

Fester Presssitz durch „hydraulisches Aufweiten“

Von Torsten Grünendick

Das Innenhochdruckfügen (IHF) im Apparatebau, bekannt unter dem Begriff des „hydraulischen Aufweitens“, ist eine Befestigungsmethode, um Rohre (Wellen) mit Rohrscheiben (Naben) zu verbinden. Die Verbindung zwischen Rohren und Rohrscheiben ist im Apparatebau ein Fertigungsprozeß von großer sicherheitstechnischer und verfahrenstechnischer Bedeutung. Insbesondere für die Herstellung von Wärmetauschern (**Bild 1**) in konventionellen und kern-technischen Kraftwerken wird diese Verbindungsart verwendet.

Die übliche Art der Rohr-/Rohrplattenverbindung war über Jahrzehnte hinweg das mechanische Ein-

walzen der Rohre, **Bild 2**. Beim Einwalzen entstehen jedoch hohe örtliche Spannungen und Verformungen, die durch den „harten“ Kontakt zwischen Rohr und Walzstein erzeugt werden. Dadurch kommt es zur Spannungsrisskorrosion, welche die Verbindungsqualität mindert. Des weiteren gelang es nicht, die Verformung durch das Einwalzen so zu optimieren, dass einerseits der Endspalt zwischen Rohr und Rohrplatte vollständig verschlossen wird und andererseits das Rohr nicht abschert. Dieser Spalt kann sich schnell zum Korrosionsnest entwickeln und die Verbindung zerstören.

Mit dem hydraulischen Aufweiten konnten

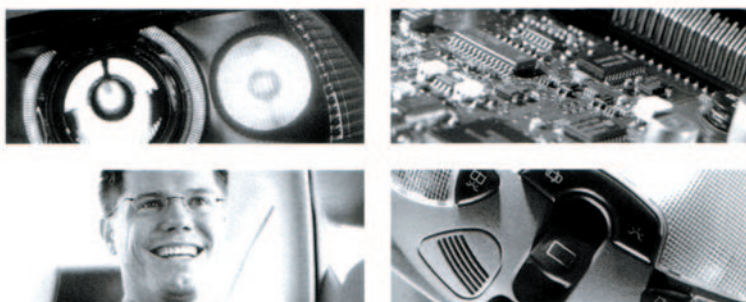
diese unerwünschten Eigenschaften und Nachteile aufgrund der hydraulischen Innendruckkräfte beseitigt werden. Die Restspannungen im Rohr sind wesentlich reduziert, was sich besonders bei spannungsrisskorrosionsempfindlichen Werkstoffen als Vorteil erweist. Ebenso gelingt die Schließung des Spaltes zwischen dem Rohr und der Rohrplatte durch ein gleichmäßiges Ausbilden der Verbindung, speziell an den Randzonen. Hierfür ist im Wesentlichen die Platzierung der Sondendichtung im Rohr bzw. in der Welle verantwortlich.

Das Einführen und Platzieren der Aufweitesonde (**Bild 3**) in das Rohr zur Aufweitung der



**Diplom-Ingenieure/-innen
Elektrotechnik / Maschinenbau**

**Kommen Sie zu uns
mit Ihrem neuen Denken
und Handeln!**



Als Schrittmacher des Fortschritts in der Elektronik und Lichttechnik der automobilen Welt sorgen wir seit über 100 Jahren für mehr Sicherheit, Komfort und Wirtschaftlichkeit. Unsere Ziele realisieren wir mit Tochtergesellschaften auf allen Kontinenten, globalen Vertriebsorganisationen und weltweit über 23.000 Mitarbeitern. Unsere Unternehmenskultur mit flachen Hierarchien, integrativen Strukturen und kooperativer Führung bietet alles, was Ihren Start ins Berufsleben und das anschließende Vorwärtkommen erfolgreich macht. Sind Sie Absolvent/in oder Student/-in des Ingenieurwesens

(Elektrotechnik, Maschinenbau), der Wirtschaftswissenschaften oder Informatik? Dann bewerben Sie sich bei:

Hella KG Hueck & Co.
Wencke Braun, E-Mail: wencke.braun@hella.de
Telefon: 02941/38-1155
Hochschulmarketing
Rixbecker Straße 75
59552 Lippstadt
www.hella.com



**Ideen für das
Auto der Zukunft**



Bild 1: Rohrbündel eines Wärmetauschers
(TITZE, WILKE 1992)

Fügepartner und das häufige Auswechseln der Sondendichtungen sind zwar sehr zeitintensiv, werden aber durch den schnellen Aufweiteprozess, der nur Bruchteile einer Sekunde benötigt, deutlich kompensiert. Damit wird das hydraulische Aufweiten gegenüber dem Einwalzen zu einem fertigungstechnisch schnelleren Verfahren.

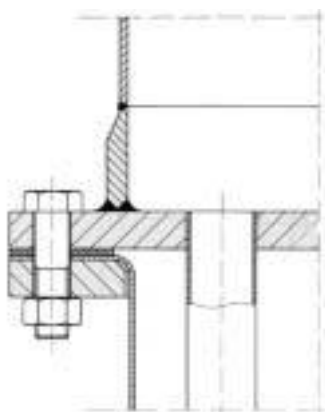


Bild 2: Rohr/Rohrscheibenverbindung durch mechanisches Einwalzen (TITZE, WILKE 1992)

Mit der erfolgreichen Anwendung des hydraulischen Aufweitens im Apparatebau und seinen vielen Vorteilen, wie z.B. hohe Qualität und gute Reproduzierbarkeit der Verbindungen sowie schnelle und einfache Fertigung, ist ein Innovationstransfer auch auf andere Gebiete der Technik erfolgt. So wird seit wenigen Jahren dieses Verfahren zur Fertigung von Pressverbindungen verwendet, die vorrangig zur Herstellung gebauter Nockenwellen für Verbrennungsmotoren dienen.

Dieses fertigungstechnisch neu hergestellte Maschinenelement benötigt 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. Damit sind die Geometrieanforderungen der Kontaktflächen durch ein zulässiges FügeSpiel deutlich geringer. Dies führt zu einer erheblichen Kosteneinsparung durch Verminderung des Fertigungsaufwandes und ermöglicht eine Verkürzung der Fertigungszeiten durch bessere Montage.

Prinzip des Innenhochdruckfügens

Das Prinzip des Innenhochdruckfügens ist erstaunlich einfach. Die Hohlwelle wird in der Nabe ausgerichtet. Das Aufweitwerkzeug (Sonde, Bild 3) wird in die Welle geführt und so positioniert, dass die auf der Sonde befindlichen Dichtungen exakt mit den Nabenrändern abschließen. Dieser im Rohr genau abgedichtete Ringspalt unterhalb der Nabe und zwischen den Sondendichtungen wird anschließend durch ein Hydromedium mit Druck beaufschlagt, Bild 5-b. Dieses Medium gelangt durch eine Sondenbohrung in den Ringspalt.

Bei Drucksteigerung weitet sich die Welle lokal unterhalb der Nabe elastisch und/oder plastisch aus, Bild 4-1. Nachdem das FügeSpiel überwunden ist, legt sich die Welle an die Nabe an und beide Bauteile expandieren, Bild 4-2. Bei weiterer Drucksteigerung und durch die gezielte Materialkombination der beiden Fügepartner wird die Welle plastisch, die Nabe lediglich elastisch verformt, Bild 4-3. Nach dem Erreichen des max. Fügedrucks und Halten des Drucks für einen bestimmten Zeitraum erfolgt die vollständige ▶

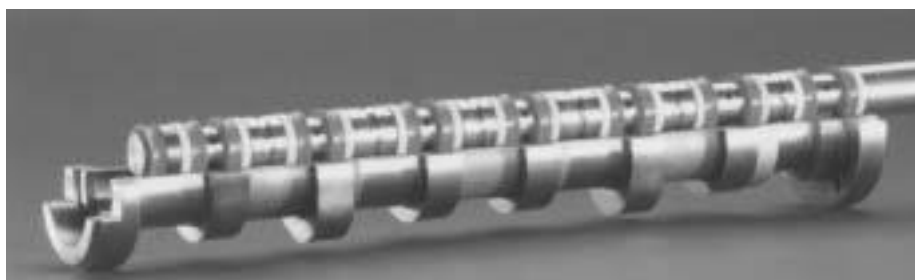


Bild 3: Sonde zum Fügen einer Nockenwelle (Prospekt DAIMLER-CHRYSLER)

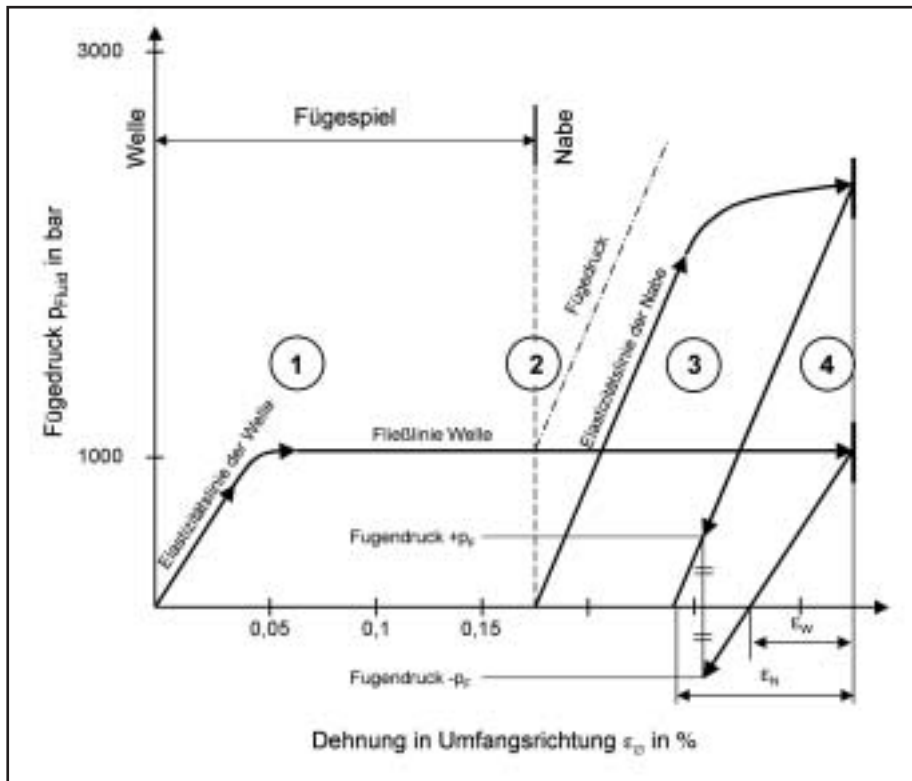


Bild 4: Verformungsschaubild der Welle-Nabe-Verbindung während des Innenhochdruckfügens

Druckrücknahme. Welle und Nabe federn gemeinsam zurück, Bild 4-4. Durch die unterschiedlichen Nachgiebigkeiten und aufgrund der Streckgrenzenunterschiede der Fügepartner ergibt sich ein unterschiedliches Rückfederungspotential, das dazu führt, dass sich die Nabe auf die Welle „schrumpft“. Die Rückfederungsbehinderung, verursacht durch die plastifizierte Welle, sorgt für einen festen Presssitz der Welle-Nabe-Verbindung, Bild 5-c.

Wird eine ungünstige Materialpaarung gewählt, bei der das Rückfederungsverhalten der Nabe kleiner ist als das der Welle, kann sich ein Presssitz nicht ausbilden, Bild 5-e. Auch ist der Presssitz möglicherweise nicht realisierbar, wenn der Fügedruck einen Grenzwert ($p_{\text{Fließ},IA'}$) erreicht, der zum Plastifizieren der Nabe führt. Hier behindern die entstehenden Eigenspannungen ein vollständiges Zurückfedern, so das auch hier ein Fügespalt verbleibt, Bild 5-f.

Den Grenzzustand, bei dem die Rückfederung der Nabe gleich der Rückfederung der Welle ist, wird in Bild 5-d dargestellt. Hier liegt also ein Zustand vor, der mindestens erreicht werden muss, damit sich ein Presssitz bei Überschreitung des Grenzfügedruckes einstellt. Bei der analytischen Betrachtung der Verbindung ist dieser „Grenzzustand“ von besonderer Bedeutung.

Analytische Betrachtungen zum Fügeprozess

Das hydraulische Verfahren und die in der Regel rotationssymmetrischen Fügepartner bieten gute Voraussetzungen für eine analytische Betrachtung des Spannungs- und Verformungszustandes. Die im folgenden gezeigten Diagramme beruhen auf einer einfachen elastisch-plastischen Berechnungsmethode, wie sie im Apparatebau allgemein bekannt ist. Ausgangspunkt sind die rotationssymmetrischen Gleichgewichtsbedingungen in Polarkoordinaten, die mit den Spannungs-Dehnungsbeziehungen eine homogene Differentialgleichung ergeben. Als Lösung erhält man ein rotationssymmetrisches ebenes Spannungsfeld.

Unter Verwendung der Fließbedingung nach von Mises lässt sich über die Verformungsbeziehungen ein „unterer“ Grenzfugedruck (p_{Grenz}) ermitteln, bei dem die Rückfederung der Nabe genauso groß ist wie die Rückfederung der durchplastifizierten Welle, Bild 5-d. Somit stellt sich erst nach dem Überschreiten dieses Grenzfugedruckes ein Fugendruck (p_F) ein, der zu einem Presssitz führt. Im Wesentlichen ist dieser Grenzfugedruck von den Durchmesserverhältnissen der Welle ($Q_I = D_{II}/D_{aI}$) und der Nabe ($Q_A = D_{IA}/D_{aA}$) abhängig sowie über das E-Modul-Verhältnis und die Streckgrenze der Welle beeinflussbar.

$$p_{\text{Fluid}} \geq p_{\text{Grenz}} = f\left(Q_A, Q_I, \frac{E_A}{E_I}, \sigma_{FI}\right)$$

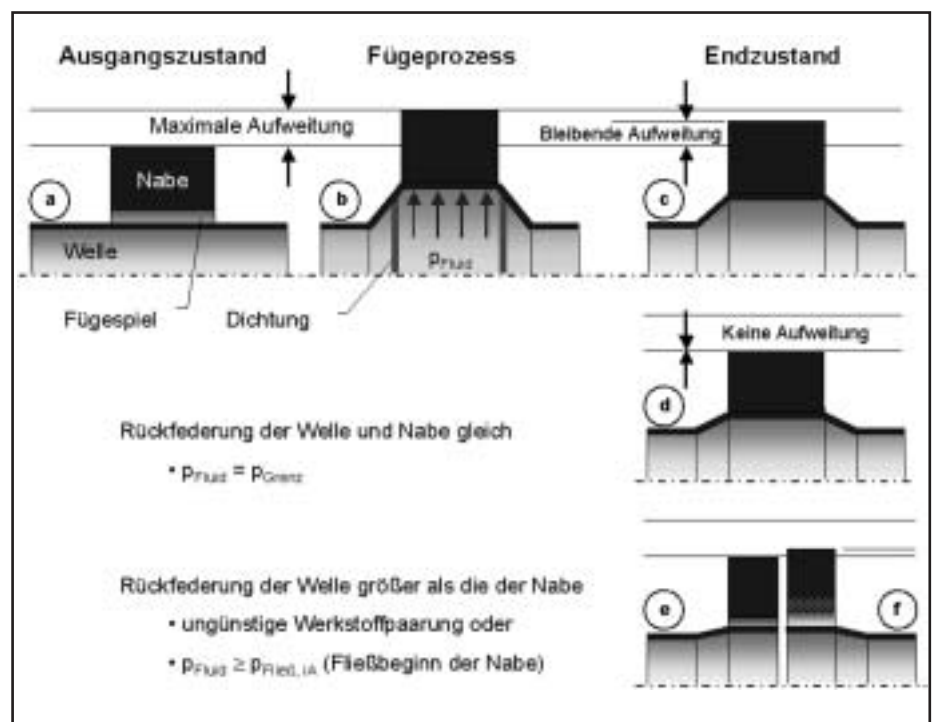


Bild 5: Phasen des Fügeprozesses und mögliche Endzustände

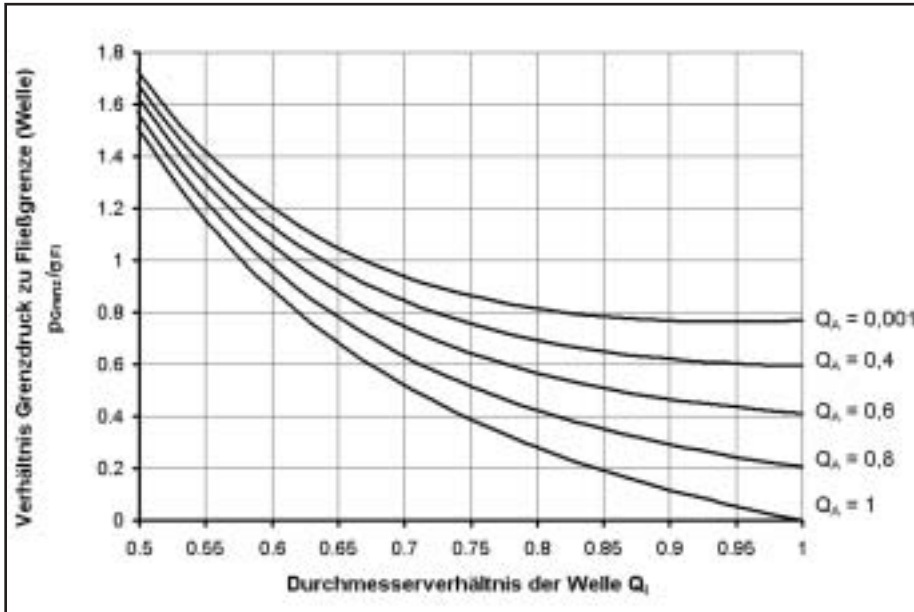


Bild 6: Bezogener Grenzfügedruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie

In **Bild 6** ist der auf die Fließgrenze der Welle bezogene „untere“ Grenzfügedruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie dargestellt. Die Kurve $Q_A=0,001$ gibt den bezogenen Grenzfügedruck einer Welle-Nabe-Verbindung mit einer plattenähnlichen Nabe an. Die Kurve $Q_A=1$ entspricht gerade dem bezogenen Fügedruck, bei dem die Welle vollständig plastifiziert. Die untereinander verlaufenden Linien zeigen eine deutliche Abhängigkeit von dem Durchmesser Verhältnis der Nabe, die mit dem Durchmesser Verhältnis der Welle den Grenzfügedruck zur Fließgrenze der Welle beeinflussen. Bei dünnwandigen Naben wird daher ein geringerer Grenzfügedruck als bei dickwandigen benötigt, um gleiche Rückfederungen der Fügepartner zu erreichen. Dies führt bei dünnwandigen gegenüber dickwandigen Naben und gleichen Fügedrücken zu einem deutlich höher ausgebildeten Presssitz (gleicher Wellendurchmesser angenommen), vgl. auch hierzu ergänzend **Bild 8**. Umgekehrt ist bei dickwandigen Naben die Steifigkeit höher und dementsprechend die Nachgiebigkeit geringer. Dies hat dann wiederum zur Folge, dass die Rückfederung der Nabe geringer ausfällt, was dann zu geringeren Fügedrücken führt. Werden verschiedene Nabensteifigkeiten bei gleicher maximaler Aufweitung verglichen, so ist diese bei dickwandigen Naben mit einer vergleichsweise größeren gemeinsamen Rückfederung verbunden als bei dünnwandigen Außen teilen. Es bildet sich ein höherer Passfügedruck aus!

Wird während des Fügeprozesses die Nabe plastifiziert, können unerwünschte Behinderung der Rückfederung der Nabe durch die Plastifizierungszone entstehen, Bild 5-f. Daher ist zu fordern, dass die Nabe nicht plastifizieren darf. Dieser „obere“ Grenzfügedruck $p_{Fließ,IA}$, der

nötig ist, um die Nabe zu plastifizieren, ist hauptsächlich von dem Streckgrenzenverhältnis der Nabe zur Welle und den Durchmesser Verhältnissen abhängig. Wird also eine höhere Streckgrenze der Nabe gewählt, kann durch einen höheren Grenzfügedruck der Presssitz stärker ausgebildet werden. Eine erhebliche Steigerung der Drehmomenten- bzw. Kraftübertragung ist die Folge.

$$p_{Fließ} \leq p_{Fließ,IA} = f\left(\sigma_A, Q_1, \frac{\sigma_{FA}}{\sigma_{FI}}\right)$$

Bild 7 zeigt für das Nabendurchmesser Verhältnis $Q_A=0,8$ mehrere dazugehörige Streckgrenzenverhältnisse ($\sigma_{FA}/\sigma_{FI}=0,6; 0,8; 1,5; 2$). Die Kurven zeigen, dass sich bei einem Nabendurchmesser Verhältnis $Q_A=0,8$ und Streckgrenzenverhältnis $\sigma_{FA}/\sigma_{FI}=0,6$ ein Presssitz ohne Plastifizieren der Nabe nur dann einstellt, wenn das Wellendurchmesser Verhältnis kleiner $Q_1=0,77$ ist. Dagegen erhöhen größere Streckgrenzenverhältnisse das Potential für einen festeren Presssitz, ohne die Plastifizierung der Nabe zu riskieren ($\sigma_{FA}/\sigma_{FI}=1,5; 2$). Die beiden Kurven $Q_A=0,4$ und $\sigma_{FA}/\sigma_{FI}=0,8$ (für $Q_A=0,4$) verdeutlichen lediglich die bereits angesprochene Abhängigkeit.

Der „untere“ und „obere“ Grenzfügedruck, die den aufzubringenden Fügedruck begrenzen, sind damit sowohl von der Geometrie der Welle und Nabe abhängig als auch vom Werkstoffverhalten der Fügepartner, gekennzeichnet durch die Streckgrenzen (Fließgrenzen) und E-Moduli.

Neben der Kenntnis des Arbeitsbereiches – „unterer“ und „oberer“ Grenzfügedruck – ist ►

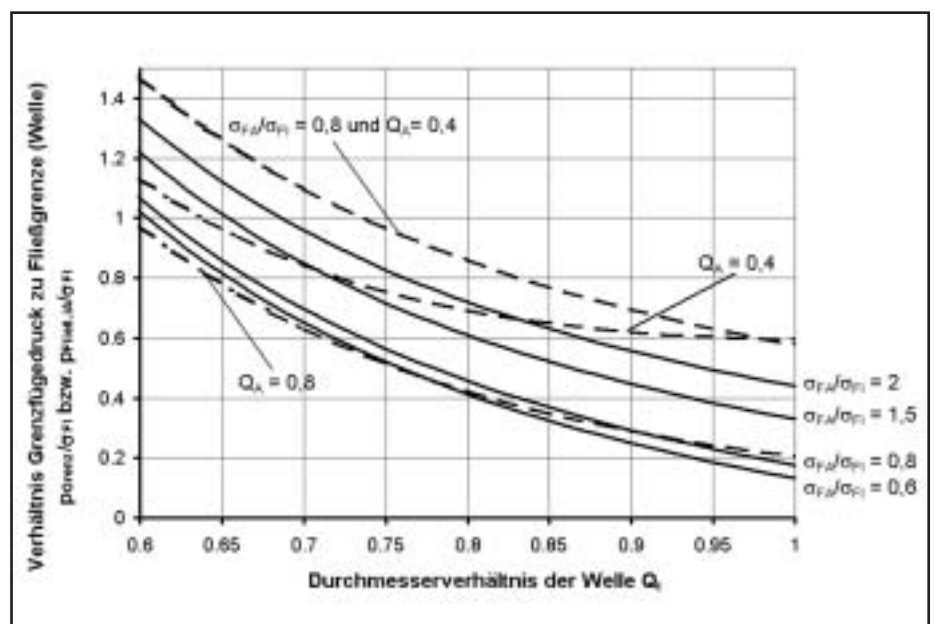


Bild 7: Streckgrenzenverhältnis und bezogener Grenzdruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie

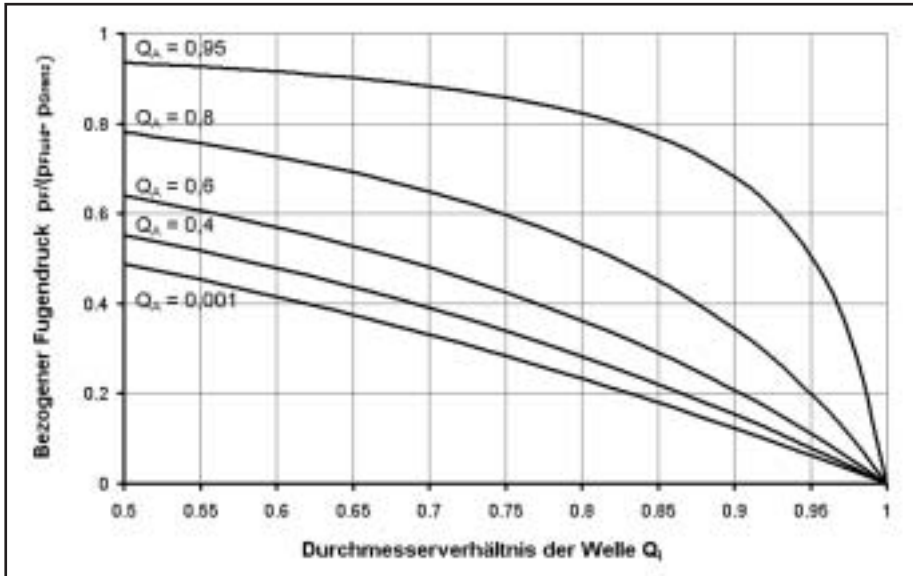


Bild 8: Bezogener Fugendruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie

die Vorhersage des entstehenden Passfugendruckes bei gegebenem Fügedruck oder die Vorhersage des Fügedruckes bei gefordertem Passfugendruck von besonderer Bedeutung. Bild 8 zeigt den bezogenen Fugendruck, der mit Hilfe von Dehnungsbeziehungen ermittelt werden kann, in starker Abhängigkeit der Welle-Nabe-Geometrie. Mit den Bildern 6 bis 8 ist somit die Berechnung einer innenhochdruckgefügtten Pressverbindung für ein E-Modulverhältnis $E_A/E_I = 1$ und $\nu = 0,3$ theoretisch möglich.

Betrachtet man den Passfugendruck in Abhängigkeit von der Wellenstreckgrenze (Bilder 6 und 8), so wird man feststellen, dass sich bei niedrigen Wellenstreckgrenzen gegenüber höheren Wellenstreckgrenzen stärkere Pressverbindungen ausbilden. Durch die geringere Wellenstreckgrenze vermindert sich das Rückfederungspotential der Welle. Die Welle-Nabe-Verbindung kann auf einem höheren Niveau ausgebildet werden. Dies bedeutet andererseits, dass bei konstant gehaltenem Passfugendruck der Fügedruck vermindert werden kann, was dann wiederum zu höheren Standzeiten der Dichtungen führt, also fertigungstechnisch interessanter ist.

Bei diesem elastischen Berechnungsmodell wird der Einfluss des Fugespiels aufgrund der getroffenen Annahmen nicht berücksichtigt. Diese Annahme ist berechtigt, solange sich die Welle im voll durchplastifizierten Zustand an die Nabe legt und ein idealplastisches Werkstoffverhalten angenommen wird. Die Drucküberstandslänge, also die axiale Positionierung der Sondendichtung unterhalb der Nabe, kann in einem rotationssymmetrischen ebenen Spannungszustand nicht berücksichtigt werden. Numerische Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass sie einen entscheidenden Einfluss auf die Fugenpressungsbildung an den Randzo-

nen der Nabe haben (GARZKE 2001). Durch die gezielte Positionierung der Dichtungen können diese Einflüsse auf den jeweiligen Anwendungsfall günstig abgestimmt werden und zu einer Drehmomentensteigerung beitragen.

Anwendungen im Automobilbau

Seit wenigen Jahren wird diese neuartige Pressverbindung zur Herstellung gebauter Nockenwellen für Verbrennungsmotoren, Ausgleichswellen und für die Befestigung von Ketten- oder Riemenrädern angewendet (Prospekt DAIMLER-CHRYSLER). Bild 9 zeigt die Nockenwelle des Dreizylinder-Diesels (Smart). Dabei konnte eine Gewichtsreduzierung von etwa 50 % durch die

verfahrensbedingte Verwendung von Hohlwellen gegenüber konventionellen Pressverbindungen mit Vollwelle realisiert werden.

Zusammenfassung

Die Einsatzmöglichkeit innenhochdruckgefügtter Welle-Nabe-Verbindungen hat sich nicht nur im Apparatebau erfolgreich durchgesetzt, sondern beginnt insbesondere im Automobilbau stärker an Einfluss zu gewinnen. Dieses neuartige kraftschlüssige Maschinenelement überzeugt durch die Reduzierung des Fertigungs- und Montageaufwandes genauso wie durch die deutliche Gewichtseinsparung gegenüber herkömmlichen Produktionsverfahren und durch die Möglichkeit der individuellen Werkstoffauswahl. Dabei muss die Werkstoffpaarung grundsätzlich so eingestellt werden, dass für einen hohen Passfugendruck eine geringe Rückfederung der Welle (geringe Nachgiebigkeit und Streckgrenze) gegenüber einer hohen Rückfederung der Nabe (geringe Steifigkeit und hohe Streckgrenze) vorliegt.

Dipl.-Ing. Torsten Grünendick
Institut für Maschinenwesen
Robert-Koch-Straße 32
38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel.: 05323/72-3507
Fax: 05323/72-3501



Bild 9: Innenhochdruckgefügte Nockenwelle für einen 3-Zylinder-CDI-Dieselmotor (Prospekt DAIMLER-CHRYSLER)