

## Das „hydraulische Aufweiten“ im neuen Gewand - IHF sorgt für festen Presssitz -

Grünendick, T.

*Der Beitrag zeigt Verfahrensanwendungen aus dem Apparatebau und beschreibt sowohl die Füge-technik als auch Ergebnisse analytischer Untersuchungen an dieser innovativen Welle-Nabe-Verbindung.*

*The contribution shows a process application from apparatus construction and describes the joint technology as well as the results of analytical investigations on these innovative shaft-hub connections.*

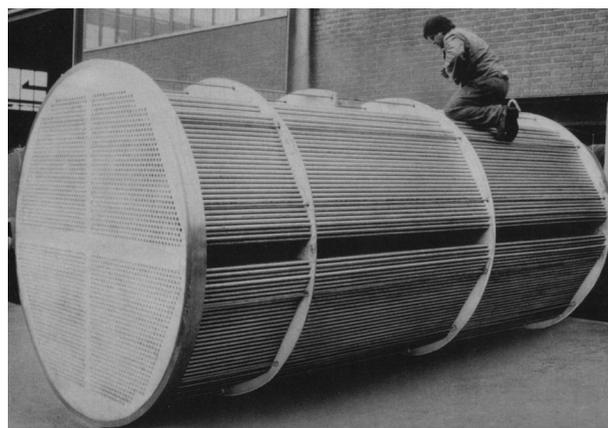
### 1 Einleitung

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

Die übliche Art der Rohr-/Rohrplattenverbindung war über Jahrzehnte hinweg das mechanische Einwalzen 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, die 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 abscherf. Dieser Spalt kann sich schnell zum Korrosionsnest entwickeln und die Verbindung zerstören.

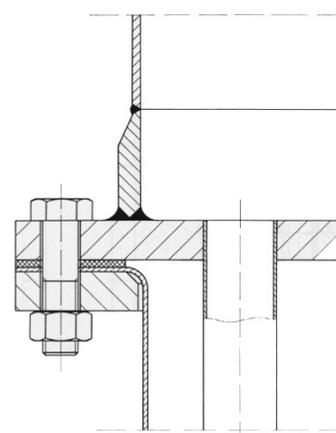
Mit dem hydraulischen Aufweiten konnten diese unerwünschten Eigenschaften und Nachteile aufgrund der hydraulischen Kräfte beseitigt werden. Die Restspannungen im Rohr sind wesentlich reduziert, was sich besonders bei spannungsrißkorrosionsempfindlichen Werkstoffen als Vorteil erweist.

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.



**Bild 1:** Rohrbündel eines Wärmetauschers, /1/

Die Einführung der Aufweitesonde in das Rohr und das Auswechseln der Dichtungen nehmen zwar eine längere Zeit in Anspruch. Dagegen benötigt der Aufweiteprozess nur Bruchteile einer Sekunde. Damit wird das hydraulische Aufweiten gegenüber dem Einwalzen zu einem fertigungstechnisch schnelleren Verfahren.



**Bild 2:** Rohr-/Rohrplattenverbindung durch mechanisches Einwalzen, /1/

Mit der erfolgreichen Anwendung des hydraulischen Aufweitens im Apparatebau und seinen vielen Vorteilen, wie z.B. die hohe Qualität und gute

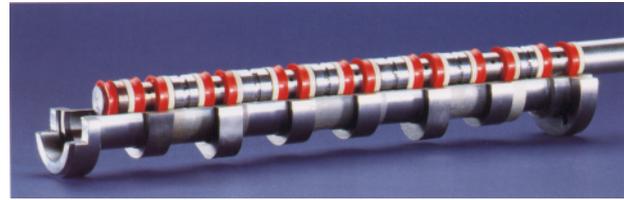
Reproduzierbarkeit der Verbindungen, ist ein Innovationstransfer auch auf andere Gebiete der Technik erfolgt. So wird seit wenigen Jahren dieses Verfahren zur Fertigung von Pressverbindungen verwendet, die vorrangig zur Herstellung gebauter Nockenwellen für Verbrennungsmotoren dienen.

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 Fügspiel deutlich geringer. Dies führt zu einer erheblichen Kosteneinsparung durch Verminderung des Fertigungsaufwandes und ermöglicht eine Verkürzung der Fertigungszeiten durch bessere Montage.

## 2 Prinzip des Innenhochdruckfügens

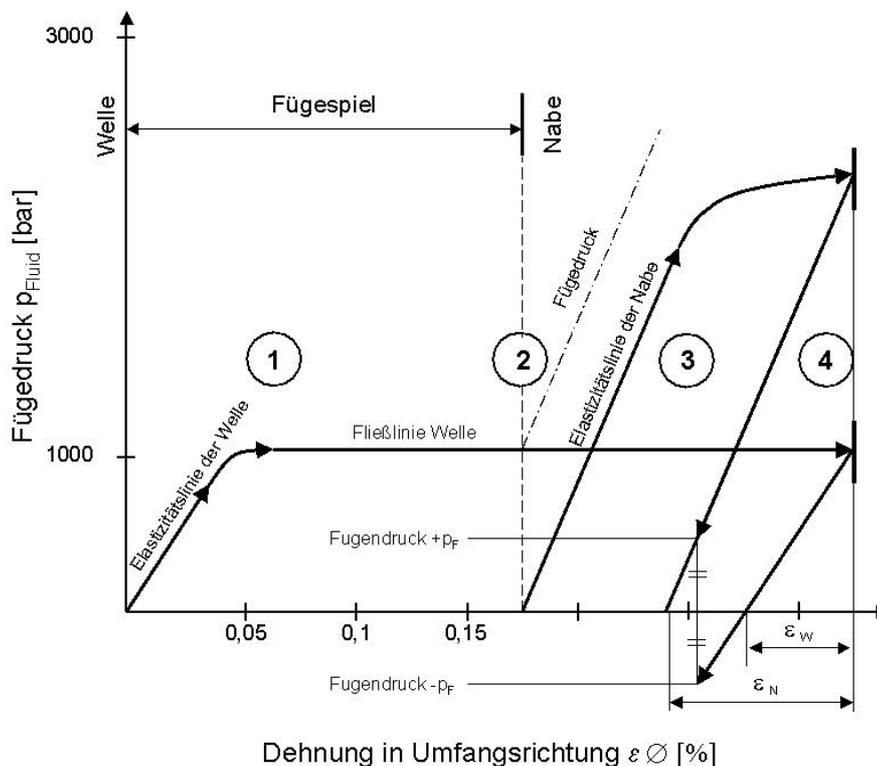
Das Prinzip des Innenhochdruckfügens ist erstaunlich einfach. Die Hohlwelle wird in der Nabe ausgerichtet. Das Aufweitewerkzeug (Sonde, **Bild 3**) wird in die Welle geführt und so positioniert, dass die auf der Sonde befindlichen Dichtungen exakt mit den Nabenrändern abschließen. Dieser im Rohr genau

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.

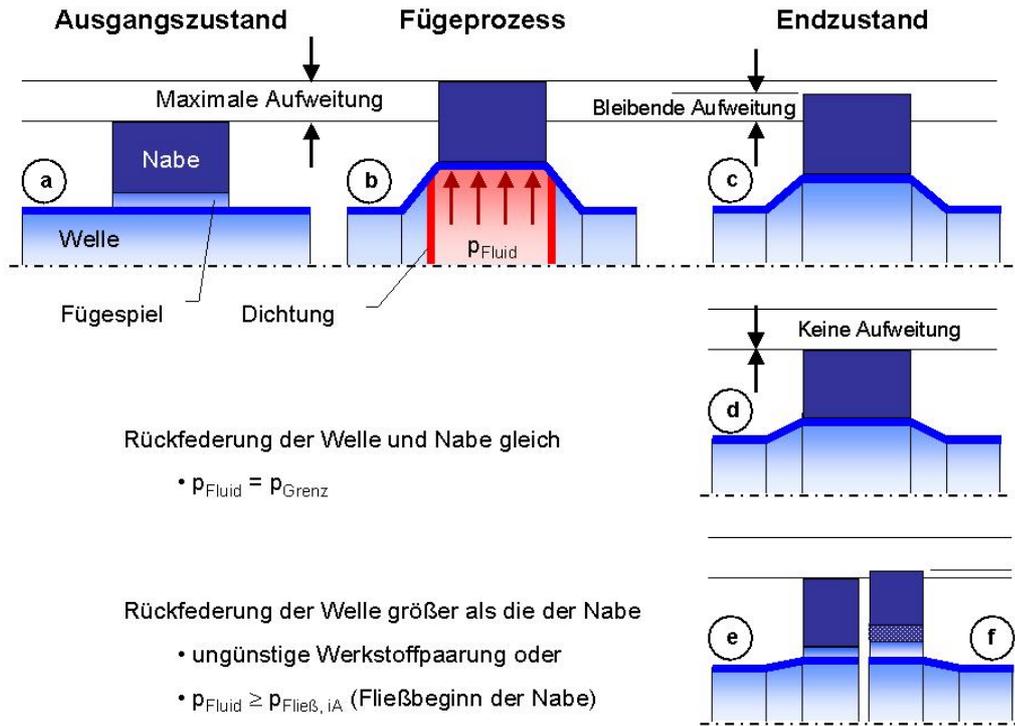


**Bild 3:** Sonde zum Fügen einer Nockenwelle, 1/2/

Bei Drucksteigerung weitet sich die Welle lokal unterhalb der Nabe elastisch und/oder plastisch auf, **Bild 4-1**. Nachdem das Fügspiel 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 Druckrücknahme. Welle und Nabe federn gemeinsam zurück, **Bild 4-4**. Durch die unterschiedlichen Nachgiebigkeiten und aufgrund der Streckgrenzenunterschiede der Füge-



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



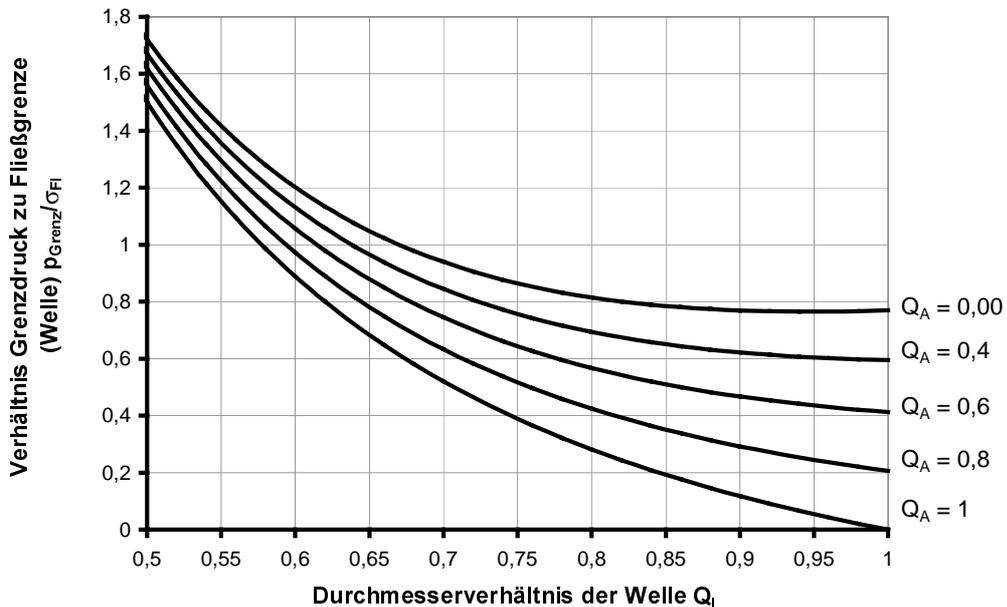
**Bild 5:** Phasen des Fügeprozesses und mögliche Endzustände

partner 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 zurückspringen, so dass 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 6:** Bezogener Grenzfügedruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie

**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.

### 3 Analytische Betrachtungen zum Fügeprozess

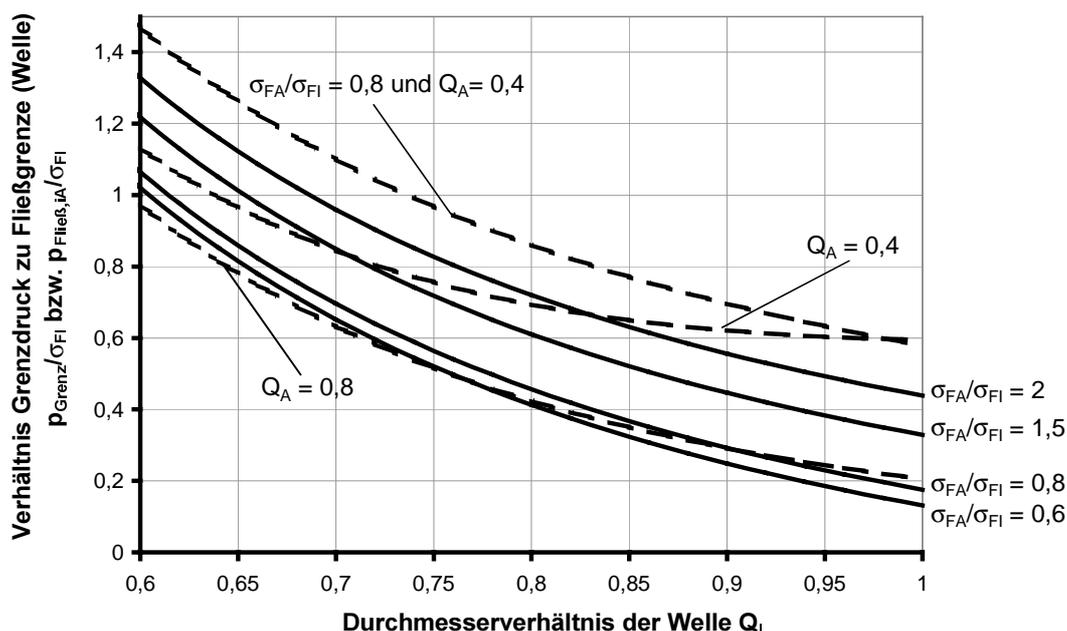
Das hydraulische Verfahren und die in der Regel rotationssymmetrischen Fügepartner bieten gute Voraussetzungen für eine analytische Betrachtung des Spannungs- und Verformungszustandes. Die im folgenden gezeigten Diagramme beruhen auf einer einfachen elastischen Berechnungsmethode, wie sie im Apparatebau 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.

Führt man in diesem Spannungsfeld die Fließbedingung nach von Mises ein, läßt sich über die Verformungsbeziehungen ein „unterer“ Grenzfügedruck ( $p_{\text{Grenz}}$ ) 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 Grenzfügedruckes ein Fugendruck ( $p_F$ ) ein, der zu einem

Presssitz führt. Im Wesentlichen ist dieser Grenzfügedruck von den Durchmesserhältnissen der Welle ( $Q_i = D_{i1}/D_{a1}$ ) und der Nabe ( $Q_A = D_{iA}/D_{aA}$ ) abhängig sowie über das E-Modul-Verhältnis und der Streckgrenze der Welle beeinflussbar.

$$p_{\text{Fluid}} \geq p_{\text{Grenz}} = f\left(Q_A, Q_i, \frac{E_A}{E_i}, \sigma_{\text{Fl}}\right)$$

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 Durchmesserhältnis der Nabe, die mit dem Durchmesserhältnis 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



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

zu geringeren Fugendrücken 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 Außenteilen. Es bildet sich ein höherer Passfugendruck 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. Außerdem ist dieses aus dem Apparatebau entstandene Berechnungsmodell wegen den getroffenen Annahmen für Vorhersagen, bei dem die Innenfaser der Nabe plastifiziert, nicht gültig. Dieser „obere“ Grenzfugedruck  $p_{\text{Fließ},iA}$ , 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 Grenzfugedruck der Presssitz stärker ausgebildet werden. Eine erhebliche Steigerung der Drehmomenten- bzw. Kraftübertragung ist die Folge.

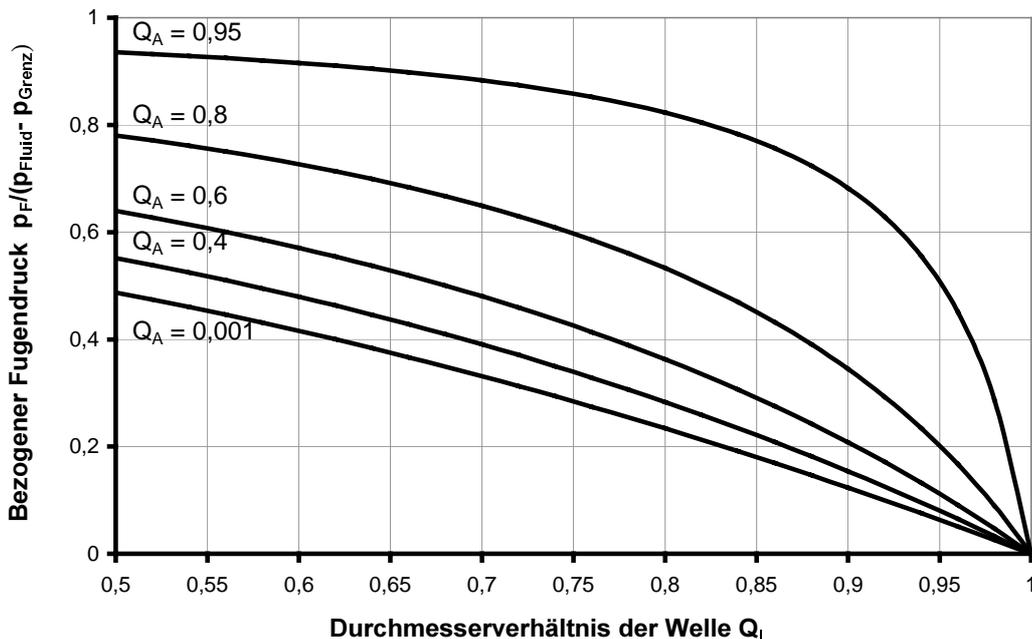
$$p_{\text{Fluid}} \leq p_{\text{Fließ},iA} = f\left(Q_A, Q_I, \frac{\sigma_{FA}}{\sigma_{FI}}\right)$$

**Bild 7** zeigt für das Nabendurchmesser- verhältnis  $Q_A=0,8$  mehrere dazugehörige Streckgrenzen- verhältnisse ( $\sigma_{FA}/\sigma_{FI}=0,6; 0,8; 1,5; 2$ ). Die Kurven zei-

gen, dass sich bei einem Nabendurchmesser- verhältnis  $Q_A=0,8$  und Streckgrenzen- verhältnis  $\sigma_{FA}/\sigma_{FI}=0,6$  ein Presssitz ohne Plastifizieren der Nabe nur dann einstellt, wenn das Wellen- durchmesser- verhältnis kleiner  $Q_I=0,77$  ist. Dagegen erhöhen größere Streckgrenzen- verhältnisse das Potential für einen festeren Presssitz ohne die Plastifi- zierung 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“ Grenzfugedruck, die den aufzubringenden Fugedruck begrenzen, sind damit sowohl von der Geometrie der Welle und Nabe abhängig als auch vom Werkstoffverhalten der Füge- partner, gekennzeichnet durch die Streckgrenzen (Fließgrenzen) und E-Moduli.

Neben der Kenntnis des Arbeitsbereiches - „unterer“ und „oberer“ Grenzfugedruck - ist die Vorher- sage des entstehenden Passfugendruckes bei ge- gebenen Fugedruck oder die Vorhersage des Fü- gedruckes bei gefordertem Passfugendruck von besonderer Bedeutung. **Bild 8** zeigt den bezoge- nen Fugedruck, der mit Hilfe von Dehnungsbezie- hungen ermittelt werden kann, in starker Abhängig- keit der Welle-Nabe-Geometrie. Mit den Bildern 6-8 ist somit eine Berechnung einer innenhochdruck- gefügten Pressverbindung für ein E- Modulverhältnis  $E_A/E_I = 1$  und  $\nu = 0,3$  theoretisch möglich.



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

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.



**Bild 9:** Bezogener Fugendruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie, /2/

Bei diesem elastischen Berechnungsmodell wird der Einfluß des Füge-spiels 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 Fugenpressungsausbildung an den Randzonen der Nabe haben, /3/. Durch die gezielte Positionierung der Dichtungen können diese Einflüsse auf den jeweiligen Anwendungsfall günstig abgestimmt werden und zu einer Drehmomentensteigerung beitragen.

#### 4 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, /2/. **Bild 9** zeigt die Nockenwelle des drei Zylinder Diesels (Smart). Dabei konnte eine Gewichtsreduzierung von etwa 50% durch die verfahrensbedingte Verwendung von Hohlwellen gegenüber konventionellen Pressverbindungen mit Vollwelle realisiert werden.

#### 5 Zusammenfassung

Die Einsatzmöglichkeit innenhochdruckgefügter 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 der Fertigungs- und Montagetiefe 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 (geringen Steifigkeit und hohe Streckgrenze) vorliegt.

#### 6 Literatur

- /1/ Titze, H.; Wilke, H.-P.: Elemente des Apparatebaues. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1992
- /2/ N., N.: Die gebaute Nockenwelle - eine innovative Systemlösung aus dem Daimler-Chrysler Werk Hamburg. Firmenprospekt, Hamburg, 2001
- /3/ Garzke, M.: Auslegung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung. Dissertation, TU Clausthal, 2001 (Veröffentlichung in Vorbereitung)