

# Integrierte Prozessketten, eine Notwendigkeit zum Präzisionsschmieden

**Die Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile soll künftig konventionelle Fertigungsprozesse hochbeanspruchter Bauteile substituieren.**

F.-W. Bach, B. Denkena, E. Doege, E. Reithmeier, A. Henze, T. Friemuth, W. Reimche, J. C. Becker, M. Bernard, H. Dähndel, K. Meeß, C. Scheer, M. van Well

**Die Automobilindustrie hat sich den letzten Jahren zum größten Abnehmer von Produkten aus der Schmiedeindustrie entwickelt. Im Jahr 1999 wurden 29 % aller in Deutschland hergestellten Schmiedeteile in der Pkw-Industrie und weitere 15 % in der Nutzfahrzeugindustrie eingesetzt [1,2]. Für den Nutzfahrzeugbau sind Kegelräder, Schaltverzahnungen, Wellensitzverzahnungen, Rücklaufräder oder Planetenräder typische, verzahnte Präzisionsschmiedeteile, die derzeit in industriellem Umfang geschmiedet werden [3]. Hierbei ist das Präzisionsschmieden häufig mit einem Kaltkalibrieren verbunden. Als Kaltkalibrierschritt wird hier neben einem Formstauchen auch das Walzen eingesetzt. Auf diese Weise wird z. B. die Verzahnung von geradverzahnten Rücklaufrädern einbaufertig durch Umformen hergestellt. Da bei diesen Bauteilen die Verzahnung nicht mehr spanend bearbeitet wird, kann die Kontur speziell an die umformtechnische Fertigung angepasst werden. Auf diese Weise wird die Zahnfußfestigkeit bei Rücklaufrädern um ca. 15 % gesteigert. Weiterhin ergeben sich Verbesserungen der Laufeigenschaften, da durch die Änderungen der Zahngestalt die Geräuschanregung reduziert wird. Auch bei geradverzahnten Kegelrädern oder Schaltverzahnungen wird die Verzahnung bereits durch Präzisionsumformung fertiggestellt, wobei die zunehmenden Marktanteile vor allem in den verbesserten Gestaltungsmöglichkeiten begründet sind [4].**

Die Fertigung von schrägverzahnten Zahnradern ist zur Zeit noch gekennzeichnet durch eine Vielzahl von verschiedenen Fertigungsverfahren, die in einer langen Prozesskette aufeinander folgen. So sind beispielsweise für die Herstellung eines Pkw-Gangrades mindestens 8 Fertigungsschritte notwendig (Bild 1).

Für schrägverzahnte Laufverzahnungen erscheint es noch nicht wirtschaftlich möglich, diese durch Umformen einbaufertig herzustellen. Hauptgründe sind die hohe geforderte Maßhaltigkeit und Oberflächengüte, die nur mit spanabhebenden Feinbearbeitungsverfahren zu erreichen sind. Die geringen Aufmaße aus dem Präzisionsschmiedeprozess weisen noch verhältnismäßig große Ungleichmäßigkeiten auf. Die Aufmaßschwän-

kungen der Rohteile entstehen durch einen Verschleiß des Schmiedegesenks und kaum zu vermeidende Wärme- und Härteverzüge sowohl beim Schmieden als auch bei der anschließenden Wärmebehandlung.

## **Präzisionsschmieden von Zahnradern**

Präzisionsgeschmiedete Zahnradern haben gegenüber konventionell spanend hergestellten Zahnradern viele Vorteile. Da eine aufwendige spanende Weichbearbeitung entfällt, kann die Masse des Rohteils stark reduziert werden, was Kosten spart. Bei der Rohteilauslegung muss lediglich das Aufmaß für die Hartfeinbearbeitung berücksichtigt werden. Untersuchungen an am Institut für Umformtechnik

und Umformmaschinen der Universität Hannover gefertigten Zahnradern haben außerdem ergeben, dass auf Grund der durch das Schmieden hervorgerufenen Kornfeinung sowie des der Kontur angepassten Faserverlaufs die Zahnfußfestigkeit von Zahnradern um ca. 20 % gesteigert wird [6]. Präzisionsschmieden von Zahnradern bietet daher die Möglichkeit, die Größe der Zahnradern zu reduzieren, ohne die Lebensdauer zu verringern. Damit ergibt sich wiederum die Möglichkeit, Getriebe mit einem kleineren Einbauvolumen herzustellen. Dadurch eröffnen sich z. B. Automobilherstellern größere Gestaltungsmöglichkeiten bei der Konzeption neuer Fahrzeuge.

An präzisionsgeschmiedeten, schrägverzahnten Zahnradern werden nur noch die Funktionsflächen spanend

nachbearbeitet. Kleine Risse, die z. B. durch ein Trennverfahren in das Roh-teil eingebracht werden, oder auch geringe Zunderbildung können durch eine sich an das Schmieden anschließende Hartfeinbearbeitung eventuell nicht mehr vollständig aus dem Bauteil entfernt werden und können daher zum Ausschuss des fehlerbehafteten präzisionsgeschmiedeten Bauteils führen. Aus diesen Gründen wirken sich sowohl die Trennverfahren und Vorbehandlungsmethoden für die Roh-teilerzeugung als auch die sich an die Schmiedeoperation anschließende Wärmebehandlung und Bauteillagerung unmittelbar auf die Bauteilqualität aus. Diese integrierte Wärmebehandlung und Bauteillagerung muss daher technisch und logistisch so gestaltet werden, dass die Handhabungszeiten zur Vermeidung von Zunderbildung sehr kurz gehalten werden. Außerdem muss verhindert werden, dass sich das Bauteil durch eine Wärmebehandlung verzieht. Aus diesen Gründen ist es sinnvoll, eine Wärmebehandlung direkt aus der Schmiedewärme durchzuführen.

Im Bereich von geschmiedeten Kurbelwellen haben sich in diesem Zusammenhang AFP-Stähle als sehr gut geeignet erwiesen. AFP-Stähle erreichen nach der Ausscheidungshärtung bzw. nach einer B-Y-Behandlung Zugfestigkeiten von 1100 MPa. Durch Induktionshärten können bei diesen Stählen Oberflächenhärten bis zu 56 HRC erreicht werden [5]. Für dynamisch hochbelastete, verzahnte Bauteile ist diese Härte nicht ausreichend. Bei hohen Anforderungen an die Flankentragfähigkeit sowie den Verschleißwiderstand insbesondere gegen plastische Verformung, „Fressen“ und Pittingbildung ist eine Härte von mindestens 60 HRC notwendig [6]. Eine weitere Anforderung an Zahnräder ist eine ausreichende Restzähigkeit im Zahnfußbereich, um Zahnbruch zu vermeiden [7]. Durch die Verwendung von Einsatzstählen für hochbelastete Zahnräder können die gegensätzlichen Anforderungen von hoher Oberflächenhärte an den Zahnflanken bei gleichzeitig zähem Zahnfuß kombiniert werden, wobei die Einsatzhärtung vor dem Schleifen die notwendige Härte der Zahnflanken sichert. Im Hinblick auf eine integrierte Wärmebehandlung bietet sich auch

zukünftig der Einsatz von Vergütungsstählen oder Kugellagerstählen an. Der Vorteil dieser Stähle ist, dass sie im Gegensatz zu Einsatzstählen schon einen zum Härten ausreichenden Kohlenstoffgehalt aufweisen, womit das Aufkohlen entfällt. Durch eine geeignete Abkühlstrategie muss dabei gewährleistet werden, dass die Zahnräder noch über eine ausreichende Zähigkeit im Zahnfuß für eine ausreichende innere Dämpfung bei hohen dynamischen Belastungen verfügen.

Grundsätzliches Problem beim Präzisionsschmieden ist, dass schon die Wahl einer anderen Legierung für das Bauteil oder auch kleine Geometrievariationen großen Einfluss auf die zur Fertigung des Werkstücks notwendige Umformkraft sowie auf das Bearbeitungsaufmaß haben. Hierbei wirken sich die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten einzelner Legierungen oder ein anderer Wärmehaushalt auf Grund eines unterschiedlichen Oberflächen-/Volumenverhältnisses bei unterschiedlichen Zahnradgrundkörpern unmittelbar auf das nur geringe Aufmaß für die abschließende Hartfeinbearbeitung aus. Um den Einfluss des Zahnradgrundkörpers auf das Bauteil zu ermitteln, werden im Teilprojekt B1 umfangreiche Versuche durchgeführt. In Bild 2 sind beispielhaft zwei präzisionsgeschmiedete Zahnräder mit gleicher Masse aber unterschiedlich großer Oberfläche auf Grund eines modifizierten Zahnradgrundkörpers abgebildet.

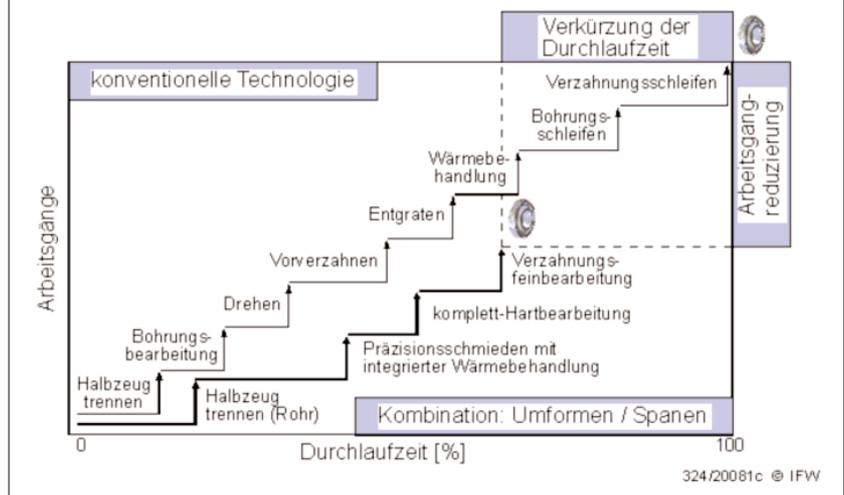
Die 15 % größere Oberfläche des im rechten Teil von Bild 2 abgebildeten

Zahnrads im Vergleich zum links dargestellten Zahnrads hat zur Folge, dass für die vollständige Ausformung des Zahnrads mit der größeren Oberfläche auf Grund erhöhter Reibung und größerer Wärmeabfuhr in das Gesenk eine um 18 % höhere Kraft aufgebracht werden muss, um das Zahnrad vollständig auszuformen und ein gleichmäßiges Bearbeitungsaufmaß von 0,1 mm auf den Zahnflanken zu erhalten. Die erhöhte Wärmeabfuhr bei vergrößerter Oberfläche bringt es außerdem mit sich, dass das Zahnrad nach dem Auswerfen aus dem Gesenk weniger schrumpft, woraus sich ein um 0,1 mm größeres Bearbeitungsaufmaß beim Zahnkopf ergibt. In Bild 3 sind die Auswirkungen auf das Aufmaß dargestellt.

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Modifikationen des Zahnradgrundkörpers bei angepasster Prozessführung hauptsächlich auf das Bearbeitungsaufmaß am Zahnkopf und im Zahnfuß auswirken. So weisen die Zahnräder mit der größeren Oberfläche durch die in den Zahnradgrundkörper implementierten Ringnut bei sonst unveränderten Umformparametern ein um 0,1 mm größeres Aufmaß am Zahnkopf für eine Hartfeinbearbeitung auf als solche mit kleinerer Oberfläche. Durch Anpassung der Umformkraft konnte bei Variationen des Zahnradgrundkörpers ein gleichmäßiges Bearbeitungsaufmaß auf den Zahnflanken erzielt werden. Zukünftiges Ziel des Teilprojekts B1 ist es, die Zusammenhänge zwischen Geometrieinflüssen

Bild 1

Verkürzung der Prozesskette durch Präzisionsschmieden



und Formfüllung zu erfassen und langfristig in Ähnlichkeitsmodellen zu hinterlegen, um den Prozessauslegungs- und Führungsaufwand nachhaltig zu reduzieren.

## Integrierte Wärmebehandlung

Wie bereits erwähnt, spielen beim Präzisionsschmieden die Handlingzeiten und die damit verbundene Zunderbildung eine große Rolle, da hier mit geringen Aufmaßen gearbeitet wird. Zur vollständigen Integration einer Prozesskette zur Herstellung von präzisionsgeschmiedeten Bauteilen und der damit verbunden Verkürzung der Handlingzeiten gehört somit auch die integrierte Wärmebehandlung. Diese Integration ist ebenso notwendig wie naheliegend, da das Bauteil nach dem Fertigschmieden eine ausreichende Temperatur für eine anschließende martensitische Härtung aufweist. Eine Abkühlung und erneute Austenitisierung verlängert nicht nur die Prozesskette sondern zerstört unter Umständen das sich beim Schmieden einstellende feinkörnige Gefüge und ist nebenbei mit einem stark erhöhten Energieverbrauch verbunden.

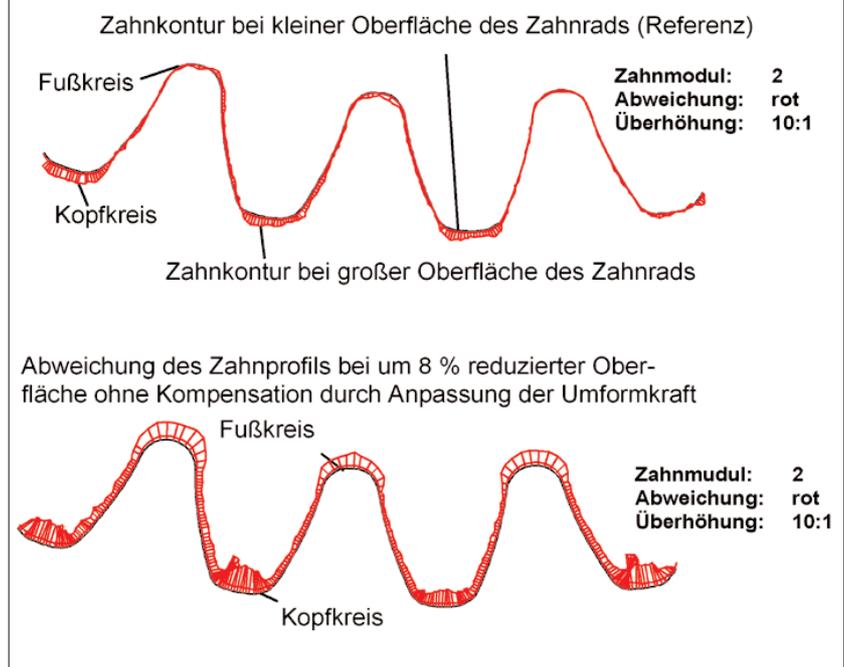
Bisherige Versuche einer Verknüpfung von Formgebung und direktem Abschrecken aus der Warmumformwärme (VS-Behandlung oder SH-Behandlung) scheiterten an technologischen Problemen (Härterisse, hohe Maß- und Formänderungen), weshalb sich diese Technologie nicht durchsetzen konnte [8,9]. Statt dessen wurde die BY-Technologie in Kombination mit AFP-Stählen entwickelt. Die Festigkeitssteigerung der Bauteile basiert hier gegenüber der Martensitbildung der VS-Behandlung auf einer Ausscheidungshärtung. Hierdurch können jedoch keine äquivalenten Zähigkeiten, Festigkeiten und Randhärten eingestellt werden. Gleichzeitig wird dabei keine Anpassung an das Beanspruchungsprofil erzielt.

Die im Rahmen einer Forschergruppe an der Universität Hannover entwickelte Technologie [10] bietet erstmals einen funktionalen Lösungsansatz (Bild 4). Die Basis hierfür ist ein Zweistoff-Düsenfeld. Hiermit ist es möglich, partiell bestimmte Bauteilbereiche entsprechend dem Beanspruchungsprofil zu härten. Gleichzeitig kann der Abkühlverlauf optimal auf

**Bild 2** Präzisionsgeschmiedete Zahnräder



**Bild 3** Vergleich der Zahnkonturen über drei Zähne bei Zahnradern unterschiedlicher Oberfläche



das gewünschte Härteergebnis abgestimmt werden, da die entwickelte Anlagentechnik vollautomatisierbar ist und die maßgeblichen Einflussgrößen gezielt beeinflusst werden können. Am Beispiel des Modellzahnrades der Forschergruppe wurde das Leistungsvermögen und Potential dieser Technologie unter Beweis gestellt [11].

Die hieran gewonnenen Erkenntnisse können jedoch nicht beliebig auf andere Geometrien übertragen werden, da die Zweistoff-Kühlung von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst wird. Daher werden zunächst Grundlagenuntersuchungen an einfachen Modellgeometrien durchgeführt. Insbesondere soll das Prozessfenster ermittelt werden, das sowohl

ein Unterschreiten der Leidenfrost-Temperatur als auch eine homogene Kühlung durch die Zweistoffdüsen ermöglicht. Das Unterschreiten der Leidenfrost-Temperatur zu Beginn des Abschreckvorganges ist die notwendige Voraussetzung, um die Verdampfungsenthalpie von Wasser zu nutzen und gleichzeitig einen gleichmäßigen Wärmeübergang zu erzielen. Unter der Gleichmäßigkeit oder der Ungleichmäßigkeit wird hierbei die Abweichung örtlicher Werte des Wärmeübergangskoeffizienten vom Mittelwert verstanden.

Die Arbeiten beinhalten die Untersuchung der Spraycharakteristik des von den verwendeten Zweistoffdüsen erzeugten Sprays mittels Phasen-

Doppler-Anemometrie (Bild 5) und Patternatoruntersuchungen zur Bestimmung der Beaufschlagungsdichte.

Die hiermit gewonnenen Daten werden verwendet, um ein Prozessmodell sowie eine analytische Beschreibung des Wärmeübergangs zu erstellen. Daneben wird an einem Modellversuchsstand der Einfluss einzelner Parameter auf den tatsächlichen Wärmeübergang untersucht. Hier werden Stahlproben mittels einer schnellen keramischen Heizung auf einer gewählten Versuchstemperatur gehalten. Die Regelung erlaubt es über eine Signalführung, die tatsächlich zugeführte Leistung zeitlich aufzuzeichnen. Integriert über die Zeit der Sprühdauer ergibt sich damit abzüglich der Leistung im Leerlauf bei der eingestellten Temperatur ein annähernd exakter Wert der mit dem Spray abgeführten Wärmeenergie. Daneben kann explizit die Benetzungskinetik in Abhängigkeit der Proben temperatur ermittelt werden. Ziel ist neben der Verschiebung der Leidenfrost-Temperatur zu Werten oberhalb der Austenitisierungstemperatur auch einen möglichst homogenen Wärmeübergang über einem besprühten Flächenelement zu erzielen. Das zu entwickelnde Prozessmodell soll verifiziert werden und letztlich soll eine fundierte Wissensbasis geschaffen werden, die es ermöglicht, Zweistoffdüsenfelder so auszulegen, das Bauteile beliebiger Geometrie gezielt abgekühlt werden können.

### Geometrierfassung

Neben den Materialeigenschaften stellt die Bauteilgeometrie eine entscheidende Regelgröße in der Prozesskette dar. Für kurze Reaktionszeiten und die damit verbundene Ausschussminimierung ist es notwendig, eine an den Herstellungsprozess angepasste und ihn begleitende geometrische Messtechnik einzusetzen, um möglichst schnell korrigierend einzugreifen.

Die geometrische Prüfung konventionell d. h. spanend bzw. abwälzend hergestellter Zahnräder erfolgt häufig mit taktilen Koordinatenmessgeräten. Hiermit ist es möglich, die Verzahnungsgeometrie im Bereich weniger Mikrometer zu bestimmen. Allerdings ist diese Methode sehr zeitaufwendig und für endkonturnah abbildend her-

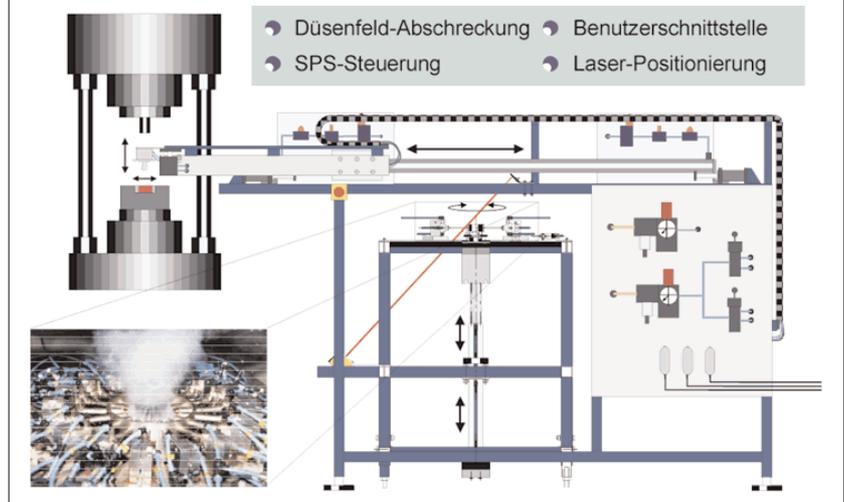
gestellte Zahnräder nur bedingt anwendbar. Die genormte Bestimmung der Abweichungen von Verzahnungsgeometrien beschränkt sich im Wesentlichen auf eine linienhafte Erfassung der Abweichungen im Profil und auf der Flanke der Verzahnung. Weiterhin setzt die spanabhebende Verzahnungsherstellung immer einen Bezug zu der Bohrung bzw. der Welle voraus, da diese Nebenformelemente vor der eigentlichen Verzahnung erstellt werden [12, 13]. Das Hauptfunktionselement, d. h. die Verzahnung selbst, wird bezogen auf diese Nebenformelemente hergestellt. Die genannten Voraussetzungen sind bei dem Fertigungsverfahren der Präzisionsumformung nicht gegeben. Haupt- und Nebenfunktionselemente werden simultan im gleichen Arbeitsgang bei der Umformung erzeugt. Die benötigten hohen Umformkräfte haben nicht zu vernachlässigende Lageabweichungen in Form von Taumel und Exzentrizität der Bohrung zur Verzahnung zur Folge [14]. Der zur funktionsorientierten Messung notwendige Bezug ist unbrauchbar. Zudem werden alle Zähne unabhängig voneinander in der Matrize abgeformt, wodurch individuelle Geometriefehler im Kopf-, Fuß- und Flankenbereich sowie Teilungsfehler entstehen können, die durch abwälzende Fertigungsverfahren in der Form nicht zu erwarten sind. Es ist daher notwendig, die Verzahnung flächig zu erfassen, um so zum einen fertigungsorientiert Korrekturdaten für den eigentlichen Schmiedeprozess

abzuleiten. Zum anderen ist eine Beurteilung der Aufmaßverteilung vor der Hartfeinbearbeitung der Verzahnung und der Bohrung unumgänglich, um Prozessdaten für die Weiterverarbeitung zu ermitteln. Hieraus lässt sich erkennen, dass das hier vorgestellte Messverfahren in der Prozesskette zwischen dem Umformprozess mit integrierter Wärmebehandlung und der abschließenden Hartfeinbearbeitung positioniert ist. Das Verfahren ist nicht geeignet die konventionelle Prüfung der endbearbeiteten Zahnräder mit KMG zu ersetzen.

Für eine schnelle und flächige Erfassung der Verzahnungsgeometrie bietet sich ein berührungsloses optisches Messverfahren mit paralleler Datenerfassung an. Für die Aufmaßbeurteilung der Rohteile ist die Messunsicherheit eines KMG nicht erforderlich. Die optisch diffus streuende Oberfläche der endkonturnah geschmiedeten Zahnräder begünstigt ein solches Messverfahren. Die optische Messung der Zahnräder erfolgt daher mit einem Streifenlichtsensor bestehend aus Projektor und Kamera. Dieser arbeitet nach dem Triangulationsprinzip und zählt zu den bildgebenden optischen 3D-Messverfahren. Für die Bestimmung der Geometriedaten wird das Messobjekt mit Gittern unterschiedlicher Ortsfrequenz (Graycode) bzw. unterschiedlicher Phase (Phaseshift) durch einen Projektor beleuchtet. Gleichzeitig werden die durch die Werkstückgeometrie verformten Streifen von einer CCD-Ka-

**Bild 4**

Düsenfeld und Integration an Schmiede



mera beobachtet [15]. Durch die Auswertung dieser Bildsequenz können die 3D-Koordinaten für das gesamte Messfeld bestimmt werden. Die Anzahl der ermittelten Koordinaten entspricht hierbei der Pixelanzahl des in der Kamera verwendeten CCD-Arrays. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen werden telezentrische Objektive eingesetzt, wobei das Messfeld auf die Verzahnung optimiert und möglichst klein gehalten wird.

Das Bild 6 zeigt die Anordnung der Komponenten, die für die Verzahnungsmessung verwendet werden. Für Test- und Entwicklungszwecke ist der Streifenprojektionssensor in ein KMG integriert. Dies gestattet ein flexibles Handling und die exakte Positionierung des Sensors zum Werkstück sowie taktile oder optotaktile Referenzmessungen ohne umspannen. Da ein solcher komplexer Aufbau für den Einsatz in der Fertigung nicht akzeptabel ist, sollen alle Messungen mit einer fixierten Sensorposition durchgeführt werden. Die Zahnräder werden auf einer hochgenauen Drehachse horizontal in einem Futter gespannt und in Schritten entsprechend der Teilung mit dem Sensor erfasst (Bild 7). Die Drehachse liegt außerhalb des eigentlichen Messvolumens und muss vorher mit einem Kalibrierkörper bestimmt werden.

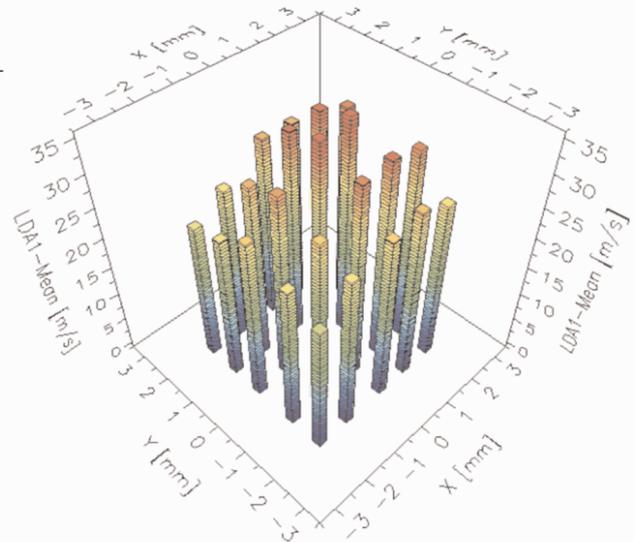
Jede Einzelaufnahme enthält Flankenteile verschiedener Zähne sowie Zahnkopf und -fußbereiche. Durch Kombination bzw. Transformation der Datensätze kann ein vollständiges Abbild eines Zahnrades erstellt werden. Da die entstehenden Datenmengen sehr groß werden (17 Mio. oder mehr Messpunkte), ist für die Auswertung und Weiterverarbeitung ein Datenmodell vorgesehen, welches in einer Baumstruktur separierte Teildatensätze vorhält. Durch gezielte Selektion sollen so beispielsweise Teilungsmessungen, 3D-Einpassung auf die Idealgeometrie oder flächige Verzahnungsabweichungen bestimmt werden. Diese Vorgehensweise erfordert deutlich weniger Rechenkapazität als die Analyse eines Gesamtgeometriemodells.

## Hartfeinbearbeitung

Das Verfahren des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehand-

**Bild 5**

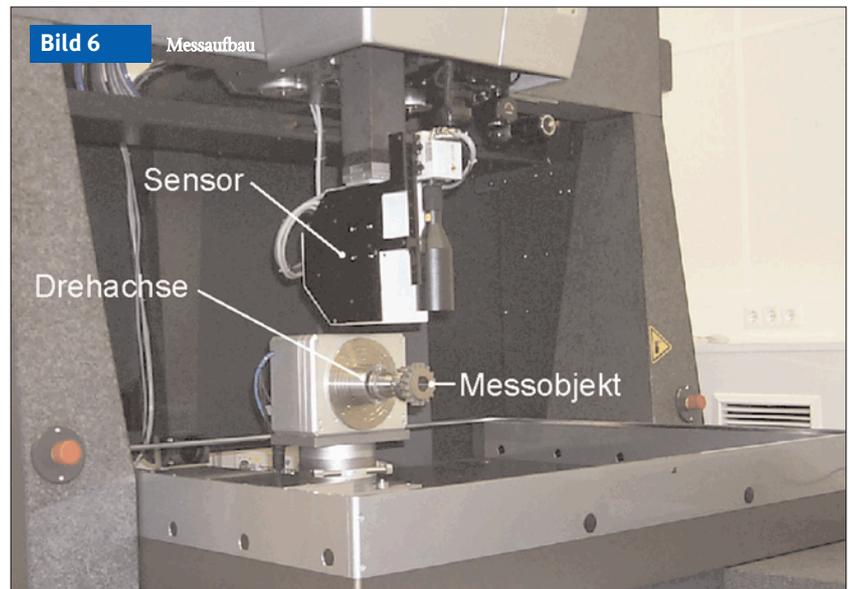
Tropfengeschwindigkeiten in einer Messebene 50 mm vor der Düse



**Bild 6**

Messaufbau

Sensor  
Drehachse  
Messobjekt



lung ermöglicht die Herstellung endkonturnaher Bauteile. Jedoch ist das Präzisionsschmieden den bereits hochentwickelten, konventionellen spanenden Vorbearbeitungsverfahren bisher qualitativ unterlegen. Die geringen Aufmaße aus dem Präzisionsschmiedeprozess weisen noch verhältnismäßig große Ungleichmäßigkeiten auf. Die Aufmaßschwankungen der Rohteile entstehen durch einen Verschleiß des Schmiedegesenks und kaum zu vermeidende Wärme- und Härteverzüge sowohl beim Schmieden als auch bei der anschließenden Wärmebehandlung.

Die qualitätsbestimmende Hartfeinbearbeitung steht am Ende der technologischen Prozesskette. Die Zielsetzung lautet daher, geeignete Hartfein-

bearbeitungsverfahren zu entwickeln, die auf Grund ihrer Robustheit Aufmaßschwankungen der Rohteile zulassen. Aufmaßschwankungen resultieren in einer örtlichen Veränderung der Bearbeitungskräfte, was zu Abweichungen hinsichtlich der Maß- und Formhaltigkeit des Fertigbauteils führen kann. Notwendig sind deshalb Korrekturen von Werkzeugposition und Werkzeugprofil, um in Kenntnis der Aufmaßschwankungen die geforderte Bauteilqualität zu erreichen. Basierend auf einem Modell zur Bestimmung von Verzahnungsabweichungen für verschiedene Hartfeinbearbeitungsverfahren wurden mögliche Korrekturen entwickelt und erprobt.

In der Hartfeinbearbeitung von Zahnrädern stehen in erster Linie

das Profilschleifen und das Wälzschleifen zur Alternative. Bei Profilschleifverfahren wird die gewünschte Verzahnungsgeometrie durch Abbildung des Werkzeugprofils im Werkstück erzielt, während Wälzschleifverfahren die Sollgeometrie durch eine kinematische Kopplung von Werkzeug- und Werkstückbewegung erzeugen [16, 17].

Das notwendige Aufmaß für die Hartfeinbearbeitung hängt direkt von den Maß- und Formschwankungen des Schmiedeteils ab. Die hinreichende Bedingung beschreibt, dass es trivialerweise die Verzüge und Maßschwankungen aus der Vorbearbeitung enthalten muss. Nur dann ist eine Feinbearbeitung der Zahnflanke möglich. Um eine Fortpflanzung der geometrischen Abweichungen gering zu halten, ist das Aufmaß nach dem Schmieden umso größer zu halten, je unregelmäßiger das Schmiedeteil ist. In Bild 8 wird dies am Beispiel des Profilschleifens erläutert. Auf Grund der Degressivität der Abhängigkeit zwischen Bearbeitungskraft und Aufmaß ergibt sich ein nicht lineares Verspannungsdiagramm, in dem die entgegengesetzt wirkenden Axialkräfte  $F_{al}$  und  $F_{ar}$  aufgetragen sind. Bei exzentrischem Aufmaß  $\Delta s$  entsteht eine Differenz der Axialkräfte  $\Delta F_a = F_{ar} - F_{al}$ , die zu einer axialen Verlagerung der Schleifscheibe führt. Betrachtet man nun die zwei Fälle der Kraftdifferenz bei geringem (gestrichelte Linie) und großem Aufmaß (durchgezogene Linie) wird deutlich, dass die Kraftdifferenz bei einer geringen Überdeckung erheblich größer ist als bei einer großen. Somit ist der resultierende Teilungsfehler des Zahnrades eine Fehlerfortpflanzung der Aufmaßschwankungen, der insbesondere bei geringen Aufmaßen zu deutlichen Abweichungen führt [17].

Entscheidend für die Verlagerungen und die Möglichkeiten zur Korrektur von Profil- und Flankenlinienfehlern von Verzahnungen ist die Kinematik des Bearbeitungsverfahrens, die sich zwischen Wälzschleifen und Profilschleifen grundlegend unterscheidet. Dies führt dazu, dass beim diskontinuierlichen Profilschleifen eine Korrektur der Profillinie durch eine veränderte Positionierung des Schleifwerkzeuges im weitgehenden Maße möglich ist. Im Fall des Einflankenschliffs

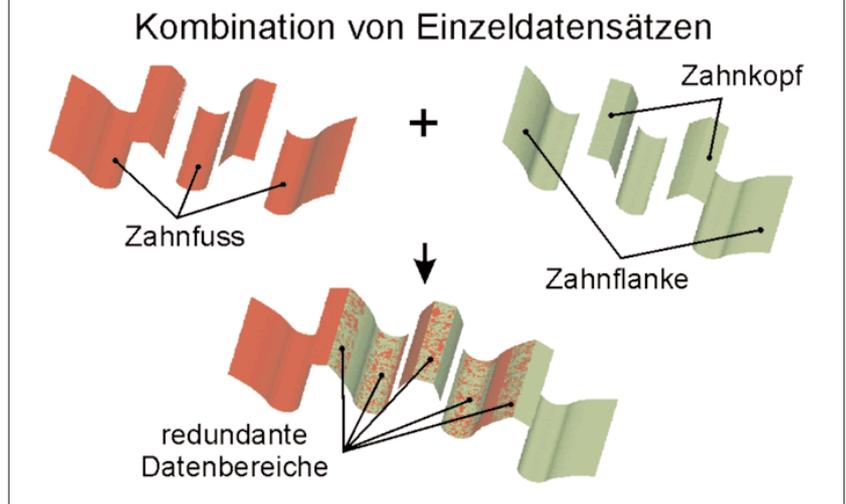
ist dies sogar für die linke und rechte Zahnflanke getrennt durchführbar. Die Flankenlinie ist durch die Anpassung der Kopplung von translatorischer Vorschubbewegung des Werkzeuges und rotatorischer Bewegung des Zahnrades zu realisieren. Nachteilig sind beim diskontinuierlichen Profilschleifen jedoch die langen Fertigungszeiten infolge der zahlreichen Teil- und Anstellbewegungen.

Das Wälzschleifen ist durch eine hohe Wirtschaftlichkeit bei stark eingeschränkten Korrekturmöglichkeiten gekennzeichnet. Ähnlich wie beim diskontinuierlichen Profilschleifen ist beim kontinuierlichen Wälzschleifen die Flankenlinie durch eine Anpassung der Vorschubbewegung zu be-

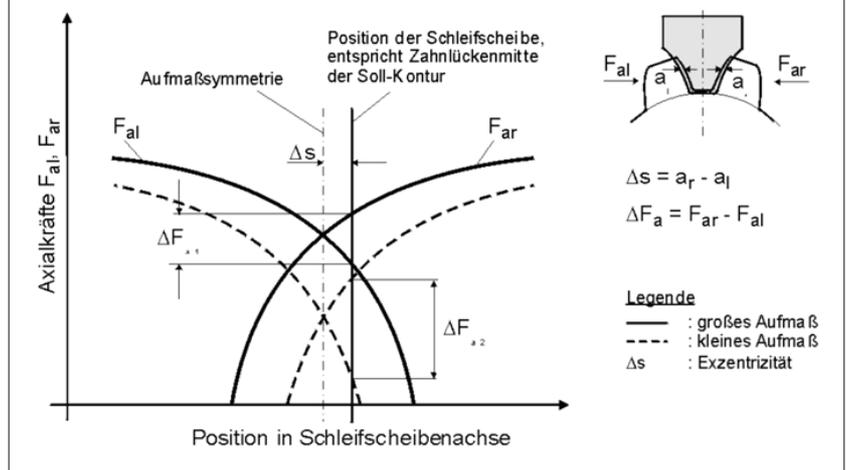
einflussen. Eine auftretende Profilwinkelabweichung jedoch lässt sich im Gegensatz zum Profilschleifen nicht durch eine translatorische Verschiebung des Werkzeuges erreichen. Deshalb wurde mit Hilfe von Simulationen und Praxisversuchen ein anderes Verfahren zur Korrektur entwickelt. Hierbei wird die Wälzschnecke mit einem veränderten Modul, gleichbedeutend mit einer veränderten Steigung, abgerichtet. Dies ermöglicht die Korrektur von Profilwinkelabweichungen im gewissen Maße ohne Veränderung des Werkzeugeingriffswinkels.

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargestellt, wird vor der Hartfeinbearbeitung zunächst die Geometrie der

**Bild 7** Teilungsbezogene Datenerfassung



**Bild 8** Kraft-Aufmaß Diagramm für das Profilschleifen



präzisionsgeschmiedeten und wärmebehandelten Bauteile erfasst. In Abhängigkeit des Aufmaßes ist es dann möglich, Aufmaßschwankungen im Schleifprozess durch veränderte Positionierung oder Profilierung des Werkzeugs zu kompensieren [18].

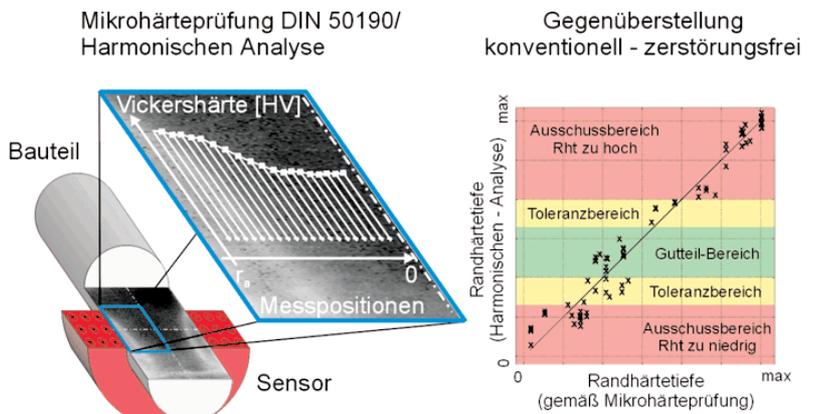
**Materialcharakterisierung**

Die Entwicklung einer verkürzten Prozesskette erfordert neben der Entwicklung neuer Werkstoffe, der Verfahrensoptimierung des Präzisions Schmiedens mit nachgeschalteter Wärmebehandlung aus der Schmiedewärme, sowie der Hartfeinbearbeitung eine verfahrensbegleitende Überwachung der einzelnen Prozessschritte. Nur durch integrierte zerstörungsfreie Bauteilprüfung in der Fertigungskette hinsichtlich der mechanischen Materialeigenschaften und Bauteilfehler ist eine qualitätsgesicherte, verkürzte Fertigung realisierbar. Mängel am Werkstoff und Produkt sowie Verfahrensfehler müssen dabei online erkannt werden, um in den Prozess steuernd eingreifen zu können.

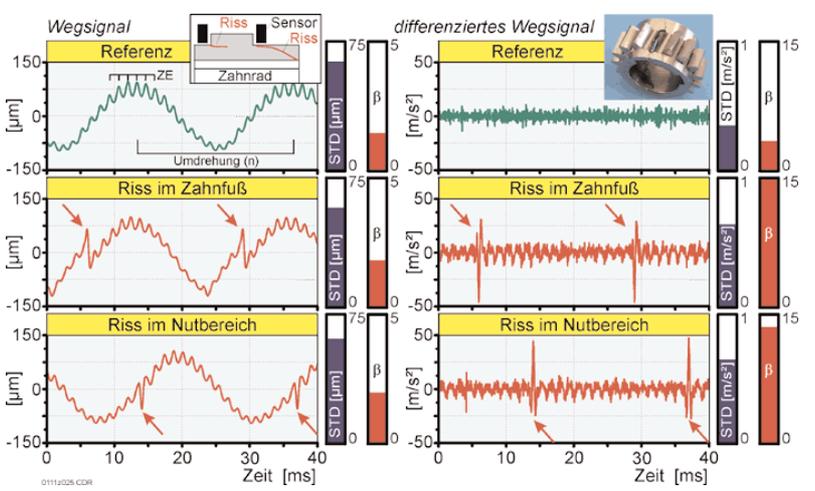
Konventionell erfolgt die Randhärte-tiefenbestimmung zerstörend gemäß DIN 50190. Die dabei zum Einsatz kommende Mikrohärtprüfung ist zeit- und kostenintensiv und auf Grund ihrer zeitverzögerten Rückkopplung nur an Stichproben anwendbar. Mit dem Ziel der quantitativen Randhärte- und Randhärte-tiefenbestimmung von Funktionsflächen präzisionsgeschmiedeter Zahnräder in der Prozesskette wird ein zerstörungsfrei arbeitendes, elektromagnetisches Prüfverfahren, die Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen, am Beispiel eines zylindrischen Bauteils weiterentwickelt und für den Einsatz in der Prozesskette qualifiziert [19, 20].

Die zerstörungsfreie Randhärte-tiefenbestimmung mit Harmonischen Analyse wird mit einem an die Problemstellung angepassten Prüfsensor im Frequenzbereich von 200Hz bis 2kHz durchgeführt (Bild 9 links). Eine für die quantitative Bestimmung der Randhärte-tiefe notwendige Kalibrierung wird durch Korrelation mehrerer, rechnerisch verknüpfter Messgrößen (Amplituden- und Phasenwerte der Harmonischen des Messsignals) mit konventionell bestimmten Rand-

**Bild 9** Zerstörungsfreie Randhärte-tiefenbestimmung an zylindrischen Bauteilen



**Bild 10** Wirbelstromsignale zur Rissdetektion



härte-tiefenwerten ermittelt. Das in Form einer Ampelkarte dargestellte Kalibrierergebnis (Bild 9 rechts) zeigt die gute Übereinstimmung beider Messverfahren. Der Gut-Teil-Bereich ist ober- und unterseitig von den Trend widerspiegelnden Toleranzbereichen umgeben. Eine frühzeitige Korrektur relevanter Fertigungsparameter führt zur Vermeidung von zu gering bzw. zu stark randschichtgehärteter Bauteile, die sich in den Ausschussbereichen der Ampelkarte befinden.

**Schadensdiagnose**

Die hohen Ansprüche an die Bauteileigenschaften erfordern eine Prüfung

unter realistischen Betriebsbedingungen hinsichtlich Laufruhe, Flanken-tragfähigkeit und Zahnfußfestigkeit. Daher erfolgt die Prüfung der präzisionsgeschmiedeten Verzahnungen im umlaufenden Verspannungsversuchstand zur Beschreibung des Laufverhaltens und der Schadensentwicklung unter Last. Dauerversuche erlauben nicht nur die Beschreibung des Zeitstandverhaltens hinsichtlich Grübchenbildung, sondern auch die Untersuchung der Zahnfußfestigkeit, der Rissinitiierung mit Rissfortschritt bis hin zum Zahnbruch.

Während sich das allgemeine Lauf- und Verschleißverhalten mit Grübchenbildung sehr präzise durch Körperschallanalysen im Zeit- und Fre-

quenzbereich beschreiben lassen [21], ist eine Detektion von Anrissen im Zahnfußbereich im Betrieb nur bedingt bzw. relativ spät mit entsprechend kurzer Vorwarnzeit möglich. Daher kommen als Ergänzung Wirbelstromwegensensoren am rotierenden Zahnrad zur Anwendung. Genutzt wird der in der dynamischen Schwingungsmessung mit Wirbelstromaufnehmern als „mechanical run-out“ bekannte Störeffekt.

Bild 10 zeigt im linken Teil Zeitsignale einer Wegmessung mit Wirbelstromsensoren über zwei Wellenumdrehungen, gekennzeichnet durch die mechanische Unwucht moduliert mit den 17 Zähnen auf Grund des „eigentlich“ zu geringen seitlichen Abstandes zwischen Sensor und Verzahnung. Ein Riss im Zahnfuß stört das Wirbelstromfeld, abzulesen an der drehperiodischen Modulation im Wegsignal, wobei eine Klassifizierung des Zeitsignals durch statistische Zeitkennwerte allerdings kaum Veränderungen aufzeigt. Nach zweifacher Differenzierung treten die rissbedingten Modulationen im Zeitsignal signifikant hervor, quantifizierend beschrieben durch entsprechend hohe Kurtosiswerte. Der Einsatz der weiterentwickelten und adaptierten Analyseverfahren ermöglicht so eine schnelle und verbesserte Zuordnung der Betriebs- und Schadenssignaturen [22].

## Zusammenfassung

Die Entwicklungen im Getriebebau sind durch stetig steigende Anforderungen an die Lebensdauer, die Laufruhe und die Leistungsübertragung bei gleichzeitiger Reduzierung der Baugröße und der Produktionskosten gekennzeichnet. Dies führt in zunehmendem Maße zu sehr hohen Qualitätsanforderungen an die im Getriebe verwendeten Zahnrad hinsichtlich der Oberflächenrauheiten, der Randzoneneigenschaften und der Maß- und Formabweichungen [1]. Neben der Qualität und den Kosten steuert aber auch der Faktor Zeit einen we-

sentlichen Beitrag zum Erfolg eines Produktes und damit eines Unternehmens bei. Dies erfordert nicht nur die Verkürzung der Entwicklungszeiten, sondern auch die konsequente Reduzierung der Durchlaufzeiten bei der Zahnradherstellung.

Der Sonderforschungsbereich 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ wird gefördert mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG, dem Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) sowie der Universität Hannover und dem Fachbereich Maschinenbau der Universität Hannover. Um innerhalb des Sonderforschungsbereichs die Zusammenarbeit zu fördern, wurden interdisziplinäre Arbeitsgruppen gebildet, in denen themenspezifische und fachübergreifende Problemstellungen bearbeitet werden. Der vorliegende Artikel basiert auf den Arbeiten der Arbeitsgruppe B „Prozesskette“, deren gemeinsames Ziel es ist, sämtliche zur Herstellung eines Präzisions schmiedeteils notwendigen Arbeitsschritte zu untersuchen und abzugleichen. Untersuchungen zur Reduzierung der Prozesskette „Präzisions schmieden“ mit allen Arbeitsschritten sind Gegenstand dieses Beitrags.

## Literatur

- [1] Tönshoff, H.K.; Karpuschewski, B.; Türich, A.: Tooth profile grinding of precision forged gears. Proceedings 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, 16.-18.03.1999 Paris
- [2] Rudau, E.: Deutsche Gesenkschmiedeindustrie gerüstet für die Zukunft, Schmiede-Journal September 2000
- [3] Douglas, J. R.; Kuhlmann, D.: Guidelines for Precision Hot Forging with Applications, Proceedings of the 4th Internat. Precision Forging Conference, 12.-14. Okt. 1998 Columbus, Ohio
- [4] Tan Xie: Development of Precision Forged Gear Technology in China. International Conference on Forging and Related Technologies (ICFT '98), April 28/29, 1998, Birmingham UK, ImechE Conference Transactions 1998-3, S. 323-331
- [5] Adlof, W.: Neue Entwicklungen bei geschmiedeten Kraftfahrzeugkurbelwellen, Schmiede-Journal, September 2001, S. 14 – 17
- [6] Liedtke, D.: Einsatzhärten; 2. Auflage; Stahl-Informations-Zentrum, Merkblatt 452; 1995
- [7] Stegemann, D.: Forschergruppe Do 190/92 Präzisionsumformung von schrägverzahnten Zahnradern, Herstellung, Wärmebehandlung und Prüfung - Teilprojekt VI: Prüfung der technologischen Eigenschaften von präzisionsgeschmiedeten Zahnradern. Abschlussbericht, 1999
- [8] Dahl, W.: Eigenschaften und Anwendungen von Stählen; Institut für Eisenhüttenkunde, RWTH Aachen; Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen 1993, Band 2
- [9] Bobbert, D.: Untersuchungen über das Vergüten aus der Schmiedewärme; Dissertation, Universität Hannover 1968
- [10] Haferkamp, H.; Doege, E.; Tönshoff, H.-K.; et.al.: Forschergruppe „Präzisionsumformung von schrägverzahnten Zahnradern - Herstellung, Wärmebehandlung und Prüfung“; Endbericht, Teilprojekt 3: Prozessintegrierte Wärmebehandlung
- [11] Breuer, M.: Verknüpfung von Wärmebehandlung und Formgebung beim Präzisions schmieden von Verzahnungen; Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Nr. 555; VDI-Verlag, Düsseldorf 2000
- [12] DIN 3960: Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung; 1987
- [13] DIN 3961-3963: Toleranzen für Stirnradverzahnungen; 1978
- [14] Gravel, G.: Beurteilung abbildend hergestellter Stirnzahnradern mit Hilfe der Koordinatenmesstechnik; Diss. Universität Hannover 1996
- [15] Frankowski, G.; Reissner, H.: Schnelle optische 3D Messung von Funktionsflächen mit digitaler Streifenprojektion auf Mikrospeigelbasis; 10. Internationales Oberflächenkolloquium Technische Universität Chemnitz Februar 2000
- [16] Bausch, T.: Moderne Zahnradfertigung, 2. Auflage, expert Verlag, 1994
- [17] Tönshoff, H.K.: Potentiale abgestimmter Prozessketten am Beispiel der Feinbearbeitung von Schmiedeteilen. Umformtechnik 2000 Plus, Herausgeber: M. Geiger, Meisenbach Bamberg, 1999
- [18] Türich, A.: Schleifen von Verzahnungen. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, Vulkan-Verlag Essen, 2001
- [19] Stegemann, D.; Reimche, W.; Feiste, K.L.; Reichert, Ch.; Fetter-Marques, P.: Determination of hardness and hardness penetration depth of metal components by non linear harmonic analysis; Nondestructive Characterization of Materials IX. Proc. of the Ninth Int. Symp. on Nondestructive Characterization of Materials, Sydney, AUS, June 28 - July 2, 1999.
- [20] Stegemann, D.; Reimche, W.; Feiste, K.L.; Reichert, Ch.; Bernard, M.; Weber, W.: Characterization of reactor pressure vessel steels by magnetoinductive harmonic analysis; Proc. of the Second Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Vol.1, New Orleans, USA, May 24 – 26, 2000.
- [21] Pietsch, O.; Südmersen, U.; Scheer, Ch.; Reimche, W.: Schwingungsanalytische Überwachung von Produktionsanlagen; 4. Tagung Technische Diagnostik 2000, Diagnose und Instandhaltung von Maschinen und Anlagen, Oktober 2000, Merseburg
- [22] Scheer, Ch.; Südmersen, U.; Pietsch, O.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.: Schadensdiagnose an Getriebestufen durch problemangepasste Multi-sensorsysteme VDI-EKV Tagung „Schwingungen in Antrieben 2001“, VDI Berichte 1630, September 2001, Würzburg (ISBN 3-18-091630-3)

## Information

Universität Hannover  
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen  
Dipl.-Ing. Helge Dähndel  
Abteilung Schmieden  
Welfengarten 1A  
D-30167 Hannover  
Tel.: +49 511 762 4958  
Fax: +49 511 762 3007  
E-Mail: daehndel@ifum.uni-hannover.de  
Internet: www.ifum.uni-hannover.de