

UMFORMEN VERBINDET

Innenhochdruck-Fügeverfahren für Welle-Nabe-Verbindungen

Von Peter Dietz und Torsten Grünendick

Pressverbindungen gehören zu den grundlegenden Welle-Nabe-Verbindungselementen der Antriebstechnik und haben eine hohe Akzeptanz im Maschinen- und Anlagenbau. Neben den klassischen Pressverbindungen bildet die innenhochdruckgefügte Welle-Nabe-Verbindung eine interessante neue Variante dieses Maschinenelements mit entscheidenden Vorteilen. Um etwa eine konventionelle Nockenwelle herzustellen, sind aufwendige Bearbeitungsschritte nötig. Alternative Fertigungsverfahren und Bauweisen wie z.B. das Innenhochdruckfügen vorgefertigter Nockenringe können helfen, Kosten einzusparen und Bauteileigenschaften zu verbessern.

Seit einigen Jahren wird diese kraftschlüssige Verbindungsart nach dem patentierten Emishaft-Verfahren zur Herstellung gebauter Nockenwellen für Verbrennungsmotoren (**Bild 1**) im DaimlerChrysler Werk Hamburg angewendet. Dabei konnte eine deutliche Gewichtsreduzierung durch die verfahrensbedingte Verwendung von Hohlwellen gegenüber konventionellen Nockenwellen aus Vollwellen realisiert werden. Daneben benötigt dieses nach neuen fertigungstechnischen Gesichtspunkten hergestellte Maschinenelement im Gegensatz zu den herkömmlichen Pressverbindungen, bei denen ein Übermaß der Fügepartner die spielfreie Übertragung hoher statischer und dynamischer Lasten gewährleistet, keine speziell abgestimmten Toleranzen. Die Geometrieforderungen der Kontaktflächen durch ein zulässiges Füge-spiel sind deutlich geringer. Dies führt nicht nur zu einer erheblichen Kosteneinsparung durch Verminderung des Fertigungsaufwandes, die verwendete Fügetechnik ermöglicht auch eine Verkürzung der Fertigungszeiten. Ein weiterer Pluspunkt ist der Einsatz von Standard-Präzisions-Stahlrohren bei den Wellen und vorbereiteten Rohlingen bei den Naben, was wiederum kostengünstigere Vor- und Endbearbeitungsverfahren ermöglicht und die Materiallogistik wesentlich erleichtert.

Prinzip des Innenhochdruck-fügens

Das ursprünglich aus dem Apparatebau (Autofrettage) stammende Prinzip des Innenhochdruckfügens (IHF) ist der Technologie des Innenhochdruckumformens (IHU) sehr ähnlich. Im Gegensatz zum IHU, bei dem beispielsweise ein Rohr gegen eine Werkzeugwand expandiert wird und einen Körper komplizierter Geometrie ergibt, werden beim IHF Welle und Nabe kraftschlüssig miteinander verbunden. Der Fügevorgang läuft dabei wie folgt ab (**Bild 2**): Die Nabe wird über die



Bild 1: Nockenwelle für 3-Zylinder Dieselmotor
Bild: DaimlerChrysler Werk Hamburg

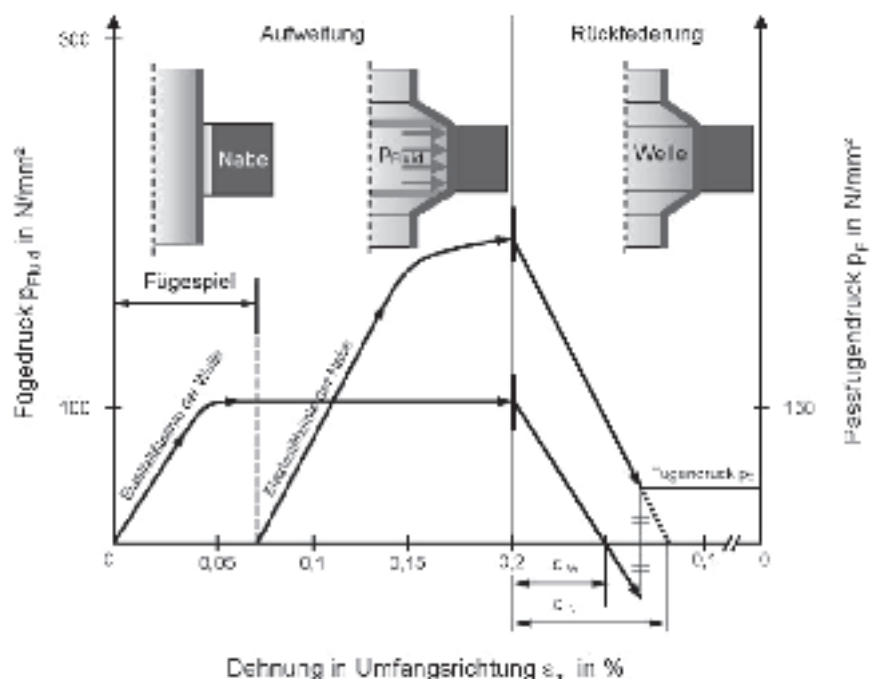


Bild 2: Abgewinkeltes Verformungsschaubild der Welle-Nabe-Verbindung während des Innenhochdruckfügens

Hohlwelle geschoben. Ein Aufweitwerkzeug wird in die Welle geführt und so positioniert, dass die auf der Sonde befindlichen Dichtungen ungefähr mit den Nabenrändern abschließen. Dieser im Rohr abgedichtete Ringspalt unterhalb der Nabe und zwischen den Sondendichtungen wird anschließend durch ein Hydromedium mit Druck beaufschlagt.

Bei Drucksteigerung weitet sich die Welle lokal unterhalb der Nabe zunächst elastisch und/oder plastisch auf, Bild 2. Nachdem das Fügenspiel überwunden ist, legt sich die Welle an die Nabe an, und beide Bauteile expandieren. Bei weiterer Drucksteigerung und durch die gezielte Materialkombination der beiden Fügepartner wird die Welle plastisch, die Nabe lediglich elastisch verformt (wie bei konventionellen Pressverbänden ist eine teilplastische Verformung der Nabe auch möglich). Nach Erreichen des maximalen Fügedrucks und Halten des Drucks für einen kurzen Zeitraum erfolgt die vollständige Druckrücknahme. Welle und Nabe federn gemeinsam zurück, Bild 2.

Durch die unterschiedlichen Nachgiebigkeiten und auf Grund der Festigkeitsunterschiede der Fügepartner ergibt sich ein unterschiedliches Rückfederungspotential, das dazu führt, dass sich die Nabe auf die Welle „schrumpft“. Die Rückfederungsbehinderung, verursacht durch die plastizierte Welle, sorgt für einen festen Presssitz der Welle-Nabe-Verbindung. Es ergibt sich ein Eigenspannungszustand ähnlich dem eines Pressverbandes.

Werkstoffeigenschaften gezielt nutzen

Bei diesem Fügeverfahren sind die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften der Fügepartner von entscheidender Bedeutung. Wird eine ungünstige Materialpaarung gewählt, bei der das Rückfederungsverhalten der Nabe kleiner ist als das der Welle, kann sich ein Presssitz nicht ausbilden. Andererseits kann man durch geschickte Wahl der Werkstoffe von Welle und Nabe sowohl den Fügevorgang als auch das Tragfähigkeitsverhalten der Verbindung optimieren.

Mit Berechnungsprogrammen kann der Spannungszustand des Fügeprozesses abgebildet und der Passfugendruck bestimmt werden. Die bisher erhaltenen guten Übereinstimmungen zwischen Berechnung und Messungen des erreichbaren Pressfugendrucks versprechen eine hohe Prozess- und Qualitätssicherheit und eine gezielte Optimierung der Verbindung mittels Simulation. Mit diesem Wissen können für unterschiedliche Bauteile und Belastungen Kombinationen von Werkstoffgruppen durchgespielt und die jeweils

besten Fertigungsbedingungen für den Anwendungsfall gesucht werden. Beispielsweise zeigt sich, dass durch die Kombination der Werkstoffeigenschaften, der geometrischen Gestaltung der Fügepartner und einer Teilplastizierung der Nabe beim Fügen der Fügedruck bei gleichbleibendem Passfugendruck reduziert werden kann, was die Standzeiten der Dichtungen erhöht.

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsvorhabens führt das Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal systematische Untersuchungen zum Betriebsverhalten dieser Welle-Nabe-Verbindung durch, um Grundlagen für die Weiterentwicklung dieses Verbindungselementes zu höheren Leistungsdurchsätzen zu schaffen. Die Ermittlung der Tragfähigkeit unter den Betriebsbeanspruchungen mit den Grenzbedingungen des Durchrutschens, der Reibrostbildung und der dynamischen Festigkeit insbesondere im Bereich der Verbindungsgrenzen stellt – wie bei den konventionellen Pressverbindungen – besondere Ansprüche an die theoretischen und experimentellen Untersuchungen. **Bild 3** zeigt eine Verbindung im Dauerprüfstand unter Wechseltorsion, **Bild 4** verdeutlicht die kombinierte Beanspruchung durch Fügeprozess und Betriebslasten (Drehmoment, Querkraft, Biegemoment) am Beispiel eines hochdruckgefügtes Kettenrades. Für die Berechnungsansätze kommen angepasste Strategien und Modelle aus der Berechnung zylindrischer Pressverbindungen zum Einsatz.

Leistungssteigerung durch Gestaltung und Ausbildung der Fügeflächen

Bisherige theoretische und experimentelle Ergebnisse zeigen, dass eine Beeinflussung des Passfugendruckverlaufes über der Länge der Verbindung (und hier besonders in der Nähe der Verbindungsenden) durch die Lage der Dichtungen beim Fügen möglich ist und damit Optimierungsmöglichkeiten zur Verbesserung des Betriebsverhaltens unter kombinierten Betriebsbelastungen eröffnet, die den klassischen Pressverbindungen verschlossen bleiben. Mittels gesteuerten Kugelstrahlens der Kontaktflächen kann darüber hinaus eine beeindruckende Leistungssteigerung erzielt werden. Diese Steigerung ist die Folge eines gekoppelten Prinzips von Mikroform- und Kraftschluss, wobei der Einfluss der muldenförmigen Topografie mit höheren Passfugendrücken stärker zur Geltung kommt.

Ein weiterer Aspekt führt zu neuen Lösungen der Leistungssteigerung: IHF-

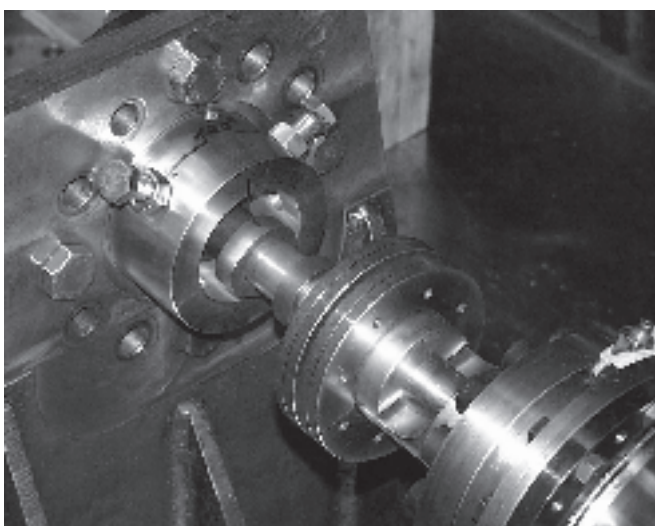


Bild 3: IHF-Pressverbindung im Dauerprüfstand unter Wechseltorsion

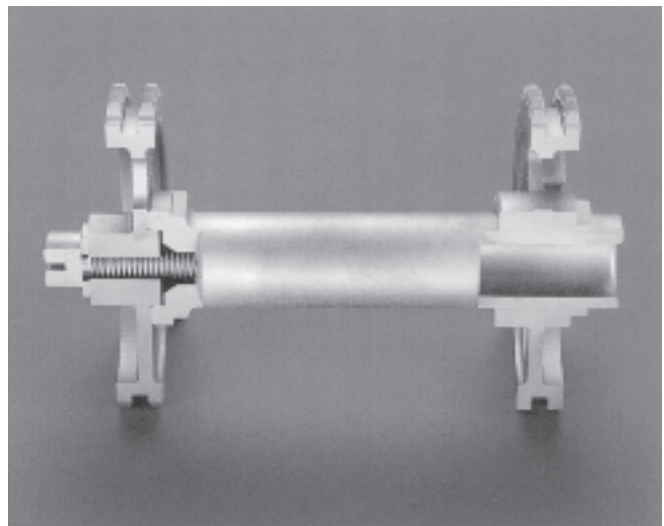


Bild 4: Hochdruckgefügtes Kettenrad
Bild: DaimlerChrysler Werk Hamburg

Pressverbindungen mit den entsprechenden Prozessschritten des Positionierens und des elasto-plastischen Aufweitens unter Raumtemperatur können in ihrem Übertragungsverhalten durch physikalisch-chemische Behandlung der Fügeflächen beeinflusst werden, beispielsweise bei galvanisch verzinkten Kontaktflächen. Der Vorteil liegt in der Oberflächenaktivierung der Pressflächen, die bei den derzeitigen Laborversuchen einen enormen Zuwachs der statischen Drehmomentübertragung von über 100% zeigen. Lokale Kaltpresslötungen, Kaltpressschweißungen und adhäsive Bindekräfte unterstützen den üblichen kraftschlüssigen Übertragungsmechanismus.

Die Einsatzmöglichkeit innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen hat sich in einigen Industriebereichen bereits erfolgreich durchgesetzt und beginnt insbesondere im Automobilbau stärker an Einfluss zu gewinnen. Als „Nebeneffekt“, ist die Verwendung von Präzisions-Stahlrohren als Wellenhalbzeug zu nennen, was Vorteile nach den Gesichtspunkten des Leichtbaus und des Platzbedarfs im Getriebe bringt. Heute schon werden in vielen Motortypen Nockenwellen dieser Fertigungstechnologie verwendet. Aber auch Kettenräder, Ausgleichswellen und weitere Verbindungen mit zunehmend höheren Anforderungen an die Übertragungsfähigkeit werden in

besonders wirtschaftlicher Serienfertigung gebaut. Dieses neuartige kraftschlüssige Maschinenelement bietet in seiner differentiellen Bauweise durch die Reduzierung des Fertigungs- und Montageaufwandes genauso wie durch die deutliche Verringerung von Gewichts- und Massenkräften neue Alternativen gegenüber integralen Lösungen der herkömmlichen Produktionsverfahren.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Peter Dietz

Dipl.-Ing. Torsten Grünendick

Institut für Maschinenwesen

Robert-Koch-Straße 32

38678 Clausthal-Zellerfeld

Tel.: 05323/72-2270 (Dietz)

05323/72-3507 (Grünendick)

Fax: 05323/72-3501

*E-Mail: dietz@imw.tu-clausthal.de
gruenen@imw.tu-clausthal.de*

