

Friedrich-Wilhelm Bach
Kai Kerber *Hrsg.*

Prozesskette Präzisionsschmieden

Prozesskette Präzisions Schmieden

Friedrich-Wilhelm Bach • Kai Kerber
(Hrsg.)

Prozesskette Präzisionsschmieden

Herausgeber

Friedrich-Wilhelm Bach
Institut für Werkstoffkunde
Leibnitz Universität Hannover
Garbsen
Deutschland

Kai Kerber
Institut für Werkstoffkunde
Leibnitz Universität Hannover
Garbsen
Deutschland

ISBN 978-3-642-34663-7

DOI 10.1007/978-3-642-34664-4

ISBN 978-3-642-34664-4 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Die Stellung der deutschen Massivumformung am Weltmarkt kann nur durch die hohe Produktqualität der Schmiedeerzeugnisse und den technologischen Vorsprung in der Produktionstechnik nachhaltig gesichert werden. Der harte internationale Wettbewerb zwingt die deutschen Unternehmen dazu, bewährte Fertigungsverfahren zu optimieren und Prozessketten effizienter zu gestalten, um so der Konkurrenz eine Nasenlänge voraus zu sein. Etablierte Fertigungsverfahren und einzelne Fertigungsschritte in Prozessketten besitzen nur noch geringe Optimierungspotenziale, die im Allgemeinen durch lokale Optimierungsmaßnahmen ausgeschöpft werden. Signifikante Potenziale zur Optimierung der Produktqualität und Effizienz können heutzutage zumeist nur erkannt und genutzt werden, wenn der gesamte Herstellungsprozess sowohl unter technologischen als auch unter logistischen Gesichtspunkten berücksichtigt wird. Um nachhaltige Erfolge zu erzielen, müssen radikale Veränderungen der Prozesskette, wie beispielsweise der Einsatz von innovativen und wirtschaftlich risikoreichen Fertigungsverfahren, oder die vollständige Umgestaltung der bekannten Prozessketten in Betracht gezogen werden. Durch abgestimmte technologische sowie logistische Maßnahmenbündel besteht die Möglichkeit, bisher unbekannte Optimierungspotenziale bei der Herstellung von qualitativ hochwertigen Produkten zur Standortsicherung Deutschlands aufzuzeigen und gewinnbringend zu nutzen. Vor diesem Hintergrund befasste sich der Sonderforschungsbereich 489 „Prozesskette zur Herstellung von präzisionsgeschmiedeten Hochleistungsbauteilen“ basierend auf der Idee von Prof. Eckart Doege seit Januar 2000 im Zuge der zwölfjährigen Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft mit der Prozesskette zur Herstellung von präzisionsgeschmiedeten Hochleistungsbauteilen und untersuchte diese sowohl unter technologischen als auch logistischen Aspekten.

Mehr als die Hälfte der durch die Massivumformung hergestellten Bauteile werden direkt oder indirekt an die Automobilindustrie geliefert. Aus diesem Grund wurden für die Forschungstätigkeiten des Sonderforschungsbereiches Demonstratorbauteile aus dem Motoren-, Triebwerks- und Getriebebau ausgewählt. Seit der Gründung des SFB 489 hat der Schwerpunkt der Forschungstätigkeiten auf der Prozesskette zur Herstellung von präzisionsgeschmiedeten, schrägverzahnten Zahnradern gelegen. Im Mittelpunkt der Bemühungen stand eine Verkürzung der Prozesskette, die auf der vollständigen Substi-

tution der spanenden Weichbearbeitung und dem Eingliedern der Wärmebehandlung in den Präzisionsschmiedeprozess beruht. Gegenüber der konventionellen Prozesskette für Zahnräder stellt sich die innovative Prozesskette des SFB 489 stark verkürzt und automatisiert dar und wird zudem durch eine prozessbegleitende Qualitätssicherung flankiert. Sie weist eine verbesserte Energiebilanz und gesteigerte Fertigungseffizienz auf und ist mit Hilfe der erarbeiteten Grundlagen und anwendungsorientierte Forschungsergebnisse aus technischer und logistischer Sicht auslegbar.

Des Weiteren wurden innovative Werkzeugtechnologien für die Massivumformung entwickelt, mit denen Langteile wie beispielsweise Kurbelwellen im geschlossenen Gesenk präzisionsgeschmiedet werden können. Die durch das Präzisionsschmieden erreichbare Genauigkeit ermöglicht es, die Bauteile durch einen einzigen Fertigungsschritt, der Hartfeinbearbeitung, fertigzustellen. Neben der Entwicklung der neuartigen Prozesskette, die im Rahmen des Forschungsprogramms in jedem Prozessschritt untersucht und lückenlos von den beteiligten Projektpartnern realisiert wurde, sind darüber hinaus wichtige Grundlagen auf den Forschungsgebieten der Massivumformung, Löt- und Beschichtungstechnik, Wärmebehandlung, Messtechnik, Adaptronik und Spanntechnik, der Hartfeinbearbeitung sowie der Fertigungsplanung und Logistik erarbeitet worden.

Dieses Buch beschreibt die erarbeiteten Forschungsergebnisse des Sonderforschungsbereiches in den jeweiligen Fachgebieten. Die Autorinnen und Autoren sowie die am Sonderforschungsbereich beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die langjährige Förderung des Vorhabens. Zudem sei den Gutachterinnen und Gutachtern des Sonderforschungsbereiches gedankt, die mit ihrer konstruktiven Kritik und Anregungen gleichwohl zu der langfristigen Entwicklung des Projektverbundes beigetragen haben. Zu guter Letzt richtet sich mein Dank an die an den Projekten und Arbeitsgruppen des Sonderforschungsbereiches beteiligten Kollegen, Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie alle Beteiligten aus den Instituten der Fakultät für Maschinenbau der Leibniz Universität Hannover, die den SFB 489 bei der Forschung und technischen Umsetzung unterstützt haben.

im November 2012
Hannover

Prof. Dr.-Ing. habil.
Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Friedrich-Wilhelm Bach

Inhaltsverzeichnis

1	Prozesskette Präzisionsschmieden	1
	Dirk Odening und Kai Kerber	
2	Präzisionsschmieden	15
	Dirk Odening, Mathias Meyer, Andreas Klassen, Anas Bouguecha und Bernd-Arno Behrens	
3	Werkzeugtechnologie	53
	Andreas Klassen, Marcus Bistron, Philip Dellinger, Jörg Schaup, Todd Alexander Deißer, Leif Behrens, Jens Köhler, Anas Bouguecha, Kai Möhwald, Berend Denkena und Bernd-Arno Behrens	
4	Wärmebehandlung	127
	Zhuo Yu, Thorsten Gretzki, Florian Nürnberger, Markus Kästner, Klaus Haskamp, Friedrich-Wilhelm Bach, Mirko Schaper und Tomas Hassel	
5	Hartfeinbearbeitung	221
	Olaf Gümmer, Ruben Fischer und Berend Denkena	
6	Mess- und Prüftechnik	311
	Vera Böhm, Markus Kästner, Rüdiger Gillhaus, Klaus Haskamp, Wilfried Reimche, Friedrich-Wilhelm Bach und Eduard Reithmeier	
7	Logistische Erfassung, Steuerung und Bewertung	431
	Jan Henjes, Marco Kennemann, Sven Baumgarten, Michael Grigutsch, Berend Denkena, Rouven Nickel und Peter Nyhuis	

Autorenverzeichnis

Friedrich-Wilhelm Bach Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: bach@iw.uni-hannover.de

Sven Baumgarten Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, Hollerithallee 6, 30419, Hannover, Deutschland
E-Mail: baumgarten.S@gmail.com

Bernd-Arno Behrens Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: behrens@ifum.uni-hannover.de

Leif Behrens Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: behrens-l@ifw.uni-hannover.de

Marcus Bistron Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: marcus.bistron@gmx.de

Vera Böhm Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: boehm@iw.uni-hannover.de

Anas Bouguecha Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: bouguecha@ifum.uni-hannover.de

Todd Alexander Deißer Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: deisser@iw.uni-hannover.de

Berend Denkena Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: denkena@ifw.uni-hannover.de

Philip Dellinger Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: dellinger@iw.uni-hannover.de

Ruben Fischer Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: fischer@ifw.uni-hannover.de

Olaf Gümmer Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: guemmer@ifw.uni-hannover.de

Rüdiger Gillhaus Institut für Mess- und Regelungstechnik, Nienburger Straße 17, 30167 Hannover, Deutschland
E-Mail: ruediger.gillhaus@hella.com

Thorsten Gretzki Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: gretzki@iw.uni-hannover.de

Michael Grigutsch Insitut für Fabrikanlagen und Logistik, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: grigutsch@ifa.uni-hannover.de

Klaus Haskamp Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str. 17, 30167 Hannover, Deutschland
E-Mail: klaus.haskamp@zf.com

Thomas Hassel Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: hassel@iw.uni-hannover.de

Mathias Meyer Institut für Integrierte Produktion Hannover GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Deutschland
E-Mail: m.meyer@cdp.de

Jan Henjes Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: henjes@ifw.uni-hannover.de

Markus Kästner Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str. 17, 30167 Hannover, Deutschland

E-Mail: markus.kaestner@imr.uni-hannover.de

Marco Kennemann Institut für Fabrikanlagen und Logistik, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823, Garbsen, Deutschland

E-Mail: marcokennemann@web.de

Kai Kerber Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland

E-Mail: kaikerber@gmx.de

Andreas Klassen Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland

E-Mail: klassen@ifum.uni-hannover.de

Jens Köhler Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland

E-Mail: koehler@ifw.uni-hannover.de

Kai Möhwald Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland

E-Mail: moehwald@iw.uni-hannover.de

Rouven Nickel Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, Hollerithallee 6, Demminer Str. 6, 30419, 30916 Hannover, Isernhagen, Deutschland

E-Mail: rouven.nickel@t-online.de

Florian Nürnberger Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland

E-Mail: nuernberger@iw.uni-hannover.de

Peter Nyhuis Institut für Fabrikanlagen und Logistik, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland

E-Mail: nyhuis@ifa.uni-hannover.de

Dirk Odening Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland

E-Mail: dirk.odening@gmx.de

Wilfried Reimche Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland

E-Mail: reimche@iw.uni-hannover.de

Eduard Reithmeier Institut für Mess- und Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 17, 30167 Hannover, Deutschland
E-Mail: eduard.reithmeier@imr.uni-hannover.de

Mirko Schaper Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: schaper@iw.uni-hannover.de

Jörg Schaup Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: schaup@iw.uni-hannover.de

Zhuo Yu Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: yu@iw.uni-hannover.de

Dirk Odening und Kai Kerber

Inhaltsverzeichnis

1.1	Gesenschmiedeprozesse zur Herstellung von Verzahnungen und Kurbelwellen	2
1.1.1	Prozessentwicklung bei der umformtechnischen Verzahnungsherstellung	4
1.1.2	Prozessentwicklung bei der umformtechnischen Kurbelwellenfertigung	5
1.2	Prozesskette zur Herstellung von geschmiedeten Verzahnungen und Kurbelwellen	6
1.3	Die Prozesskette des SFB 489	7
	Literatur	13

Mit dem Aufkommen von Dampfmaschinen und der beginnenden Industrialisierung im 18. Jahrhundert wurden für den Einsatz von Antriebs- und Getriebekomponenten neue Anwendungen erschlossen. Dieses zog einen deutlich erhöhten Bedarf an belastbaren Komponenten nach sich. Dieser Trend ist bis heute ungebrochen. Im modernen Maschinen- und Fahrzeugbau zählen Stirnradverzahnungen mit zu den am häufigsten eingesetzten Konstruktionsteilen. Ein weiteres Beispiel stellt die Nutzung von Kurbelwellen dar. Erste Motoren, wie der atmosphärische Gasmotor von Nikolaus August Otto, kamen 1867 noch ohne eine Kurbelwelle aus. Stattdessen wurde eine Zahnstangenverbindung zwischen Kolben und Schwungrad verwendet. 1876 mit der Entwicklung des Viertaktmotors wurde die Zahnstangenverbindung durch die Kurbelwelle und Pleuelstange verdrängt. Seitdem ist der Entwicklungsfortschritt und der Bedarf an der Kurbelwelle eng mit dem Verbrennungsmotor verknüpft [NN05].

D. Odening (✉)

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover,
An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: dirk.odening@gmx.de

K. Kerber

Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover,
An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland

1.1 Gesenkschmiedeprozesse zur Herstellung von Verzahnungen und Kurbelwellen

Die Umformtechnik geht in ihrer heutigen Form auf eines der ältesten Handwerke, dem Schmieden, zurück. Mit der Einführung von dampfangetriebenen Maschinen im 19. Jahrhundert löste sich die Umformtechnik aus dem hauptsächlich handwerklichen Umfeld und entwickelte sich bis heute zu einer in Teilen hoch automatisierten Fertigungstechnik [Doe10]. Die Ansprüche an Form und Funktionalität gesenkschmiedeter Bauteile nahmen bei gleichzeitig steigender Anfrage kontinuierlich zu.

Im Bereich des Werkzeugbaus ermöglichen der Einsatz moderner Werkzeugstähle, Fertigungsverfahren (Hochgeschwindigkeits-Frästechnik etc.) und Oberflächenbehandlungsverfahren (Nitrieren, Beschichten etc.) die wirtschaftlichere Herstellung prozessoptimierter und langlebiger Schmiedewerkzeuge und Gesenke. Die eingesetzten Umformmaschinen entwickelten sich ausgehend von den rein energiegebundenen Schmiedehämmern und Spindelpressen zu kraftgebundenen Hydraulikpressen sowie weggebundenen mechanischen Pressen mit Kurbel- oder Exzenterantrieb. Bis heute führen kontinuierlich Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich der Maschinentechnik zu immer leistungsfähigeren Schmiedeanlagen. Durch die zunehmende Mechanisierung und Automatisierung entlang der gesamten Prozesskette von Schmiedeprozessen konnten immer höhere Mengenleistungen bei steigender Arbeits- und Reproduziergenauigkeit erzielt werden. Heute lassen sich über verschiedene Umformverfahren der Warm-, Halbwarm- und Kaltmassivumformung und deren Kombination eine Vielzahl verschiedener Bauteilgeometrien, mit Bauteilgewichten von wenigen Gramm bis zu mehreren Tonnen herstellen. Weiterentwicklungen im Bereich der eingesetzten Werkstoffe führten zu hochwertigen Schmiedevormaterialien, welche in zunehmendem Maße durch Einsatz entsprechender Anlagen- und Prozesstechnik unmittelbar aus der Umformwärme bauteilgerecht und wirtschaftlich wärmebehandelt werden können.

Das starke Wachstum der Automobilindustrie brachte in den vergangenen Jahrzehnten einen erheblichen Bedarf an Antriebs- und Getriebekomponenten mit sich. Gleichzeitig stiegen die Anforderungen an diese Bauteile hinsichtlich Belastbarkeit und Einsatzverhalten. Dieser Trend ist bis heute ungebrochen und löste immer wieder neue Entwicklungen auf dem Maschinen- und Werkzeugsektor aus [Fel08]. Der wachsende Konkurrenzdruck auf dem globalen Markt verstärkt den stetig steigenden Qualitäts und -kostendruck, welcher Forderungen nach Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich der Fertigungs- und Produktionstechnologien nach sich zieht.

Die Zahnradfertigung ist durch ein ständiges Bestreben zur Rationalisierung und Kostensenkung gekennzeichnet. Die Zielsetzung nach erhöhter Wirtschaftlichkeit verlangt den Einsatz neuer leistungsfähiger Verzahnungstechnologien. Unter diesem Aspekt gewinnen spanlose Verfahren zur Herstellung von Stirnverzahnungen im Substitutionswettbewerb ständig an Bedeutung [Jüe86]. In Abb. 1.1 sind aktuelle Produktbeispiele aus dem Bereich präzisionsgeschmiedeter Verzahnungen zusammengefasst dargestellt.



Abb. 1.1 Produktbeispiele aus aktuellen Anwendungen. (Quelle: SONA BLW Präzisionsschmiede)

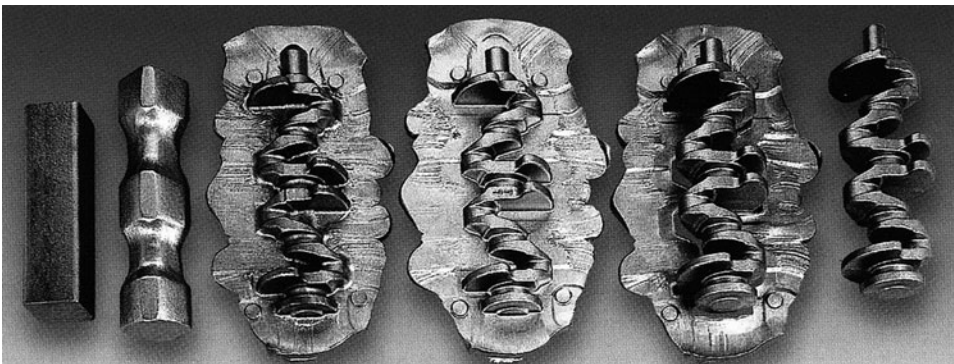


Abb. 1.2 Stadienfolge zum Schmieden einer Kurbelwelle mit Materialüberschuss [NN05]

Trotz der wesentlichen Vorteile der umformtechnischen Prozessroute hat sich die Herstellung schrägverzahnter Stirnradverzahnungen durch Prozesse der Massivumformung bis heute nicht durchsetzen können. Unzureichende Werkzeugstandzeiten und ungenügenden Verzahnungsqualitäten gelten als wesentliche Herausforderungen bei der Etablierung in der industriellen Praxis und stellen weiterhin Forschungsbedarf dar [Vuc04].

Die Kurbelwelle (s. Abb. 1.2) ist eines der am höchsten belasteten Bauteile im Motorenbau [Spe09]. Aufgrund der hohen Ansprüche bezüglich der mechanischen Festigkeit

erfolgt die industrielle Massenproduktion von Kurbelwellen hauptsächlich durch umformtechnische Fertigungsverfahren, wie Freiform- oder Gesenkschmieden mit Hammer oder Presse. Welches dieser Verfahren angewendet wird, hängt u. a. von dem Anwendungsbereich und der zu fertigenden Stückzahl ab. Die Herstellung von PKW-Kurbelwellen erfolgt bei einer größeren Stückzahl durch Gesenkschmieden auf einer Presse und einem Materialüberschuss von bis zu 30 %.

Der Materialüberschuss findet sich größtenteils im Gratanteil der Kurbelwelle wieder. Ein geringer Anteil des Materialüberschusses wird für das sog. Aufmaß benötigt, das durch eine anschließende Zerspannung abgetragen wird. Dadurch werden die geforderten Maßtoleranzen und Oberflächengüten realisiert [Spe09]. Industrielle Forderungen zur besseren Nutzung von Ressourcen sowie das Bestreben zu kürzeren Fertigungsprozessen, lassen im Schmiedebereich den Forschungsbedarf hinsichtlich des gratlosen Präzisionsschmiedens für Langteile mit innovativen Werkzeugkonzepten erkennen.

1.1.1 Prozessentwicklung bei der umformtechnischen Verzahnungsherstellung

Die Entwicklung von Gesenkschmiedeprozessen zur Verzahnungsherstellung besitzt eine lange Tradition. Bereits 1902 stellte MÄGDEFRAU Pressformen zur bildsamen Herstellung von Zahnrädern durch Gesenkschmieden vor [Mäg02]. Vorerst wurde hauptsächlich die umformtechnische Umsetzung von Kegel- und Kronenrädern mit einem Stofffluss in Pressrichtung betrachtet. 1941 wurde erstmals ein Presswerkzeug zum Warmpressen von Stirn- oder Kegelrädern im geschlossenen Gesenk vorgestellt [Sin41a, Sin41b]. Durch stetige Weiterentwicklungen konnte die Prozessstabilität und erreichbare Bauteilgenauigkeit kontinuierlich verbessert werden. In dem Ende der 1950er Jahre vorgestellten Präzisionsschmiedeprozess zur Herstellung von Kegelrädern wiesen die erzeugten Verzahnungen bereits Genauigkeiten auf, welche mit den Güten konventioneller spanabhebender Fertigungsverfahren damaliger Zeit vergleichbar waren [Sch59, Bay56, Sch60]. Durch Übertragung und Anpassung dieser Technologie wurde das Bauteilspektrum kontinuierlich erweitert. Mitte der 1980er Jahre wurde ein Präzisionsschmiedeverfahren zur Herstellung von Gangradrohteilen mit einbaufertiger Kupplungsverzahnung zur Serienreife gebracht [Gut98, Gut09]. Ende der 1990er Jahre folgten Entwicklungen zur umformtechnischen Herstellung gerad- und schrägverzahnter Laufverzahnungen [Doe87, Doe89, Doe90, Ada90]. Aufbauend auf den genannten Arbeiten von Doege wurde im Jahr 1992 die Forschergruppe „Präzisionsumformung von schrägverzahnten Zahnrädern, Herstellung, Wärmebehandlung und Prüfung“ initiiert, die den Grundstein für den im Jahr 2000 gestarteten Sonderforschungsbereich 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ darstellte und dessen Forschungsergebnisse in diesem Buch vorgestellt werden.

1.1.2 Prozesentwicklung bei der umformtechnischen Kurbelwellenfertigung

Heutzutage werden Kurbelwellen durch Gießen und vornehmlich durch Schmieden hergestellt. Der Anteil gegossener Kurbelwellen war vor Mitte der 1950er und Anfang der 1960er Jahre gering, da sich mit derzeitigen Gießverfahren und -werkstoffen nicht die geforderte Festigkeiten einstellen ließen [NN05]. Die schmiedetechnische Herstellung von Kurbelwellen wird seit mehr als 100 Jahren untersucht. Ein erster Ansatz wurde 1904 von Brophy in „Verfahren zur Herstellung von Kurbelwellen“ verfolgt [Bro04]. Dabei wird ein modularer Aufbau der Kurbelwelle durch Segmente beschrieben, die zu einer kompletten Kurbelwelle verschweißt werden. Die Segmente, die aufgrund der derzeit vorhandenen Prozesstechnik annähernd in den gewünschten Abmessungen geschmiedet wurden, bestanden aus einer Kurbelwange sowie einem Haupt- und einem Pleuellager. Um die industrielle Massenproduktion durch Schmieden weiter voranzutreiben, wurde 1918 von Becker und Suchoparek ein „Verfahren zur Herstellung von mehrfach gekröpften Kurbelwellen mit versetzten Hüben“ vorgestellt [Bec18]. Dieses Verfahren beinhaltet das gleichzeitige Gesenkschmieden von zwei nebeneinanderliegenden Wellen aus einem Halbzeug. Aufgrund der Unwirtschaftlichkeit des Gesenkschmiedens von Kurbelwellen ab einer bestimmten Größe (Großkurbelwellen) werden diese in der Regel durch Freiformschmiedeprozesse hergestellt. Allerdings kann mit dem Freiformschmieden kein günstiger Faserverlauf erreicht werden. Daher wurde 1974 von Detzel und Maier ein Verfahren zum gratlosen Schmieden von Kurbelwellen im Einzelhubschmieden dargelegt [Det74]. Mit diesem Verfahren kann bei größeren Kurbelwellen durch das gratlose Schmieden ein geschlossener Faserverlauf realisiert werden, der die mechanischen Eigenschaften der Kurbelwelle bei dynamischer Beanspruchung verbessert.

Um Kurbelwellen im Gesenkschmiedeverfahren gratlos herstellen zu können, ist eine Stoffverschiebung in den Pleuellagerstellen erforderlich. Dies kann durch den Einsatz mehrdirektionaler Werkzeuge realisiert werden [Spe09]. Im Jahr 1914 wurde ein „Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von gekröpften Kurbelwellen und dgl.“ von White vorgestellt [Whi14]. Bei diesem Verfahren wird der erwärmte Stangenabschnitt mittels einer Vorrichtung über ein feststehendes Gesenkmittelteil in die gekröpfte Stellung gebogen und am Stangenabschnittsende gestaucht. In dem „Verfahren zum Pressen von Kurbelwellen“ wurde 1918 von Jakowitch ein mehrdirektional wirkendes Umformwerkzeug beschrieben [Jak18]. Bei diesem Verfahren wird die Kröpfung der Kurbelwelle aus einem Rundstahl durch einen Stempel, mit einer gleichzeitigen Einwirkung von zwei quer zur Welle angeordneten beweglichen Druckbacken, herausgepresst. Ein weiteres mehrdirektional wirkendes Werkzeug wurde 1971 von Rut vorgestellt: In „Vorrichtung zum Schmieden von Kurbelwellen“ wird eine Werkzeugvorrichtung, bestehend aus zwei getrennten Ober- und Unterwerkzeugen, zum Schmieden von Kurbelwellen durch gleichzeitiges Stauchen und Biegen beschrieben [Rut71]. Des Weiteren hat Rut 1981 in „Verfahren zum Schmieden von Kurbelkröpfungen“ ein Schmiedeverfahren dargelegt, bei dem die Kurbelkröpfungen durch das Stauchen und Biegen des Mittelteils, senkrecht

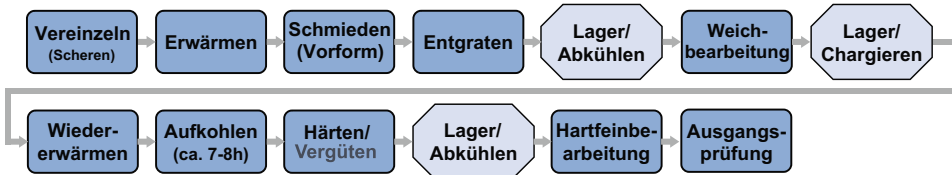


Abb. 1.3 Konventionelle Prozesskette zur Fertigung von Schmiedeteilen aus Stahl

zur Stauchrichtung, eines Stababschnittes hergestellt werden [Rut81]. Ferner wurde eine Vorrichtung zum mehrdirektionalen Schmieden der Kurbelkröpfungen entwickelt, die Keile und Kniehebel verwendet. 1983 wurde von Rut die Verwendung des Kniehebelprinzips in „Preßvorrichtung, insbesondere Vorrichtung zum Pressen von achsstummelfreien Kurbelhüben“ vorgestellt [Rut83]. Eine „Vorrichtung zum Schmieden von Kurbelhüben in einer vertikal wirkenden Schmiedepresse“ hat 1984 Ruget beschrieben [Rug84]. Mit dieser Vorrichtung können winkerversetzte Kurbelhübe axial auf einer vertikal wirkenden Schmiedepresse geschmiedet werden. Ein mehrdirektionales Umformwerkzeug mit Keilprinzip wurde 1996 in der Patentschrift „Gesenk zur Herstellung von Werkstücken mit exakt definierter Masseverteilung entlang der Längsachse“ von Doege und Broß vorgestellt [Doe87]. Mit dem Werkzeug kann in vertikaler und horizontaler Richtung mit einem Arbeitshub umgeformt werden. Im Rahmen des Forschungsprogrammes des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ wurden diese und weitere Werkzeugkonzepte erprobt und zum Teil erstmals in Form von Versuchswerkzeugen technisch umgesetzt.

1.2 Prozesskette zur Herstellung von geschmiedeten Verzahnungen und Kurbelwellen

Während das Zahnrad bereits sehr lange als Maschinenelement genutzt wurde, begann die teilautomatisierte mechanische Fertigung Mitte des 19. Jahrhunderts. Ausgelöst durch das im Jahre 1900 offengelegte sogenannte PFAUTER-Patent „Verfahren und eine Maschine zum Fräsen von Schraubenrädern mittelst Schneckenfräasers“ begann das Zeitalter der industriellen Zahnradfertigung [Fel08]. Hierauf aufbauend entwickelte sich eine bis heute weitestgehend unveränderte Prozesskette für die Herstellung von Verzahnungen tragenden Schmiedeteilen beziehungsweise Kurbelwellen aus Stahlwerkstoffen, die sich im Wesentlichen aus den in Abb. 1.3 dargestellten Fertigungsschritten zusammensetzt.

Durch Scheren wird das in der Regel durch Strangguss hergestellte stangenförmige Halbzeug aus Einsatzstahl in Rohteile verarbeitet. Durch ein Vorschmieden der Rohteile kann eine angepasste Vorform erzeugt und das in der Weichbearbeitung abzutragende Spanvolumen reduziert werden. Durch die Massivumformung des Rohteils wird ein poren- und lunkerfreies Gefüge mit hervorragenden Festigkeitseigenschaften für die hochbelasteten Antriebs- und Getriebekomponenten erzeugt. Die endgültige Bauteilgestalt und

insbesondere die Funktionsflächen, wie die Verzahnung, Innenbohrungen und Lagersitze, wird in der konventionellen Prozesskette durch spanenden Verfahren der Weichbearbeitung hergestellt. Die eigentliche Zahnformung erfolgt hierbei durch Wälzfräsen, -stoßen oder -schaben. Im Anschluss an die Wärmebehandlung, dem Einsatzhärten bestehend aus den Prozessschritten Aufkohlen, Härten und Anlassen, zur Einstellung der mechanischen Materialeigenschaften der Funktionsflächen und des Kerns des Bauteils folgt die spanende Hartfeinbearbeitung entsprechender Funktionsflächen durch Schleifen, Honen, Schälwälzfräsen oder Hartschälen. Kontinuierliche Weiter- und Neuentwicklungen, insbesondere in den Bereichen der Schneid- und Schleifwerkzeuge sowie der Maschinenteknik und -regelung, führten zu einer stetigen Verbesserung der Fertigungsgenauigkeiten und Zunahme der Leistungsfähigkeit dieser Prozesskette.

1.3 Die Prozesskette des SFB 489

Das Präzisionsschmieden ist ein Near-Net-Shape Verfahren, das es erlaubt, Stähle endkonturnah mit einer Genauigkeit von etwa ± 100 Mikrometern warmmassiv umzuformen. Beim Präzisionsschmieden werden die Bauteile gratfrei im geschlossenen Gesenk hergestellt (s. Kap. 2). Der Gratanteil, der beim konventionellen Schmieden bis zu 30 % der Einsatzmasse betragen kann, entfällt. Neben der direkten Kostenersparnis durch Reduzierung des Einsatzmaterials entfallen zudem Prozessschritte der herkömmlichen Prozesskette, wie beispielsweise das Abgraten. Indirekte Effekte führen zu weitergehenden Kostensenkungen. Hier sind beispielsweise Kostenersparnisse durch die nahezu vollständige Einsparung der Weichbearbeitung der Schmiedeteile zu nennen. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen bietet die Präzisionsumformung im geschlossenen Gesenk zudem den technischen Vorteil, dass der Faserverlauf im Gefüge des Werkstoffs ununterbrochen der Kontour des Bauteils folgt und so zu erhöhten Dauerfestigkeiten führt.

Die resultierenden geometrischen Toleranzen der Präzisionsschmiedeteile bedingen Werkzeugkonzepte, die innovative Ansätze bei der Stadienplanung und Werkzeuggestaltung erforderlich machen (s. Kap. 2.3 und 2.4). Eine Zielsetzung innerhalb des Forschungsprogramms des Sonderforschungsbereichs bestand in der Entwicklung innovativer, mehrdirektional wirkender Werkzeuge, die in konventionellen Schmiedepressen betrieben werden können. Diese Technologie erlaubt beispielsweise das aufwändige „Twisten“, das Verdrehen der Hub- und Hauptlager einer Kurbelwelle, im Anschluss an den mehrstufigen Umformprozess in den geometriegebenden Umformvorgang zu integrieren und so den nachgeschalteten Prozessschritt einzusparen (s. Abschn. 2.3.2).

Bei der Herstellung von in der Massenverteilung komplexen Schmiedeteilgeometrien wird die Massenvorverteilung im Roh- bzw. Halbfertigteil in der Regel durch vorgelagerte Umformschritte in der Stadienfolge eingestellt. Zur Erzeugung von geeigneten Massenvorverteilungen kann neben der schmiedepressegebundenen Umformung zudem ein ein- oder

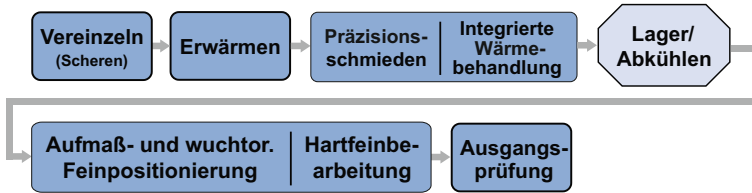


Abb. 1.4 Prozesskette des Sonderforschungsbereichs 489

mehrschrittiger Umformvorgang durch einen Querkeilwalzprozess angewendet werden (s. Abschn. 2.3.3).

Aufgrund der Umformung im geschlossenen Gesenk wird beim Präzisionsschmieden insbesondere an die Genauigkeit der Geometrie und des Volumens der Rohteile hohe Ansprüche gestellt. Um in der Prozesskette des SFB 489 den Aufwand bei der Rohteilherstellung zu reduzieren, eine gleichbleibende Bauteilqualität zu gewährleisten und den Gesenkverschleiß zu verringern, werden Massenschwankungen der Rohteile durch sogenannte Ausgleichsräume in der Gesenkkontour kompensiert (s. Abschn. 2.3.2). Durch eine geschickte Positionierung und Ausgestaltung der Ausgleichsräume wird das überschüssige Material bei der späteren spanenden Bearbeitung, beispielsweise der Funktionsflächen, mit minimalem Aufwand entfernt. Aufgrund der geringen Dimensionierung der Bearbeitungsaufmäße von Präzisionsschmiedebauteilen ist neben der thermischen und elastischen Aufweitung der Schmiedewerkzeuge zudem das Schrumpfungsverhalten der warmumgeformten Bauteile bei der geometrischen Abstimmung der Gesenkkontour bei der Werkzeugauslegung zu berücksichtigen (s. Abschn. 2.3.4).

Bei der Prozesskette des Sonderforschungsbereiches 489 handelt es sich um eine verkürzte Prozesskette mit zumeist direkt verbundenen Prozessen, die eine Einzelteilfertigung realisieren (s. Abb. 1.4). Schwankungen relevanter Prozessparameter, schleichende Prozessänderungen oder auch sporadisch auftretende Störungen müssen möglichst früh erkannt werden, um den Wertschöpfungsverlust aufgrund der Weiterverarbeitung von Ausschussteilen in der Prozesskette zu vermeiden. Basierend auf dieser Zielsetzung wurden im Rahmen des SFB 489 eine Prozessüberwachung des Präzisionsschmiedes von Zahnrädern, Ritzelwellen und Kurbelwellen entwickelt. Die wegsynchrone Betrachtung des transienten Umformvorganges mit hochfrequenten Körperschall- und Schallemissionsaufnahmen erlaubt die Identifikation von signifikante Informationen über den Prozessablauf, das Umformverhalten, den Einfluss relevanter Störgrößen sowie die Formfüllung und Bauteilprägung im Hinblick auf die zu bewertende Bauteilqualität (s. Kap. 6.3). Durch die kontinuierliche Analyse der transienten Körperschall- und Schallemissionssignale im Zeit-Frequenzbereich mit Hilfe der Wavelet-Transformation sowie die vektorielle Betrachtung signifikanter Merkmale im Vergleich mit Referenz-Gutteilen wird eine mehrdimensionale Klassifizierung mit einer hohen Trennschärfe hinsichtlich des Materialeinflusses, der Prozessparameter, der Störgrößen sowie der Bauteilqualität erreicht.

Schmiedewerkzeuge für das Präzisionsschmieden sind aufgrund ihrer komplexen und filigranen Geometrie verschleißanfälliger als konventionelle Umformwerkzeuge. Die ge-

ringeren Fertigungstoleranzen der Präzisionsschmiedeteile bedingen zudem eine entsprechend verringerte Toleranz gegenüber den unterschiedlichen Verschleißerscheinungen (s. Kap. 3.1). Zur Verbesserung des Verschleißverhalten von Präzisionsschmiedewerkzeugen sowie konventioneller Umformwerkzeuge befasste sich der SFB 489 in einem Schwerpunkt mit der Entwicklung von Keramik-Stahl-Hybridwerkzeugen sowie dem Verschleißschutz durch Mehrlagenbeschichtungen (s. Kap. 3.3). Besonders durch Verschleiß beanspruchten Bereiche der Umformwerkzeuge können bereits während der Prozessauslegung durch numerische Berechnungen identifiziert werden (s. Kap. 3.2). Entsprechende Bereiche können mit Keramikeinsätzen versehen werden, die durch Aktivlöten mit dem Gesenkgrundkörper gefügt werden. Die mechanische, chemische und thermische Beständigkeit der Keramik bewirkt eine deutliche Standzeiterhöhung bei der Massivumformung (s. Abschn. 3.3.3). Die Entwicklung einer Feinbearbeitungstechnologie für Keramik-Stahl-Verbunde erlaubt darüber hinaus die Herstellung von komplexen und freigeformten Gesenkgeometrien (s. Kap. 3.4). Bei flächig durch Verschleiß beanspruchten Umformwerkzeugen ist die Verwendung von Mehrlagenbeschichtungen zielführend. Durch die Verwendung von Mehrlagen-Schichtsysteme der Gattung TiN-TiCN-TiC kann die Standzeit von Massivumformwerkzeugen deutlich erhöht werden (s. Abschn. 3.3.2).

In herkömmlichen Prozessketten zur Herstellung von Schmiedebauteilen wird eine Wärmebehandlung in dem Umformvorgang nachgelagerten Prozessschritten durchgeführt. Die nach der Formgebung abgekühlten Bauteile werden chargiert, erneut erwärmt und wärmebehandelt. Dieser mit wiederholt auftretenden Erwärmungsvorgängen behaftete Fertigungsablauf bedingt entsprechend hohe Energiekosten. In der verkürzten Prozesskette des Sonderforschungsbereiches 489 wird die Wärmebehandlung direkt aus der Prozesswärme des formgebenden Umformvorgangs durchgeführt und somit die Energiebilanz der Prozesskette deutlich verbessert (s. Kap. 4). Verzahnungen tragende Bauteile wie Zahnräder und Ritzelwellen sowie Kurbelwellen werden in der Regel durch Flamm-, Einsatz- oder Induktionshärten wärmebehandelt (s. Abschn. 4.1.2). Aufgrund der direkten Verkettung der Wärmebehandlung mit der geometriegebenden Massivumformung, werde die Präzisionsschmiedeteile Vergütet (s. Abschn. 4.2.2).

Nach der Entnahme aus der Präzisionsschmiedepresse besitzen die Schmiedeteile eine Temperatur von ca. 900 °C. Sie werden von einer Zuführungseinrichtung in einem Düsenfeld platziert und mit einem Spray aus Wasser und Luft lokal und zeitlich angepasst abgekühlt (s. Kap. 4.5). Bei der konventionellen Wärmebehandlung tritt beim Abschrecken in Wasser- oder Ölbädern aufgrund des so genannten Leidenfrosteffekts in Grenzen eine inhomogene und nicht kontrollierbare Abkühlung im Bauteilvolumen auf. Durch das geometrisch und zeitlich kontrollierbare Wasser-Luft-Spray werden die Bauteile gezielt, mit verringertem Verzug und reproduzierbarer abgeschreckt (s. Abschn. 4.5.4). Zudem kann das Bauteil gezielt abgekühlt werden, um beispielsweise werkstofftechnische Eigenschaften auf die Bauteilbelastung bei der Anwendung einzustellen (s. Abschn. 4.5.3). Durch die Anwendung der Sprayfeldtechnologie können die Bauteile mit der selben Anlagentechnik beispielsweise Randschichtvergütet oder Bainitisiert werden (s. Kap. 6.4). Die Flexibilität der Wärmebehandlungstechnologie erlaubt sogar, den Verzug von Bau-

teilen gezielt durch asymmetrische Abkühlung zu beeinflussen. Mit Hilfe eines optischen Messsystems werden die wärmezubehandelnden Bauteile warm gemessen. Auf Basis der Messwerte erfolgt die Berechnung geeigneter Sprayparameter und die gezielte asymmetrische Abkühlung im Hinblick auf die geforderten Werkstoffeigenschaften sowie der Minimierung des Verzugs des Bauteils (s. Abschn. 4.5.4).

Zur Auslegung der Sprayfelder und des Wärmebehandlungsprozesses können numerische Berechnungen Anwendung finden. Die Basis der Berechnungen bildet die Kenntniss über die relevanten Einflussgrößen, die auf die Ausprägung des Wasser-Luft-Sprays einfluss nehmen (s. Abschn. 4.4.1). Durch die Abbildung der wesentlichen Sprayfeldeigenschaften kann die Bauteilabkühlung berechnet werden. Wird zudem die Berechnung der Wärmebehandlung mit der Umformsimulation gekoppelt, ist eine hochgenaue Prognose der resultierenden Gefügeeigenschaften des wärmebehandelten Präzisionsschmiedeteils möglich (s. Abschn. 4.6.1). Die Basis der Modellierung bildet eine umfassende Werkstoffcharakterisierung der verwendeten Vergütungsstähle (s. Kap. 4.3). Die lokale Gefügezusammensetzung wird anschließend genutzt, um die mechanischen Eigenschaften zu bestimmen. Beispielsweise ist eine Prognose der Randschichthärte und Einhärttiefe in Abhängigkeit des Schmiedeprozesses, der Wärmebehandlungsparameter der Spraykühlung sowie eines nachgeschalteten Anlassvorgangs möglich. Entsprechend gekoppelte Berechnungsmodelle sind rechenintensiv und können beispielsweise nicht für die oben genannten Parameterbestimmung für die Einstellung einer asymmetrischen Wärmebehandlung Verwendung finden. Für die rasche Abschätzung entsprechender Prozessparameter können beispielsweise Einschrittlöser auf Basis von Künstlichen Neuronalen Netzen verwendet werden (s. Abschn. 4.6.2).

In der traditionellen Prozesskette zur Herstellung von Verzahnungen, findet im Anschluss an die umformtechnische Herstellung der Halbfertigteile eine weichbearbeitung statt. Die Bearbeitungsaufmaße der Funktionsflächen können in Einzelfällen mehrere Millimeter aufweisen (s. Kap. 2). Beispielsweise wird bei Zahnrädern zuerst die Mittelbohrung hergestellt, die dann als Referenz für die Fertigung der Verzahnung dient. In der Prozesskette des SFB 489 wird die Mittelbohrung sowie die Verzahnung durch den Präzisionsschmiedeschritt endkonurnah geformt. Die Mittelbohrung weist, unvermeidbare Form- und Lagefehler auf, die durch Versatz des ber und Untergesenks sowie Montagespiel im Umformwerkzeug entstehen. Resultierend kann eine Exzentrizität der Bohrung in Bezug auf die Verzahnung festgestellt werden (s. Abschn. 5.1.1). Entsprechende Fehler können durch die Zugabe eines erhöhten Bearbeitungsaufmaßes kompensiert werden. Diese Lösung widerspricht jedoch dem Grundgedanken des Präzisionsschmieprozesses sowie der Prozesskette des SFB 489. Gelöst wird die Problematik daher durch einen adaptronischen Feinpositioniervorgang mit anschließender Hartbearbeitung (s. Kap. 5.1). Im Rahmen der Forschungstätigkeiten des Sonderforschungsbereiches wurden Adaptronische Spannvorrichtungen für Drehprozesse in zwei, Exzenterfehler von Zahnrädern (s. Abschn. 5.1.3), und vier Freiheitsgraden, Exzenter und Taumelfehler von Ritzelwellen (s. Abschn. 5.1.4), entwickelt und erprobt. Die Korrektur in zwei bzw. vier Freiheitsgraden erfolgte auf Basis einer optischen Messung der Funktionsflächen durch konoskopische Senoren, die

in die Bearbeitungsmaschine integriert würden und eine anschließende aufmaßorientierte Berechnung eines Verschiebungs- bzw. Verkippungsvektors auf Basis der Messdaten eines jeden Bauteils (s. Kap. 6.2). Durch Übergabe des Korrekturvektors und Auslenkung der Bauteile durch die adaptiven Spannhalter werden die Halbfertigteile bei der anschließenden Hartbearbeitung der ersten Funktionsfläche, die darüber hinaus in nachfolgenden Prozessschritten als Referenzfläche fungiert, optimal bearbeitet. Prozessschwankungen beim Umformprozess oder bei der Wärmebehandlung, die bei einem Bearbeitungsaufmaß von beispielsweise $150\ \mu\text{m}$ bereits im kleinen Umfang zum Ausschuss der Teile führen können, werden so kompensiert. Durch die individuelle Bearbeitung jedes Bauteils wird zudem eine deutliche Qualitätssteigerung der Funktionsflächen erzielt.

Als abschließender Fertigungsschritt ist das Schleifen der Funktionsflächen, der Verzahnung der Zahnräder bzw. der Haupt- und Hublager der Kurbelwelle vorgesehen. Insbesondere die im Vergleich zur herkömmlichen Prozesskette auftretenden Aufmaßschwankungen und die aufgrund des Wegfalls der spanenden Weichbearbeitung vergleichsweise hohen Aufmaße vor dem Schleifprozess (s. Abschn. 5.2.2), machten die Entwicklung eines angepassten kontinuierlichen Wälzschleifprozesses notwendig (s. Abschn. 5.2.4). Zum Einsatz kommen bei der Herstellung von Verzahnungen CBN-Schleifwerkzeuge, die sich durch eine hohe Werkzeugstandzeit auszeichnen (s. Abschn. 5.2.5).

Bei der Bearbeitung von präzisionsgeschmiedeten Kurbelwellen treten aufgrund der beschriebenen Positionierfehler und Prozessschwankungen sowohl Exzenter- als auch Taulmefehler auf, die durch den Einsatz einer adaptiven Feinpositioniereinrichtung, in Form eines zwei Freiheitsgrad-Feinpositioniersystems und eines aktiven Reitstocks (s. Abschn. 5.3.4), sowie der Integration von optischen Messsystemen in die Schleifmaschine (s. Abschn. 6.2.2), kompensiert werden können. Mit Hilfe des Feinpositioniersystems, einer Prozessvorsteuerung zur Kompensation der Werkstückabdrehung (s. Abschn. 5.3.2) sowie einer adaptiven Prozesssteuerung (s. Abschn. 5.3.3) können trotz der lokal schwankenden Aufmaße der Präzisionsschmiedeteile qualitativ hochwertige Prozessergebnisse unter wirtschaftlichen Voraussetzungen erzielt werden. Durch die Integration der optischen Messtechnik in die Schleifmaschine, der Entwicklung von Mess- und Auswerteverfahren zur optischen Bestimmung der Aufmaßverteilung und Unwucht und die Übergabe dieser Werte an die Feinpositioniereinrichtung sowie die adaptive Prozesssteuerung kann der Aufwand für das Auswuchten der Kurbelwellen bereits durch die Schleifbearbeitung der Funktionsflächen minimiert werden (s. Abschn. 6.2.3).

Für hochbeanspruchte und sicherheitsrelevante Bauteile wird eine hohe Qualität vorausgesetzt, die für jedes Bauteil ermittelt und protokolliert werden muss. Dies ist in der Regel nur mit zerstörungsfreien Mess- und Prüftechniken möglich, die die Qualitätsmerkmale der Bauteile prozessbegleitend ermitteln können. Aufgrund der hohen Taktraten der Umformprozesse müssen entsprechende Mess- und Prüfmethode rasch die Beurteilung der Bauteilqualität vornehmen können. Im Rahmen des Forschungsprogramms des SFB 489 wurden eine Wirbelstrom-Scantechnik zur prozessnahen zerstörungsfreien Bauteil-Fehlerprüfung sowie Impuls-Thermografie mit induktiver Anregung zum schnellen empfindlichen Nachweis systematischer Bauteil-Oberflächenfehler, wie Schmie-

defehler, Härte- und Ermüdungsrisse, in Bereichen von hochbeanspruchten Funktions- und profilierten Bauteilflächen entwickelt (s. Kap. 6.3.3). Neben der Fehlerfreiheit sind die in einer Prozesskette für Hochleistungsbauteile eingestellten Werkstoffeigenschaften im Bauteil und der Bauteilrandzone von wesentlicher Bedeutung für die Bauteileigenschaft und die Bauteilqualität. Diesbezüglich liefert die neue entwickelte Technologie der Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen mit speziell an die Prüfaufgabe und die Bauteilgeometrie angepassten Spulensystemen und eine werkstoff- und bauteilspezifische Systemkalibrierung eine schnelle zerstörungsfreie Bestimmung von lokalen und integralen Härtekennwerten, wie der Rand- und Kernhärte sowie der Einhärtungstiefe (s. Kap. 6.3.4), die zur Regelung von einzelnen vorgelagerten Prozessschritten wie dem Umformvorgang (s. Kap. 2) sowie der Wärmebehandlung (s. Kap. 4) und damit zur inline Qualitätssicherung der Bauteileigenschaften in der Prozesskette Präzisionsschmieden eingesetzt werden können.

Zur flächigen hochauflösenden Qualitätsprüfung der Funktionsflächen in der getakteten Fertigung können optische Messverfahren zum Einsatz kommen (s. Kap. 6.1.1). Verwendung findet ein Streifenprojektionsmessverfahren anwendung. Analyse und Einspassverfahren erlauben so beispielsweise die Messung von Prozessbedingten Fehlern wie dem Bauteilverzug bei der Wärmebehandlung (s. Abschn. 6.1.2) oder Störungen bei der Schleifbearbeitung der präzisionsgeschmiedeten Verzahnungen. Die Kombination des Streifenprojektionsverfahrens, des Schattenprojektionsverfahrens sowie der konoskopischen Messung der Funktionsflächen erlaubt zudem die Fertigungsnahe vollständige Beurteilung der Qualität der Funktionsflächen von Langteilen wie beispielsweise Kurbelwellen (s. Abschn. 6.1.3). Eine Auslegung entsprechender Messaufgaben in turbulenter Produktionsumwelt mit häufigen Produktionsumstellungen kann beispielsweise mit der Virtuellen Multisensortechnik erfolgen (s. Abschn. 6.1.4).

Zur Verifikation der Leistungsfähigkeit von durch die Prozesskette des SFB 489 Hergestellten präzisionsgeschmiedeten Hochleistungsbauteilen, wie Zahnradern und Ritzelwellen, erfolgt die abschließende Prüfung der Bauteileigenschaften hinsichtlich der Laufeigenschaften, Flankentragfähigkeit und Zahnfußfestigkeit, in einem Verzahnungs-Getriebeprüfstand für schrägverzahnte Zahnradern (s. Kap. 6.4). Durch die Entwicklung und Einsatz neuartiger innovativer Prüf- und Analysetechnik, wie einer Hochfrequenz-Wirbelstromtechnik zur Überwachung des Verzahnungszustandes unter Einsatzbedingungen und der Installation von Körperschall- und Schallemissionsaufnehmern am Getriebegehäuse und vorteilhaft an den umlaufenden Radsatzwellen, wird mit einer hohen Empfindlichkeit eine frühzeitige Erkennung und Ortung von Verzahnungsschäden, Rissinitiierung, Graufleckigkeit und Grübchenbildung ermöglicht.

Neben der technologisch ausgerichteten Forschungsthemen widmete sich der Sonderforschungsbereich 489 zudem der Untersuchung der technischen, logistischen und wirtschaftlichen Wechselwirkungen innerhalb der Prozesskette Präzisionsschmieden (s. Kap. 7). Zur nachhaltigen und effektiven Optimierung bereits etablierter Fertigungsverfahren und Prozessketten ist eine umfassende technische, logistische und wirtschaftliche Optimierung der gesamten Prozesskette notwendig (s. Kap. 7.1). Die umfangreichen

technologisch-logistischen Wechselwirkungen der einzelnen Teilprozesse der Prozesskette werden in ganzheitlichen Beschreibungs- und Simulationsmodellen erfasst. Zur Auslegung, Steuerung und Analyse der Prozesskette werden die technologischen Schnittstellen zwischen den einzelnen Teilprozessen untersucht und eine Bewertung der verschiedenen Einflussgrößen durchgeführt (s. Kap. 7.2). Die wirtschaftlich-logistischen Zusammenhänge in der Prozesskette werden durch logistische Kennlinien festgehalten (s. Kap. 7.4). Abgerundet wird diese Betrachtung der Prozesskette durch die Auslegung und Untersuchung von flexiblen Lieferketten sowie der Risikobewertung der eng verketteten Einzelteilfertigung in der Prozesskette des SFB 489 (s. Kap. 7.3).

Literatur

- [Ada90] Adams B (1990) Verfahren und Fertigungssystem zum Präzisions-schmieden von Zylinder-rädern; Dissertation, Universität Hannover, 1990
- [Bay56] Bayerisches Leichtmetallwerk AG (1956) Improvements in method of an apparatus for Hot Forging Toothed Wheels. The Patent Office London, Specification Published: 08.08.1956
- [Bec18] Becker E, Suchoparek R (1918) Verfahren zur Herstellung von mehrfach gekröpften Kurbelwellen mit versetzten Hüben. (29.04.1918)
- [Bro04] Brophy J (1904) Verfahren zur Herstellung von Kurbelwellen. (26.04.1904)
- [Det74] Detzel H, Maier A (1974) Patentierte für: Maschinenfabrik Alfing Keßler KG: Verfahren und Vorrichtung zum Schmieden hochwertiger Kurbelwellen. (24.01.1974)
- [Doe87] Doege E, Hartke G, Adams B (1987) Verfahren und Vorrichtung zum Schmieden von Zahnrädern. Deutsches Patentamt, Tag der Patenterteilung: 20.08.1987
- [Doe89] Doege E, Adams B (1989) Verfahren und Vorrichtung zum Schmieden von Zahnrädern. Deutsches Patentamt, Tag der Offenlegung: 29.06.1989
- [Doe90] Doege E, Adams B (1990) Verfahren und Vorrichtung zum Schmieden von schrägverzahn-ten Zahnrädern, Tag der Offenlegung: 22.11.1990
- [Doe10] Doege E, Behrens, B-A (2010) Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien; Maschinen. 2. bearbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin, 2010
- [Fel08] Felten K (2008) Verzahntechnik – Das aktuelle Grundwissen über Herstellung und Prüfung von Zahnrädern; 2., neuüberarbeitete Auflage, expert Verlag, 2008
- [Gut98] Gutmann, P (1998) Precision Formed Powertrain Components. 4th International Precision Forging Conference, Ohio, 1998
- [Gut09] Gutmann P (2009) Gangräder mit präzisionsgeschmiedeter Kupp-lungsverzahnung; Schmiedejournal, September, 2009
- [Jak18] Jakowitsch J (1918) Verfahren zum Pressen von Kurbelwellen. (14. 09.1918)
- [Jüe86] Jütte F (1986) Beitrag zum Präzisionsschmieden; Dissertation, Uni-versität – Gesamthoch-schule – Paderborn, 1986
- [Mäg02] Mägdefrau H (1902) Pressform zur Herstellung von Zahnrädern und dgl., Kaiserliches Patentamt, Ausgegeben am: 15.04.1902
- [NN05] NN (2005) Kraftfahrzeug-Kurbelwellen – Konstruktion, Berechnung, Herstellung. 2. Auf-lage, sv corporate media, München 2005
- [Rug84] Ruget, G (1984) Patentinhaber: Creusot-Loire: Vorrichtung zum Schmieden von Kurbelhüben in einer vertikal wirkenden Schmiedepresse. (14.06.1984)

- [Rut71] Rut T (1971) Anmelder: Centralne Laboratorium Obrobki Plastyczej: Vorrichtung zum Schmieden von Kurbelwellen. (11.02.1971)
- [Rut81] Rut T (1981) Patentinhaber: Instytut Obrobki Plastyczej: Verfahren zum Schmieden von Kurbelkröpfungen. (16.04.1981)
- [Rut83] Rut T (1983) Patentinhaber: Instytut Obrobki Plastyczej: Preßvorrichtung, insbesondere Vorrichtung zum Pressen von achsstummelfreien Kurbelhüben. (10.03.1983)
- [Sin41a] Singer, F (1941) Werkzeug zum Warmpressen von Zahnrädern. Reichspatentamt, Ausgegeben am 07.03.1941
- [Sin41b] Singer F (1941) Preßwerkzeug zum Warmpressen von Stirn- oder Kegelhädern. Reichspatentamt, Ausgegeben am 27.03.1941
- [Sch59] Schober F (1959) Gesenk zum Warm Schmieden von Kegelzahnradern, Ausgabe der Patentschrift: 10.12.1959
- [Sch60] Schober F (1960) Method of Pressing Bevel Gear Wheels and the like form Steel, United States Patent Office, Patented: 20.12.1960
- [Spe09] Specker A (2009) Untersuchungen zum gratlosen Gesenkschmieden von Kurbelwellen. In: Behrens B-A, Nyhuis P, Overmeyer L (Hrsg.) Berichte aus dem IPH, Bd.04/2009, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Garbsen 2009
- [Vuc04] Vucetic D, Klocke F (2004) Ansätze zur Optimierung des Kaltfließpressens von Strinverzahnungen. 45. Arbeitstagung „Zahnrad- und Getriebeuntersuchungen“, WZL, Aachen, 2004
- [Whi14] Williams White & Co (1914) Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von gekröpften Kurbelwellen und dgl. (14.07.1914)

Dirk Odening, Mathias Meyer, Andreas Klassen, Anas Bouguecha und
Bernd-Arno Behrens

Inhaltsverzeichnis

2.1	Bauteilspektrum	20
2.2	Werkstoffspektrum	20
2.3	Prozess- und Werkzeugauslegung	22
2.3.1	Funktions- und prozessgerechte Bauteilgestaltung	23
2.3.2	Werkzeugkonzepte	24
2.3.3	Stadienplanung beim Präzisionsschmieden	31
2.3.4	Werkzeugkorrektur	36
2.4	Prozesssimulation	41
2.4.1	Grundlagen der FEM	42
2.4.2	Aufbau von FE-Systemen	43
2.4.3	Standardanwendungen	45
	Literatur	48

Nach DIN 8580 versteht man unter dem Begriff „Umformen“ das Fertigen durch bildsames oder plastisches Ändern der Form eines festen Körpers. Hierbei werden sowohl die Masse als auch der Stoffzusammenhalt des zu bearbeiteten Körpers beibehalten. Für die Umformung metallischer Werkstoffe ergänzt SIEGERT diese Definition um die gezielte Beeinflussung der Oberflächen- und Produkteigenschaften durch den Umformvorgang.

Die teilweise oder vollständige umformtechnische Umsetzung von Fertigungsprozessen bietet aufgrund verschiedener technologischer, konstruktiver sowie produktionstech-

D. Odening (✉) · A. Klassen · A. Bouguecha · B.-A. Behrens
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover,
An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland
E-Mail: dirk.odening@gmx.de

D. Odening
Am Schelmenbusch 4, 76307 Karlsbad, Deutschland

M. Meyer
Institut für Integrierte Produktion Hannover GmbH, Hollerithallee 6,
30419 Hannover, Deutschland



Abb. 2.1 Zahnradrohling geschmiedet aus dem Vollen gefräst [Lao97]

nischer und ökonomischer Gesichtspunkte diverse Vorteile. Aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften werden Schmiedeteile in sicherheitsrelevanten Bereichen hoher statischer und dynamischer Belastungen eingesetzt. Sie eignen sich insbesondere für kraft- und bewegungsübertragende Komponenten im Fahrzeug- und Turbinenbau [Imu08]. Neben den guten mechanischen Eigenschaften zeichnen sich geschmiedete Bauteile des Weiteren durch eine reduzierte Verzugsneigung in der abschließenden Wärmebehandlung aus [Sil03]. In Zeiten der globalen Energie- und Rohstoffverknappung und gesellschaftspolitischen Forderungen nach einem sparsamen Umgang der natürlichen Ressourcen gewinnen umformende Fertigungsverfahren immer mehr an Bedeutung. Je nach eingesetzter Prozess- und Anlagentechnologie müssen für die Erzeugung von 1 kg Kohlenstoffstahl 18 MJ bis 36 MJ aufgewendet werden [Doe10]. Nach TEKKAYA entfallen für warmumgeformte Stahlbauteile bis zu 90 % der insgesamt aufzuwendenden Energie bereits auf den grundlegenden Urformprozess zur Stahlerzeugung [Tek09]. HERBERTZ beziffert bezogen auf den Primärenergiebedarf für die Herstellung von Massivbauteilen ca. zwei Drittel auf die Vormaterialerzeugung und zirka ein Drittel auf die Weiterverarbeitung in den Unternehmen der Warm- und Massivumformung [Her11]. Durch die gute Rohstoffausnutzung umformtechnischer Fertigungsverfahren ergibt sich somit trotz erhöhtem Energiebedarf zur Rohteilerwärmung und Umformung insgesamt eine positive Energiebilanz. In einer vergleichenden Betrachtung am Beispiel eines konventionell gespannten und geschmiedeten Rücklaufrades zeigt LAOURINE eine mögliche Materialeinsparung von 43 % durch ein verringertes Rohteilvolumen und eine verbesserte Werkstoffausnutzung der umformtechnischen Fertigungsroute auf. Zusätzlich gelingt es durch die zeitgleiche Ausformung einer funktionsgerechten Stirnkontur im Übergangsbereich zwischen Nabe und Zahnkranz das spätere Bauteilgewicht ohne zusätzlichen Fertigungsaufwand um 22 % gegenüber der einfach gespannten Variante zu reduzieren (s. Abb. 2.1).

Im Vergleich zu der konventionellen Prozesskette mit Vorschmieden und spanender Weichbearbeitung der Bauteil- bzw. Verzahnungskontur (s. Abb. 2.1) ist durch Einsatz des

gratlosen Präzisionsschmiedens neben der Erhöhung der Materialeffizienz eine Einsparung von Fertigungsschritten und eine Verkürzung der gesamten Prozesskette zu erreichen.

Nach dem Formgebungsprozess ist oftmals nur noch eine abschließende Hartfeinbearbeitung definierter Funktionsflächen mit minimalen Spanvolumina erforderlich. Die Substitution der spanenden Weichbearbeitung und die hohen Prozesstemperaturen von bis zu 1250 °C beim Schmieden von Stahlwerkstoffen ermöglichen eine integrierte Wärmebehandlung der geschmiedeten Bauteile direkt aus der Schmiedewärme. Durch die Vermeidung einer Grobkornbildung aufgrund sekundärer Rekrystallisation bei Wiedererwärmung und die Ausbildung eines sehr feinen Martensits während der Abschreckbehandlung können festigkeitsoptimierte Gefügestände in den Schmiedeteilen erreicht werden (s. Kap. 4).

Neben der zumeist im Vordergrund stehenden äußeren Formgebung des Werkstoffs können die werkstoffimmanenten Materialeigenschaften, wie der Faserverlauf und die Gefüge- und Kornstruktur, durch den Formgebungsprozess positiv beeinflusst werden. Der Erhalt der grundsätzlichen Werkstoff- und Faserstruktur sowie die verformungsinduzierte Kornfeinung beeinflussen die bei Wärmebehandlung ablaufenden Umwandlungs- und/oder Ausscheidungsvorgänge und tragen zur Festigkeitssteigerung bei [Lan93a]. Durch eine weitestgehende Entkopplung von den fertigungsbedingten Randbedingungen konkurrierender spanender Fertigungsverfahren (Zustellwege, Werkzeugausläufe etc.) begünstigen umformtechnische Fertigungsverfahren eine funktions- und belastungsoptimierte Bauteilgestaltung [Wit11]. Hierdurch sind neben einer verbesserten Funktionalität eine weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit bei unveränderter Baugröße oder verringerte Abmessungen bei gleichbleibender Festigkeit möglich. Dies unterstützt den Trend zum „Downsizing“ und Leichtbau [Ado95].

Als ein wesentliches Klassifizierungsmerkmal wird die Umformtemperatur herangezogen. Eine vorherige Erwärmung des Umformgutes führt zu einer deutlichen Reduzierung der erforderlichen Umformkräfte bei gleichzeitiger Erhöhung des Umformvermögens. Traditionell wird zwischen Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung unterschieden (s. Abb. 2.2). Stahlwerkstoffe werden im Allgemeinen oberhalb 1000 °C warm umgeformt [Doe10].

Nach DIN 8583-1 wird das Gesenkformen oder Gesenkschmieden als Druckumformen mit gegeneinander bewegten Formwerkzeugen (Gesenken) definiert. Es wird zwischen Gesenkschmieden mit und ohne Grat unterschieden. Während bei Gesenkschmiedeprozessen mit Grat überschüssiger Werkstoff durch einen Gratspalt abfließen kann und in einem nachfolgenden Fertigungsschritt entfernt werden muss, erfolgt das Gesenkschmieden ohne Grat im vollständig geschlossenen Gesenk. Das gratlose Schmieden zeichnet sich insbesondere durch die optimale Werkstoffausnutzung, den geringen Nachbearbeitungsaufwand sowie den gänzlich geschlossenen Faserverlauf der Schmiedeteile aus.

Gesenkschmiedeteile aus Stahl werden überwiegend nach DIN EN 10243-1 toleriert und hinsichtlich ihrer Fertigungstoleranzen klassifiziert. Je nach gestellten Genauigkeitsanforderungen wird zwischen der Schmiedegüte „F“ für allgemeine Anwendungsfälle und „E“ für Schmiedeteile mit erhöhten Genauigkeitsanforderungen unterschieden. Eine weiter-

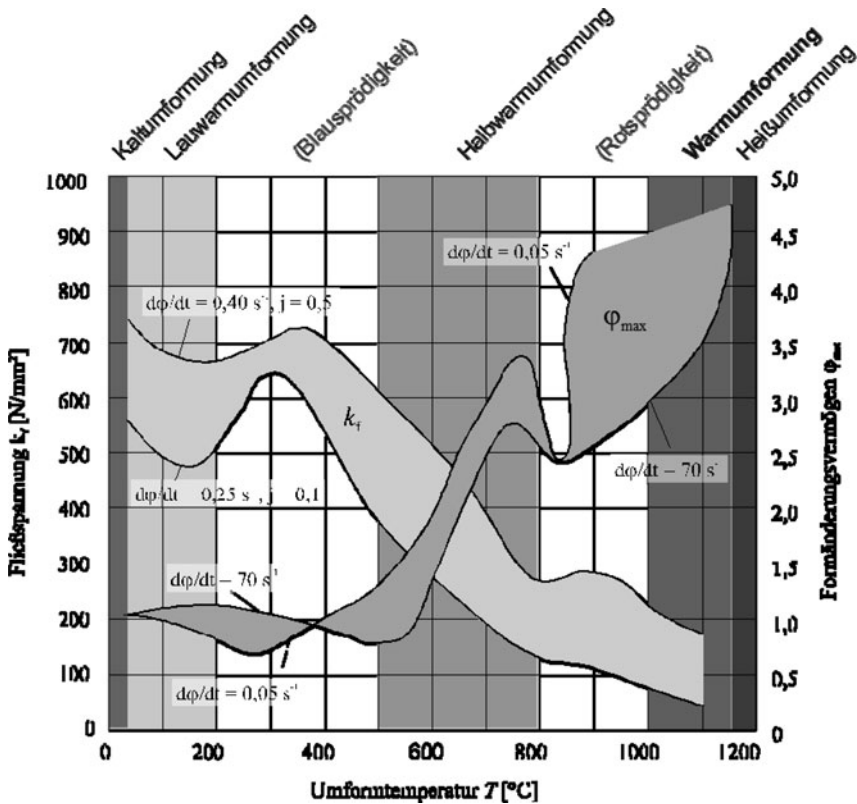


Abb. 2.2 Fließkurve/Formänderung über der Umformtemperatur von Schmiedestählen [Doe10]

führende Klassifizierung der Fertigungsgenauigkeiten erfolgt in der DIN EN ISO 286 nach dem sogenannten ISO-Toleranzsystem (IT). Hiernach entsprechen die klassischen Schmiedegüten „F“ und „E“ je nach Nennmaß den Grundtoleranzgraden IT 16 bis IT 14. Durch Erhöhung des technischen Aufwands können die Fertigungsgenauigkeiten von Schmiedeteilen weiter gesteigert werden. Durch ein Gesenkschmieden mit anschließendem Maßprägen (Genauschmieden) sind Fertigungstoleranzen bis IT 10 erreichbar. Durch weitere Maßnahmen können Präzisionsschmiedeprozesse mit Fertigungstoleranzen bis IT 7 umgesetzt werden. Die erreichbaren Genauigkeiten sind hierbei mit denen spanender Schlichtarbeitsgänge vergleichbar. In Tab. 2.1 sind die erreichbaren Fertigungstoleranzen verschiedener Fertigungsverfahren gegenübergestellt.

Die erhöhten Ansprüche an die Maß- und Formgenauigkeiten von Präzisionsschmiedeteilen stellen erhöhte Anforderungen an die Werkzeug- und Prozessgestaltung. Hierzu sind insbesondere:

- eine genaue Werkzeugauslegung und -fertigung,
- eine hohe Volumen- und Geometriegenauigkeit,

Tab. 2.1 Fertigungstoleranzen verschiedener Fertigungsverfahren im Vergleich [Doe10, Imu08]

Verfahren	ISO-Toleranzreihe (IT) entspricht DIN ISO 286 Teil 1									
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Gesenkschmieden (Schmiedegüte E u. F)										
Genauschmieden (Gesenkschmieden und Maßprägen)										
Präzisionsschmieden										
Warmfließpressen										
Halbwarmfließpressen										
Kaltfließpressen										
Drehen										

- eine genaue Temperaturführung,
- eine genaue Werkzeug- bzw. Stößelführung,
- eine genaue Prozessführung,
- eine hohe Prozessstabilität sowie eine hohe Reproduzierbarkeit der Prozess- und Maschinenparameter

zu nennen [Sil03, Doe10].

Die Steigerung der Präzision von Umformteilen in Bezug auf Form-, Lage- und Maßgenauigkeit sowie die Verbesserung der Oberflächengüte haben zur Folge, dass immer mehr Funktionselemente oder komplette Werkstücke ohne oder mit nur geringer Nachbearbeitung einbaufertig hergestellt werden können. Das Fertigungsverfahren Umformen steht damit vielfach in Konkurrenz zu gesamten Fertigungsfolgen und nicht mehr nur zu einzelnen Fertigungsprozessen [Klo06].