

Studies on the Manufacture of a Shaft-Hub Connection with Transverse Extrusion

The transmission capacity of conventional form-fit shaft-hub connections is frequently determined by the achievable tolerances of the separately manufactured shafts and hubs. Especially novel contours on the basis of complex cycloids that demonstrate high potential in numerical studies cannot show this frequently in practical applications because of production tolerances and joining allowance. Final cutting of the shaft geometry is omitted if shaft and hub are connected with transverse extrusion. The shaft blank is formed in the completely finished hub. This can almost exclude tolerance problems between shaft and hub and can also increase the stability of the connection through the joint pressure resulting from the joining process.

Untersuchungen zur Herstellung einer Welle-Nabe-Verbindung durch Quer-Fließpressen

Dipl.-Ing. Florian Dörr,
Dipl.-Ing. Michael Funk,
Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald MBA und
Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz, Stuttgart

Das Übertragungsvermögen üblicher formschlüssiger Welle-Nabe-Verbindungen wird häufig durch die erreichbaren Toleranzen der getrennt voneinander gefertigten Welle und Nabe bestimmt. Besonders neuartige

Konturen auf Basis komplexer Zykloide, die in numerischen Untersuchungen ein hohes Potenzial aufweisen, können dieses aufgrund von Fertigungstoleranzen und Fügenspiel in der Praxis häufig nicht zeigen. Durch das Fügen einer Welle-Nabe-Verbindung mittels Quer-Fließpressen entfällt die spanende Endbearbeitung der Wellengeometrie. Der Wellenrohling wird in der fertig bearbeiteten Nabe umgeformt. Hierdurch können zum einen Tolerierungsprobleme zwischen Welle und Nabe nahezu ausgeschlossen und zum anderen die Verbindungsfestigkeit durch den aus dem Fügeprozess resultierenden Fugendruck gesteigert werden.

Einleitung

Im Maschinenbau übliche reib- oder formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen werden durch Fügen der bearbeiteten Teile erzeugt. Nachteilig ist hierbei, dass für einen einfachen Fügeprozess Fügenspiel notwendig ist. Bei kaltgefühten formschlüssigen Verbindungen kann daher Betriebsspiel auftreten, das unter zyklischer Belastung zu Reibkorrosion führen kann. Untersuchungen an Zahnwellen- und Polygonprofilverbindungen

haben gezeigt, dass die Wahl von engen Toleranzen beziehungsweise das Sicherstellen einer leichten Presspassung zwischen den Fügepartnern die Tragfähigkeit steigert [Hov86, Rei94, Sch03]. Andererseits geht damit immer auch eine Erhöhung des Fertigungs- und Montageaufwands und folglich auch der Herstellkosten einher. Die bei warmem Fügen notwendigen hohen Temperaturdifferenzen können bei gehärteten Teilen ein Wiederanlassen bedingen.

Bei Polygonprofilen, als besondere Form der formschlüssigen unmittelbaren Welle-Nabe-Verbindung, kann durch eine elastisch-plastische Auslegung die Dauerfestigkeit erhöht werden. Ursache hierfür ist der steigende Fugendruck und damit die Zunahme des schlupfflos übertragbaren Grenzdrehmoments. So tritt Mikrogleiten, das zur Reibkorrosion führt, nur vermindert bis gar nicht auf [Koll84].

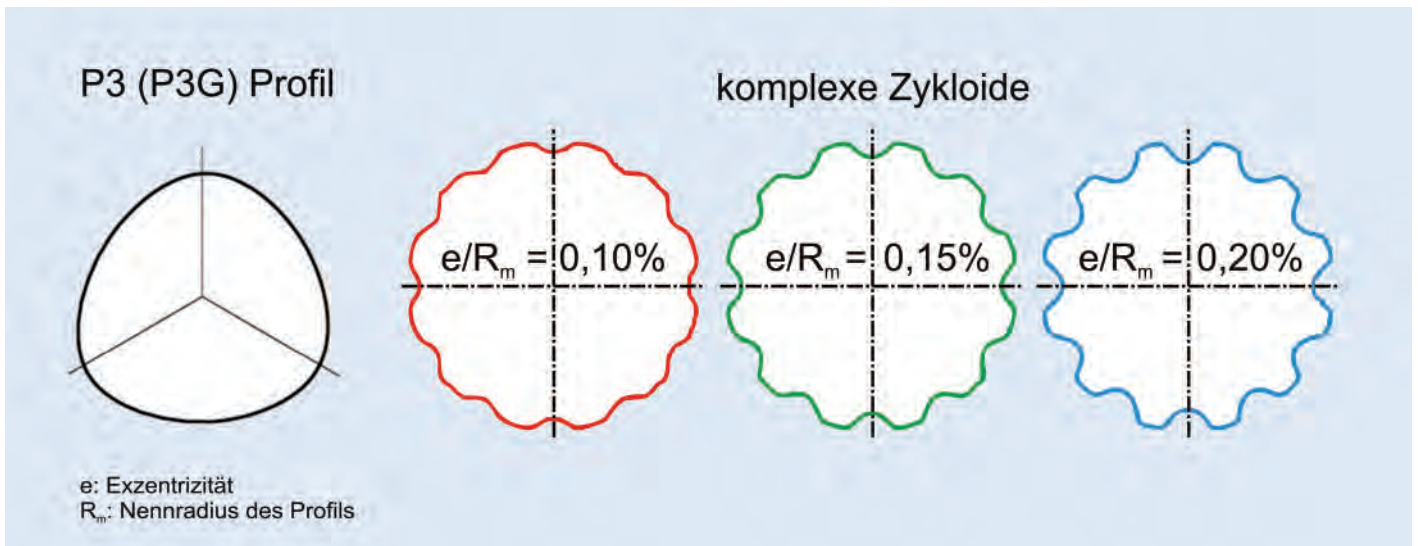


Bild 1: Beispiel für Polygonprofil und Profile auf Basis komplexer Zykloiden [Zia07].

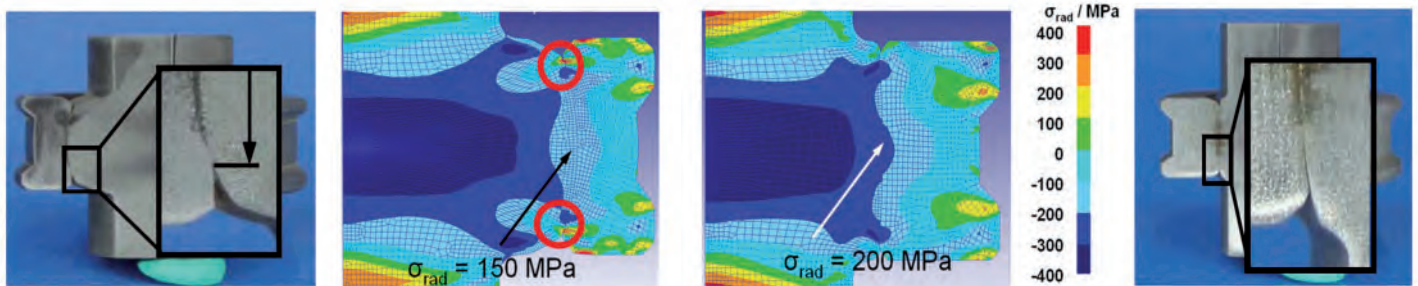
Reinholz [Rei94] zeigt mittels einer analytischen Betrachtung an P3G Polygonprofilverbindungen, dass nach DIN 32711 [Din09] zulässige Fertigungsabweichungen bereits eine deutliche Erhöhung der Flächenpressung und damit eine Reduzierung der Übertragungsfähigkeit bewirken können.

Durch die umformtechnische Erzeugung einer Fügeverbindung mittels Umformen der Welle wird das bei formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen vorhandene Füge-spiel ausgeglichen und der Fugendruck kann deutlich gesteigert werden. Neuere Entwicklungen zur Auslegung von formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen mit

bereits in der industriellen Praxis eingeführt, jedoch kann das Verfahren nur bei relativ dünnwandigen Hohlwellen angewendet werden.

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung sind zunächst reibschlussige Verbindungen einer zylindrischen Welle mit einer zylindrischen Nabe durch Quer-Fließpressen der Welle hergestellt worden. Ziel dieser Untersuchung bildeten der prinzipielle Nachweis der Herstellbarkeit und die Erarbeitung von Grundlagen für die Werkzeugkonstruktion für das Fügen exemplarischer Geometrien von Welle und Nabe.

wurden, erfolgte die Modellierung mit einem elastisch-plastischen Werkstoffverhalten der Welle und rein elastischem Verhalten der ringförmigen Nabe. Hierdurch lassen sich die Eigenspannungen nach der Entlastung der Stempel berechnen. Die Eigenspannungen nach der Entnahme sind in Bild 2 dargestellt. Durch den Einsatz zweier Nabengeometrien (Kapitel Experimentelle Untersuchungen), die aufgrund verschiedener Durchmesser-verhältnisse ein unterschiedliches Steifigkeitsverhalten zeigen, kann der Fugendruck der Welle-Nabe-Verbindung variiert werden, ohne dass es zur Ausbildung von kritischen Tangentialspannungen in der Nabe kommt. Die entstehenden Flächenpressungen in der



Nabengeometrie 1

Nabengeometrie 2

Bild 2: Eigenspannungen in der Welle-Nabe-Verbindung nach der Entnahme.

optimierten Konturen von Ziaei [Zia07] zeigen, dass mit Profilkonturen, basierend auf komplexen Zykloiden (Bild 1), die Vorteile von Polygonprofilverbindungen (geringe Kerbwirkung) mit denen von Keilbeziehungswise Zahnwellenverbindungen (große Anzahl an Mitnehmern) kombiniert werden können.

Verfahrensentwicklungen in der Umformtechnik bieten Möglichkeiten zur Herstellung von Welle-Nabe-Verbindungen, bei denen die oben genannten Nachteile nicht auftreten. Das Innenhochdruckfügen beispielsweise ist bei verschiedenen Produkten im Fahrzeugbau

FEM-Voruntersuchungen

Bei den Umformsimulationen, die im Vorfeld der Untersuchungen mit Hilfe des Software-Pakets DEFORM 2D durchgeführt

Trennfuge liegen bei Nabengeometrie 2 bei vergleichbarer Presskraft deutlich höher. Zudem zeigt die Simulation bei Nabengeometrie 1 am oberen und unteren Ende der

Naben-geometrie	Fugennenn-durchmesser D _f in [mm]	mittlere Fugenlänge L _f in [mm]	mittlerer Fugendruck p _f in [N/mm ²]	übertragbares Drehmoment T in [Nm]
1	35	10	150	433
2	28	12	200	443

Tabelle 1: Theoretisch ermittelte zulässige Drehmomente der gefügten reibschlussigen Welle-Nabe-Verbindung.

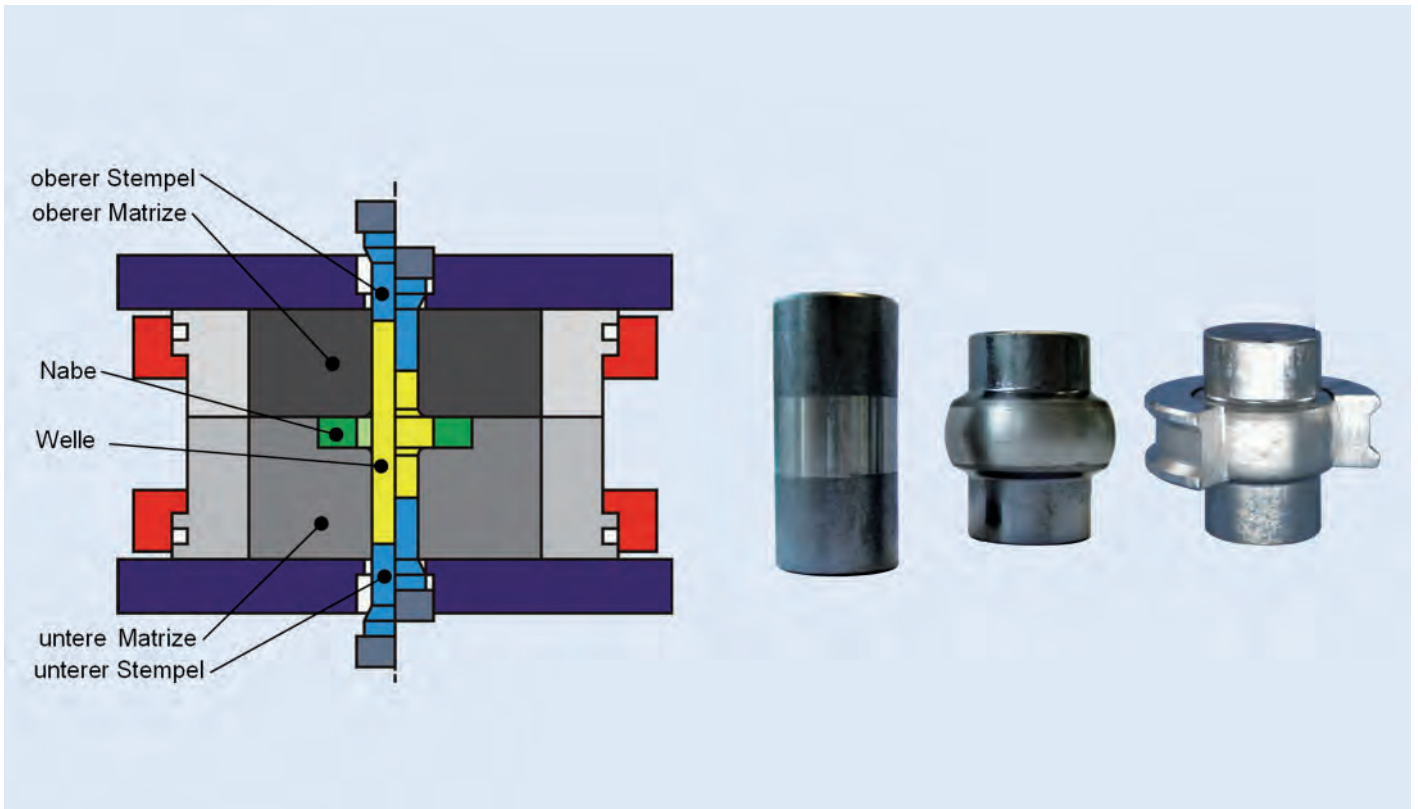


Bild 3: Links: Aufbau des Werkzeugs im Querschnitt. Rechts: Schmierstoffverteilung auf dem Wellenkörper (Zustellmuster ohne Nabenrohteil) und umformtechnisch gefügte Welle-Nabe-Verbindung.

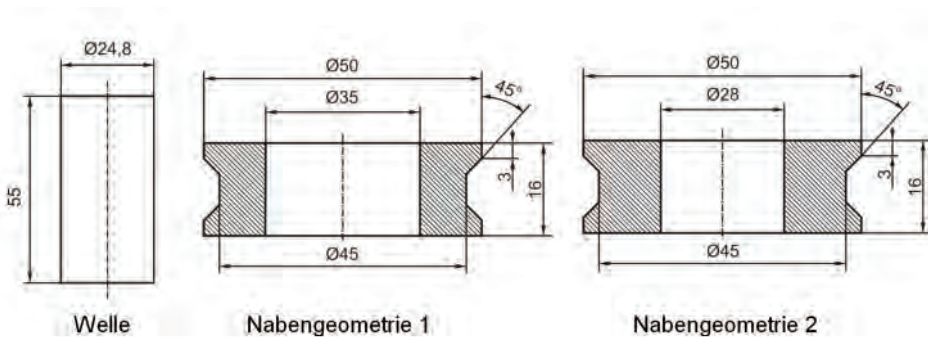


Bild 4: Geometrien der Rohteile Welle und Nabe.

Kontaktfläche sehr hohe Spannungsspitzen (zirka 400 MPa), die zu einer Minderung der Übertragungsfähigkeit vor allem bei spröden Nabenwerkstoffen führen können (Kapitel Experimentelle Untersuchungen) [Glö03, Hey07].

Eine vereinfachte Berechnung des übertragbaren Drehmoments infolge des entstandenen Querpressverbandes ist mit Hilfe von folgender Gleichung möglich:

$$T = \frac{\pi}{2} \cdot D_f^2 \cdot L_f \cdot \mu_{\text{Reib}} \cdot p_f$$

Mit der Annahme einer über dem Umfang konstanten Fugelänge L_f , sowie eines homogenen Fugendrucks und einer Reibungszahl nach Coulomb von $\mu_{\text{Reib}} = 0,15$, ergeben sich die in Tabelle 1 berechneten Drehmomente für die unterschiedlichen Nabegeometrien. Es wurde somit gezeigt, dass sich reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen umformtechnisch herstellen lassen. Ein experimenteller Nachweis zur Verbindungsfestigkeit hinsichtlich Torsion und Axialkraft steht jedoch noch aus. Der Nachteil solcher reibschlüssigen Verbindungen ist, dass sich in der Nabe durch den hohen Fugendruck große Verformungen ergeben. Derartige Verformungen schließen die Herstellung eng tolerierter Werkstücke aus. Abhilfe soll hier das Vorspannen der Nabe vor dem Einpressen und eine formschlüssige Gestaltung der Verbindung schaffen.

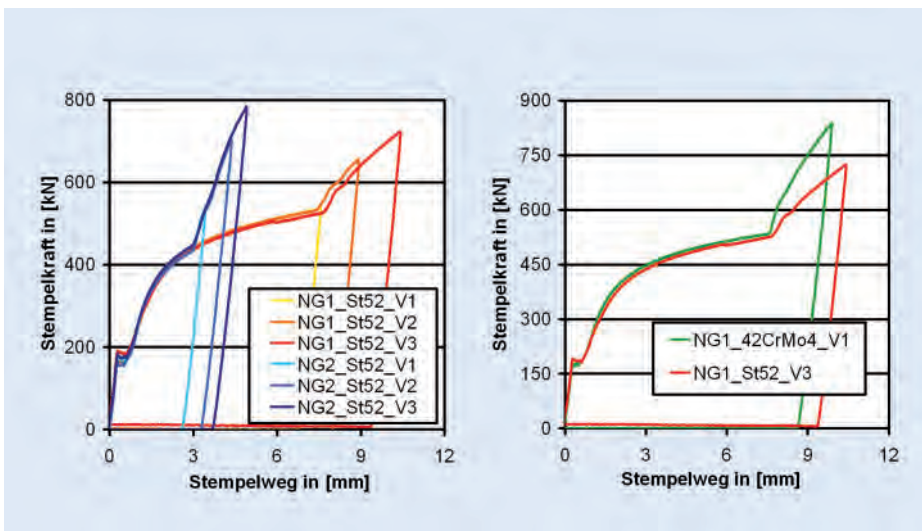


Bild 5: Presskraftverläufe für unterschiedliche Nabegeometrien und Zustellungen beim Nabenwerkstoff St52 und bei unterschiedlichen Nabenwerkstoffen. Bilder: Autoren



Dipl.-Ing. Florian Dörr



Dipl.-Ing. Michael Funk


 Prof. Dr.-Ing.
Hansgeorg Binz

 Prof. Dr.-Ing.
Mathias Liewald MBA

Experimentelle Untersuchungen

Zur Versuchsdurchführung steht am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart eine hydraulische Schließvorrichtung zur Verfügung. Die beiden Rohteile Welle und Nabe werden in die untere Matrize eingelegt. Nach dem Schließen der beiden Matrizenhälften erfolgt das Quer-Fließpressen durch das Zusammenfahren des unteren und oberen Stempels (Bild 3).

Die verwendeten Wellen- und Nabengeometrien sind in Bild 4 dargestellt. Die umlaufende Nut in der Nabenaußenkontur dient dem Ausgleich der Volumenschwankungen des Wellenrohlings und damit der Vermeidung einer Vollpressung.

Als Wellenwerkstoff wurde der Einsatzstahl 16MnCr5 in weich geglühtem Zustand verwendet. Als Nabenwerkstoffe kamen der Baustahl St52 und der Vergütungsstahl 42CrMo4 zum Einsatz. Im Anlagebereich von Matrize und Welle wurde diese mit dem Schmierstoff MoS₂ beschichtet. Der spätere Fügebereich der Welle-Nabe-Verbindung hingegen wurde gezielt frei von Schmiermittel belassen, um einen möglichst hohen Reibungskoeffizienten zwischen den Fügepartnern zu gewährleisten (Bild 3). In den Versuchen wurde die Stempelzustellung kontinuierlich erhöht, um unterschiedliche Pressungen in der Trennfuge zu erhalten. Die sich hierbei einstellenden Presskraftverläufe für die verschiedenen Nabengeometrien sind in Bild 5 dargestellt. Aufgrund des geringeren Innendurchmessers der Nabengeometrie 2 (NG2_...) kommt es bereits nach zirka 3 mm Stempelweg zum Kontakt der Welle mit der Nabe. Für den größeren Innendurchmesser der ersten Nabengeometrie (NG1_...) sind hierfür zirka 7 mm Stempelweg erforderlich. Die beiden Nabengeometrien besitzen die gleiche Außenkontur und somit aufgrund der unterschiedlichen Innendurchmesser verschiedene Wanddicken. Die geringere Nabewanddicke von Nabengeometrie 1 im Vergleich zu Nabengeometrie 2 führt im Kraft-Weg-Verlauf zu einem weniger steilen Kraftanstieg im Bereich nach dem ersten Kontakt.

In Bild 5 sind die Kraft-Weg-Verläufe für das Quer-Fließpressen mit zwei unterschiedlichen

Nabenwerkstoffen (St52 und 42CrMo4) dargestellt. Es zeigt sich, dass aufgrund der höheren Festigkeit des Nabenwerkstoffs 42CrMo4 ein steilerer Kraftanstieg nach Ausbildung des ersten Kontaktes eintritt, wodurch sich ein höherer Fugendruck einstellt.

Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass die Herstellung einer reibschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung mittels Quer-Fließpressen der Welle möglich ist. Aufgrund der hohen Flächenpressungen in der Trennfuge während des Prozesses kommt es jedoch zu bleibenden Verformungen der Nabenaußenkontur. Durch den Einsatz von Naben mit einer profilierten Innenkontur, wie zum Beispiel einem Polygonprofil (P3G) oder einem Profil auf Basis komplexer Zykloide, kann vermutlich bereits bei einem geringeren Fugendruck eine ausreichende Übertragungsfähigkeit erzielt werden. Es hat sich ebenfalls gezeigt, dass mit größerem Fugespalt eine kürzere axiale Fügelänge eintritt und gleichzeitig hohe Spannungsspitzen am Rand des Fugebereichs auftreten.

Ausblick

Die Gestaltung der Nabinnenkontur zur Herstellung formschlüssiger Welle-Nabe-Verbindungen soll im Weiteren auf der Basis der komplexen Zykloide nach [Zia07] an die Anforderungen im Umformprozess angepasst werden. Der Umformprozess und die Nabinnenkontur sind so abzustimmen, dass eine ausreichende Formfüllung der Mitnehmer erreicht werden kann, ohne dass es zu einer unrunder Verformung der Nabenaußenkontur kommt. Gleichzeitig soll die Verbindung Drehmomente von über 600 Nm bei einem Fugennennendurchmesser von 25 mm übertragen können.

Zur Untersuchung der statischen und dynamischen Übertragungsfähigkeit der gefügten Welle-Nabe-Verbindungen arbeitet das Institut für Konstruktion und Technisches Design (IKTD) und das Institut für Umformtechnik (IFU) an der Universität Stuttgart im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts eng zusammen. ■

Danksagung

Weitere Untersuchungen werden über die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen eines DFG-Gemeinschaftsprojekts gefördert.

Literatur

[Din09] DIN 32711: Antriebselemente – Polygonprofile P3G. Normenausschuss Antriebstechnik (NAN) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Normenausschuss Werkzeugmaschinen (NWM) im DIN, März 2009

[Glö03] Glöggler, C: Untersuchungen an spannungshomogenisierten und zylindrischen Pressverbindungen unter Torsionsbelastung, Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau der Universität Stuttgart, Dissertation, Stuttgart, 2003

[Hey07] Heydt, J; Binz, H: Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von spannungshomogenisierten und zylindrischen Pressverbänden bei Umlaufbiegebelastung, VDI Bericht 2004, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2007

[Hov86] Hove, U: Zum Verhalten biege- und torsionsbelasteter Profilverbindungen, Technische Universität Berlin, Dissertation, Berlin, 1986

[Koll84] Kollmann, F. G.: Welle-Nabe-Verbindungen: Gestaltung, Auslegung, Auswahl. Berlin, Heidelberg, New York. Springer Verlag, Konstruktionsbücher Band 32, 1984, ISBN3-540-12215-X

[Sch03] Schäfer, G: Auslegung von Zahnwellen-Verbindungen, Belastungsarten, Schadenszenarien und Ansätze in der Berechnung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003

[Rei94] Reinholz, R.: Tragfähigkeit von P3G-Welle-Nabe-Verbindungen bei Dauerschwingbeanspruchung. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fachbereich Maschinenbau und Produktionstechnik, Berlin 1994

[Zia07] Ziaei, M.: Anpassungsfähige kontinuierliche Innen- und Außenkonturen für form- und reibschlüssige Verbindungen auf Basis der komplexen Zykloiden. VDI-Berichte Nr. 2004, 2007, Seite 277-294