

Fertigung von Getriebe-Hohlwellen durch Massivumformung

F. Schmieder, P. Kettner

Inhalt Bedingt durch die Forderung nach Leichtbauteilen, ist ein zunehmender Einbau von Hohlwellen in allen Fahrzeuggetrieben festzustellen. Die Autoren stellen verschiedene Massivumformverfahren vor, teilweise in Kombination mit Füge- und Zerspanarbeitsgängen, und diskutieren sie bezüglich Formgebungsmöglichkeiten, Toleranzen und Wirtschaftlichkeitsaspekten.

Manufacturing of hollow transmission shafts via bulk-metal forming

Abstract More and more hollow transmission shafts are used in all vehicle gears as a result of the demand of lightweight structural components. Several bulk-metal forming processes – some in combination with joining and machining functions – are presented and discussed with regard to forming possibilities, tolerances and economical feasibility.

1 Einleitung

Die steigenden Anforderungen an bessere Fahrleistung bei gleichzeitiger Reduktion von Kraftstoffverbrauch, Geräusch- und Abgasemission führen bei allen Fahrzeugen zu neuen Getriebekonzepten. So ist heute das 5-Gang-Synchrongetriebe im Pkw Standard und für Topmodelle teilweise das 6-Gang-Schaltgetriebe [1]. Bei den Automatikgetrieben – hier wird in den kommenden Jahren eine deutliche Mengensteigerung erwartet – gibt es vorwiegend Wandler-4-Gang- und -5-Gang-Getriebe.

Bei jeder Einführung eines neuen Getriebetyps steht aus ökologischer und energiepolitischer Sicht die Automobilindustrie und ihre Zulieferbranchen in zunehmendem Maße vor der Aufgabe, Strukturen bzw. Komponenten der Getriebe kostengünstiger, leistungsfähiger, kompakter, aber auch materialsparend auszuführen. Baugröße und Getriebemaße sollten dabei mindestens beibehalten, besser jedoch verringert werden. Das bedeutet, daß das Leistungsgewicht der Getriebe – wie in den letzten Jahren – auch künftig weiter abnehmen wird [2].

Bei der Realisierung dieser „Leichtbau“-Forderungen, die ohne Einbuße an Lebensdauer und Zuverlässigkeit umgesetzt werden müssen, zeichnen sich prinzipiell zwei Wege ab: die Verwendung neuer Werkstoffe, die bei gleichen Werkstoffeigenschaften kleinere Massen zulassen, oder die beanspru-

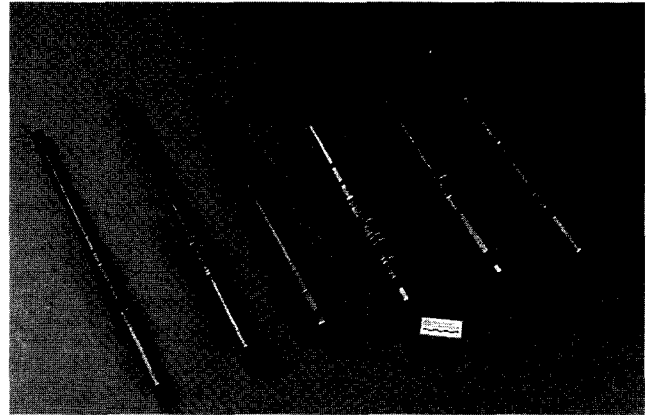


Bild 1. Beispiele kaltfließgepreßter Getriebewellen

chungsgerechte Auslegung von Bauteilen mit Stahlwerkstoffen. Letzteres ist gerade dann von Interesse, wenn andere Werkstoffe aufgrund der Betriebsbedingungen wie hohe Belastungen und Temperaturen sowie hohe Festigkeit bei genügender Zähigkeit funktionell und wirtschaftlich nicht in Betracht kommen. Zu derartigen Bauteilen zählen vor allem die Getriebewellen.

2 Verfahren zur Hohlwellenfertigung

Im Schaltgetriebe werden im allgemeinen drei Wellen benötigt: die Antriebswelle, die Vorgelegewelle und die Haupt- bzw. Abtriebswelle. In Automatikgetrieben befindet sich zwischen An- und Abtriebswelle die Zwischenwelle. Die Stückgewichte dieser Wellen bewegen sich in Pkw-Getrieben zwischen 2 und 5 kg, bei Nutzfahrzeugen liegen sie zwischen 8 und bis zu über 20 kg.

Gewichtseinsparungen bei dieser Bauteilfamilie, zu denen auch noch die Antriebskegelräder der Achsgetriebe zu zählen sind, zielen vor allem auf die Verwendung von Hohlwellen. Die grundsätzliche Ausführung dieser Wellen ist meist ähnlich (Bild 1). Bei Schaltgetrieben haben die Antriebswellen an einem Wellenende einen Kopf und einen mehr oder weniger abgestuften Schaft; Hauptwellen haben einen mittig angeordneten Flansch und zwei abgesetzte Wellenbereiche, während Vorgelegewellen meist zwei bis drei Festräder aufweisen.

Die Beanspruchung dieser Wellen konzentriert sich auf den oberflächennahen Bereich, während das Kernmaterial nur unwesentlich belastet ist und somit im wesentlichen Ballast darstellt. Wählt man bei einer hohlen Welle einen Bohrungsdurchmesser von etwa dem halben Außendurchmesser, verringert sich das Flächenträgheitsmoment bzw. Widerstandsmoment gegenüber einer Vollwelle um weniger als 10%. Daraus errechnet sich eine mögliche Material- bzw. Gewichtseinsparung von bis zu 30%, d.h., bei gleichbleibender Außenkontur gegenüber der Vollwelle treten bei Verwendung

¹ Dr.-Ing. F. Schmieder
Hirschvogel Eisenach GmbH, Rennbahn 8, D-99817 Eisenach

² P. Kettner
Hirschvogel Umformtechnik GmbH, Mühlstr. 6, 86920 Denklingen

¹ stellvertretender Geschäftsführer der Hirschvogel Eisenach GmbH, Eisenach

² Produktionsleiter Kalt- und Halbwarmumformung der Hirschvogel Umformtechnik GmbH, Denklingen

einer konturnachgeführten hohlen Bauart nur geringfügige Änderungen in bezug auf die Steifigkeit und die Festigkeit ein.

Sollen die Vorteile der umformenden Fertigungsverfahren, wie gute Werkstoffausnutzung, kurze Fertigungszeiten und hohe Festigkeit, genutzt werden, so bieten sich aus umformtechnischer Sicht prinzipiell folgende Verfahren zur Hohlwellenherstellung an:

- Drückwalzen,
- Schmieden,
- Querwalzen,
- Rundkneten (Stauchkneten),
- Rundschmieden,
- Innenhochdruckumformung,
- Fließpressen,
- Fließpressen und Reibschweißen,
- Fließpressen und Tieflochbohren.

Bei der Beurteilung geeigneter Produktionsmethoden stehen neben der Kosten- und der Materialersparnis insbesondere die Zuverlässigkeit und die Reproduzierbarkeit bezüglich der Formgebung sowie die erreichbare Endformnähe und die Toleranzen im Vordergrund. Letztere stellen sich vor allem bei den Verfahren als problematisch dar, die einen Rohrabchnitt als Ausgangsmaterial benötigen. Die Fertigungstoleranzen dickwandiger Rohre – insbesondere bezüglich der Koaxialität zwischen Außen- und Innendurchmesser – unterliegen Schwankungen, die in folgenden Bearbeitungsgängen nur mangelhaft ausgeglichen werden können. Bei den hohen Drehzahlen von Getriebewellen können aber Unwuchten über dem Querschnitt nur bedingt akzeptiert werden. Da das Drückwalzen verfahrensbedingt nur ein sehr kleines Teilespektrum abdeckt und das Schmieden nur im Bereich der schweren Nutzfahrzeug-Wellen Bedeutung findet, werden diese Verfahren hier nicht näher beschrieben.

3

Querwalzen

Bei Vollwellen mit mehr als einem Flansch erweist sich das Querwalzen bei Warmumformtemperatur durch Taktzeiten zwischen drei und zwölf Sekunden als produktives Verfahren. Industriell haben sich das Rundbackenverfahren nach dem Zweiwalzenprinzip und das Flachbackenverfahren durchgesetzt. Erste Voruntersuchungen zeigen, daß auch Hohlwellen querwalzbar sind. Jedoch liegen noch keine Verfahrenskennwerte und Gestaltungsrichtlinien für die Herstellung von Getriebehohlwellen vor. Vor allem muß noch geklärt werden, ob nur dickwandiges Rohr als Vormaterial verwendbar ist. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor sind die verfahrensbedingten Faserverdrillungen in Bauteillängsachse, die im Bereich von nachträglich zerpanend eingebrachten Verzahnungen zu größeren Fertigungsungenauigkeiten führen können.

4

Rundkneten (Stauchkneten)

Das Rundkneten ist ein bekanntes Verfahren zur Querschnittsverminderung an Stäben und Rohren und wird vorzugsweise bei Raumtemperatur angewendet. So können alle Vorzüge der Kaltumformung wie enge Toleranzen, günstiger Faserverlauf, glatte Oberflächen und Werkstoffverfestigung erreicht werden.

Prinzipiell lassen sich zwei Verfahren unterscheiden: das Vorschubrundkneten und das Einstichreduzieren. Zwei bis vier Werkzeugsegmente führen dabei eine oszillierende Radialbewegung durch und formen das Werkstück in kleinen Einzelschritten um. Beim Vorschubreduzieren wird das Werkstück zusätzlich in axialer Richtung durch die oszillie-

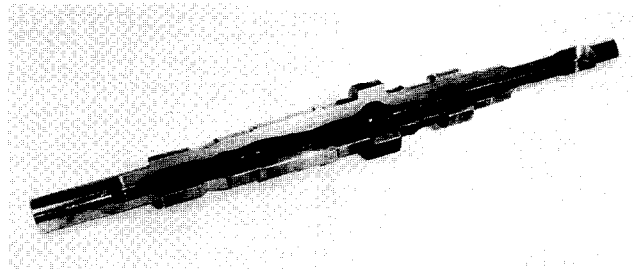


Bild 2. Durch Stauchkneten hergestellte Getriebewelle (PtU/HMP)

renden Gesenke bewegt. Beim Einstichreduzieren führen die Werkzeuge zusätzlich eine radiale Zustellbewegung aus, die der Oszillation überlagert und wesentlich größer als diese ist. Bei diesem Verfahren können die Schulterwinkel am Werkstück wesentlich steiler sein; auch erlaubt dieses Verfahren Querschnittsreduzierungen zwischen den Werkstücken, also das Erzeugen von Hinterschnitten. Bei Verwendung entsprechender Innendorne lassen sich Bohrungen mit engen Toleranzen herstellen, die zylindrisch, kegelig oder mit Absatz versehen sind. Auch die Herstellung von Innenprofilen ist möglich.

Typische Getriebewellengeometrien (Bild 2) mit einer deutlichen Wanddickenvergrößerung im Bereich der Flanche können allerdings nur durch ein Kombinationsverfahren (Stauchknetetechnik) auf Spezialmaschinen gefertigt werden. Dieses Verfahren, auch Axial-Radial-Umformen genannt, wurde an der Technischen Hochschule Darmstadt in Zusammenarbeit mit HMP entwickelt. Der Rohrabchnitt wird partiell an der Stelle erwärmt, die in einer Stauchoperation zum Flansch umgeformt wird. Neben der Erzeugung lokaler Wandverdickungen kann die Reduzierung des Rohrteldurchmessers ohne vorherige Erwärmung durch Rundkneten des Werkstücks durchgeführt werden [3].

Der prinzipielle Bearbeitungsablauf zur Herstellung einer Getriebe-Hauptwelle zeigt aber die Grenzen einer wirtschaftlichen Fertigung. Drei Aufspannungen (Erwärmen und Flanschstauchen, mehrfaches Reduzieren des langen und kurzen Wellenschaftes) und die partielle Umformung durch Rundkneten ergeben lange Bearbeitungszeiten. Sicherlich lassen sich diese durch die Entwicklung von Mehrstufenanlagen, die mehrere Umformschritte zeitparallel bewältigen, noch deutlich herabsetzen. Ob aber Taktzeiten, wie sie beim Querwalzen oder Kaltfließpressen üblich sind, erreicht werden, scheint noch ungewiß. So bleibt das charakteristische Merkmal des Axial-Radial-Umformens sein großes Flexibilitätspotential zur Bearbeitung von Werkstücken ähnlicher Geometrie mit geringem Werkzeugeinsatz. In Verbindung mit einer Automatisierung liegt der wirtschaftliche Anwendungsbereich eher bei kleinen Losgrößen.

5

Rundschmieden

Das Rundschmieden unterscheidet sich vor allem vom Kalt-rundkneten dadurch, daß hier nicht die Werkzeuge, sondern das Werkstück rotierend angetrieben wird. Außerdem läuft der Umformvorgang meist bei Schmiedetemperaturen ab. Die Formwerkzeuge sind meist zweiteilig ausgeführt; die Zustellung erfolgt ebenfalls in radialer Richtung. Auch beim Rundschmieden wird ausgehend vom Ausgangsdurchmesser der Querschnitt verkleinert. Jedoch können auf diesen Schmiedemaschinen ebenfalls Stauchoperationen durchgeführt werden. Ausgehend von einem Präzisionsstahlrohr mit ausreichender Wanddicke, läßt sich beim Rundschmiedeverfahren die Ausgangswanddicke partiell auf das Doppelte an-

stauchen. In weiteren Arbeitsgängen kann dann warm (oder kalt) auf derselben Maschine (oder auf hintereinander geschalteten Maschinenstufen) die weitere Reduzierung der Schaftenden vorgenommen werden.

Es ist nun eine Frage der Philosophie, ob das Werkstück in zwei bis drei Umformstufen vorgeformt und anschließend komplett spanabhebend fertigbearbeitet wird. Die Toleranzen beim Rundschmieden liegen bei einigen Zehntelmillimetern. Als Alternative ist auch die endkonturnahe Weiterbearbeitung durch Kaltrundkneten denkbar. Dadurch steigern sich die Genauigkeiten auf den Hundertstel-Bereich.

6

Innenhochdruckumformung

Auch das Prinzip des Innenhochdruckumformens ist zur Herstellung von Hohlwellen geeignet. Die Veränderung der Rohrausgangsgeometrie wird durch Aufbringen eines genügend hohen Innendrucks bei gleichzeitigem Nachführen des Werkstoffs in Richtung der Rohrlängsachse erzielt. Der Rohraußendurchmesser entspricht dem kleinsten Wellenquerschnitt; die Innengeometrie des verwendeten Formwerkzeugs entspricht der Außengeometrie der herzustellenden Hohlwelle.

Da der Werkstoff nicht allein aus der Wanddicke, sondern auch aus der Rohrlänge nachfließt, müssen die Dichtwerkzeuge in Rohrlängsrichtung nachgeführt werden. Aufgrund der Dichtungsproblematik sind auch glatte, meist gebürstete Rohrenden notwendig. Den erreichbaren Vergrößerungen oder Aufweitungen des Durchmessers sind durch das Formänderungsvermögen des Werkstoffs zwangsläufig Grenzen gesetzt. Auch hier ermöglicht eine Verfahrenserweiterung durch Kombination des Innenhochdruckumformens mit einem Stauchen in Längsrichtung, zum Beispiel Hohlwellen mit einem Mittelbund herzustellen.

Die Verfahrensgrenzen sind auch hier von der Bauteilgeometrie abhängig. Vor allem das Durchmesser/Wanddicke-Verhältnis grenzt das Teilespektrum ein. Desweiteren liegen beispielsweise die kleinsten auszuformenden Radien beim ein- bis einhalbfachen der Wanddicke. Die Maßgenauigkeit der Außenkontur bei den werkzeuggebundenen Maßen liegt im Bereich von IT 10 bis IT 14; sie ist unter anderem auch vom Rückfederungsverhalten abhängig. Die Maßabweichungen der Innenkontur sind im allgemeinen größer; sie lassen sich aufgrund des freien Werkstoffflusses in Verbindung mit der Wanddickenabweichung der Ausgangsrohre ebenso wie Radien, Übergänge oder Form- und Lagetoleranzen meist erst nach Fertigung von Mustern festlegen [4].

Hervorzuheben ist auch die Möglichkeit, das Verfahren zur kraft- und formschlüssigen Verbindung von Rohrstücken mit zusätzlich aufgesteckten Bauelementen anzuwenden. Dieses Verfahren, das teilweise bei der Nockenwellenherstellung Anwendung findet, scheint für Getriebewellen mit einem deutlich höheren Belastungskollektiv eher unwahrscheinlich.

7

Fließpressen

Bei Getriebevollwellen hat das Kaltfließpressen die warmgeschmiedeten Varianten vor allem im Bereich großer Stückzahlen abgelöst. Ein Grund sind sicherlich die geringeren Aufmaße und die engen Fertigungstoleranzen; ein weiterer Punkt ist, daß fließgepreßte Wellen ohne Wärmeschlußbehandlung, d.h. preßhart, weiter bearbeitet werden können; während bei warm umgeformten Wellen eine Schlußglühung notwendig wird, um das Zwischenstufengefüge, das sich beim Abkühlen aus der Schmiedewärme bei Einsatzstählen einstellt, in ein gut zerspanbares Gefüge umzuwandeln.

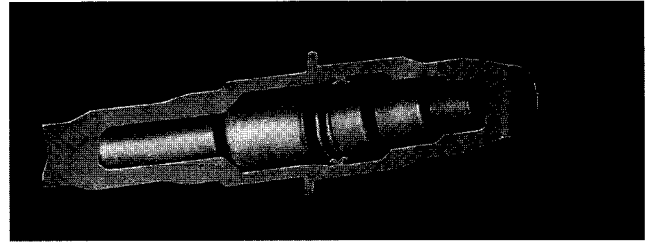


Bild 3. Hohle Hauptwelle für Nutzfahrzeuggetriebe

Diese Vorteile will man sich auch bei Hohlwellen zunutze machen; allerdings führen verfahrensbedingte Einschränkungen dazu, daß nur die wenigsten Wellengeometrien allein durch Fließpressen wirtschaftlich hergestellt werden können. Allerdings bieten Kombinationen mit anderen Fertigungsverfahren wie *Fließpressen und Reibschweißen* interessante Möglichkeiten.

Eine Nutzfahrzeug-Getriebewelle (Bild 3), die als Vollwelle mehr als 20 kg wiegt, kann beispielsweise durch eine Hohlwelle mit rund 5 kg weniger Gewicht ersetzt werden. Dabei werden die zwei Wellenhälften durch Napfrückwärts-Fließpressen in mehreren Umformoperationen gefertigt. Aufgrund der hohen Umformgrade ist bei diesem Beispiel eine Zwischenglühung notwendig. Beim Kaltfließpressen entsteht aufgrund der Massenschwankung des Ausgangsmaterials ein nicht zu verhindernder Werkstoffüberlauf. Dieser muß vor dem Reibschweißen durch eine Drehoperation entfernt werden.

Bei einem Vergleich der Herstellkosten stellt sich heraus, daß die so gefertigte Hohlwelle teurer ist als die in einem Pressendurchgang ebenfalls kaltfließgepreßte Vollwelle. Dies rührt bei diesem Beispiel daher, daß

- zwei Wellenhälften gepreßt werden müssen;
- eine zusätzliche Zwischenglühoperation und erneute Oberflächenbehandlung notwendig ist;
- Drehen und Reibschweißen

als darauf folgende Arbeitsgänge hinzukommen. In der Summe übersteigen die Herstellkosten die Einsparungen im Bereich der Materialkosten deutlich [5]. Anzumerken bleibt, daß bei der Drehmomentübertragung aufgrund des verminderten Querschnitts oder durch die Reibschweißverbindung keine Probleme auftreten.

Eine wirtschaftliche Fertigung von Hohlwellen kann man aber auch durch Kombination von *Kaltfließpreßverfahren und Tieflochbohren* bei bestimmten Getriebewellengeometrien erreichen. Dabei gilt es, eine kostenoptimale Fertigungsfolge der Umform- und Zerspanungsprozesse unter Berücksichtigung der erreichbaren Maß- und Formtoleranzen zu finden und gleichzeitig die Vorteile der Kaltumformung zu nutzen.

Eine Antriebswelle (Bild 4) kann ausgehend von gescherten Stababschnitten zum Beispiel durch mehrfaches Reduzieren und Kopfstauen zunächst kalt umgeformt werden. Das darauf folgende Tieflochbohren, das bei entsprechender Stückzahl rationell auf Mehrspindelautomaten durchgeführt wird, führt zu form- und lagegenauen Bohrungen mit hoher Maßhaltigkeit. Erfordert eine beanspruchungsoptimal ausgelegte Hohlwelle beispielsweise kopfseitig kleinere Bohrungen, kann diesen Anforderungen durch unterschiedliche Durchmesser beim Tieflochbohren entsprochen werden. Die Endkontur der Welle wird zum Schluß in weiteren Kaltarbeitsgängen gefertigt. Je nach dem, ob eine Wanddickenabnahme oder eine der Außenkontur nachgeführte Innengeometrie bei gleicher Wanddicke erzielt werden soll, kommen die Verfahren Reduzieren oder Einhaseln zur Anwendung. Auf ein

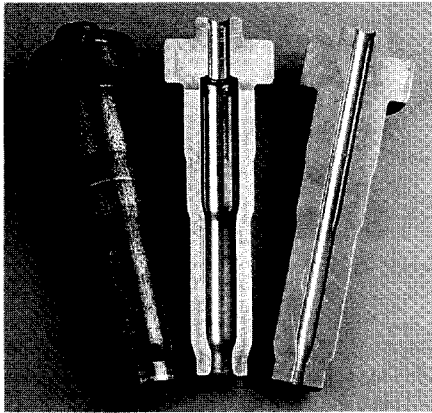


Bild 4. Beispiele hohler Antriebswellen

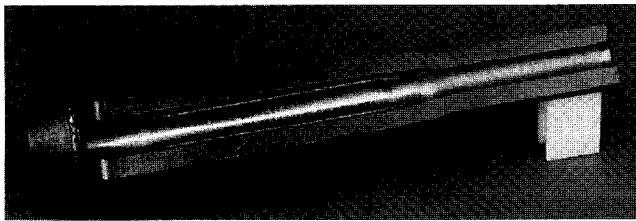


Bild 5. Durch Tieflochbohren und Kaltfließpressen gefertigtes Antriebskegelrad

Zwischenglühen oder erneutes Oberflächenbehandeln kann in den meisten Fällen verzichtet werden. Die Durchmesser-toleranzen betragen innen wie außen $\pm 0,2$ mm; der Rundlauf ist auf max. 0,6 mm eingeschränkt. Die Gewichtsersparnis gegenüber der Vollwelle beträgt etwa 20%. Die Wanddicken liegen je nach Bautyp zwischen 10 und 16 mm.

Auch bei der Herstellung von Antriebskegelrädern (Bild 5) in hohler Ausführung kann diese Verfahrenskombination angewendet werden. Es handelt sich hierbei um ein Werkstück, das als Vollwelle 4,8 kg wiegt, als hohle Ausführung aber 1 kg weniger. Das bedeutet eine Gewichtsreduzie-

Kostenvergleich: Vollwelle vs. Hohlwelle

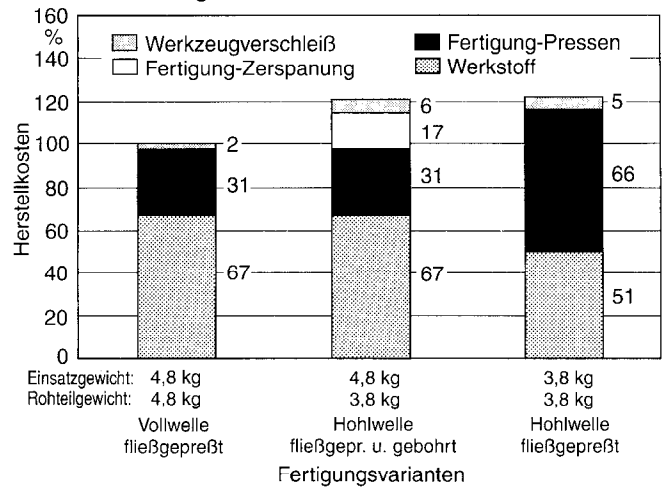


Bild 6. Herstellkostenvergleich zwischen Voll- und Hohlwelle

rung um über 20%. Die Stadienfolge zur Herstellung eines Antriebskegelrades kann aufgrund großer Querschnittsunterschiede manchmal ein Vor- und Fertigtaschen des Kopfes im ersten Pressendurchgang aufweisen.

Um die unterschiedlichen Durchmessersprünge und Absätze herzustellen, wird auch hier nach dem Tieflochbohren in mehreren Pressenstufen der Schaft eingehalst. Dabei bleiben die Wanddicken nahezu erhalten, und die Innengeometrie paßt sich der Außenform an. Dadurch erreicht man gegenüber der nachträglich gebohrten Welle zusätzlich den Vorteil eines beanspruchungsgerechten Faserverlaufs. Auch eine andere Fertigungsfolge wäre in diesem Fall denkbar: Ausgehend vom Rohr oder vorgebohrten Stababschnitt, wird zunächst der Kopf angestaucht und im gleichen Pressenzyklus durch Reduzieren und Einhalsen der Schaft geformt. Im Gegensatz zur zuerst erwähnten Fertigungsfolge muß beim Kopfstauchen der Werkstoff mittels Dorn abgestützt werden.

Der in Bild 6 gezeigte Kostenvergleich zwischen Voll- und Hohlwelle kann natürlich nur sehr grob sein. Die kostenbe-

Tabelle 1. Verfahrensvergleich bei Getriebe-Hohlwellen

	Rundkneten	Rundschmieden	Innenhochdruckumformen	Fließpressen und Reibschweißen	Fließpressen und Tieflochbohren
Ausgangsgeometrie	Rohr	Rohr	Rohr	Stange	Stange
Umformtemperatur	überwiegend kalt	überwiegend warm	kalt	kalt	kalt
Schmiermittel	nein	partiell	partiell (Festschmierstoff)	ja	ja
Umformstufen	mehrere Stadien	mehrere Stadien	1	mehrere Stadien	mehrere Stadien
Bearbeitungsaufmaß	●●●	●	●●	●●●	●●●
Fertigungstoleranzen	●●●	●	●●	●●●	●●●
Oberflächen-güte	●●●	●	●●	●●●	●●●
Verfahrenseinschränkungen	Flanschdurchmesser	d/s - Verhältnis	d/s - Verhältnis	min. Bohrungsdurchmesser	
Mindeststückzahlen	●●●	●●●	●	●●	●●
Taktfolge	●●	●●	●	●●●	●●●

●●● günstig → ● ungünstig

einflussenden Faktoren sind unterteilt in Materialkosten, Fertigungskosten zum Pressen, Fertigungskosten zum Zerspanen und Werkzeugverschleißkosten. Diese grobe Abschätzung zeigt, daß die Hohlwellen beider Varianten um etwa 20% teurer sind, wie die in einem Durchgang kaltfließgepreßte Vollwelle.

8

Verfahrensvergleich und Ausblick

Bei der Beurteilung der umformtechnischen Verfahrensvarianten zur Herstellung von Getriebe-Hohlwellen wird wohl überwiegend die Kostenbewertung ausschlaggebend sein. Die jeweiligen Möglichkeiten der Verfahren, größere Materialanhäufungen anzufüllen, und die erreichbare Formgenauigkeit werden dann mit einfließen. In Tabelle 1 sind einige Verfahren zur Herstellung von Getriebe-Hohlwellen zusammengestellt und bezüglich einiger Merkmale in ihrer Bedeutung gewichtet. Eine wesentliche Rolle spielt aber auch die Wärmebehandlung der Hohlwellen mit der entsprechenden Auswirkung der unterschiedlichen Verfahren auf die Maßgenauigkeit. Auch muß die Weiterbearbeitung wie beispielsweise das Walzen von Paßverzahnungen für die Synchronkörper bei Hohlwellen noch geklärt werden. Dabei ist auch zu überlegen, ob bei den Fließpreßverfahren derartige Verzahnungen nicht gleich mitgepreßt werden können.

Literatur

1. **Rastinger, B.:** Die neuen Schaltgetriebe für die BMW-Baureihen 8, 5 und 3. ATZ 93 (1991) 698-705
2. **Bartsch, G.; Hock, S.; Köpf, P.:** Entwicklungstendenzen bei Fahrzeuggetrieben und Perspektiven für ihre Bauteile. Vortrag „Neuere Entwicklungen in der Massivumformung“. DGM-Inform.-ges., Oberursel 1993
3. **Schmoeckel, D.; Ruhland T.:** Einsatz des Axial-Radial-Umformens zur Herstellung von Getriebewellen in Leichtbauweise. Umformtech. 27 (1993) 384-388
4. **Ebbinghaus, A.:** Präzisionswerkstücke in Leichtbauweise, hergestellt durch Innenhochdruckumformen. Metallumformtech. D1 (1991) 15-19
5. **Hirschvogel, M.:** Transmission shaft forgings - technical and economical aspects of new developments. Proc. 9th Int. Cold Forging Congr., Solihull (Großbritannien) 1995 425-431