

# $\varphi$ phi

*Produktionstechnik Hannover informiert*

## *Die Prozesskette Präzisionsschmieden*

*Der Sonderforschungsbereich 489*

*Präzision Schlag für Schlag*

*Härter als Stahl*

*Außen hart und Innen weich*

*Hartfeinbearbeitung*

*Qualität Zahn um Zahn*

*Prozessketten ganzheitlich planen*

*Alles im Griff*

# Inhalt

- |    |   |    |   |
|----|---|----|---|
| 3  | <i>Vorwort</i>  | 12 | <i>Hartfeinbearbeitung – Clever Positionieren und dann kommt der letzte Schliff</i>                                 |
| 4  | <i>Der Sonderforschungsbereich 489</i>  | 14 | <i>Qualität Zahn um Zahn – Messtechnik in der Prozesskette Präzisionsschmieden</i>                                  |
| 6  | <i>Präzision Schlag für Schlag – Hochgenaue gratfreie Massivumformung</i>                             | 16 | <i>Prozessketten ganzheitlich planen – Kosten senken durch Auslegung technologisch-logistischer Schnittstellen.</i> |
| 8  | <i>Härter als Stahl – Keramikeinsätze und Mehrlagenbeschichtungen zur Gesenkverschleißreduzierung</i> | 18 | <i>Alles im Griff – Ganzheitliches Logistikmanagement für die Prozesskette Präzisionsschmieden</i>                  |
| 10 | <i>Außen hart und Innen weich – Rand-schichtvergüten durch Zweiphasenspray</i>                        | 20 | <i>Vorschau</i>   |

# Impressum

*phi* ist die gemeinsame Zeitschrift der produktionstechnischen Institute in Hannover. *phi* erscheint vierteljährlich mit einer verbreiteten Auflage von 2.700 Exemplaren. ISSN 1616-2757

Jeder Nachdruck, auch auszugsweise, ist nur mit Erlaubnis der Redaktion gestattet.

Kostenloses Abonnement der *phi*: Im Internet unter [www.phi-hannover.de/abo.htm](http://www.phi-hannover.de/abo.htm) oder telefonisch bestellen unter Telefon (05 11) 27 97 65 00.

## Redaktion

Michaela Herzig (v.i.S.d.P.)

## Redaktionsanschrift

Hollerithallee 6  
30419 Hannover  
Telefon: (05 11) 2 79 76-500  
Fax: (05 11) 2 79 76-888  
E-Mail: [redaktion@phi-hannover.de](mailto:redaktion@phi-hannover.de)  
Internet: [www.phi-hannover.de](http://www.phi-hannover.de)

## Beteiligte Institute

Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Universität Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Peter Nyhuis  
Schönebecker Allee 2  
30823 Garbsen  
Tel.: (05 11) 762-2440  
Fax: (05 11) 762-3814  
E-Mail: [ifa@ifa.uni-hannover.de](mailto:ifa@ifa.uni-hannover.de)  
Internet: [www.ifa.uni-hannover.de](http://www.ifa.uni-hannover.de)

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Universität Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena  
Schönebecker Allee 2  
30823 Garbsen  
Tel.: (05 11) 762-2533  
Fax: (05 11) 762-5115  
E-Mail: [ifw@ifw.uni-hannover.de](mailto:ifw@ifw.uni-hannover.de)  
Internet: [www.ifw.uni-hannover.de](http://www.ifw.uni-hannover.de)

Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier  
Nienburger Straße 17  
30167 Hannover  
Tel.: (05 11) 762-3334  
Fax: (05 11) 762-3234  
E-Mail: [sekretariat@imr.uni-hannover.de](mailto:sekretariat@imr.uni-hannover.de)  
Internet: [www.imr.uni-hannover.de](http://www.imr.uni-hannover.de)

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens  
Schönebecker Allee 2  
30823 Garbsen  
Tel.: (05 11) 762-2264  
Fax: (05 11) 762-3007  
E-Mail: [ifum@ifum.uni-hannover.de](mailto:ifum@ifum.uni-hannover.de)  
Internet: [www.ifum.uni-hannover.de](http://www.ifum.uni-hannover.de)

Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bach  
Schönebecker Allee 2  
30823 Garbsen  
Tel.: (05 11) 762-4312  
Fax: (05 11) 762-5245  
E-Mail: [info@iw.uni-hannover.de](mailto:info@iw.uni-hannover.de)  
Internet: [www.iw.uni-hannover.de](http://www.iw.uni-hannover.de)

IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH  
Hollerithallee 6  
30419 Hannover  
Tel.: (05 11) 2 79 76-0  
Fax: (05 11) 2 79 76-888  
E-Mail: [info@iph-hannover.de](mailto:info@iph-hannover.de)  
Internet: [www.iph-hannover.de](http://www.iph-hannover.de)

## Druck

digital print  
laser-druck-zentrum garbsen GmbH  
Baumarktstraße 10  
30823 Garbsen  
Internet: [www.digital-print.net](http://www.digital-print.net)

## Layout

demandcom dialogmarketing GmbH  
Stefan Krieger  
Baumarktstraße 10  
30823 Garbsen  
Internet: [www.demandcom.de](http://www.demandcom.de)

# Vorwort

*Liebe Leserinnen und Leser,*

der internationale Wettbewerb zwingt Unternehmen, Fertigungsverfahren ständig zu optimieren, um eine Erhöhung der Produktqualität und Effizienz zu erzielen. Einer Steigerung der Produktivität und Wirtschaftlichkeit bei gleichzeitiger Erhöhung der Produktqualität kann allerdings nur entsprochen werden, wenn eine umfassende technische und logistische Fertigungsoptimierung unternommen wird. Um moderne Herstellungsprozesse effizienter zu gestalten ist eine isolierte Betrachtung und Optimierung der einzelnen, meist schon sehr lange etablierten, Teilprozesse nicht mehr ausreichend. Signifikante und nachhaltige Verbesserungen können nur erzielt werden, wenn der gesamte Herstellungsprozess mit den Wechselwirkungen der einzelnen Teilprozesse untereinander bei der Optimierung berücksichtigt wird. Zudem ist die Einbeziehung von alternativen Prozessvarianten und Substitutionsmaßnahmen bei den Bemühungen eine Effizienz- und Qualitätssteigerung zu realisieren, oftmals die einzige Möglichkeit, um nachhaltige Erfolge zu erzielen.

Durch Massivumformung hergestellte Bauteile weisen bedingt durch die werkstofftechnischen Eigenschaften eine höhere Betriebsfestigkeit und Dauerfestigkeit auf als mittels konkurrierender Verfahren hergestellte Bauteile. Die Massivumformungsbranche ist eine Zulieferindustrie und daher stark von der wirtschaftlichen Entwicklung der Abnehmerindustrien abhängig. Die deutsche Massivumformungsindustrie liefert jährlich direkt und indirekt ca. 50 % des gesamten Produktionsvolumens an den Fahrzeugbau. Beispielsweise werden für Hochleistungsbauteile im Motorbereich durch den Trend zu Dieselfahrzeugen und direkteinspritzenden Motoren zunehmend geschmiedete Kurbelwellen und Pleuel eingesetzt, da durch die höhere Zähigkeit der massivumgeformten Bauteile höhere Bauteilbelastungen realisierbar sind. Wird von den Automobilherstellern die Gewichtseinsparung als Zielsetzung definiert, so können Bauteile durch leichtere Schmiedeteile ersetzt werden. Die fortwährende Forderung der Automobilindustrie eine weitere Verringerung des Bauteilgewichtes und der Stückkosten zu realisieren, ist jedoch mit den herkömmlichen Fertigungsverfahren und Werkstoffen nicht mehr möglich. Die Entwicklung von innovativen Fertigungsverfahren und der Einsatz von neuartigen Werkstoffen ist daher unumgänglich.

Die gratfreie hochpräzise Warmmassivumformung (Präzisionsgeschmiedeten) erlaubt die Fertigung von endkonturnahen Schmiedeteilen, die lediglich einer abschließenden Hartfeinbearbeitung unterzogen werden müssen. Der Sonderforschungsbereich 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ (SFB 489) hat sich die Entwicklung und übergreifende Betrachtung einer Prozesskette auf Basis dieser Schmiedetechnologie zur Herstellung von präzisionsgeschmiedeten Hochleistungsbauteilen zur Aufgabe gemacht.

Ziel des Sonderforschungsbereiches ist die grundlegende Entwicklung und Qualifikation neuer technologischer und logistischer Verfahren zur Herstellung von präzisionsgeschmiedeten



Prof. Dr.-Ing. Fr.-W. Bach

Hochleistungsbauteilen. Im Mittelpunkt steht unter anderem die drastische Verkürzung der Prozesskette, die auf der Integration der Wärmebehandlung in die Prozesskette und der Substitution der spanenden Weichbearbeitung durch die Präzisionsschmiedetechnik beruht. Zudem wird eine umfassende technologische und logistische Betrachtung der Prozesskette angestrebt, um die umfangreichen Wechselwirkungen der Teilprozesse und darüber hinaus die technischen und logistischen Wechselwirkungen vollständig zu erfassen. Diese Vorgehensweise soll bisher nicht erkannte Optimierungspotentiale aufzeigen.

An der Betrachtung der Prozesskette in ihrer Gesamtheit und im Detail sind im Rahmen des Sonderforschungsbereiches sechs Institute der Universität Hannover beteiligt:

- IFW - Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen
- IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
- IMR - Institut für Mess- und Regelungstechnik
- IFA - Institut für Fabrikanlagen und Logistik
- IFUM - Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen
- IW - Institut für Werkstoffkunde.

Der Sonderforschungsbereich wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur gefördert.

Diese Ausgabe der phi soll Ihnen die Forschungstätigkeiten des Sonderforschungsbereiches 489 näher bringen. Ich wünsche Ihnen viel Spaß bei der Lektüre.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr.-Ing. Fr.-W. Bach

Sprecher des Sonderforschungsbereiches 489

# Der Sonderforschungsbereich 489

Um moderne Herstellungsprozesse effizienter zu gestalten, reicht die Optimierung einzelner Teilprozesse der Prozesskette nicht aus. Signifikante Verbesserungen können nur erzielt werden, wenn der gesamte Herstellungsprozess zusammen mit den Wechselwirkungen der einzelnen Teilprozesse berücksichtigt wird. Der Sonderforschungsbereich 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ befasst sich aus diesem Grund mit einem ganzheitlichen technologischen und logistischen Forschungsprogramm zur Prozesskette präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile.

Im Mittelpunkt der Forschungstätigkeiten des Sonderforschungsbereiches steht die Verkürzung der Prozesskette, die auf der vollständigen Substitution der spanenden Weichbearbeitung und der Eingliederung der Wärmebehandlung in die Prozesskette im Anschluss an das Präzisionsschmieden beruht. Die durch das Präzisionsschmieden erreichbare Genauigkeit ermöglicht es, die Bauteile durch einen einzigen abschließenden Fertigungsschritt, die Hartfeinbearbeitung (Schleifen), fertigzustellen. Diese drastische Verkürzung der Prozesskette verbessert die Energiebilanz sowie die Effizienz der Fertigung von präzisionsgeschmiedeten Hochleistungsbauteilen stark.

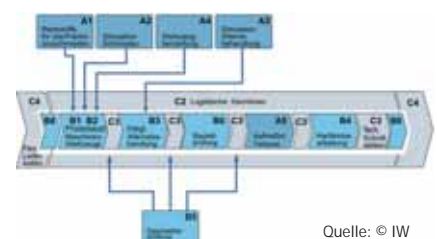
In Anlehnung an die verkürzte Prozesskette wurde der Sonderforschungsbereich 489 eingerichtet. Die 14 Teilprojekte

des Sonderforschungsbereiches sind in drei Teilbereiche: A – „Technologie“, B – „Prozesskette“ und C – „Logistik“ aufgeteilt und arbeiten seit dem Jahr 2000 erfolgreich an einem gemeinsamen Forschungsprogramm.

### *Innovative Werkzeugtechnologie*

Da mehr als die Hälfte der durch die Masivumformung hergestellten Bauteile direkt oder indirekt an die Automobilindustrie geliefert werden, wurden für die Forschungstätigkeiten des Sonderforschungsbereiches Demonstratorbauteile aus der Gruppe der rotationssymmetrischen und länglichen Bauteile des Motoren-, Triebwerks- und Getriebebaus gewählt. In den ersten sechs durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsjahren lag der Schwerpunkt der Forschungstätigkeiten

auf der Untersuchung einer Prozesskette zur Herstellung von präzisionsgeschmiedeten schrägverzahnten Zahnrädern. In den nächsten drei Jahren wird durch die



Teilprojekte des Sonderforschungsbereiches 489 in Anlehnung an die Prozesskette Präzisionsschmieden.

Betrachtung der Prozesskette für die Herstellung von Ritzelwellen der Wechsel von rotationssymmetrischen auf längliche Bauteile, d.h. Einzylinder-, Zweizylinder- und Dreizylinder-Kurbelwellen, vollzogen. Die komplexe Bauteilgeometrie

dieser Hochleistungsbauteile erfordert eine aufwändige Gestaltung der Schmiedewerkzeuge.



Quelle: © IW

Die Verkürzte Prozesskette zum Präzisionsschmieden von Zahnradern.

Die Erhöhung der Standmengen von Präzisionsschmiedewerkzeugen ist ein Forschungsschwerpunkt des Sonderforschungsbereiches. Besonders stark durch Verschleiß beanspruchte Bereiche des Umformwerkzeuges werden durch Keramikeinsätze ersetzt, die im Gesenk durch Löten fixiert werden. Die größere Härte der Keramik verringert den Verschleiß der Gesenke und verringert durch die

Produktionskosten. Um hochbelastete Gesenkbereiche zu identifizieren, wird der Umformprozesswerkzeug- und bauteilseitig simuliert. Des Weiteren werden Schleifverfahren für die Werkstoffkombination aus Keramik und Stahl untersucht, um verschleißfestere Präzisionsschmiedegesenke mit der erforderlichen Präzision herstellen zu können.

### Integrierte Wärmebehandlung

In herkömmlichen Prozessketten zur Herstellung von Schmiedeteilen wird eine Wärmebehandlung zum Härten der Bauteile erst zu einem späten Zeitpunkt im Fertigungsablauf durchgeführt. Die bereits nach dem Schmieden erkalten Bauteile werden erneut erwärmt und durch ein Kühlmedium schlagartig abgekühlt. Um durch das Härten bedingte Spannungen im Bauteil zu verringern, werden die Bauteile nach dem Härten angelassen. Diese Form der Fertigung führt durch mehrmaliges Erwärmen der Bauteile zu hohen Energiekosten.

In der Prozesskette des Sonderforschungsbereiches wird die Wärmebehandlung (Härten und Anlassen) direkt

im Anschluss an den Schmiedeprozess durchgeführt, um so die Schmiedewärme für diesen Vorgang zu nutzen. Nach der Entnahme der Schmiedeteile aus der Präzisionsschmiedepresse werden diese in einem Düsenfeld platziert. In einem Spraynebel aus Wasser und Luft werden sie dann an der Oberfläche kurzzeitig abgeschreckt (Randschichthärten). Nach dem Abschreckvorgang wird die im Bauteil noch vorhandene Restwärme genutzt, um es anzulassen. Durch diese Form der Wärmebehandlung werden für die Präzisionsschmiedeteile Vergütungsstähle anstatt der üblichen Einsatzstähle verwendet. Um Sprayfelder für verschiedene Schmiedeteile mit entsprechenden Anforderungsprofilen auslegen zu können, werden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Simulationsverfahren zur Berechnung des Sprayfeldes und des Werkstoffverhaltens des Bauteiles entwickelt.

### Qualität durch richtige Positionierung

Die Endbearbeitung der Präzisionsschmiedeteile wird in der Prozesskette durch eine Hartfeinbearbeitung realisiert. Eine Feinpositionierung der Bauteile in der Bearbeitungsmaschine ermöglicht eine Verringerung des Bearbeitungsaufmaßes und somit den Bearbeitungsaufwand. Zudem wird durch die individuelle Bearbeitung jedes Bauteils eine deutliche Qualitätssteigerung erzielt. Ein optisches Messsystem ermittelt hierzu die Konturen des gefertigten Bauteils und ein Algorithmus bestimmt die optimale Lage in der Spannvorrichtung, um Exzenter- und Taumelfehler zu kompensieren.

### Messtechnik für Hochleistungsbauteile

Für hochbeanspruchte und sicherheitsrelevante Bauteile in Fahrzeugen wird eine hohe Bauteilqualität vorausgesetzt, die für jedes Bauteil ermittelt und protokolliert werden muss. Um eine kostengünstige prozessintegrierte Prüfung der Bauteilqualität eines jeden Bauteiles zu ermöglichen, werden schnelle und zerstörungsfreie Prüfverfahren benötigt. Im Rahmen der Forschungstätigkeiten des Sonderforschungsbereiches wird beispielsweise die Härte jedes Einzelzahn eines Zahnrad durch Wirbelstromprüfverfahren bestimmt. Um die Geometrie der Bauteile zu prüfen, werden optische Verfahren wie die Streifenprojektionstechnik angewandt, um eine vollständige flächige Erfassung der Bauteilgeometrie der präzi-

sionsgeschmiedeten Bauteile durchzuführen. Die Messtechnik ist im Rahmen des Forschungsprogramms des Sonderforschungsbereiches nicht nur bei der Herstellung vertreten. Es werden Verfahren, die den Zustand der Bauteile anhand der akustischen Signale beurteilen, die beispielsweise Zahnräder beim Betrieb in einem Getriebe erzeugen, untersucht und für die Betriebsüberwachung von Hochleistungsbauteilen adaptiert.

### Verknüpfung von Technologie und Logistik

Neben der technologisch ausgerichteten Forschung beschäftigt sich der Sonderforschungsbereich mit der logistischen Untersuchung der Prozesskette Präzisionsschmieden. Die umfangreichen Wechselwirkungen der einzelnen Teilprozesse der Prozesskette und darüber hinaus die oftmals vernachlässigten technischen und logistischen Wechselwirkungen sollen in ganzheitlichen Beschreibungs- und Simulationsmodellen erfasst werden. Zur Auslegung, Steuerung und Analyse der Prozesskette werden die technologischen Schnittstellen zwischen den einzelnen Teilprozessen untersucht und eine logistische Bewertung der verschiedenen Einflüsse durchgeführt. Die technisch-logistischen Zusammenhänge in der Prozesskette werden durch logistische Kennlinien festgehalten. Abgerundet wird die logistische Betrachtung der Prozesskette durch die Auslegung und Untersuchung von flexiblen Lieferketten.



Demonstratorbauteile des Sonderforschungsbereiches 489.

Auf Basis der Erkenntnisse der Fachgebiete Technologie und Logistik werden Simulationsmodelle aufgestellt, mit deren Hilfe ein Vergleich zwischen herkömmlichen Prozessketten zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen und der Prozesskette des Sonderforschungsbereiches 489 durchgeführt wird.

Kai Kerber, IW



Quelle: © IFUM

## *Präzision Schlag für Schlag – Hochgenaue gratfreie Massivumformung*

Schmieden ist eines der ältesten Metallverarbeitungsverfahren der Menschheit. Schmiedeteile bieten gegenüber Bauteilen, die mit anderen Verfahren, wie z.B. dem Gießen hergestellt werden, sehr gute statische und dynamische Festigkeitseigenschaften. Daher sind Schmiedeverfahren ein unersetzbarer Bestandteil der modernen Industrie und aus der heutigen Fertigungslandschaft nicht wegzudenken.

### *Mit wenigen Schritten zum Ziel*

Neben ihren guten mechanischen Eigenschaften bieten Schmiedeteile weitere Vorteile. Diese sind die grundsätzlich in der Warmumformung hohen erreichbaren Umformgrade sowie die mögliche Geometrievielfalt der Bauteile.

Komplexe Bauteile wie Zahnräder, Pleuel und Kurbelwellen werden zurzeit noch mit einer Vielzahl von Bearbeitungsschritten gefertigt. Nach der Vorformung durch einfache Schmiedeprozesse erfolgt

anschließend die Erzeugung des Schmiederohteils. In nachgelagerten Prozessen wird das Bauteil durch spanende Bearbeitungen wie z.B. Drehen oder Fräsen weiterverarbeitet. Anschließend erfolgt eine Wärmebehandlung zur Herstellung der geforderten Festigkeitseigenschaften. Die Fertigung der Endkontur erfolgt durch eine abschließende Hartfeinbearbeitung.

Im Gegensatz zu den derzeit verwendeten Schmiedeverfahren ist das Präzisionsschmieden ein Verfahren, mit dem Bauteile in großen Stückzahlen end-

konturnah produziert werden können. Die Bauteile müssen nach einer dem Schmieden folgenden Wärmebehandlung nur noch abschließend hartfeinbearbeitet werden. Eine aufwändige spanende Weichbearbeitung kann entfallen. Das spart Kosten und Zeit.

Das Präzisionsschmieden bietet dadurch das Potenzial, den Anforderungen der Unternehmen nach innovativen Produkten durch endkonturnahe Geometriegebung gerecht zu werden. Aus diesem Grund haben derartige Verfahren in den

letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Beim Präzisionsschmieden von zyklisch symmetrischen Bauteilen wie z.B. Zahnrädern können durch verringerte Bearbeitungsaufmaße an den Funktionsflächen zeitaufwändige Zerspanoperationen eingespart werden. Im Sonderforschungsbereich wurden zur Realisierung dieser verkürzten Prozesskette besondere Maßnahmen für die Prozessauslegung und -führung entwickelt.

Da die Rohteile beim Schmieden auf Temperaturen von 1250 °C erwärmt werden, muss schon bei der Werkzeugkonstruktion die Schrumpfung des Bauteils berücksichtigt werden. Da das Schrumpfungsverhalten u.a. von der Legierungszusammensetzung beeinflusst wird, wirken sich auch kleine Schwankungen - z.B. verursacht durch unterschiedliche Materialchargen - auf die Bauteilqualität aus. Diese Einflüsse wurden im Teilprojekt B1 „Prozessauslegung und Prozessführung beim Präzisionsschmieden“ im Rahmen von umfangreichen Untersuchungen ermittelt und müssen bei der Prozessauslegung durch entsprechend entwickelte Regelalgorithmen kompensiert werden. Beim Schmieden müssen die Vorgaben bezüglich der Prozessparameter sehr genau eingehalten werden, um eine gleichmäßige Qualität der Schmiedeteile zu gewährleisten. Dies stellt hohe Ansprüche an die Prozessauslegung und Prozessführung beim Präzisionsschmieden.

### *Simulieren geht über Probieren*

Mit der Simulation auf Basis der Finite-Element-Methode (FEM) steht ein leistungsfähiges Hilfsmittel für die Auslegung von Präzisionsschmiedeprozessen zur Verfügung. Besonders vor dem Hintergrund der geforderten hohen Bauteilgenauigkeiten beim Präzisionsschmieden sind bei der Prozessauslegung sehr genaue Simulationsmodelle notwendig, welche im Rahmen des Teilprojekts A2 „Erweiterte Simulationsmodelle für das Präzisionsschmieden“ entwickelt werden. Die Abbildung der bisher in den FEM-Systemen nur vereinfacht berücksichtigten komplexen thermisch-mechanischen Wechselwirkungen zwischen dem Werkstück und den Werkzeugen musste daher verbessert werden. Hierfür erfolgte die Entwicklung von Ansätzen, die eine realitätsnahe Abbildung der Reibung und des Wärmeübergangs zwischen dem Werk-

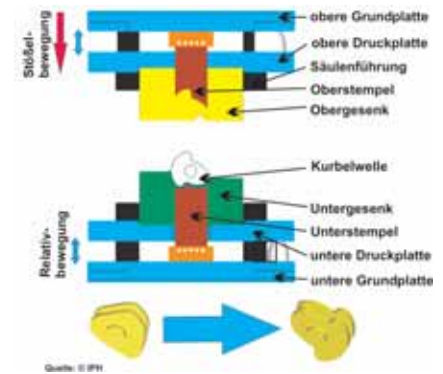
stück und den Werkzeugen gestatten. So wird eine optimale Prozessauslegung ermöglicht. Ein weiterer Punkt war die Entwicklung von Methoden zur Berechnung des Werkzeugverschleißes beim Präzisionsschmieden unter Verwendung der FEM-Simulation. Hierbei wurde das Ziel verfolgt, die Genauigkeit der geschmiedeten Bauteile sowie die Werkzeugstandmenge vorherzusagen.

### *Über Kurz oder Lang*

Das gratfreie Kurbelwellenschmieden stellt eine grundlegende Erweiterung des Produktionsverfahrens Präzisionsschmieden dar, dass erst durch die erhöhte Leistungsfähigkeit der Computertechnologie ermöglicht wurde. Durch aufwändige FEM-Simulationen können die bisherigen Lösungsansätze für die Herstellung rotationssymmetrischer Geometrien auch auf hochkomplexe, nicht rotationssymmetrische Bauteile übertragen werden. Mit den am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH im Teilprojekt B2 „Innovative Werkzeug- und Maschinentechнологien zum Präzisionsschmieden“ entwickelten Technologien rückt die Möglichkeit in greifbare Nähe, Langteile wie z.B. Kurbelwellen präzisionszuschmieden.

Die besondere Herausforderung des gratfreien Kurbelwellenschmiedens ist die stark ungleichmäßige Masseverteilung entlang der Bauteillängsachse. Um eine vollständige Formfüllung zu erreichen, ist es beim konventionellen Kurbelwellenschmieden notwendig, einen Masseüberschuss von 20 % bis 30 % der Einsatzmasse vorzuhalten. Das überschüssige Material wird als Grat zwischen den Gesenkhälften herausgepresst und muss zur erneuten Nutzung recycelt werden. Beim Präzisionsschmieden entfällt der Grat, wodurch die zum Schmieden notwendige Einsatzmasse erheblich reduziert wird.

Die Komplexität bei der Umsetzung des Präzisionsschmiedens von Langteilen erforderte eine Aufteilung des Vorhabens in drei Teilziele. Das erste Teilziel bestand in der gratfreien Herstellung einer einzelnen Wange mit einem Haupt- und Kurbelager. Diese Herausforderung konnte bereits in der Vergangenheit gemeistert werden. Das nächste Ziel bestand in der Herstellung einer vereinfachten Einzylinderkurbelwelle. Das Abschmieden der kompletten Stadienfolge einer verein-



Präzisionsschmieden ermöglicht die gratfreie Herstellung einfacher Kurbelwellen.

fachten Einzylinderkurbelwelle bestätigte die Machbarkeit auch für komplexere Langteile. Derzeit wird daran gearbeitet, die erzielbare Bauteilgenauigkeit weiter zu steigern.

Der vorerst letzte Schritt besteht in der Entwicklung eines Verfahrens zum gratfreien Schmieden mehrhubiger Kurbelwellen. Aktuell wird ein Werkzeugsystem zum Präzisionsschmieden einer Zweizylinderkurbelwelle entwickelt. Dafür wird u.a. ein Modellwerkzeug zur Analyse des Werkstoffflusses sowie der komplexen Wirkbewegungen der verwendeten Vorformwerkzeuge aufgebaut und untersucht.

### *Chancen und Nutzen*

Zu den Stärken der Entwicklungsarbeit innerhalb eines Sonderforschungsbereiches zählt die starke Vernetzung der beteiligten Projekte und der damit einhergehende Know-how-Schub für die Forschungsstellen. Im Idealfall erfolgt schon während der Forschungsphase der Transfer der gewonnenen Erkenntnisse in die Industrie. Das Potenzial beim Präzisionsschmieden von verzahnten Bauteilen und Kurbelwellen liegt für Unternehmen daher nicht nur in einem individuellen Produkt. Vielmehr bietet das Präzisionsschmieden Unternehmen die Chance, sich durch die Umsetzung eines innovativen Produktionsverfahrens am Markt individuell zu positionieren. Durch die Ergänzung der bewährten Schmiedeverfahren können den Kunden durch den Einsatz der Präzisionsschmiedetechnologie qualitativ hochwertige Produkte zu konkurrenzfähigen Preisen angeboten werden.

Helge Dähndel, Falko Schäfer, IFUM  
Axel Specker, IPH



# Härter als Stahl – Keramikeinsätze und Mehrlagenbeschichtungen zur Gesenkverschleißreduzierung

Schmiedegesenke unterliegen während der Umformung komplexen Belastungskollektiven aus thermischen, mechanischen und tribologischen Beanspruchungen. Der dadurch verursachte Verschleiß kann mit Keramik-Metall-Verbunden und modernen Beschichtungstechnologien drastisch reduziert werden.

## Wo es anderen zu heiß wird

In den Randbereichen der Matrizenzähne konventioneller Stahl-Gesenke kommt es aufgrund hoher Schmiedetemperaturen mit steigender Zyklenzahl zu unerwünschten Anlasseffekten, die dadurch einen verstärkten Verschleiß bewirken. Keramische Werkstoffe besitzen, bedingt

durch ihren atomaren Aufbau, nicht dieses Verhalten. Die logische Folgerung wäre, Matrizen vollständig aus Keramik zu fertigen. Gegen diese Vorgehensweise spricht jedoch das spröde Materialverhalten, sowie die kostenintensive Herstellung dieser Bauteile. Ein erfolgversprechender Lösungsansatz bietet sich hier durch die Verwendung von Werkstoffverbunden an, indem in den hoch beanspruchten Zonen Keramikverstärkungen in das Stahlwerkzeug integriert werden.

zeichnet sich gegenüber Stahl durch eine hohe Korrosions- und Verschleißbeständigkeit aus, gleichzeitig ist es thermisch hoch belastbar. Dem gegenüber steht die fehlende Duktilität, die wiederum der Stahl aufweist. Neben der Zusammenstellung angepasster Werkstoffe nimmt die Auswahl eines geeigneten Fügeverfahrens eine wichtige Rolle ein.



Armierte Matrize mit eingelöteten Keramikzylindern zum Präzisionsschmieden von geradzahnten Modellzahnradern.

## Werkstoffe für den Anwendungsfall

Die anwendungsgerechte Auslegung von Verbundwerkzeugen erfolgt unter Beachtung der Werkstoffeigenschaften der Verbundpartner und konstruktiver Kriterien, unterstützt durch Finite-Elemente-Berechnungen. Aus der großen Vielfalt verfügbarer Werkstoffe lassen sich auf den Anwendungsfall speziell abgestimmte Kombinationen auswählen. Siliziumnitrid

## Auf die Verbindung kommt es an

Aktivlötten als stoffschlüssiges Fügeverfahren für Keramik-Metall-Verbunde nimmt in der Praxis zunehmend eine stärkere Rolle ein. Dies trifft besonders dann zu, wenn die Verbundpartner aufgrund geometrischer Abmessungen oder hoher Komplexität nicht mehr mit konventionellen Mitteln, wie Schrauben, Klemmen oder Schrupfen, gefügt werden können. Dabei kommen dem Lot wichtige Aufgaben zu. Zum einen muss es in der Lage sein, Spannungen abzubauen zu können,

die während des Lötprozesses durch die stark abweichende Wärmedehnung von Metall und Keramik entstehen, zum anderen muss es die Benetzung der Keramik gewährleisten. Aktivlote besitzen reaktive Komponenten, wie Titan, Zirkonium oder Hafnium, die mit der Keramikoberfläche chemisch in Wechselwirkung treten und dabei eine sog. Reaktionszone bilden, die verantwortlich für die Benetzung der Keramik ist und die Erzeugung des geforderten Verbundes ermöglicht. Typische Lote für das Fügen basieren vorwiegend auf Elementen, wie Gold, Silber und Kupfer.

### *Fügen unter extremen Bedingungen*

Der Lötprozess findet im Hochvakuum bei Temperaturen von über 950 °C statt und wird somit dem Hochtemperaturlöten zugeordnet. Die Prozessführung unter Vakuum ist erforderlich, damit die Aktivelemente nicht zu Oxiden reagieren und dadurch ihre Funktion verlieren. Fixierhilfsmittel, die sog. Lötlehren, sorgen für eine exakte Positionierung der keramischen Einsätze während des gesamten Fügevorganges.

Gesenke werden im Zuge ihrer Produktion mehrfachen Temperaturbehandlungen zum Härten und Anlassen unterzogen. Durch eine angepasste Werkstoffauswahl und Parameteranpassung ist es möglich, das Fügen mit dem Härten zu kombinieren, wenn eine sehr schnelle Abkühlung aus der Lötwärme vorgenommen werden kann. Integriert man zusätzlich die Anlasszyklen in das Temperaturprogramm, liegt nach einem einzigen Ofenprozess oftmals ein direkt einsetzbares Verbundwerkzeug vor.

### *Schleifen zur fertigen Geometrie*

Keramikverstärkte Gesenke benötigen hohe Geometriegenauigkeiten und Oberflächengüten, die nur mittels einer Schleifbearbeitung erreicht werden können. Dabei müssen Stahl und Keramik verfahrensbedingt in einem Prozessschritt mit demselben Schleifwerkzeug bearbeitet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften stellt die spanende Bearbeitung des Verbundes zur Herstellung der Oberflächengeometrie eine große Herausforderung dar. Während Stahl-Gesenkgrundkörper duktil sind, handelt es sich bei Keramik, die zur Verstärkung eingesetzt wird, um ein sprödhartes Material. Aus den Materialeigenschaften der Verbunde resultieren

unterschiedliche Verschleißmechanismen am Schleifwerkzeug, die der Einhaltung der Qualitätsanforderungen des Gesenkes entgegenstehen.

### *Angepasste Schleifwerkzeuge für Keramik und Stahl*

Zur Entwicklung eines angepassten Schleifverfahrens wurden die Verschleißursachen und -mechanismen analysiert, die bei der Bearbeitung von Stahl-Keramik-Verbunden mit hochharten Schleifstoffen auftreten. Der Schwerpunkt der technologischen Untersuchungen lag in der Reduzierung und Ausgleichung des Werkzeugverschleißes, der hauptsächlich durch die beim Schleifen von Stahl entstehenden Späne verursacht wurde. Um Möglichkeiten der Verschleißreduzierung zu untersuchen, wurden Schleifwerkzeuge mit unterschiedlicher Bindungshärte und Korngröße eingesetzt. Neben der Werkzeugspezifikation wurde auch der Einfluss der Prozessparameter auf das Verschleißverhalten ermittelt.

Durch gezielte Werkzeug- und Prozessauslegung wurde ein gleichmäßiger Verschleiß bei der Schleifbearbeitung von beiden Verbundpartnern erreicht. Aufbauend auf den experimentell ermittelten Zusammenhängen zwischen System- und Stellgrößen wurden Modelle der thermischen und mechanischen Werkzeugbelastung entwickelt. Die gewonnenen Ergebnisse werden auf das keramikverstärkte geradzahnte Modellschmiedegesenk übertragen. Die Bearbeitung des Gesenkes wird auf einer 5-Achsen-Schleifmaschine mit einem Schleifarm durchgeführt, der aufgrund der geometrischen Bedingungen bei der Schleifbearbeitung der innenverzahnten Schmiedegesenke entwickelt und in die Maschine integriert wurde.

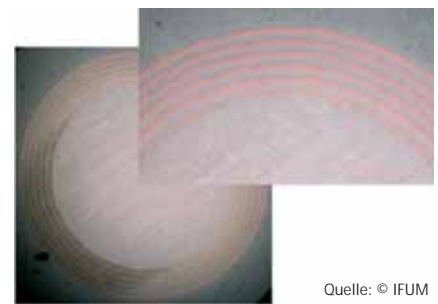
### *Schlag auf Schlag*

Die Keramik-Metall-Verbundgesenke zeichnen sich beim Schmieden durch eine hohe Verschleißfestigkeit aus. Nach 500 Schlägen konnte kein Materialabtrag der Matrizen beobachtet werden. Somit konnten die Matrizen ihre Eignung für den Anwendungsfall des Präzisions Schmiedens mit guten Ergebnissen unter Beweis stellen.

### *Dünne Schichten mit hartem Charakter*

Neben dem Einsatz von gefügten Werkstoffverbunden lässt sich auftretender

Verschleiß durch den Auftrag von Mehrschichtsystemen effektiv reduzieren. Dabei werden dünnste Einzelschichten in einem plasmaunterstützten CVD-Prozess mit variiertem Härte mehrfach übereinander auf dem Stahlbauteil abgeschieden. Auch bei diesem Konzept wird die notwendige Stützfunktion durch den Stahl gewährleistet, während das Schichtsystem auf der Basis von Titancarbid, -carbonitrid und -nitrid der Oberfläche eine hohe Verschleißfestigkeit verleiht. Resultierend konnte mit diesen Mehrschichtsystemen auf nitrierten Matrizen zum Schmieden von Zahnrädern mit Schrägverzahnung der auftretende Verschleiß um den Faktor 3,5 gesenkt werden.



Mehrlagenbeschichtung TiC-TiCN-TiN im Kalottenschliff (Gesamtdicke 1,8 µm).

### *Werkstoffverbunde – Ein Trend für die Zukunft*

„Sämtlichen an ihn gestellten Forderungen, kann ein einzelner Werkstoff meist nicht mehr gerecht werden. Jedoch liegen in der Kombination verschiedenster Werkstoffe große Potenziale, die es auszunutzen gilt.“ stellt Prof. Dr.-Ing. Fr.-W. Bach, Leiter des Instituts für Werkstoffkunde der Universität Hannover, fest. Gleichzeitig ist auch der herrschende Kostendruck innerhalb der Industrie mit in diese Forderung einzubeziehen.

Ein Werkzeug hat in verschiedenen Bauteilzonen abweichende Anforderungsprofile. Durch die Ausnutzung verschiedener Werkstoffe in Form von Verbunden kann neben der Anforderungserfüllung zusätzlich der Einsatz kostenintensiver Werkstoffe auf ein Minimum reduziert oder sogar gänzlich vermieden werden. Gleiches gilt für den Einsatz moderner Beschichtungstechnologien, wie dem Thermischen Spritzen, den Dünnschichtprozessen oder dem Auftragschweißen und -löten.

Todd Alexander Deißer, IW

Aziz Huskic, IFUM

Alexey Karyazin, IFW



# Außen hart und Innen weich – Randschichtvergüten durch Zweiphasenspray

Durch eine Wärmebehandlung aus der Umformwärme lässt sich die herkömmliche Prozesskette zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen verkürzen, um damit Kosten und Energie einzusparen. Das Randschicht-härten von Zahnrädern aus der Schmiedewärme ist ein solches Verfahren, bei dem Vergütungsstähle mittels eines Zweiphasen-Sprays abgeschreckt werden.

## *Schmiedewärme effektiv genutzt*

Die herkömmliche Prozesskette zur Herstellung von Schmiedeteilen wie Zahnrädern ist gekennzeichnet durch eine große Anzahl an Prozessschritten. Dazu zählen:

- der Schmiedevorgang,
- folgendes Abkühlen,
- Transport,
- spanende Bearbeitung zur Erzeugung der Verzahnungsgeometrie,
- Transport zur Härterei,
- Erwärmen und Aufkohlen der Bauteilrandschicht,
- Abschrecken,
- Anlassen zur Einstellung einer gewünschten Duktilität und Härte,
- Transport sowie eine abschließende Hart-Fein-Bearbeitung der Verzahnungsoberfläche.

Zeitintensiv bei dieser Prozesskette ist insbesondere die Tatsache, dass das

Schmiedeteil mit einer oft notwendigen Pufferlagerung von Prozessschritt zu Prozessschritt transportiert werden muss. Zudem ist diese Prozesskette energieintensiv, da zunächst ein Schmiederohling für die Umformung auf 1200°C, danach das Schmiedeteil zum Abschrecken in der Härterei auf ca. 800°C und schließlich zum Anlassen auf ca. 200-500°C erwärmt wird.

Eine Verknüpfung von Präzisionsschmieden und Wärmebehandlung erlaubt nun, diese Prozesskette erheblich zu verkürzen. Nach dem Präzisionsschmieden liegen Bauteile einer hohen Geometrie-genauigkeit vor, so dass die spanende Bearbeitung entfallen kann. Dies bedeutet zugleich, dass die Wärmebehandlung direkt aus der Schmiedewärme erfolgen kann. Die in der herkömmlichen Prozesskette verwendeten Einsatzstähle werden dazu durch Vergütungsstähle substituiert, da für diese ein Aufkohlen vor dem

Härten nicht nötig ist. Das Abschrecken wird am Institut für Werkstoffkunde (IW) durch eine Zweiphasenströmung, das heißt ein Wasser-Luft-Spray, realisiert, damit der Wärmeübergang beim Abkühlen flexibel gestaltet werden kann.

Mit dem eingesetzten Sprayfeld kann durch die Steuerung des Abkühlverlaufes ein Anlassen aus der Restwärme durchgeführt werden, so dass die drei energieintensiven Wärmebehandlungsschritte der konventionellen Prozesskette durch einen einzigen ersetzt werden.

## *Fein vernebelt*

Das Sprayfeld ist in die Teile Düsenfeld, Wasser- und Luftzufuhr sowie Steuerung aufgeteilt. Das Düsenfeld besteht aus einer Grundplatte und den darauf kreisförmig angeordneten Zweistoffdüsen. Die Düsen sind so angeordnet, dass sich die Spraykegel im Zentrum dieses Kreises

schneiden. Im Mittelpunkt befindet sich das Zahnrad, das während der Abkühlung durch einen 3-Backengreifer fixiert und mit einem Schrittmotor gedreht wird. Die Düsen sind separat auf Schlitten montiert, so dass der Abstand zur Werkstückoberfläche stufenlos variabel ist. Es handelt sich um Überdruck-Zweistoffdüsen mit innerer Mischung. Sie zeichnen sich durch hohe Tropfengeschwindigkeiten und ein gleichmäßiges Spritzbild aus. Durch das Zerstäubungsgas Pressluft besteht die Möglichkeit, Tropfengröße und -geschwindigkeit gezielt zu beeinflussen.

Zudem lassen sich die Parameter des Sprayfeldes wie:

- Teilung des Düsenfeldes,
- Abstand der Düsen vom Werkstück,
- Wasserdruck,
- Luftdruck,
- Rotationsgeschwindigkeit des Bauteils,

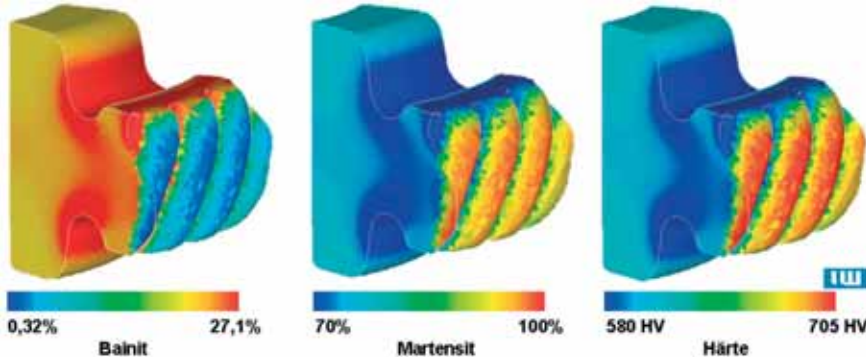
variabel einstellen.

Die Anlage wird über einen handelsüblichen PC mit Windows 2000 als Betriebssystem betrieben. Als Benutzerschnittstelle dient die Software DASYSLab®. Über die Steuerung von Druckluft und

dewärme mit dem Zweiphasenspray ist durch viele Prozessparameter gekennzeichnet. Deshalb sind umfangreiche Versuchsreihen notwendig, um die optimalen Prozessparameter zu ermitteln. Zur Unterstützung der Prozessauslegung wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches in Abhängigkeit der Bauteilabkühlung Gefügewandlungen mit daraus resultierenden Eigenschaften wie der Härte, Zugfestigkeit und Dehngrenze berechnet. Für die Berechnungen werden Umformgrad und Temperaturfeld vom Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) zur Verfügung gestellt. Der Simulation lag eine abgestufte Abkühlung durch das Spray zu Grunde. In der Verzahnung bildet sich ein Gefügegradient heraus. Während die Zahnköpfe nahezu vollständig aus hartem Martensit bestehen, hat sich mit zunehmenden Abstand von der Verzahnung mehr und mehr der weichere Bainit gebildet.

#### Härte-Prognosen

Das Wasser-Luft Spray, das bei diesem Verfahren zur Anwendung kommt, bietet eine gute Einstellbarkeit der Wärmeübergangsbedingungen an der zu kühlenden Bauteiloberfläche. Mit Hilfe der Simu-



Simuliertes Gefüge nach dem Härten im Sprayfeld.

Wasser durch die entsprechenden Ventile kann das Spray gezielt beeinflusst und ein reproduzierbarer Abkühlvorgang erzielt werden. Um den Prozess zu automatisieren, wurde ein Roboter in die Anlage integriert. Der Roboterarm transportiert das ca. 1000°C warme Zahnrad von der Schmiedepresse in das Sprayfeld, und legt es nach dem Härten an einer definierten Position ab. Dadurch ist ein effizienter und schneller Ablauf der integrierten Wärmebehandlung gegeben.

#### Simulation von Prozessen

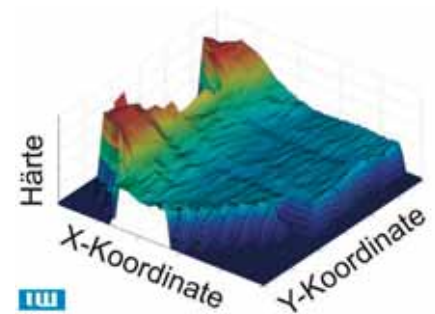
Die Erzeugung einer gehärteten Randschicht von Zahnradern aus der Schmiedewärme mit dem Zweiphasenspray ist durch viele Prozessparameter gekennzeichnet. Deshalb sind umfangreiche Versuchsreihen notwendig, um die optimalen Prozessparameter zu ermitteln.

Zur Unterstützung der Prozessauslegung wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches in Abhängigkeit der Bauteilabkühlung Gefügewandlungen mit daraus resultierenden Eigenschaften wie der Härte, Zugfestigkeit und Dehngrenze berechnet. Für die Berechnungen werden Umformgrad und Temperaturfeld vom Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) zur Verfügung gestellt. Der Simulation lag eine abgestufte Abkühlung durch das Spray zu Grunde. In der Verzahnung bildet sich ein Gefügegradient heraus. Während die Zahnköpfe nahezu vollständig aus hartem Martensit bestehen, hat sich mit zunehmenden Abstand von der Verzahnung mehr und mehr der weichere Bainit gebildet.

lationsergebnisse und der ermittelten Spraycharakteristik können Parameter ermittelt werden, die einen Gefüge- und Härteverlauf erzeugen, der dem Beanspruchungsprofil von Zahnradern gerecht wird. Durch die Aufnahme von Temperatur-Zeit-Profilen an verschiedenen Stellen des Zahnrades können mit Hilfe von so genannten ZTU (Zeit-Temperatur-Umwandlung)-Schaubildern Vorhersagen über das entstehende Gefüge und die daraus resultierende Härte getroffen werden. Durch die Realisierung unterschiedlicher Druck-Zeit-Profile von Wasser und Luft kann die Einhärtungstiefe im Bauteil gezielt und reproduzierbar variiert werden. Ein Anlassen aus der im Bauteil verbliebenen Restwärme kann zusätzlich zu einer Energieeinsparung beitragen.

#### Langteile im Sprayfeld

Basierend auf den Ergebnissen der letzten Jahre soll die Anwendung dieses Verfahrens zukünftig für Langteile untersucht werden. Im speziellen sind das eine Einzylinderkurbelwelle und eine Ritzelwelle. Beide Bauteile sollen bzw. wurden bereits im Rahmen des SFB 489 durch Präzisionsschmieden hergestellt. Es besteht bereits ein Entwurf für ein Sprayfeld, das für Langteile geeignet ist. Bei der Wärmebehandlung dieser Schmiedeteile sollen die Spraycharakteristik bestimmt und Simulationen durchgeführt werden, um den Versuchsaufwand zu mi-



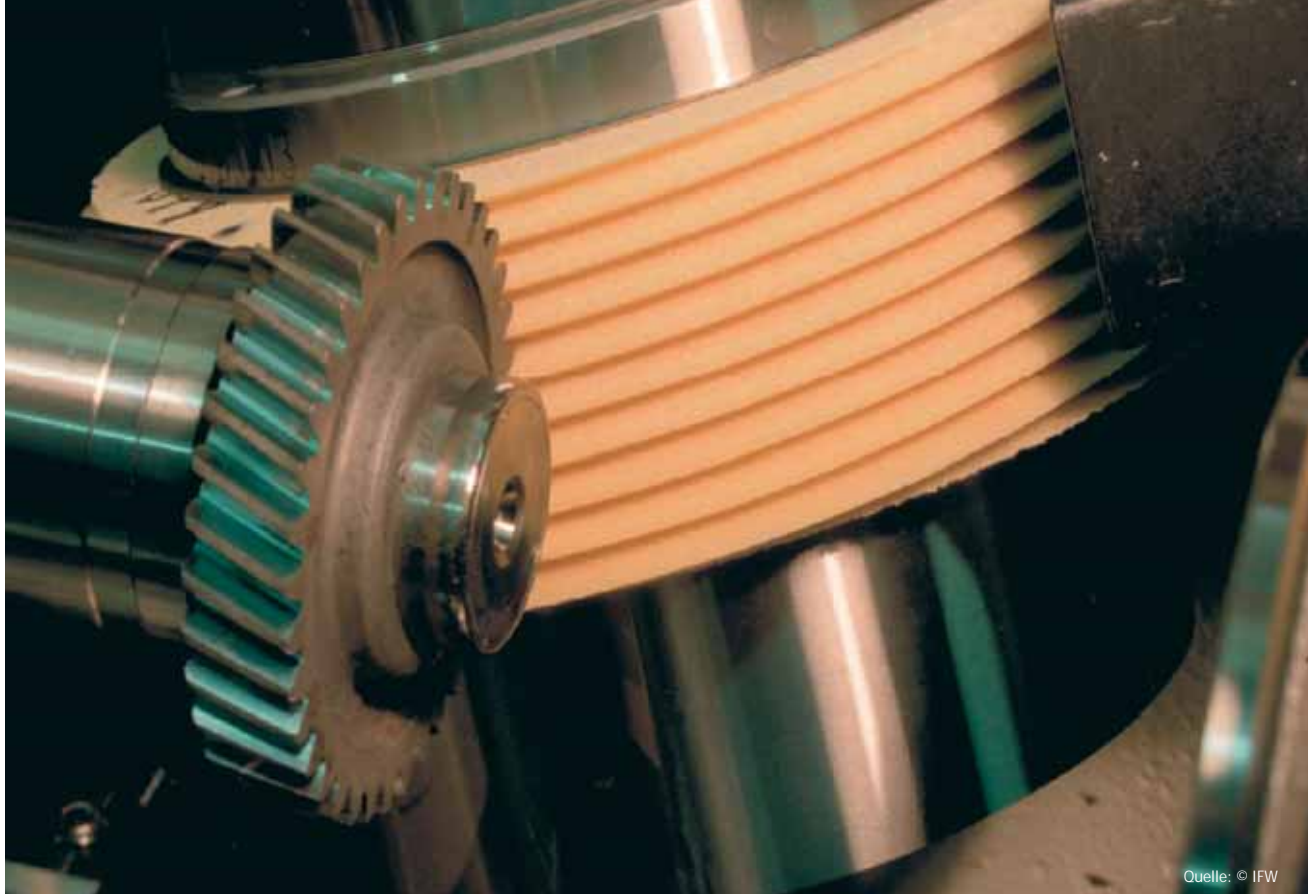
Härteverteilung eines im Sprayfeld gehärteten Zahnrades.

nimieren. Neben der Simulation des Temperaturverlaufes und des entstehenden Gefüges bei der Wärmebehandlung sollen zukünftig numerische Berechnungen von Eigenspannung und Verzug realisiert werden. Auf diese Weise können neben den metallurgischen und thermomechanischen Aspekten auch Aussagen über die entstehende Bauteilqualität getroffen werden.

Durch eine starke Verzahnung mit den anderen Projekten des Sonderforschungsbereiches sollen Erkenntnisse über Verzüge, Härte und die daraus resultierende Dauerfestigkeit gewonnen werden.

Durch eine Randschichtvergütung aus der Schmiedewärme mittels eines Zweiphasensprays lassen sich komplexe Schmiedebauteile mit niedrigem energetischen Aufwand wärmebehandeln. Die vergütete Randschicht zeichnet sich durch eine hohe Verschleißbeständigkeit bei geringen Verzügen aus.

Mirko Schaper, Florian Nürnberger, Christian Krause, IW



Quelle: © IFW

## *Hartfeinbearbeitung – Clever Positionieren und dann kommt der letzte Schliff*

Trotz der zunehmenden Verbreitung stufenloser Schaltgetriebe im Automobilbau ist das Zahnrad weiterhin ein wichtiges Bauteil für die Leistungsübertragung. Daher werden an der Universität Hannover innovative Prozesse zur Zahnradfertigung entwickelt und erforscht.

Der letzte und qualitätsbestimmende Schritt in der Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder ist die Hartfeinbearbeitung. Die geringen Bearbeitungsaufmaße aus dem Präzisions schmiedeprozess stellen einen technologischen Fortschritt dar und erlauben eine deutliche Reduzierung der Bearbeitungszeit. Diese Bearbeitungsaufmaße weisen heute noch Schwankungen auf,

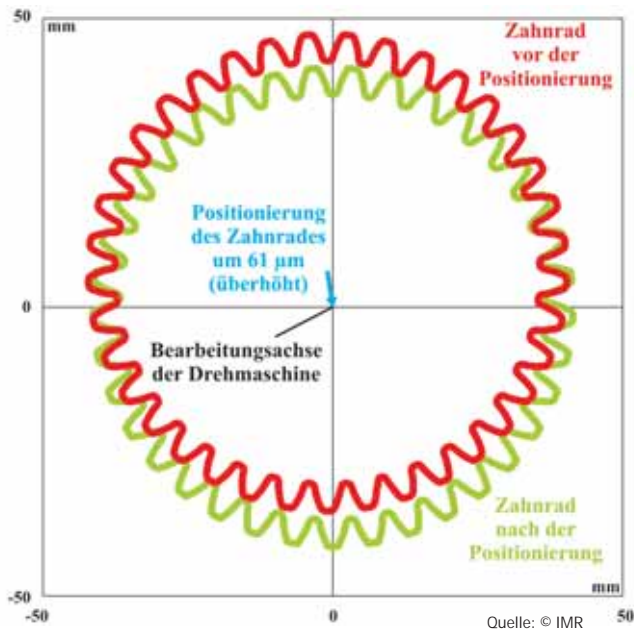
welche in der Hartfeinbearbeitung zu nicht konstanten Zeitspannvolumina und somit zu unterschiedlichen Bearbeitungskräften führen. Darüber hinaus treten wechselnde Werkzeug- und Werkstückverlagerungen sowie unterschiedliche Randzoneneigenschaften aufgrund variierender thermischer und mechanischer Belastungen auf. Diese Auswirkungen auf den Schleifprozess, die aus den Schwan-

kungen des Bearbeitungsaufmaßes entstehen, können durch eine Feinpositionierung der Zahnräder reduziert werden.

### *Perfekt positionieren*

Bei präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern befindet sich aufgrund der Werkzeugverlagerungen die geschmiedete Mittenbohrung nicht genau

zentrisch zur Verzahnung, sondern weicht um einige Mikrometer von der idealen Lage ab. Da die Mittenbohrung zur Aufspannung der Zahnräder beim anschließenden Schleifen dient, kann diese geringe Lageabweichung von bis



Das perfekte Positionieren des Zahnrades stellt die Übereinstimmung von Mittenbohrung und Bearbeitungsachse der Drehmaschine sicher.

zu 80 µm schon ausreichend sein, dass die Verzahnung nicht mehr vollständig geschliffen wird.

Um diese Lageabweichung aufzuspüren, wird seitens des Instituts für Mess- und Regelungstechnik (IMR) eine optische Messtechnik eingesetzt. Damit wird in kürzester Zeit die Verzahnung in einem Schnitt gemessen. Ausgehend von diesen Messdaten wird mit am IMR entwickelten Algorithmen die Lage der Verzahnung zur Bearbeitungsachse der Drehmaschine bestimmt. Als Ergebnis wird die Verschiebung des Zahnrades berechnet, um die Verzahnung konzentrisch zur Bearbeitungsachse positionieren zu können.

#### An der richtigen Stelle drehen



Das präzise Hartdrehen der Mittenbohrung des Zahnrades ermöglicht die anschließende Schleifbearbeitung der Verzahnung.

Für die Positionierung müssen geeignete Spann- und Positioniersysteme bereit gestellt werden. Dazu wurde am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) eigens ein Präzisionsspannfutter entwickelt und aufgebaut. In dieses

Präzisionsspannfutter sind modernste technische Antriebssysteme integriert, die ein optimales Übertragungsverhalten besitzen und damit eine hochgenaue Führung erlauben. Weiterhin wird eine hochkompakte Aktorik eingesetzt. Dadurch ist ein platzsparender Aufbau möglich, mit Hilfe dessen die exakte Positionierung des Zahnrades in der Drehmaschine durchgeführt wird.

Sobald das Zahnrad konzentrisch zur Bearbeitungsachse der Drehmaschine positioniert ist, wird die Mittenbohrung in einem Hartdrehprozess bearbeitet. Damit befindet sie sich nun genau in der Mitte des Zahnrades und kann für die nachfolgende Hartfeinbearbeitung als Referenz genutzt werden.

#### Der letzte Schliff

Die Hartfeinbearbeitung als abschließender und damit qualitätsbestimmender Schritt soll die Herstellung hochwertiger, einbaufähiger präzisionsgeschmiedeter Zahnräder ermöglichen. Dabei ist eine Reduzierung der Bearbeitungszeit der entscheidende Faktor, um einen wettbewerbsfähigen Prozess zur Verzahnungsherstellung anbieten zu können.

Das Verfahren des kontinuierlichen Wälzschleifens von Verzahnungen weist eine hohe Mengenleistung auf und eignet sich damit für den Einsatz in der Massenproduktion. Die Leistung des Verfahrens kann durch den Einsatz des verschleißfesten kubisch-kristallinen Bornitrids (im Folgenden: CBN, aus dem Englischen cubic boron nitride) als Schleifstoff weiter erhöht werden. Damit können die bei präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern auftretenden Aufmaßschwankungen optimal

ausgeglichen und die Profilhaltigkeit des Werkzeugs gewährleistet werden.

Bisher wurde CBN nur in einlagigen, galvanisch gebundenen Schleifscheiben eingesetzt. In Verbindung mit einem keramischen Bindungsmaterial ergibt sich der größte Vorteil des Nachprofilierens in der Maschine. Der Einsatz dieses Bindungssystems in Kombination mit dem CBN-Schleifstoff konnte bisher beim Wälzschleifen aufgrund nicht geeigneter Abrichttechnologie nicht realisiert werden. Dieser Problematik wurde sich am IFW angenommen. Daraufhin wurde die Abrichttechnologie für keramisch gebundene CBN-Wälzschnecken entwickelt und untersucht. Hierdurch ist es möglich, die Schleifscheibentopographie durch die Wahl geeigneter Abrichtparameter der



Erst das perfekte Zusammenspiel aller Prozesse ermöglicht es, hochwertige präzisionsgeschmiedete Zahnräder herzustellen.

Bearbeitungsaufgabe anzupassen und somit abrichtbare CBN-Wälzschnecken zur Herstellung von Verzahnungen einzusetzen. Unter diesen Umständen kann die Schleifleistung erhöht und somit die Bearbeitungszeit pro Bauteil entsprechend reduziert werden, ohne die Bauteilqualität dadurch negativ zu beeinträchtigen.

#### Hand in Hand zum Ziel

Der Sonderforschungsbereich „Präzisionsschmieden“ beschäftigt sich nicht nur mit einzelnen Prozessen, sondern vielmehr mit der ganzheitlichen Betrachtung der Prozesskette. Daher werden auch die hier beschriebenen Prozesse Messen, Positionieren, Drehen der Mittenbohrung und Schleifen der Verzahnung im Rahmen dieser Prozesskette behandelt. Nur durch das Zusammenwirken der einzelnen Fertigungsschritte wird es möglich, qualitativ hochwertige Zahnräder zu fertigen, die auch höchsten Belastungen stand halten. Fausto Catoni, Jochen Immel, IFW Rainer Haase, IMR



# Qualität Zahn um Zahn – Messtechnik in der Prozesskette Präzisionsschmieden

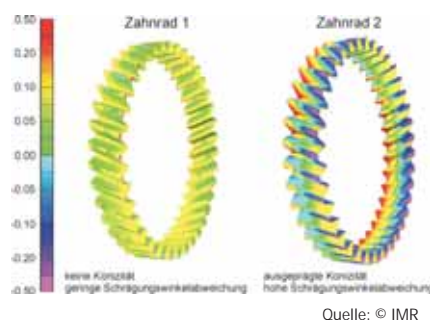
Eine verkürzte Prozesskette „Präzisionsschmieden“ erfordert neben stabilen Fertigungsprozessen eine schnelle und gründliche Qualitätsprüfung der gefertigten Bauteile. Qualitätsmerkmale wie Formabweichung, Härteeigenschaften und Betriebsfestigkeit von Zahnrädern werden erfasst, bewertet und zur Optimierung der Fertigungsprozesse genutzt.

Durch eine integrierte Bauteilprüfung zur Prozessüberwachung und Prozessregelung eröffnen sich neue Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Fertigung von hoch beanspruchten Maschinenbauteilen hoher Qualität. Die prozessintegrierte objektive Erkennung und Überwachung relevanter Bauteileigenschaften im Prozessablauf ist dabei von wesentlicher Bedeutung für die Prozesssteuerung und Erreichung einer hohen Prozesssicherheit.

## *In Form oder nicht in Form*

Für eine zuverlässige Regelung der im Rahmen des SFB 489 aufgebauten Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile ist eine fertigungsnahe Geometrieprüfung der Zwischenprodukte unerlässlich. Die Charakterisierung der Geometrieinformatio-

nen gibt Aufschluss über die Art und Ausprägung der Abweichungen und liefert somit die Ist-Daten zur Prozessregelung. Auf diese Weise können beispielsweise



Dreidimensionale Darstellung der Verzahnungsabweichungen.

der Verschleiß der Umformwerkzeuge oder Formfehler infolge der integrierten Wärmebehandlung detektiert werden.

Die bei den präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern auftretenden typischen prozessbedingten Geometriefehler besitzen eine vollkommen andere Systematik als die Fehler, die bei rein spanend gefertigten Zahnrädern auftreten. Durch die Abformung im Schmiedegesenk entstehen individuelle und zufällig über der Verzahnung verteilte Geometrieabweichungen, wodurch eine flächenhafte Messung aller Zähne des Zahnrades notwendig wird. Die in der konventionellen Verzahnungsmessung übliche linienhafte Erfassung der Zahnflanken ist hier unzureichend, da so lokale Fehlstellen nicht sicher erkannt werden.

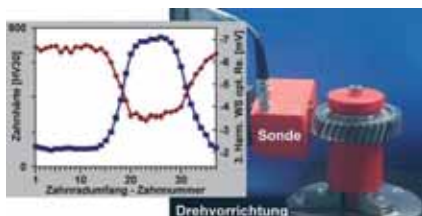
Für eine schnelle und flächenhafte Erfassung der gesamten Verzahnungsgeometrie der präzisionsgeschmiedeten Zahnräder wurde ein optisches Zahnrad-

messsystem auf Basis der Streifenprojektionstechnik entwickelt und aufgebaut. Durch die optische und flächenhafte Messung wird zum einen eine Analyse der gesamten Verzahnungsgeometrie ermöglicht, zum anderen werden die Prüfzeiten, verglichen mit der konventionellen Zahnradmessung, drastisch reduziert.

Die Ergebnisse der optischen Geometrieprüfung der präzisionsgeschmiedeten Zahnräder lassen sich besonders übersichtlich in Form von dreidimensionalen Abweichungsbildern darstellen. Durch diese Darstellung wird bereits eine qualitative Bewertung der Verzahnungsabweichungen ermöglicht. Insbesondere können die für das Präzisionsschmieden typischen lokalen und zufällig verteilten Geometrieabweichungen sowie temperaturbedingte systematische Abweichungen leicht erkannt werden. Eine quantitative Analyse der Geometriefehler kann mit Hilfe der im Rahmen des Projektes entwickelten flächenbasierten Kenngrößen geschehen.

#### *Harte Schale, weicher Kern*

Die Gewährleistung einer hohen Verschleiß- und Dauerfestigkeit hoch beanspruchter Verzahnungen erfordert gra-



Quelle: © IW

Einzelzahn-Härteprüfung - Fehlhärtung eines Zahnrades.

dierte Werkstoffeigenschaften im Zahn. Dieses sind eine harte verschleißfeste Randzone mit einer beanspruchungsorientierten Einhärtungstiefe unter Druckeigenschaften und ein duktiler hochfester Zahnkern, der die Zahnlast überträgt. Durch eine integrierte Wärmebehandlung der präzisionsgeschmiedeten Zahnräder aus der Schmiedewärme werden die geforderten Werkstoffeigenschaften im Bereich der Verzahnung mittels einer am Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover (IW) neu entwickelten Wasser-Luft-Spraykühlung eingestellt. Die geforderte Profilierung und Oberflächengüte der Zähne wird durch eine anschließende Hartfeinbearbeitung in der Prozesskette erreicht.

Die Qualitätsanforderungen an die Zahnräder erfordern eine Prüfung der Harteigenschaften der Verzahnung in der Prozesskette, um über eine Prozessregelung zu einer Qualitätssicherung zu kommen. Bei Hochleistungsbauteilen aus ferromagnetischen Werkstoffen bieten sich zerstörungsfreie magnetinduktive Prüfverfahren wie die Wirbelstromtechnik in Kombination mit der Harmonischen-Analyse zur Bestimmung von Materialkennwerten an. „Wir haben mit der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen am Institut für Werkstoffkunde (IW) eine Prüftechnik entwickelt, mit der wir zerstörungsfrei, präzise und schnell Härtekennwerte von Zahnradern ermitteln können“ betont Dr. Reimche, Leiter des Bereichs Zerstörungsfreie Prüfverfahren am IW.

Zur Realisierung einer zerstörungsfreien prozessintegrierten Härteprüfung der Zahnräder in der Prozesskette wurde zum einen eine integrale Messsonde zur Bestimmung der Randhärte im gesamten Verzahnungsbereich und zum anderen eine Einzelzahnsonde zur Bestimmung der Einzelzahn-Randhärte und Einhärtungstiefe der Zähne entwickelt.

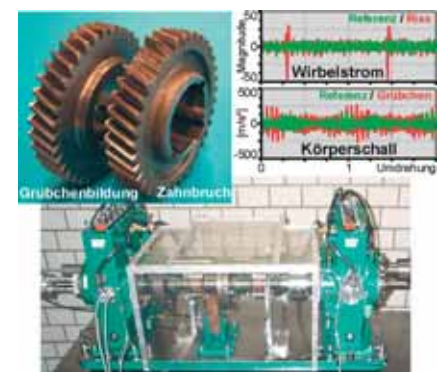
Bei der Prüfung eines konventionell gefertigten Zahnradprobensatzes konnten eindeutig einige Zahnräder als fehlerhaft identifiziert werden. Die Zahnräder mit einer Einhärtungstiefe von 0,5 mm zeigten aufgrund einer Fehlhärtung einen über dem Umfang variierenden Härteverlauf von „harten“ und „weichen“ Zähnen. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass durch eine Legierungsänderung und Wärmebehandlung hervorgerufene Gefügeveränderung in der Randzone mit Hilfe der Harmonischen-Analyse von Wirbelstromsignalen empfindlich nachgewiesen und lokale Härtekennwerte der Einzelzähne zerstörungsfrei bestimmt werden können. Außerdem wurde deutlich, dass auch bei konventioneller Fertigung von Zahnradern aus Einsatzstahl eine zerstörungsfreie Härteprüfung zur Qualitätssicherung sinnvoll ist.

#### *Unter Last bestehen*

Eine Beurteilung der Bauteileigenschaften Laufruhe, Flankentragfähigkeit und Zahnfußfestigkeit nach der Endbearbeitung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder erfordert eine Prüfung unter realistischen Betriebsbedingungen. Präzisionsgeschmiedete Bauteile werden hier mit herkömmlich gefertigten Zahnradern

verglichen, um Einflüsse des Präzisionsschmiedens, der Wärmebehandlung und der Hartfeinbearbeitung auf die Qualität und die Bauteileigenschaften beurteilen zu können. Neben der Prüfung im umlaufenden Verzahnungsprüfstand hinsichtlich Flankentragfähigkeit und Zahnfußfestigkeit lassen sich auch Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit und Geometrieabweichungen nachweisen. Dies ermöglicht anderen Teilprojekten eine Optimierung des Bauteils sowie der einzelnen Fertigungsprozesse.

Als Mittel zur Beurteilung des Lauf- und Geräuschverhaltens wird die Körperschall- und Schwingungsanalyse einge-



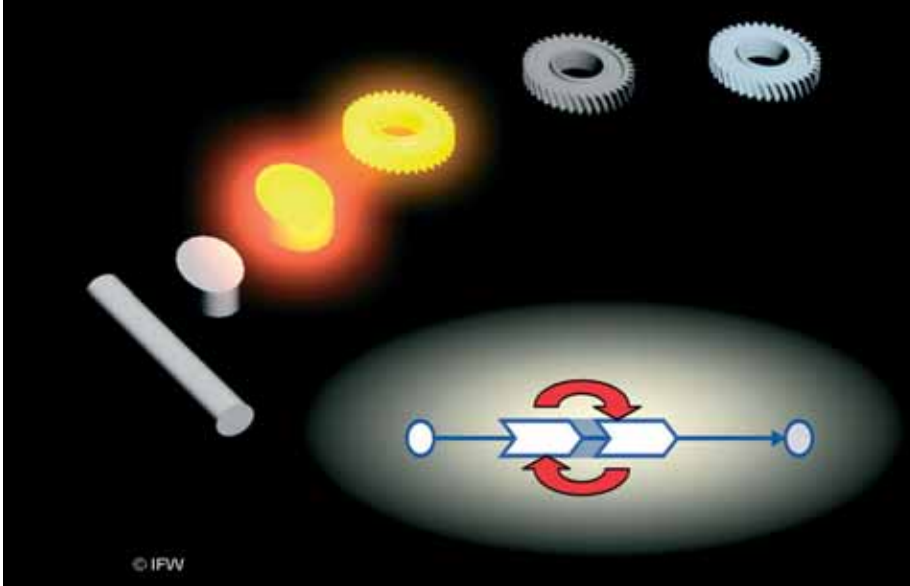
Quelle: © IW

Umlaufender Verzahnungsprüfstand.

setzt. Die Anwendung spezieller Analyseverfahren ermöglicht die Erkennung verzahnungsspezifischer Schwingungssignaturen, die Zuordnung entsprechender Anregungsursachen und erlaubt eine Klassifizierung des Bauteilzustandes. Dadurch lassen sich Schäden frühzeitig erkennen und zuordnen. Zur frühzeitigen Erkennung von Anrissen im Zahnfuß wurden Wirbelstromsensoren integriert.

Die Integration von Prüftechniken zur schnellen Geometrieerfassung und zerstörungsfreien Härteprüfung in der Prozesskette „Präzisionsschmieden schrägverzahnter Zahnräder“ sowie ein anschließender Test unter realistischer Belastung ermöglicht eine Bauteilprüfung und Optimierung der Fertigungsprozesse im Rahmen der Qualitätssicherung. Im alltäglichen Betrieb sind Zahnräder in Getrieben höchsten Belastungen ausgesetzt. Durch prozessintegrierte Prüftechniken lässt sich die Zuverlässigkeit erhöhen, schließlich ist bereits ein defekter Zahn ein defekter Zahn zuviel.

Martin Bernard, Christian Scheer, IW  
Markus Kästner, IMR



# *Prozessketten ganzheitlich planen – Kosten senken durch Auslegung technologisch-logistischer Schnittstellen.*

Die Fertigungskosten für Bauteile wie Zahnräder bewegen sich in Deutschland seit Jahren auf höchstem Niveau. Trotzdem behaupten sich inländische Produkte auf dem Weltmarkt. Als Wettbewerbsvorteile werden häufig die Produkt- und Logistikqualität der Bauteile genannt, die zukünftig mittels im SFB 489 entwickelter Planungsmethoden ausgebaut werden sollen.

Die Teilprojekte der Arbeitsgruppe Logistik des SFB 489 untersuchen Strategien und Methoden zur technologischen und logistischen Planung und Bewertung schmiedetechnischer Prozessketten. Zur wissenschaftlichen Analyse solcher Prozessketten wurden in Zusammenarbeit mit verschiedenen Unternehmen und den technologischen Teilprojekten des SFB 489 Real- und Labordaten erhoben. Ziel ist ein Vergleich konventioneller Schmiedeprozessketten mit Prozessen, in denen Präzisionsschmiedetechnik zum Einsatz kommt. Hintergrund der Methodenentwicklung ist einerseits die Optimierung technologischer Wechselwirkungen zwischen Einzelprozessen und andererseits die Implementierung logistischer Maß-

nahmen zur Bestands- und Durchlaufzeitreduzierung.

### *Planen mit konventionellen Prozessmodellen*

Der derzeitige Stand der Technik in der Prozessplanung ist eine selektive Prozessoptimierung. Eine ganzheitliche Bewertung der Fertigungsprozesskette findet nicht statt. Als Planungswerkzeuge werden Arbeitsplanungssysteme eingesetzt, mit denen Prozessketten bedarfsorientiert flexibel konfiguriert werden können. Basis dieser Konfiguration sind statische Prozessmodelle, auf die seitens der Planung, sei es auch nur zum Vermitteln von Empfehlungen für die

Prozessparametrisierung, kein Einfluss genommen werden kann. Dies bedeutet z.B. für das Präzisionsschmieden eines Zahnrades, dass vorangestellte Prozessschritte hauptsächlich an einer hohen Ausbringung gemessen werden und der Schleifprozess dahingehend ausgelegt wird, aus diesen Teilen inklusive Toleranzen Gutteile herstellen zu können. Eine ganzheitliche technologische Prozessoptimierung unter Einbindung der gesamten Prozesskette erfolgt derzeit nicht, obwohl die Notwendigkeit industriell erkannt wurde. So schreibt der Verband der Automobilindustrie in seinem Jahresbericht 2004: „...das Verständnis ist gewachsen, dass es notwendig ist, die gesamte Wertschöpfungskette zu optimieren. [...]“

Entscheidend ist daher die Frage der Optimierung des Entwicklungs- und Herstellungsprozesses innerhalb der gesamten Wertschöpfungsarchitektur und nicht nur deren einzelner Glieder.“

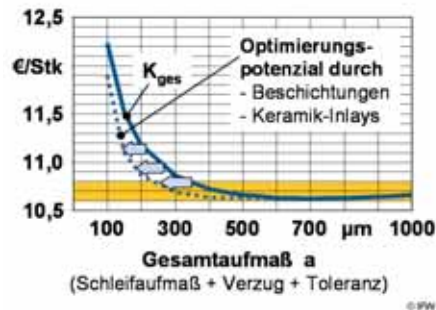
Fertigungstechnische Prozessketten bestehen aus verknüpften Einzelfertigungsprozessen. Hierbei handelt es sich sowohl um Prozesse zur Manipulation von Bauteilen als auch zur Prüfung von Zwischen- und Ergebniszuständen. Auch Transportprozesse können Teil einer fertigungstechnischen Prozesskette sein, insbesondere dann, wenn sich während des Transports der Zustand des Produkts ändert, z.B. die Temperatur oder die Oberflächenbeschaffenheit durch Oxidation. Diese Prozessketten beziehen sich im Gegensatz zu logistischen Prozessketten nicht speziell auf den Materialfluss. Es werden grundsätzlich andere Parameter betrachtet wie Temperaturen, Qualitätsmerkmale, Geometriemerkmale, Informationen usw. Es ist aber auch zulässig, logistische Parameter der Betrachtung einer fertigungstechnischen Prozesskette hinzuzufügen. Bei der „ganzheitlichen“ Planung einer fertigungstechnischen Prozesskette muss die Logistik daher mit berücksichtigt werden.

### Ganzheitlichkeit erfordert Umdenken

Bauteile mit komplexer Geometrie werden traditionell in losem Verbund in Prozessketten hergestellt. Grundlage ist häufig das Fertigungskonzept der Werkstattfertigung. Durch diese räumliche aber auch durch die im Rahmen der Kostenstellenrechnung hervorgerufene monetäre Trennung erfolgen Optimierungsmaßnahmen ausschließlich lokal. Für eine ganzheitliche Prozesskettenauslegung bedarf es eines Umdenkprozesses, an dessen Ende lokal optimierte Einzelprozesse in den Hintergrund und Modelle zur prozessübergreifenden Prozesskettenauslegung in den Vordergrund treten. Das Teilprojekt C3 des SFB 489 entwickelt Methoden und Werkzeuge zur Positionierung technologischer Schnittstellen, d.h. zur Berücksichtigung technologischer Wechselwirkungen für die Auslegung fertigungstechnischer Prozessketten.

Beispielhaft für ein Optimierungsproblem innerhalb der betrachteten Prozesskette lässt sich das Werkstückaufmaß nennen. Während auf der einen Seite die Standzeit eines Umformwerkzeuges durch tole-

riert hohe Aufmaßschwankungen verlängert wird, steigen auf der anderen Seite die Werkzeug- bzw. Werkzeugkonditionierkosten des Schleifprozesses durch eine systematische Aufmasszunahme der umgeformten Rohteile an.



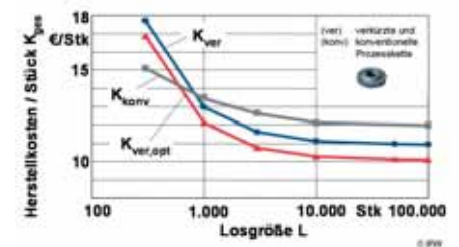
Zu eng dimensionierte Aufmaßtoleranzen führen zu geringen Standzeiten für Gesenke und hohen Herstellungskosten.

Anhand dieser Problemstellung entwickelten Wissenschaftler am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Universität Hannover (IFW) die DTI-Methode (Englisch für: design of technological interfaces) zur prozessübergreifenden Auslegung industrieller Prozessketten. Grundlage der Methode ist eine qualitative und quantitative Positionierung der technologischen Schnittstellen innerhalb einer Prozesskette. Ziel der qualitativen Positionierung ist die Reduzierung der Schnittstellenanzahl und damit einhergehend der zu betrachtenden Prozesselemente. Die quantitative Positionierung beschreibt den Prozess der Dimensionierung technologischer Übergabeparameter zwischen einzelnen Prozessschritten. Auf der Grundlage physikalischer und empirischer Zusammenhänge werden für alle Elemente der Prozesskette Prozessmodelle bestimmt. Diese Modelle werden in der Simulationsumgebung eM Plant von der Fa. UGS-Tecnomatix implementiert. Ergebnis der anschließenden Simulation sind so genannte Schnittstellenmodelle, aus denen die technologischen Wechselwirkungen zwischen einzelnen Prozesskettenelementen hervorgehen. Diese Wechselwirkungen werden algorithmisch beschrieben. Sie stellen Zielfunktionen für die spätere Optimierung dar. Die einzelnen Zielfunktionen werden mit Präferenzen versehen und gegeneinander gewichtet. Es entsteht eine Gesamtzielfunktion für die prozessübergreifende Prozesskettenauslegung.

### Synergieeffekte technologischer und logistischer Planung

Das beschriebene Vorgehen wurde prototypisch für eine Referenzprozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder implementiert. Dabei galt es über 300 technologische und ökonomische Eingangs-, Stell- und Zielgrößen zu betrachten und in einen funktionalen Zusammenhang zu bringen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden an dem Simulationsmodell evaluiert. Durch den Einsatz der beschriebenen DTI-Methode zur Prozesskettenauslegung eröffnet sich ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung der Herstellkosten um bis zu 10 % im Vergleich zu konventionell ausgelegten Prozessketten.



Die Berücksichtigung technologischer Schnittstellen eröffnet ein großes Potenzial zum Reduzieren der Herstellkosten.

Neben der Auslegung technologischer Schnittstellen mittels der DTI-Methode finden im SFB 489 umfangreiche Untersuchungen zur Verbesserung der logistischen Performance fertigungstechnischer Prozessketten statt. Im Mittelpunkt stehen dabei logistische Kennlinien zur Steuerung moderner Schmiedelinien sowie unternehmensübergreifende Lieferketten. Durch eine Zusammenführung der unterschiedlichen Methoden und Werkzeuge in naher Zukunft werden Synergieeffekte weiteres Rationalisierungspotenzial ermöglichen. Als erster Meilenstein auf diesem Weg wird für die Prozesskette Präzisionsschmieden eine Reduzierung der wirtschaftlichen Losgrößen von derzeit ca. 3000 Stück auf etwa 1000 Stück angestrebt.

Arndt Brandes, IFW



# *Alles im Griff – Ganzheitliches Logistikmanagement für die Prozesskette Präzisionsschmieden*

Liefertreue und Lieferzeit laufen bei der Schmiedeindustrie auf Grund der Turbulenzen des Käufermarktes häufig aus dem Ruder. Mit Hilfe eines ganzheitlichen Logistikmanagements basierend auf flexiblen Methoden und Modellen bekommen Schmiedeunternehmen diese Kennzahlen wieder in den Griff.

Schmiedeunternehmen stehen als Zulieferer turbulenten Marktbedingungen gegenüber, die gekennzeichnet sind durch Änderungen von Liefermengen und -terminen durch den Kunden sowie durch ein unzuverlässiges Lieferverhalten der Zulieferer. Eine innerbetriebliche Produktionsplanung und -steuerung gleicht dadurch einem Drahtseilakt und endet häufig in falschen Planvorgabewerten für die Produktion. Die Folge ist eine geringe Logistikleistung, die sich durch die Kennzahlen Liefertreue und Lieferzeit beschreiben lässt, und im heutigen Wettbewerb von keinem Kunden mehr toleriert wird. Stattdessen ist in einem solchen Fall zum Beispiel mit Umsatzeinbußen, einer Verschlechterung der Marktstellung und einem angeschlagenen Unternehmensimage zu rechnen.

## *Trotz Turbulenzen auf Kurs bleiben*

Für Zulieferer besteht die Zielsetzung darin, durch geeignete Methoden und Modelle für die Produktionsplanung, -steuerung und das -controlling eine hohe Logistikleistung trotz starker Marktschwankungen zu gewährleisten.

Die Entwicklung derartiger Methoden und Modelle war Gegenstand des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“.

Im Teilprojekt C4 „Planung und Steuerung flexibler Lieferketten zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Bauteile“ wurde hierzu ein simulationsbasiertes

Planungs-, Steuerungs- und Controllingwerkzeug (SiMPL) entwickelt, das zunächst eine Unterstützung bei der Identifizierung von Turbulenzen bietet und deren Auswirkungen auf die innerbetriebliche Produktionsteuerung und deren Parameter zeigt. SiMPL soll darüber hinaus Modelle zur Prognose des Kunden- sowie des Zuliefererverhaltens in die Produktionsplanung integrieren. Schließlich müssen die Auswirkungen der Veränderung vorab überprüft und verschiedene Szenarien in kurzer Zeit bewertet werden können. Zur Bewertung der bestehenden und zukünftigen Prozesse berücksichtigt SiMPL die im Teilprojekt C2 „Logistische Kennlinien“ entwickelten Logistischen Kennlinien. Diese ermöglichen Prozesse, Fertigungsbereiche und ganze Prozessketten bezüglich ihrer Leistung, Durch-

laufzeit und Termintreue in Abhängigkeit des Bestandsniveaus ganzheitlich zu bewerten und zu gestalten. Die Integration der Logistischen Kennlinien in SiMPL und die Betrachtung der innerbetrieblichen Prozesse bis hin zu ganzen Lieferketten führen schließlich zu einem ganzheitlichen Logistikmanagement.

### *Nervös oder überlegt?*

Basis von SiMPL ist eine modulare Materialflusssimulation, welche automatisch aus dem Produktionsprogramm und den Arbeitsplandaten eines Schmiedeunternehmens aufgebaut wird. Neben den planenden Modulen „Produktionsplanung und -steuerung“ (PPS) sowie „Monitoring“ sind die drei durchführenden Module „Zulieferer“, „Produzent“ und „Kunde“ implementiert worden. Eine Datenbank dient als Schnittstelle zwischen allen Modulen.

Das Modul „PPS“ liest aus der Datenbank Lieferabrufe, die vom Simulationsmodul „Kunde“ generiert wurden, und erzeugt terminierte Arbeitsvorgangreihenfolgen. Des Weiteren schreibt das PPS-Modul Lieferabrufe an Rohstoffen in die Datenbank, die vom Simulationsmodul „Zulieferer“ ausgelesen werden. Das Simulationsmodul „Zulieferer“ modelliert das Lieferverhalten des Rohstofflieferanten. Der Kern dieses Moduls ist ein Algorithmus, der Lieferungen in Abhängigkeit vom Lieferverhalten des Zulieferers generiert. Das Lieferverhalten des Zulieferers wird durch die mittlere Terminabweichung und die mittlere Mengenabweichung und deren Streuung von den Sollwerten beschrieben. Die Termin- und Mengenabweichungen werden dabei mit einer Normalverteilungsfunktion modelliert.

Das Simulationsmodul „Produzent“ liest die generierten Fertigungsaufträge, simuliert deren Durchführung und meldet Betriebsdaten zurück. Die Produktionsrückmeldungen werden vom Modul „Monitoring“ ausgelesen, analysiert und zu Kennzahlen zur Auswertung der Logistikleistung verdichtet. Anhand dieser Kennzahlen kann der Nutzer die Planparameter im PPS-Modul gezielt modifizieren.

Das Simulationsmodul „Kunde“ dient zur Modellierung des Bestellverhaltens der Kunden. Aufgabe dieses Moduls ist das Generieren von Lieferabrufrmatrizen. Die gebildeten Lieferabrufe und -prognosen

hängen von der in Rahmenverträgen vereinbarten Menge, der Eingangsfortschrittszahl und vom Kunden- bzw. Lieferabrufverhalten ab. Das Kundenverhalten wird durch die Parameter Nachfrageverlauf und Reaktionsverhalten modelliert. In SiMPL sind die Nachfrageverläufe „konstant“, „linear“ und „saisonal“ implementiert. Die Einstellung des Reaktionsverhaltens definiert die Antwort auf Mengenabweichungen im Zugang. Hierfür sind zwei Reaktionen „überlegtes Reagieren“ und „nervöses Reagieren“ implementiert. Ein „überlegtes Reagieren“ liegt vor, wenn der Kunde die Fehlmenge im Zugang zur nächsten Abrufmenge addiert, um somit den fehlenden Bestand auszugleichen. Demgegenüber ist ein „nervöses Reagieren“ dann gegeben, wenn der Kunde mit einer erneuten Fehlmenge rechnet und somit mehr bestellt als er tatsächlich benötigt.

### *Positionieren mit Logistischen Kennlinien*

Im Rahmen des PPS-Moduls von SiMPL kommen die entwickelten Logistischen Kennlinien zum Einsatz. Diese basieren auf der Theorie der Logistischen Kennlinien für Einzelarbeitssysteme und wurden im Rahmen des Forschungsprojekts zunächst von der Betrachtung losweiser verketteter Arbeitssysteme auf das One-Piece-Flow-Prinzip in schmiedetechnischen Prozessketten erweitert. Anschließend wurde der Untersuchungsgegenstand von der Betrachtung einzelner Ressourcen auf ganze schmiedetechnische Prozessketten mit integrierten Lagerstufen ausgedehnt.

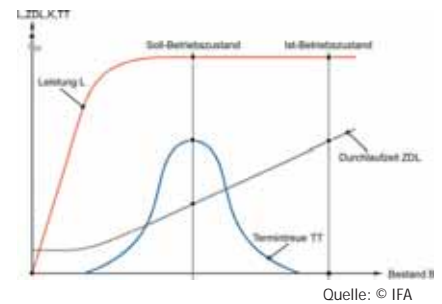


Quelle: © IFA

Von einzelnen Ressourcen bis zur vollständigen schmiedetechnischen Prozesskette des SFB 489.

Die entwickelten Logistischen Kennlinien beschreiben basierend auf mathematischen Modellen die Wirkzusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue in Abhängigkeit des qualitativen und quantitativen Bestandes. Sie ermöglichen so eine ganzheitliche logistische Positionierung schmiedetechnischer Prozessketten.

Die ganzheitliche logistische Positionierung ist die bewusste Festlegung des Wertes einer Zielgröße und die Ableitung der Werte der übrigen Zielgrößen unter Berücksichtigung der vorhandenen Wirkzusammenhänge.



Quelle: © IFA

Planung der logistischen Zielgrößen der Prozesskette durch die Methode der Logistischen Positionierung.

Für eine betrachtete schmiedetechnische Prozesskette wird dazu zunächst der Ist-Betriebszustand für die einzelnen logistischen Zielgrößen ermittelt. Anschließend lassen sich die jeweiligen Logistischen Kennlinien für die Leistung, Durchlaufzeit und die Termintreue in Abhängigkeit des Bestandes berechnen. Durch die Priorisierung einer Zielgröße, z.B. der Termintreue, wird ein Soll-Betriebszustand definiert, für den sich die übrigen Zielgrößen ableiten lassen.

Mit Hilfe der ganzheitlichen logistischen Positionierung lassen sich sowohl verschiedene Szenarien entwickeln und bewerten als auch Planparameter für die Produktionsplanung und -steuerung ableiten.

### *Logistikleistung als Marktdifferenzierungsmerkmal*

Die Kombination des simulationsbasierten Werkzeugs SiMPL mit den Logistischen Kennlinien unterstützt Schmiedeunternehmen bei der Planung und Steuerung sowie beim Controlling ihrer Lieferketten. Durch die Betrachtung aller logistischen Zielgrößen unter Berücksichtigung von Marktturbulenzen wird langfristig die Logistikleistung erhöht. Dadurch werden Unternehmen in die Lage versetzt, ihre logistische Leistungsfähigkeit als Differenzierungsmerkmal gezielt einzusetzen.

Markus Vogel, IFA

Karim Ouali, IPH

# Vorschau

Liebe *phi*-Leser,

ab dem nächsten Jahr werden nur noch 2 Ausgaben der *phi* herausgegeben. Die nächste *phi* erscheint Mitte April 2006.



## *Das Besondere im Blick – Die Sonderforschungsbereiche*

SFB 362: Fertigen in Feinblech – neue Denkansätze und Methoden für eine zukunftsorientierte Feinblechfertigung

SFB 489: Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile

SFB 516: Konstruktion und Fertigung aktiver Mikrosysteme

SFB 599: Biomedizin-Simulationen zum Wohle der Patienten

SFB 653: Gentelligente Bauteile – Genetik und Intelligenz in der Produktionstechnik

## *Beteiligte Institute*

Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Universität Hannover

**IFA**

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Universität Hannover

**IFW**

Institut für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover



Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover

**IFUM**

Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover

**IW**

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH

**IPH**

