



Modulare Rotorwellen für die Elektromobilität

Simulation und Test umformtechnisch hergestellter Segmente

Durch zunehmende Elektromobilität gewinnen auch modulare Bauformen elektrischer Antriebskomponenten an Bedeutung. Segmentierte Rotorwellen für entsprechende Elektromotoren sind dabei eine ideale Möglichkeit, sowohl den steigenden logistischen als auch den mechanischen Anforderungen zu begegnen. Eine aktuelle Entwicklung stellt die Rotorwelle dar, deren Segmente durch TUBE+ – einem Verfahren zum partiellen Aufdicken von Wandstärken, Rundkneten und Axialformen kaltmassivumformend hergestellt werden können.

AUTOREN



**Dr.-Ing.
Henning Wagner**

ist Projektleiter Entwicklung
bei der Felss Systems GmbH
in Königsbach-Stein



Robin Kurth, M. Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der
Abteilung Werkzeugmaschinen am
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU in Chemnitz



Dennis Beihofer, B. Eng.

ist Teamleiter Entwicklung
bei der Felss Systems GmbH
in Königsbach-Stein



**Dipl.-Ing.
Robert Tehel**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der
Abteilung Werkzeugmaschinen am
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU in Chemnitz



**Dipl.-Wirt.-Ing.
Thomas Peter**

ist Geschäftsführer der
Felss Systems GmbH
in Königsbach-Stein

Optimierte Energieeffizienz und die Abbildung anwendungsgerechter Motoreigenschaften spielen eine tragende Rolle bei der Entwicklung elektromotorischer Fahrzeuge. Auf Komponentenebene bedeutet dies die Erschließung des vorhandenen Leichtbaupotenzials und die Umsetzung von Modularisierungsstrategien. Dem Elektromotor kommt dabei als Hauptfunktionsträger eine zentrale Bedeutung zu. Neben Wickel- und Lamellenstapelgeometrie bietet das Rotorwellendesign besonderes Optimierungspotenzial, da zum einen eine Hohlwelle ein enormes Leichtbaupotenzial ausschöpft und zum anderen durch eine geschickte Segmentierung der Welle ein wesentlicher Nutzen für modulare Motorkonzepte entsteht. Bei der Übertragung aktueller Produktarchitekturen auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge können somit Leistungsklassen, wie sie im Automobilbereich zum Einsatz kommen, durch einfache Kombination unterschiedlicher Rotorwellensegmente bei gleichzeitiger Ausnutzung der Skaleneffekte großer Losgrößen realisiert werden [1].

Um die genannten Potenziale zu nutzen, entwickelt, testet und optimiert Felss Systems GmbH gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU eine segmentierte Rotorwelle für den Einsatz im Automobilbereich. Neben der Fertigungsfolge wird eine spezielle Fügegeometrie weiterentwickelt und sowohl simulativ als auch experimentell bezüglich ihrer Tragfähigkeit geprüft.

AUFBAU DER SEGMENTIERTEN ROTORWELLE

Die aktuell entwickelte Wellengeometrie besteht aus zwei oder mehr Segmenten. Hierbei wird zwischen den längeren Mittelwellen (Bild 1 – M1 bis M3), welche im Bereich des Blechpakets des Motors liegen, und den kürzeren Endstücken (Bild 1 – E1 bis E3), welche als Schnittstelle zu den Verbrauchern fungieren, unterschieden [2]. Der Ansatz kann ebenfalls auf dreiteilige Wellen übertragen werden.

Bei identisch gestalteter Fügegeometrie ist durch die Segmentierung der Welle eine Kombination unterschiedlich ausgeführter Mittelwellen mit geometrisch variierten Endstücken möglich. Somit wird beispielsweise die Anschlussfähigkeit leistungsskalierter Elektromotoren an unterschiedliche Abtriebsbaugruppen ermöglicht, wobei gleichzeitig eine Reduktion der Anzahl notwendiger Komponentenvarianten erreicht wird. Die Segmente werden dabei mit einer modifizierten Kerbverzahnung als Welle-Nabe-Verbindung gefügt. Durch das Einbringen eines Schrägungswinkels in die Außenverzahnung des Wellenteils (Endstück) sind die Wellensegmente nach dem Fügeprozess mechanisch vorgespannt, woraus eine hohe Flächenpressung an den Zahnflanken und ein Reibschluss resultiert. Anders als herkömmliche Fügeverbindungen, die aufgrund der notwendigen engen Toleranzen spanend gefertigt werden, ermöglicht diese spezielle Fügegeometrie eine fast komplette umformtechnische Herstellung der Segmente. Dies



Bild 1: Grundlegender Aufbau einer segmentierten Rotorwelle [2]

hat zum Vorteil, dass die Vorspannkraft über die Verzahnungslänge reguliert werden kann und das Ausgangsmaterial ressourceneffizient eingesetzt wird. Innerhalb der Prozesskette können dabei die Wellenkontur und die Fügezone gemeinsam erzeugt werden.

FERTIGUNGSFOLGE

Die Fertigung der Wellensegmente erfolgt mittels eines mehrstufigen Ablaufs. Dabei werden zunächst die Teilwellen hergestellt und abschließend in einem Fügevorgang kombiniert. In Bild 2 ist ein beispielhafter Gesamtprozess für die segmentierte Welle schematisch dargestellt [2].

Zur Herstellung der Mittelwelle wird ein dünnwandiges Rohr in einer ersten Stufe mittels des von Felss entwickelten und patentierten TUBE+ Prozesses aufgedickt, um eine für die Folgestufen vorteilhafte und insbesondere zur Herstellung der Fügegeometrie notwendige Materialverteilung zu erzeugen. Dabei erfährt das Halbzeug eine Längenänderung aufgrund

der Massen- und Volumenkonstanz bei gleichzeitiger Zunahme der Festigkeit im umgeformten Bereich [3]. Dieses besonders effiziente Verfahren ermöglicht eine signifikante Reduktion der Gesamttaktzeit, eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit sowie einen effizienten Einsatz der verwendeten Ressourcen. Die Kontur des Wellensegments wird durch den Einsatz von Rundkneten inkrementell erzeugt, wobei die Anzahl der notwendigen Rundknetstufen abhängig von der geometrischen Komplexität des Bauteils ist. Die vorher erzeugte Aufdickung am Wellensegment kann somit nach innen gestellt werden. Die Verzahnung, welche für die spätere Montage der Segmente notwendig ist, kann nun in einem letzten Umformschritt mittels rekursivem Axialformen erzeugt werden. Durch eine frequenzüberlagerte axiale Prozessbewegung können die notwendigen Axialkräfte gegenüber herkömmlichen axialen Umformprozessen deutlich reduziert werden. Dünnwandige Teile lassen sich so wesentlich besser umformen, ohne die Form der Welle zu beschädigen [4]. Bei der spanenden Nachbearbeitung werden lediglich steile Flanken (90 °) und die Lagersitze mit entsprechenden Passun-

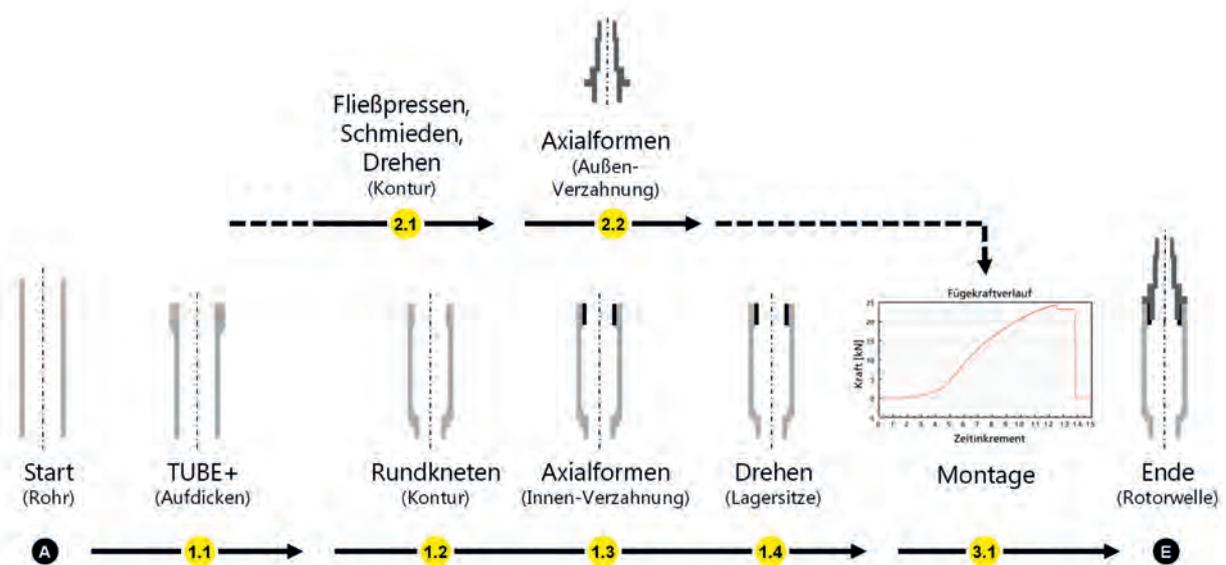


Bild 2: Fertigungsfolge der segmentierten Hohlwelle

gen erzeugt. Da mit diesen Prozessschritten unterschiedliche Bauteil- und Bearbeitungslängen abgebildet werden können, sind diese Verfahren in Kombination prädestiniert für die Herstellung der Rotorwellensegmente für unterschiedliche Motorleistungsklassen im Sinne eines Baukastens.

Analog zu der Mittelwelle können die Konturen der Endstücke mittels Verfahrenskombinationen aus TUBE+ und Rundkneten hergestellt werden. Anwendungsfallabhängig können auch Schmiede- oder Drehprozesse vorteilhaft sein. Zur Herstellung der Verzahnung für die Fügeverbindung ist der Einsatz des rekursiven Axialformens prädestiniert, da hiermit auch der Schrägungswinkel innerhalb der Außenverzahnung optimal abgebildet werden kann.

Die Montage der Wellensegmente erfolgt durch Verpressen. Die dabei notwendigen Fügekräfte liegen im Bereich bis zirka 25 kN. Durch eine Überwachung dieser Fügekräfte kann schon während der Montage auf die resultierende Widerstandsfähigkeit der segmentierten Welle gegen axiale Zuglasten geschlossen werden (Diagramm in Bild 2).

SIMULATIVE UNTERSUCHUNGEN

Die Beanspruchung von Elektromotorwellen ist vielseitig. Hohlwellen werden bereits in Elektromotoren im Automotive-Bereich erfolgreich eingesetzt. Eine Untersuchung der beschriebenen umformtechnisch erzeugten Fügeverbindung segmentierter

Hohlwellen hinsichtlich Tragfähigkeit liegt in aktueller Literatur jedoch nicht vor. In [5] werden statische Voruntersuchungen bezüglich der mechanischen Eigenschaften der segmentierten Hohlwelle beschrieben und auf Basis einer Variantensimulation in einen Vorschlag für eine Gestaltungsmethode überführt. Daran anknüpfend werden in dieser Arbeit Dauerversuche bei Torsionsbeanspruchung der segmentierten Hohlwelle beschrieben, um deren Tragfähigkeit und somit die Einsatzmöglichkeit in Elektromotoren im Automobilbau zu untersuchen. Für eine Auslegung der dabei eingesetzten Fügegeometrie wurden zunächst simulative Untersuchungen durchgeführt. Dazu konnte aufbauend auf die Voruntersuchungen ein Modell der segmentierten Hohlwelle mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) unter Nutzung elastoplastischer Materialmodelle aufgestellt werden. Durch eine Variantensimulation konnte zunächst der Einfluss von Parametern der Fügeverbindung, etwa Schrägungswinkel und Flankenübermaß, auf die Widerstandsfähigkeit der segmentierten Welle gegen Axiallast, Biegung und Torsion identifiziert werden.

Dabei besteht folgender Zielkonflikt: In der Fügegeometrie ist zum einen eine hohe Flankenpressung der Verzahnung anzustreben, um ein Versagen durch Lösen der Fügeverbindung bei Betriebsbedingungen zu verhindern (Reibschluss). Da die Welle einen Vorspannungszustand nach dem Fügen der Segmente erfährt, sind zum anderen jedoch genügend Festigkeitsreserven für die zusätzliche Belastung der segmentierten Welle

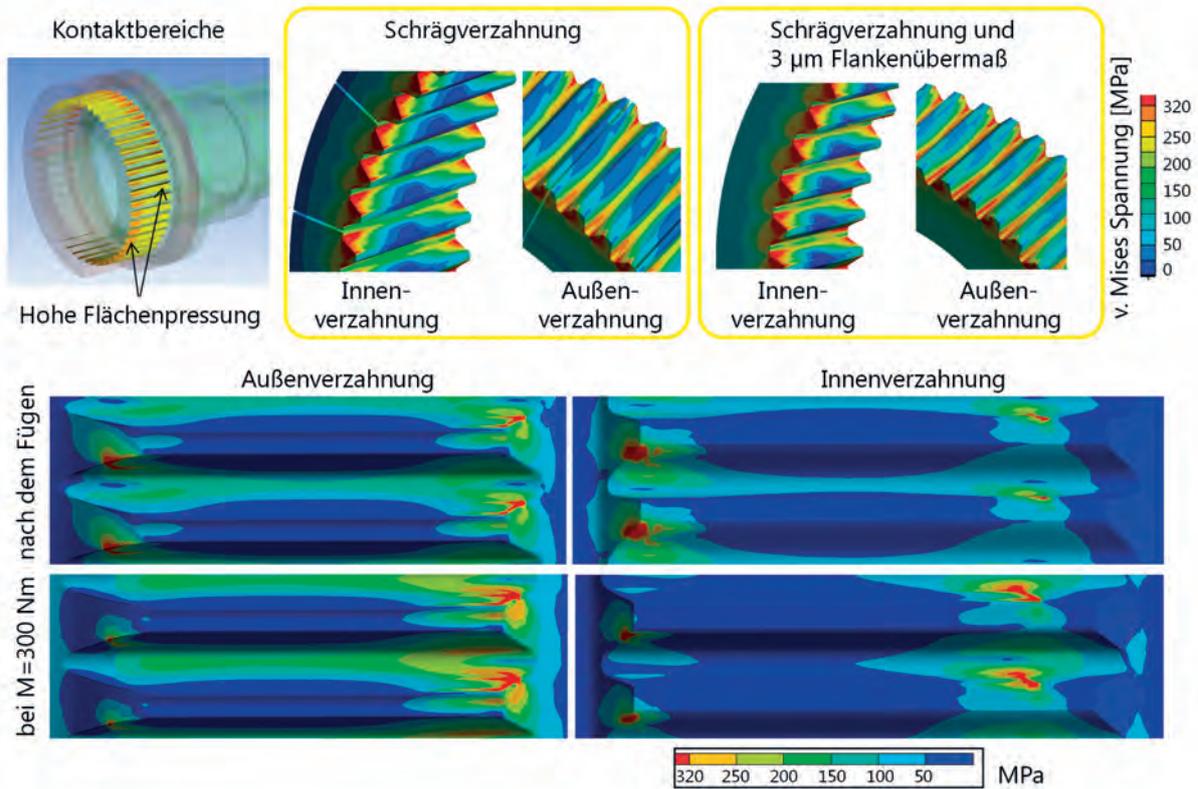


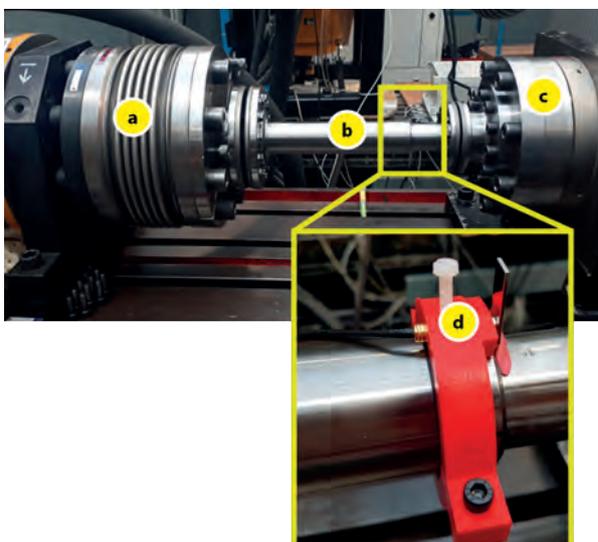
Bild 3: Ergebnisse der FEM-Simulationen bei unterschiedlichen Verzahnungsparametern;
oben: Untersuchung der Materialspannung nach dem Fügeprozess;
unten: Materialspannungen bei zusätzlich 300 Nm Torsionslast

bei Betriebsbedingungen zu berücksichtigen (Bild 3). Um notwendige Einsatzsicherheiten im späteren Betrieb der Welle zu gewährleisten, wurde in Voruntersuchungen identifiziert, dass derartige Wellen Axiallasten bis 5.000 N bei einem Drehmoment von zirka 300 Nm aufnehmen, welche in dieser Arbeit als Lastfälle berücksichtigt werden.

Wie mit den Simulationsergebnissen in Bild 3 gezeigt werden kann, wird eine sehr hohe Flankenpressung bereits bei einer Fügeverbindung ohne Flankenübermaß und sehr kleinem Schrägungswinkel erreicht. Die Maximalwerte der Flächenpressung und Materialspannungen treten dabei in den Anfangs- und Endzonen der Verzahnung auf, welche bei ungüns-

tiger Auslegung entweder zu einer plastischen Deformation und somit zu einer Lockerung der Fügeverbindung bei zusätzlichen Lasten oder zu einem Anriss in der Fügezone führen können.

Durch Variation der Parameter konnte eine Verzahnungsgeometrie identifiziert werden, für die ein Auswandern bei axialen Zuglasten von bis zu 12 kN ausgeschlossen wird. Transiente Simulationen des Verhaltens bei Torsion zeigen, dass nach einer Setzphase der Fügeverbindung (Verringerung der lokalen Spannungsspitzen in Bild 3, unten) diese das Torsionsmoment mit dem im Automobilbau üblichen Sicherheitsfaktor 2 bis 3 erträgt.



- a** Belastungseinheit
- b** Probe
- c** Messeinrichtung für Drehmoment
- d** Wegmess-einrichtung

Bild 4:
Versuchsaufbau zur Identifikation der Tragfähigkeit bei Wechseltorsion

EXPERIMENTELLE TRAGFÄHIGKEITSUNTERSUCHUNGEN

In einem weiteren Schritt wurden dynamische Dauerversuche bei wechselnder Torsionslast durchgeführt. Dafür konnten entsprechende Probekörper mit den beschriebenen umformenden Fertigungsverfahren hergestellt und geprüft werden. Für die Abschätzung der Tragfähigkeit der segmentierten Wellen sind diese in einen Torsionsversuchsstand integriert und bei unterschiedlichen Belastungsamplituden mehreren Millionen Lastwechseln unterzogen worden. Der Versuchsaufbau ist in Bild 4 dargestellt.

Bei den Untersuchungen wurden zwei Versagenskriterien herangezogen: Auswandern der Fügepartner und Materialversagen durch plastische Deformation in der Fügezone. Zur Detektion eines Auswanderns wurden die Proben mit

einem Abstandssensor ausgerüstet, welcher kontinuierlich und zeitsynchronisiert mit den Belastungszyklen Abstandsänderungen zwischen Endstück und Mittelwelle erfasst. Hinzukommend sind Torsionsmoment und Torsionswinkel kontinuierlich aufgezeichnet worden, um eine fortschreitende plastische Deformation – etwa durch eine Unstetigkeit in der somit abgebildeten Torsionssteifigkeit oder eine Hysterese – zu detektieren.

Für die Dauerversuche konnten sechs Laststufen von 320 Nm bis zu 2.000 Nm berücksichtigt werden, da von einem festigkeitssteigernden Einfluss der Umformung im Fügebereich aufgrund von Kaltverfestigungseffekten ausgegangen wird. Die Proben wurden dabei mit jeweils 3 Millionen Lastzyklen in den Laststufen geprüft.

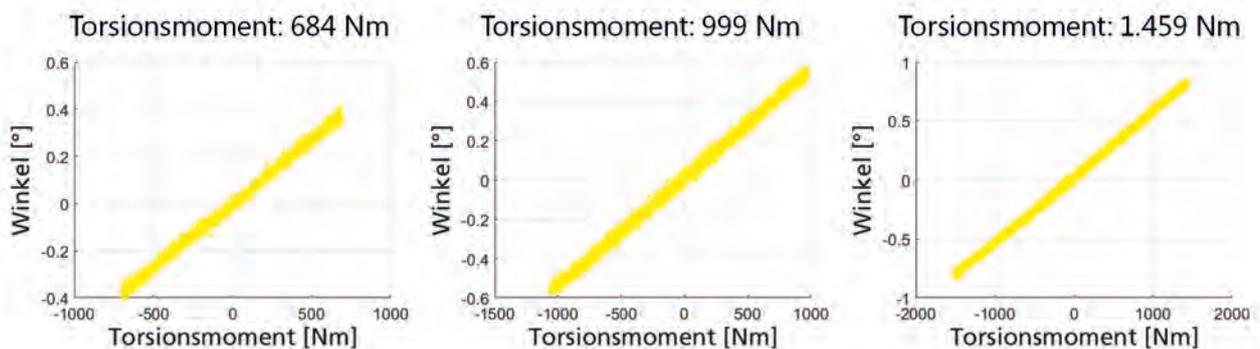


Bild 5: Diagramme von Torsionswinkel und -moment bei den Laststufen: 684 Nm, 999 Nm und 1.459 Nm

Die Messwerte der Torsionswinkel sind bei zugehörigen Torsionsmomenten in Bild 5 für drei unterschiedliche Laststufen dargestellt. Wie die Ergebnisse der Dauerversuche zeigen, können weder eine Hysterese, noch eine Unstetigkeit in den Steifigkeitsverläufen detektiert werden. Eine langsam fortschreitende plastische Deformation in der Kerbverzahnung kann bis zu einer Laststufe von zirka 1.500 Nm nicht detektiert werden. Bei keiner der untersuchten Proben kann überdies ein Auswandern der Fügepartner identifiziert werden. Ein Versagen wird erst ab einer Wechsellast von zirka 2.000 Nm detektiert. Ein nach der Schädigung aufgetrennter Probekörper ist in Bild 6 dargestellt.

Deutlich ist hierbei der Anriss im Bereich des Verzahnungsauslaufs zu erkennen. Dieser weist seinen Ursprung in dem Radius zu der axialen Schulter des Wellensegments auf. Die Verzahnung selbst ist nicht von Materialversagen betroffen.

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Die Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz einer segmentierten Rotorwelle für Elektromotoren Vorteile in der Fertigungsfolge mit sich bringt und einen Beitrag zur Modul- und Leistungsklassenbildung für Antriebsbaugruppen leisten kann. Die Entwicklung einer speziellen Fügeverbindung zwischen den Wellensegmenten, ausgeführt als modifizierte Kerbverzahnung, führt zu einer zusätzlichen Effizienzsteigerung durch die nun fast durchgehend mögliche umformtechnische Herstellung der Segmente. Es konnte nachgewiesen werden, dass die segmentierte Welle Torsionslasten mit entsprechend für den Automobilbereich üblichen Sicherheitsfaktoren erträgt. Innerhalb der weiteren Untersuchungen sind Optimierungen hinsichtlich der Wellengeometrie und der Herstellungsmöglichkeiten geplant. Hinzukommend werden weitere Dauerversuche zur Identifikation des Tragverhaltens der segmentierten Wellen bei Wechselbiegung durchgeführt.



Bild 6: Verzahnungsbereich eines nach Versagen bei 2133 Nm aufgetrennten Probekörpers

Bilder: Autoren



Felss Systems GmbH
Dieselstraße 2
75203, Königsbach-Stein
Telefon: +49 7232 402-0
E-Mail: info.felss-systems-stein@felss.com
Internet: www.felss.com

Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz
Telefon: +49 371 5397-0
E-Mail: info@iwu.fraunhofer.de
Internet: www.iwu.fraunhofer.de



[1] Strutz, T.; Roll, A.: Innovativ und sicher dank modularem Querbaukasten, ATZextra, 6 (2012), S. 34 – 37

[2] Wagner, H.; Bejnoud, F.; Beihofer, D.: Gefügte Rotorwellen für die Elektromobilität – Fertigungskonzepte und Auslegung der Fügeverbindung, 8. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen, (2018)

[3] Michi, W. et al.: Verfahren und Vorrichtung zum insbesondere abschnittweisen Verdicken einer plastisch verformbaren Hohlkörperwand eines Hohlkörpers sowie Fertigungsverfahren und Maschine zum Fertigen eines Hohlkörpers, European Patent, EP3345694A1, (2017)

[4] Grupp, P.; Richter, W.: Frequenzmoduliertes Axialformen – flexible Fertigung von Innen- und Außenverzahnungen, Umformtechnisches Kolloquium, Darmstadt, (2006)

[5] Kurth, R.; Tehel, R.; Päßler, T.; Wagner, H.; Beihofer, D.: Methodology for the design of recursively axially formed rotor shafts made of two or more combined segments, Procedia Manufacturing, 27 (2019), S. 13 – 20