kurbelwelle durch fehlerhafte Aufspannung

stitut für Mess- und Regelungstechnik (imr) erarbeitet. Dabei geschieht die Feinpositionierung präzisionsgeschmiedeter Kurbelwellen unter technologischen Gesichtspunkten. In diesem Zusammenhang ist unter technologischen Gesichtspunkten zu verstehen, dass das Verfahren die Endbearbeitbarkeit der Funktionsflächen (Haupt- sowie Hublagersitze) sicherstellt und gleichzeitig die Unwucht der endbearbeiteten Kurbelwellen korrigiert. Voraussetzung dafür ist das Erfassen mehrerer Messschnitte durch die Haupt- und Hublagersitze sowie die Kurbelwangen.

Besondere Anforderungen an das einzusetzende Messsystem ergeben sich aus der Messung der Hublagersitze. Hier sind sowohl ein großer lateraler Messbereich als auch ein großer Messhub gefordert, um die Hublagersitze in jeder beliebigen Winkelstellung vollständig erfassen zu können. Zur Aufnahme der Messschnitte ist ein Schattenprojektionssensor, wie in **Bild 4** dargestellt, besonders geeignet. Dabei wird die Kurbelwelle von einer Seite mit parallelem Licht beleuchtet. Der Schatten wird auf der gegenüber liegenden Seite auf einer CCD-Zeile detektiert und subpixelgenau ausgewertet. Auf diese Weise werden zunächst die Hell-Dunkel-Übergänge an der entsprechenden Winkelposition der Kurbelwelle aufgenommen. Rotiert die Kurbelwelle einmal vollständig, so lässt sich aus den erfassten Messwerten und den zugehörigen Winkelpositionen ein kompletter Messschnitt generieren.

Aufgrund der Geometrie der Kurbelwangen ist ihre vollständige Erfassung mittels Schattenprojektionstechnik nicht möglich, da es hier zu Abschattungen kommt. Daher kommt zusätzlich ein laserbasierter Abstandssensor zum Einsatz. Abhängig von der Geometrie der Kurbelwangen lässt sich ein

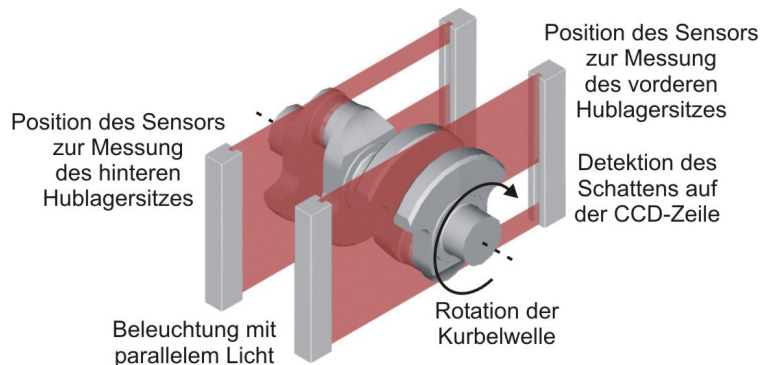


Bild 4. Messung der Hublagersitze einer Kurbelwelle mittels Schattenprojektionstechnik

punktförmig oder linienhaft arbeitender Sensor verwenden, mit dem ein vollständiger Schnitt der Kurbelwangen erfasst wird.

Aus den Messschnitten durch die Haupt- und Hublager-sitze sowie die Kurbelwangen kann die Unwucht der endbearbeiteten Kurbelwelle approximiert werden. Damit ist die Feinpositionierung der Kurbelwelle unter wuchtrelevanten Kriterien möglich. Hierzu wird als Zielfunktion die Unwucht der Kurbelwelle definiert. Die Minimierung der Zielfunktion liefert dann die Transformationsvorschrift, also Rotation und Translation, zur Feinpositionierung der Kurbelwelle. Um die Endbearbeitbarkeit der präzisionsgeschmiedeten Kurbelwelle sicherzustellen, müssen alle Messpunkte der Messschnitte durch die Funktionsflächen außerhalb des Modells der endbearbeiteten Kurbelwelle liegen; das findet durch eine Nebenbedingung bei der Minimierung der Zielfunktion Berücksichtigung. Kann die Nebenbedingung nicht eingehalten werden, so ist die Kurbelwelle als Ausschuss zu klassifizieren.

In diesem Zusammenhang kann es sich als fertigungstechnisch und ökonomisch günstiger erweisen, das Aufmaß an den zu bearbeitenden Funktionsflächen etwas zu erhöhen. Das eröffnet die Möglichkeit, die Zielfunktion zu minimieren, ohne die Nebenbedingung zu verletzen. Auf diese Weise wird eine Unwucht unterhalb der spezifizierten Toleranz erreicht und zugleich die Endbearbeitbarkeit der Funktionsflächen gewährleistet. Die Forschungsarbeiten im Bereich der Messdatenerfassung und -auswertung im Rahmen der Feinpositionierung werden vom Institut für Mess- und Regelungstechnik (imr) der Universität Hannover durchgeführt.

4.3 Aktorik zur Feinpositionierung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder und Kurbelwellen

Die geometrischen und gegebenenfalls wuchtrelevanten Abweichungen präzisionsgeschmiedeter Werkstücke sind bei jedem Bauteil individuell ausgeprägt; deshalb ist auch eine individuelle Korrektur erforderlich. Daher muss die Umsetzung der Feinpositionierung präzisionsgeschmiedeter Werkstücke im Prozessstakt als Prozessschritt in der Prozesskette erfolgen. Neben der Messtechnik zur schnellen Erfassung relevanter Bereiche der Werkstücke muss also auch eine geeignete Aktorik in die Werkzeugmaschine integriert werden. Für die Feinpositionierung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder wurde am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) ein in eine Werkzeugmaschine integriertes, aktives Spann-futter entwickelt und bereits erfolgreich eingesetzt [12–14].

Die Prinzipskizze des aktiven Spann-futters zur Feinpositionierung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder ist in **Bild 5** dargestellt. Das Zahnrad wird über ein pneumatisch aktiviertes Membranspannfutter eingespannt und durch sternförmig angeordnete Piezoaktoren in zwei Freiheitsgraden positioniert.

Um ein hochgenaues Bearbeiten sicherzustellen, ist die Anordnung steif in Richtung der Achse der Werkstückspindel und nachgiebig in Richtung der Positionierung ausgelegt. Hierfür kommen spezielle elastokinematische Gitterführungen zum Einsatz, die bei kleinen Stellwegen ein verschleiß-freies lineares Übertragungsverhalten aufweisen. Die Übertragung des Drehmoments übernehmen zwei über einen Kern verbundene, torsionssteife Membranen. Auf diese Weise werden die Piezoaktoren ausschließlich in ihrer jeweiligen Stellrichtung belastet.

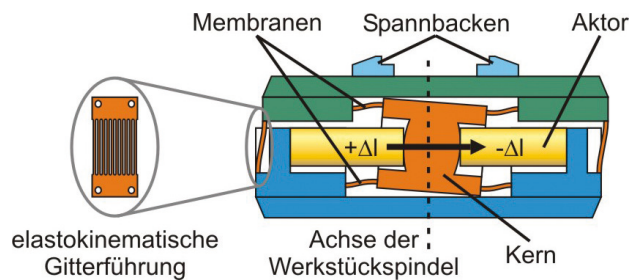


Bild 5. Prinzipskizze des aktiven Spann-futters für präzisionsgeschmiedete Zahnräder

Der in Bild 5 dargestellte Aufbau ist in der Lage, Bauteile (beispielsweise präzisionsgeschmiedete Zahnräder) in zwei Freiheitsgraden (xy-Ebene) zu positionieren. Bei diesen gedungenen Werkstücken ist der Taumel gegenüber dem Exzenter vernachlässigbar. Bei langen Bauteilen (wie Kurbelwellen) ist diese Vereinfachung allerdings nicht mehr zulässig. Daher soll aufbauend auf den Forschungsergebnissen mit präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern ein aktorischer Aufbau erforscht werden, der auch lange Werkstücke – in dann vier Freiheitsgraden – positioniert. Damit lassen sich in der Werkzeugmaschine sowohl Exzenter als auch Taumel ausgleichen, wie dies beispielsweise für die Bearbeitung präzisionsgeschmiedeter Kurbelwellen erforderlich ist.

Als Antriebe einer solchen Feinpositioniervorrichtung eignen sich insbesondere Piezoaktoren aufgrund ihrer hohen Dynamik und der hochgenauen Ansteuerbarkeit. Der geringe Stellweg von lediglich etwa 1 ‰ ihrer Länge (bei 150 mm Aktorlänge beträgt der Leerstellweg circa 150 μm) verlangt jedoch spezielle Wegübersetzer und spielfreie Gelenke, um den erforderlichen Stellweg von etwa 400 μm unter der Randbedingung des begrenzten Bauraums in Schleifmaschinen realisieren zu können. Insgesamt soll eine kompakte Einheit in der Größenordnung konventioneller Spannvorrichtungen verwirklicht werden. Auf diese Weise bleibt der in der Werkzeugmaschine verfügbare Platz beinahe uneingeschränkt für Werkstücke und Werkzeuge nutzbar. Die Forschungsarbeiten im Bereich der aktorischen Umsetzung von Feinpositioniervorrichtungen übernimmt das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Universität Hannover.

5 Zusammenfassung

Es wurde das Potential zur Verkürzung von Prozessketten am Beispiel der Fertigung von Kurbelwellen aufgezeigt. Im Vordergrund stehen dabei innovative integrierte Prozesse. Diese wurden am Beispiel des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung sowie der prozessintegrierten Feinpositionierung vorgestellt. Wesentlicher Vorteil des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung ist neben kürzeren Durchlaufzeiten der verminderte Einsatz von Ressourcen, wie Material und Energie, bei gleichzeitig gesteigerter Produktqualität. Erst mit Einsatz der prozessintegrierten Feinpositionierung wird die Umsetzung der durch das Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung verkürzten Prozesskette möglich. Dabei substituiert die Feinpositionierung unter wuchtrelevanten Kriterien das Auswuchten der Kurbelwellen. Abschließend wurde exemplarisch die technische Realisierung der Feinpositionierung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder in der Prozesskette vorgestellt.

Literatur

- [1] Bach, F.-W. et al.: Integrierte Prozessketten, eine Notwendigkeit zum Präzisionsschmieden. UTF science (2003) Nr. II, S. 1–8
- [2] Doege, E.; Thalemann, J.; Westerkamp, C.: Präzisionsschmieden von Zahnrädern. wt Werkstattstechnik – Produktion und Management 85 (1995) H. 3, S. 85–89
- [3] Dähndel, H.; Schäfer, F.; Specker, A.: Präzision Schlag für Schlag – Hochgenaue gratfreie Massivumformung. phi – Produktionstechnik Hannover informiert 6 (2005) Nr. 4, S. 6–7
- [4] Bach, F.-W. et al.: SFB 489 – Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile – Fortsetzungsantrag 2006-2007-2008. Universität Hannover, 2005
- [5] Schaper, M.; Nürnberger, F.; Krause, C.: Außen hart und innen weich – Randschichtvergüten durch Zweiphasenspray. phi – Produktionstechnik Hannover informiert 6 (2005) Nr. 4, S. 10–11
- [6] Kerber, K.: Der Sonderforschungsbereich 489. phi – Produktionstechnik Hannover informiert 6 (2005) Nr. 4, S. 4–5
- [7] Kämpfer, S.: Schmiedetechnik gibt Sicherheit. VDI nachrichten Nr. 14, 08.04.2005, S. 28. Düsseldorf: VDI-Verlag
- [8] Dittmann, J.: Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von präzisionsgeschmiedeten Bauteilen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 608. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002
- [9] Bach, F.-W. et al.: SFB 489 – Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile – Fortsetzungsantrag 2003-2004-2005. Universität Hannover, 2002
- [10] Jagodzinski, V.: 3D-Abweichungsanalyse zur Qualitätsbewertung in der Produktentwicklung. Dissertation, Universität Hannover, FB Maschinenbau. Aachen: Shaker-Verlag 1998
- [11] Haase, R.; Seewig, J.; Reithmeier, E.: Verbesserte Hartfeinbearbeitung von Zahnrädern – Bearbeitungsaufmaß für den Schleifprozess präzisionsgeschmiedeter Zahnräder optimieren. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) Nr. 6, S. 447–452. Internetadresse: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [12] Denkena, B.; Götz, T.: Rotierende Spannvorrichtung mit Aktorik zur Feinpositionierung – Mechanische Umsetzung. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) Nr. 5, 309313. Internetadresse: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [13] Denkena, B.; Götz, T.: Aktive rotierende Spannvorrichtung mit Bluetooth-Anbindung – Ein berührungslos versorgtes, intelligentes Zusatzsystem für Werkzeugmaschinen. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) Nr. 3, S. 118121. Internetadresse: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [14] Denkena, B.; Immel, J.; Götz, T.: Einsatz adaptronischer Systeme zur Feinpositionierung in Drehmaschinen. Adaptronic Congress, Göttingen, 2005