

Method Development for Cold Forging Technology of Hollow Lightweight Components

In order to manufacture geometrically-challenging hollow components, such as gear shafts with ready-to-use toothings, a technical forming production chain is investigated, which involves the impact extrusion processes such as cup impact extrusion, piercing, hollow forward impact extrusion and a combination of

hollow forward and hollow backward impact extrusion. The focus of this work is the position deviation propagation and addition as a consequence of the stages mentioned above, as well as the development of tool-specific solutions to improve positional accuracy, able to be achieved by technical forming of multiply-toothed hollow gear shafts. At first, studies were carried out by means of numerical analyses and, in the course of the project, under experimental process conditions suited to the industrial practice with the help of several experiment set-ups.

Verfahrensentwicklung zur Kaltmassivumformung von hohlen Leichtbaukomponenten

Dr.-Ing. Alexander Felde,
Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald MBA, Stuttgart

Für die Herstellung von geometrisch anspruchsvollen, hohlen Bauteilen wie zum Beispiel Getriebewellen mit fertig gepressten Verzahnungen wird eine umformtechnische Fertigungskette untersucht, welche die Fließpressverfahren Napf-Fließpressen, Lochen, Hohl-Vorwärts-Fließpressen und eine Kombination aus Hohl-Vorwärts- und Hohl-Rückwärts-Fließpressen beinhaltet. Im Fokus dieser Arbeit steht die Lageabweichungsfortpflanzung und -addition im

Zuge der oben genannten Stadienfolge sowie das Erarbeiten werkzeugspezifischer Lösungen zur Verbesserung der umformtechnisch erreichbaren Lagegenauigkeit von mehrfach verzahnten hohlen Getriebewellen. Die Untersuchungen erfolgten zunächst anhand von numerischen Analysen und im weiteren Projektverlauf experimentell mit Hilfe mehrerer Versuchsaufbauten unter an die industrielle Praxis angepassten Prozessbedingungen.

Einleitung

Zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen leistet die Reduktion der Fahrzeugmasse einen bedeutenden Beitrag. Getriebewellen weisen aus heutiger Sicht ein beachtliches Potenzial hinsichtlich des konstruktiven Leichtbaus auf. Durch die hohle Gestaltung von Getriebekomponenten wird im Inneren von Bauteilen dabei gezielt Material eingespart. Weiterhin kann die verbleibende Werkstückmasse in radialer und axialer Richtung mit neuen technologischen Ansätzen funktionsgerecht platziert werden [1, 2]. Neben der Gewichtseinsparung und dem damit verbundenen reduzierten Energieverbrauch im Betrieb besteht durch die umformtechnische

Herstellung solcher Komponenten auch bei deren Produktion ein zusätzliches Einsparpotenzial hinsichtlich Material- und Energieeinsatz.

Hohle Wellen für Getriebe im Automobil- oder Anlagenbau werden in der Regel heute durch eine Verfahrenskombination von Umformen und Spanen hergestellt. Sollen mehrere Formelemente (Innen- und Außenverzahnung) an demselben Bauteil hergestellt werden, folgt dem Umformen meist eine spanende Fertigbearbeitung. Das Kaltfließpressen bietet die Möglichkeit, Formelemente an hohlen Wellen in einbaufertiger Qualität (net shape) zu erzeugen. Dies erlaubt eine Reduzierung

der nachfolgenden Fertigungsschritte, einen geminderten Materialeinsatz und geringere Fertigungskosten bei gleichbleibendem oder erhöhtem Anteil an der Wertschöpfungskette.

Eines der Probleme bei der umformtechnischen Herstellung von hohlen Wellen stellen die geforderten Lagegenauigkeiten und Fluchtungsfehler der Funktionsflächen entlang der Bauteillängsachse dar. Dieses erfordert heute stets den Einsatz eines Halbzeugs mit geringer Koaxialitätsabweichung der Innen- und Außenoberfläche. Auch beim Mehrfachverzahnungspresen ist eine exakte und sichere Positionierung von Ober- zu Unterwerkzeug zu gewährleisten.

Fertigungsfolge

Im Rahmen des Forschungsprojekts IGF 16940N (Lagegenauigkeit der Innen- und Außenverzahnungen an umformtechnisch gefertigten hohlen Wellen) wird am Institut für Umformtechnik an der Universität Stuttgart eine Fertigungsfolge zur Herstellung von hohlen Pressteilen mit Innen- und Außenverzahnung gemäß Bild 1 untersucht. Im Schwerpunkt der Untersuchung stehen die Fehlerfortpflanzung und Addition von Lagegenauigkeitsabweichungen. Die Fertigungsfolge beinhaltet die Herstellung einer napfförmigen Geometrie durch das Napf-Rückwärts-Fließpressen, die Entfernung des Napfbodens (Lochen), die Erzeugung eines endgültigen rohrförmigen Halbzeugs durch das Hohl-Vorwärts-Fließpressen und schließlich das Verzahnungspressen mittels eines kombinierten Hohl-Vorwärts- und Hohl-Rückwärts-Fließpressvorgangs.

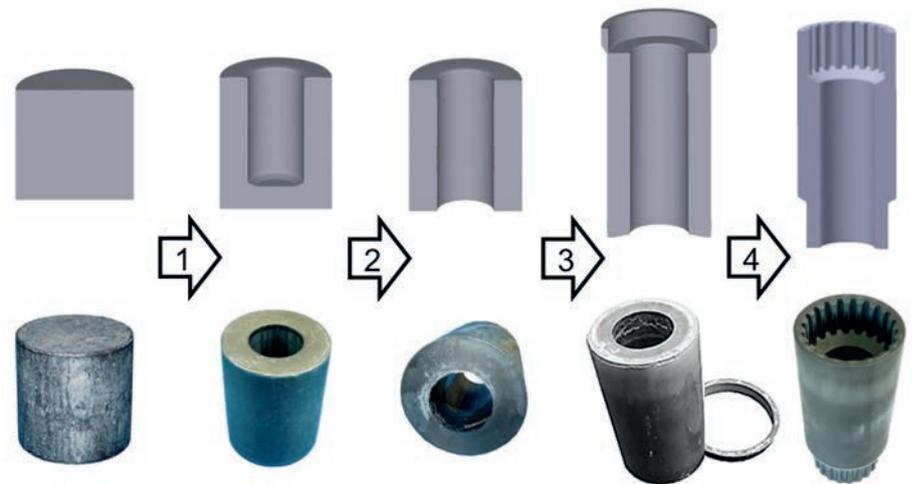


Bild 1: Fertigungsfolge des Kaltpressens einer mehrfach verzahnten, hohlen Welle: 1 – Napf-Rückwärts-Fließpressen; 2 – Lochen; 3 – Hohl-Vorwärts-Fließpressen; 4 – kombiniertes Hohl-Vorwärts- und Hohl-Rückwärts-Fließpressen.

Aktuelle Fertigungstoleranzen rohrförmiger, durch das Napf-Fließpressen hergestellter Halbzeuge – insbesondere bezüglich der Koaxialität zwischen Außen- und Innenoberfläche – unterliegen Abweichungen, die in der nachfolgenden Bearbeitung nur mangelhaft beziehungsweise gar nicht ausgeglichen werden können. Erreichbare Werte der Koaxialität liegen je nach Größe des Werkstücks zwischen 0,05 mm und 0,3 mm [3].

Herstellung der Hohlform

Zur Reduzierung der Lagegenauigkeitsfehler beim Napf-Rückwärts-Fließpressen ist eine aufwendige Führung der Werkzeughälften erforderlich, da sich die formgebenden Werkzeugteile (Matrize und Stempel) nicht in einer Werkzeughälfte befinden. Zu Prozessbeginn steigt die Axialkraft auf den Stempel, wodurch dieser gestaucht wird. Gleichzeitig kommt es zur elastischen Aufweitung der Matrize aufgrund der Werkzeugbelastung in der Kavität. Eine konventionelle Zentrierhülse als Stempelführung in der Matrize kann die beschriebenen Abläufe nur bedingt kompensieren und erlaubt somit keine konstante Führung der beiden Werkzeughälften. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Lösungsvorschlag zum modifizierten Führungskonzept beim Napf-Rückwärts-Fließpressen konzipiert und konstruktiv ausgearbeitet. Die Stempelführungseinheit besteht aus einer äußeren, längs geschlitzten und einer inneren Hülse, welche mit einander über ihren konischen Oberflächen kontaktieren (Bild 2, rechts). Dabei erfolgt der Ausgleich einer prozessbedingten Aufweitung des Matrizendurchmessers durch eine Verstellung der inneren Hülse relativ zu den äußeren und eine dadurch ausgelöste Aufspreizung der äußeren Hülse (Bild 2, mitte). Das prozessbedingte Aufstauchen des Stempels wird in der Führungseinheit in einer Ausführungsvariante durch das Vorhalten des Stempeldurchmessers und in der zweiten Variante durch eine Elastomer-Einlage auf der Innenseite der inneren Hülse kompensiert.

Ergebnisse experimenteller Untersuchungen mit dem in Bild 2, links dargestellten Werkzeug zeigen, dass die spezifische Werkzeuganordnung mit der Zentrierung des Stempels in der Matrize über eine adaptive Führungshülse folgende Fehlerquellen nur zum Teil egalalisieren kann:

- Rechtwinkligkeitsfehler am Rohteil,
- Ungleichmäßigkeit der Härteverteilung im Querschnitt des Rohteils,
- Fehler in der Stempelbefestigung beziehungsweise -positionierung,
- Fertigungsfehler am Stempel und
- werkzeugspezifisches Spiel zwischen Stempel und Führungshülse zu Prozessbeginn.

Bild 3 vergleicht Lagegenauigkeitsfehler von Pressteilen, welche ausgehend von einem zylindrischen Halbzeug mit vorzentrierender Stirnflächenvertiefung mithilfe desselben Versuchswerkzeugs mit und ohne Stempelführungseinheit erzeugt wurden.

Die Vermessung von anschließend gelochten Napfteilen zeigte, dass der Lochvorgang keine signifikante Veränderung der Lagegenauigkeit verursacht.

Die weitere Umformung des hohlen Werkstücks erfolgt gemäß der in Bild 1 dargestellten Fertigungsfolge durch das Hohl-Vorwärts-Fließpressen mithilfe des in Bild 4 gezeigten Werkzeugs. Der Dorn befindet sich im Unterteil des Werkzeugs und wird mit dem im Oberteil des Werkzeugs montierten Stempel zentriert. Für das Ausstoßen/Abstreifen des Werkstücks wird die Auswerferhülse über acht Stifte betätigt. Mithilfe dieses Versuchsaufbaus wurden die durch das Werkzeug verursachten Abweichungen an den mit einer Genauigkeit unter 0,004 mm zerspanend angefertigten Proben analysiert. Die Vermessung dieser dem Hohl-Vorwärts-Fließpressen unterzogenen Werkstücke führte zu Koaxialitätsabweichungen im Bereich zwischen 0,007 und 0,015 mm. Dieser Abweichungsbereich kann als spezifische Genauigkeit des eingesetzten Versuchswerkzeugs betrachtet werden.

Weitere Pressversuche mit den durch das Napf-Rückwärts-Fließpressen und Lochen erzeugten und mit unterschiedlichen Lagegenauigkeitsfehlern behafteten Halbzeugen ergaben, dass die Koaxialitäts- und Kon-

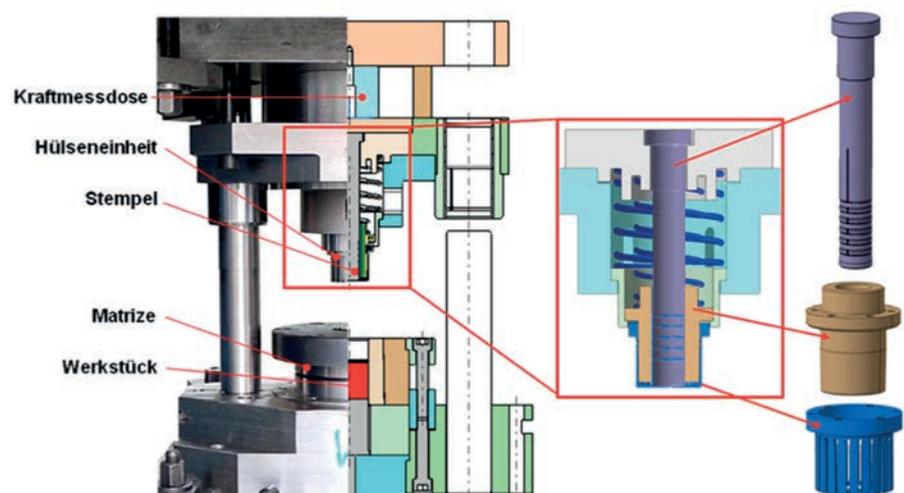


Bild 2: Stempelführung mit aktiver Zentrierhülse im Werkzeug für das Napf-Rückwärts-Fließpressen.

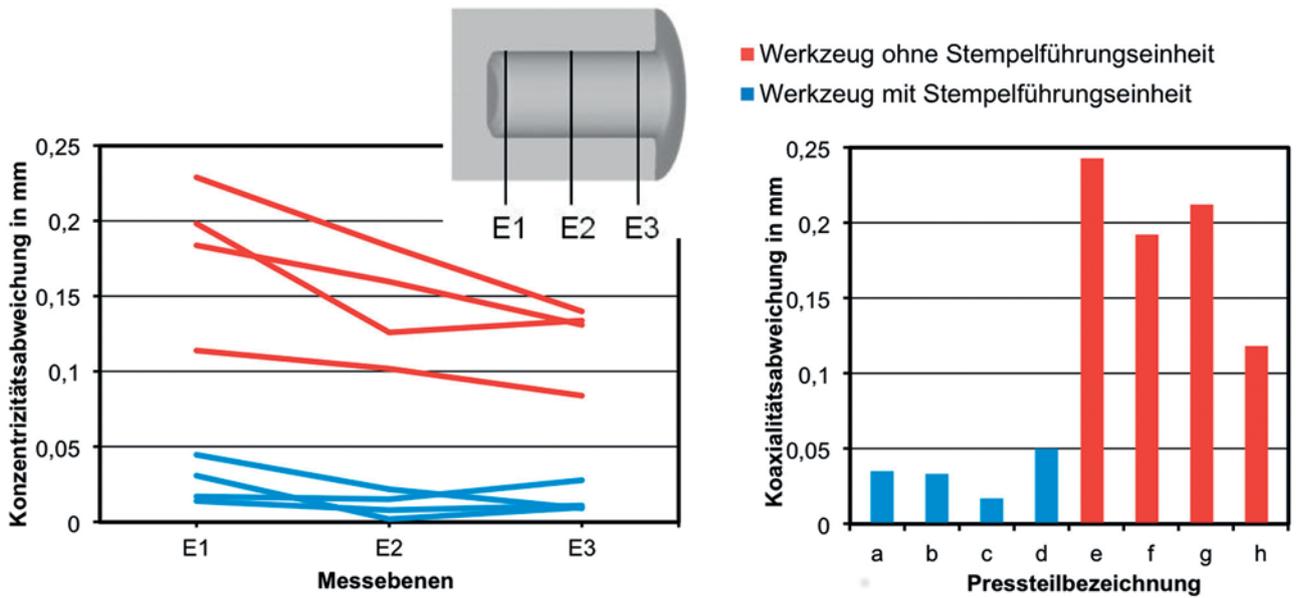


Bild 3: Konzentrizitäts- und Koaxialitätsabweichung von Halbzeugen nach dem Napf-Rückwärts-Fließpressen, welche im selben Werkzeug mit Stempelführungseinheit (spielbehaftet in einer starren Zentrierhülse geführter Stempel mit Stützrippen) und ohne Stempelführungseinheit gepresst wurden.

zentrizitätsabweichungen durch das derartige Hohl-Vorwärts-Fließpressen in der Regel reduziert werden konnten. Eine Ausnahme bildet der Fall, wenn die Lagegenauigkeitsabweichungen der Halbzeuge mit der oben genannten spezifischen Genauigkeit des Werkzeugs vergleichbar sind. Weiterhin wurde festgestellt, dass sich an den Halbzeugen mit relativ großen Lagegenauigkeitsfehlern eine signifikante Reduzierung der Abweichungen nach dem Hohl-Vorwärts-Fließpressen ergab. So werden die am Halbzeug festgestellten Koaxialitätsabweichungen von 0,08 mm und 0,2 mm nach dem Hohl-Vorwärts-Fließpressen

zu den Koaxialitätsfehler am Pressteil von 0,04 mm beziehungsweise 0,12 mm transformiert.

Eine numerische Analyse des elastischen Verhaltens des Versuchswerkzeugs für das Hohl-Vorwärts-Fließpressen beim Umformen von Werkstücken mit definierten Koaxialitätsfehlern bestätigte, dass die in das Pressteil übergehenden Abweichungen im Wesentlichen durch eine unzureichende Steifigkeit des Dorns in dieser Werkzeuganordnung verursacht werden. Dies gilt insbesondere zu Prozessbeginn, wenn der nicht geführte Teil des Dorns

am längsten ist. Die Steifigkeit eines solchen Werkzeugaufbaus und somit die Lagegenauigkeit des Presserzeugnisses kann erhöht werden, indem der Dorn aus Hartmetall ausgeführt wird und/oder die Auswerferhülse schwebend (zum Beispiel durch eine Feder) angeordnet wird, wodurch der Stempel unter der Matrize eine zusätzliche radiale Abstützung erhält.

Verzahnungserzeugung

Im finalen Arbeitsschritt der in Bild 1 gezeigten Fertigungsfolge werden im Zuge eines kombinierten Hohl-Vorwärts- und Hohl-Rückwärts-Fließpressvorgangs eine

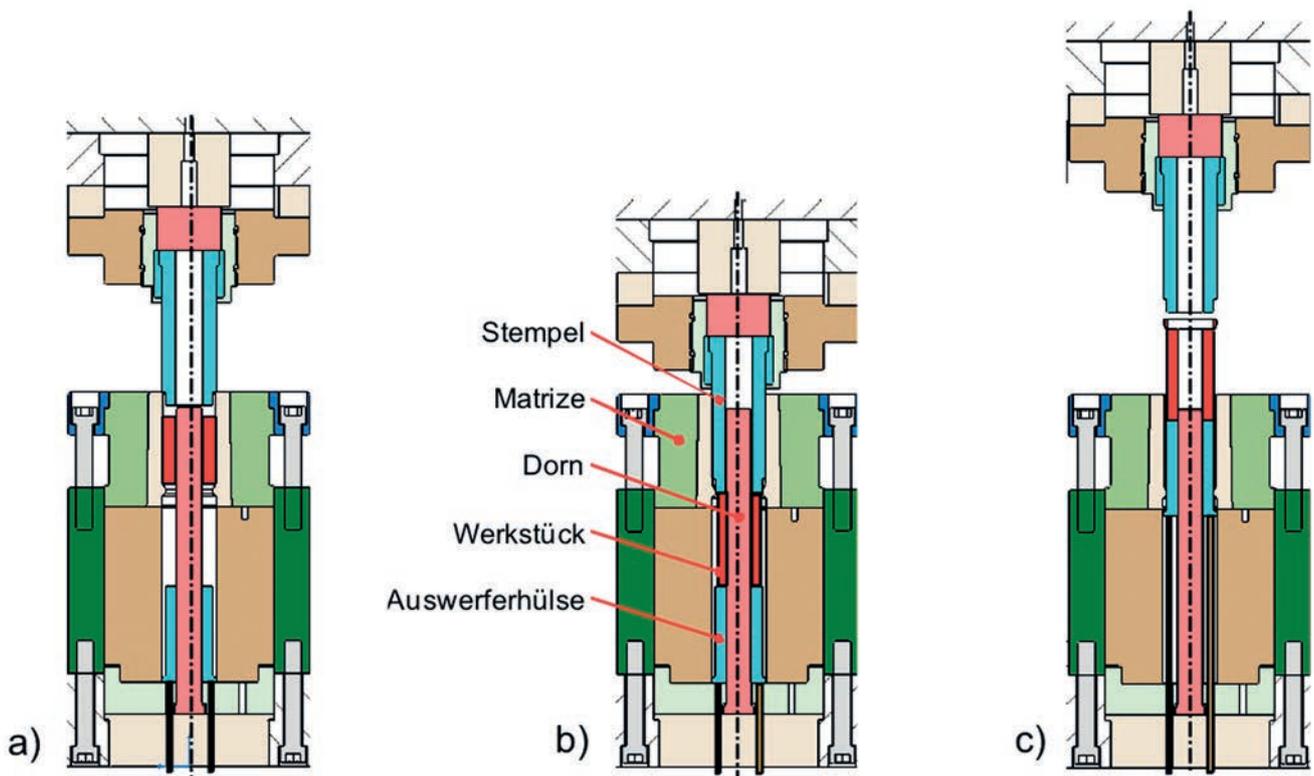


Bild 4: Versuchswerkzeug für das Hohl-Vorwärts-Fließpressen in typischen Prozessstadien: a) Aufsetzen des Stempels, b) Endstadium des Pressens, c) Auswerfen des Pressteils.

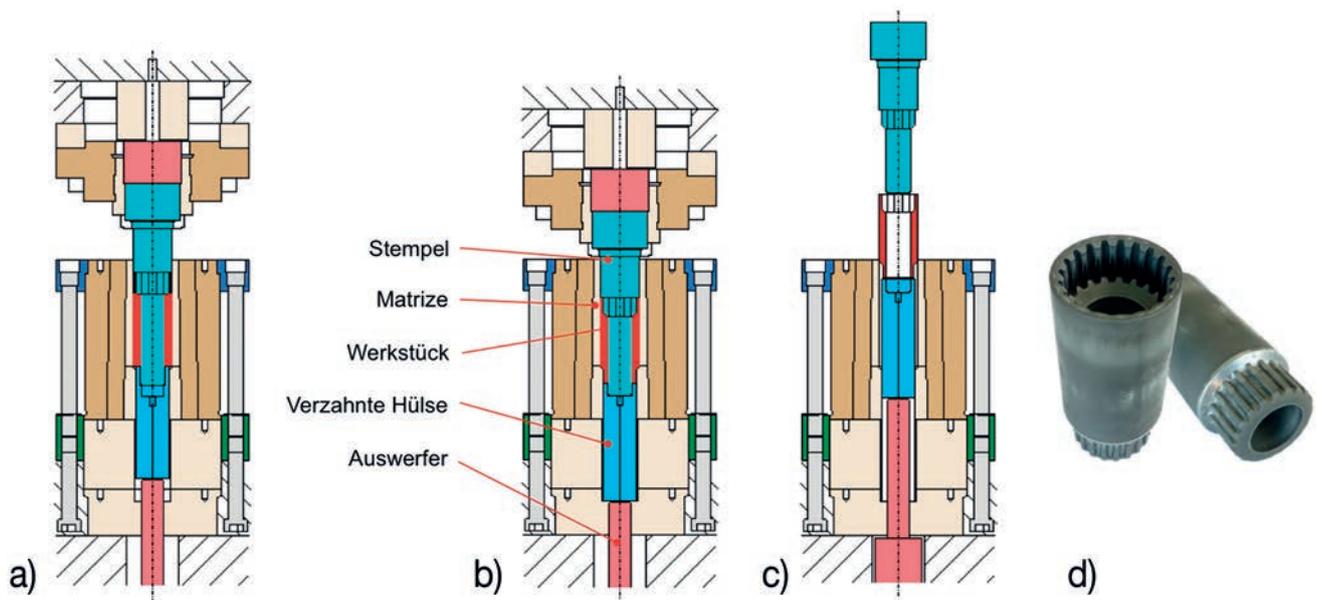


Bild 5: Versuchswerkzeug für das kombinierte Hohl-Vorwärts- und Hohl-Rückwärts-Fließpressen in typischen Prozessstadien: a) Aufsetzen des Stempels, b) Endstadium des Pressens, c) Auswerfen und d) erzeugte Pressteile. Bilder: Autoren

Innen- und eine Außenverzahnung erzeugt. Hierbei handelt es sich um Verzahnungen mit Keilflanken und gleicher Zahnanzahl von 20 und Modulen von 1,85 mm innen beziehungsweise 1,835 mm außen. Die Anbringung der Innen- und Außenverzahnung verursacht Umformgrade von zirka 0,75 beziehungsweise 0,7. Für die experimentelle Untersuchung des kombinierten Umformprozesses wurde das in Bild 5 dargestellte Versuchswerkzeug entwickelt und aufgebaut. Der Stempel enthält eine negative Form der zu erzeugenden Innenverzahnung sowie einen dornartigen Bereich zur Abstützung des Hohlraums des Pressteils und ist in der stößelseitigen (oberen) Werkzeughälfte montiert. Die in der unteren Werkzeughälfte angebrachte Matrize besteht aus einer zylindrischen Aufnehmerhülse sowie aus einer verzahnten Hülse für die Erzeugung der Außenverzahnung. Der Stempel wird während des Pressvorgangs sowohl im oberen Bereich der Matrize als auch über den federnd in der Matrize geführten Auswerfer zentriert. Dieser Auswerfer bildet auch einen Anschlag beim Auspressen der Außenverzahnung und führt schließlich das Ausstoßen des Pressteils aus. Die Federfunktion ist in die Auswerfereinheit integriert (in Bild 5 nicht dargestellt). Im Zuge der experimentellen Untersuchung im Rahmen des oben genannten IGF-Vorhabens mit diesem Versuchswerkzeug wird die erreichbare finale Lagegenauigkeit der gepressten Außen- und Innenverzahnung zueinander in Abhängigkeit von der in den vorangegangenen Umformstufen entstandenen Fehlergröße und -verteilung analysiert.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Fokus der vorgestellten Untersuchungen stehen die Entstehung und die Fortpflanzung der Lagegenauigkeitsabweichungen an Werkstücken im Zuge der entwickelten Stadienfolge zur Erzeugung hohler Pressteile mit zwei

Verzahnungen an der äußeren und inneren Bauteiloberfläche. Mithilfe der entwickelten Versuchswerkzeuge werden die entstehenden Konzentrizitäts- und Koaxialitätsfehler der erzeugten hohlen Zwischenformen sowie der finalen Bauteilgeometrie analysiert. Die Lagegenauigkeitsfehler entstehen beim Napf-Fließpressen. Der Einsatz von vorzentrierten Halbzeugen und Stempelführung durch die adaptive Zentrierhülse im Werkzeug für das Napf-Rückwärts-Fließpressen führt zu einer wesentlichen Verbesserung der Lagegenauigkeit. Jedoch kann damit die erwünschte Koaxialitätsabweichung unter 0,02 mm nicht prozesssicher garantiert werden. Während des nachfolgenden Entfernens des Napfbodens durch Lochen wurde keine signifikante Veränderung der Lagegenauigkeit festgestellt. Das anschließende Hohl-Vorwärts-Fließpressen mithilfe des entwickelten Werkzeugaufbaus ermöglicht eine Reduzierung des Lagegenauigkeitsfehlers am Halbzeug bis zu 50 Prozent. Diese Fehlerkorrektur kann sich durch die oben genannten Maßnahmen zur Versteifung eines solchen Werkzeugs noch bedeutender ergeben.

Im Schwerpunkt zukünftiger Projektaktivitäten steht die Analyse der Lagegenauigkeit bei der Verzahnungserzeugung im



Dr.-Ing. Alexander Felde



Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald MBA

kombinierten Hohl-Vorwärts- und Hohl-Rückwärts-Fließpressvorgang. Hierbei ist die Auswirkung von Fehlern, die in den vorangegangenen Stufen produziert beziehungsweise fortgepflanzt wurden, auf die finalen Lagegenauigkeitskenngrößen der doppelverzahnten Bauteile von besonderem Interesse. Auch werden hier Werkzeuggestaltungsprinzipien zur Erzeugung hochgenauer verzahnter Pressteile verifiziert. ■

Literatur

- [1] Leykamm, J.: Herstellung von verzahnungstragenden Werkstücken durch Kaltfließpressen. Beitrag der Zeitschrift Werkstofftechnik 13, S. 299-304, 1982.
- [2] Quintenz, G.: Der Wettstreit der Verfahren der Hohlwellenherstellung. In Motion, Hirschvogel Automotive Group, Ausgabe Oktober, 2006.
- [3] VDI 3138 – Beiblatt 2. Kaltmassivumformung von Stählen – Anwendung, Arbeitsbeispiele, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für das Kaltfließpressen. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB), VDI-Handbuch Betriebstechnik 2, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1999.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 16940N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV) wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann nach Projektabschluss bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.