

## Experimentelle Untersuchungen an innenhochdruckgefühten Pressverbindungen

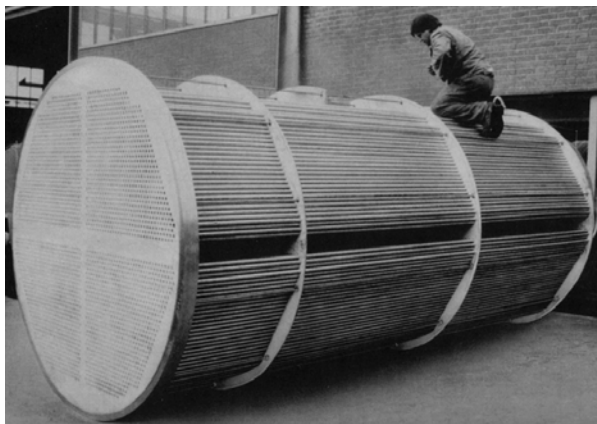
Grünendick. T.

*Der Beitrag zeigt Verfahrensanwendungen aus dem Apparatebau und beschreibt sowohl die Fügetechnik als auch Ergebnisse experimenteller 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 experimental investigation 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 Rohrplatten (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.



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

1929 wurde zum ersten Mal in der Arbeit von Jantscha /2/ das hydraulische Aufweiten diskutiert. Vom Pioniergeist geleitet, brachten Podhorsky und Krips dieses Verfahren 1973 zum Patent. Bis heute ist es eines der wichtigsten Verfahren zum Verbinden von Rohr-Rohrplattenverbindungen im Apparatebau geblieben, /3/.

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 eine Wiederentdeckung auch auf andere Gebiete der Technik erfolgt. Obwohl eine Patentierung bereits 1973 erfolgte, wird erst seit wenigen Jahren dieses Verfahren zur Herstellung gebauter Nockenwellen für Verbrennungsmotoren verwendet. Weitere Anwendungen aus dem Automobilbau sind innenhochdruckgefügte Lenksäulen, Kettenräder und Ausgleichswellen.

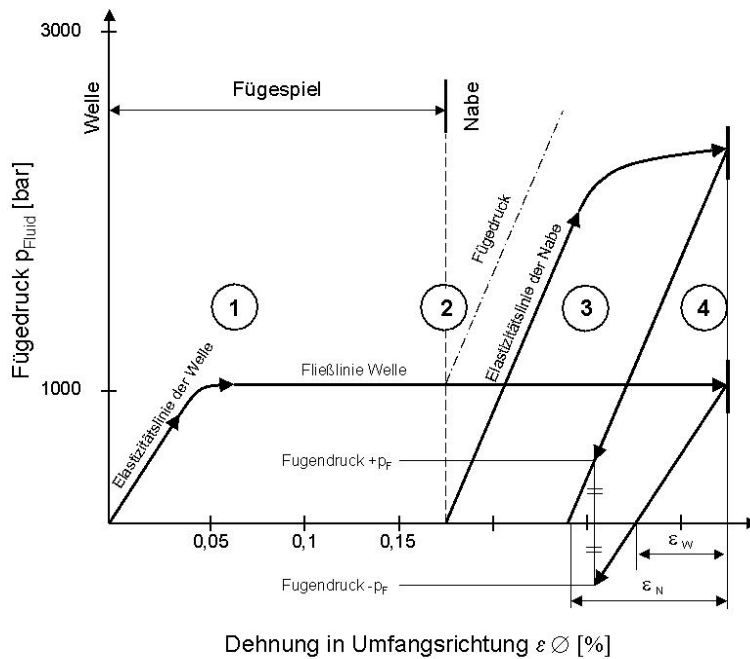
Dieses fertigungstechnisch neu hergestellte Maschinenelement benötigt im Gegensatz zu den herkömmlichen Pressverbindungen, bei denen ein Übermaß der Fügepartner die spielfreie Übertragung hoher statischer und dynamischer Lasten gewährleistet, keine speziell abgestimmten Toleranzen. Damit sind die Geometrieanforderungen 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.



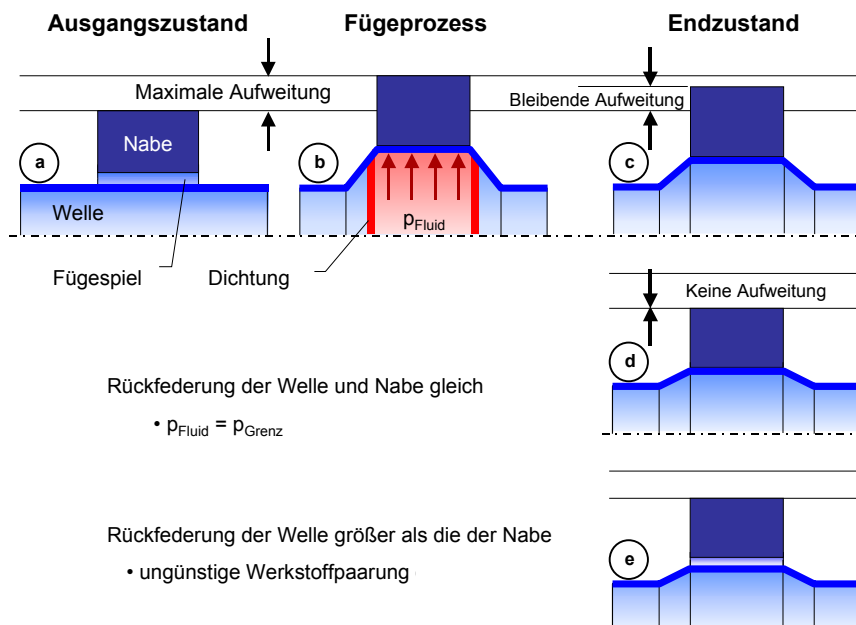
**Bild 2:** Sonde zum Fügen einer Nockenwelle, /4/

### 2 Prinzip des Innenhochdruckfügens

Das Prinzip des Innenhochdruckfügens (IHF) ist der Technologie des Innenhochdruckumformen (IHU) sehr ähnlich. Im Gegensatz zum IHU, bei dem beispielsweise ein Rohr gegen eine Werkzeugwand expandiert wird und einen Körper mit komplizierter Geometrie ergibt, werden beim IHF Welle und Nabe kraftschlüssig miteinander verbunden. Die Hohlwelle wird in der Nabe ausgerichtet. Das Aufweitwerkzeug (Sonde, **Bild 2**) wird in die Welle geführt und so positioniert, dass die auf der Sonde befindlichen Dichtungen mit einem genau definierten Drucküberstand seitlich der Nabenränder



**Bild 3:** Verformungsschaubild der Welle-Nabe-Verbindung während des Innenhochdruckfügens, /3/



**Bild 4:** Phasen des Fügeprozesses und mögliche Endzustände

abschließen. Dieser im Rohr genau abgedichtete Ringspalt unterhalb der Nabe und zwischen den Sondendichtungen wird anschließend durch ein Hydromedium mit Druck beaufschlagt. Dieses Medium gelangt durch eine Sondenbohrung in den Ringspalt.

Bei Drucksteigerung weitet sich die Welle lokal unterhalb der Nabe elastisch und/oder plastisch auf, **Bild 3-1**. Nachdem das Fügespiel überwunden ist, legt sich die Welle an die Nabe an und beide Bauteile expandieren, **Bild 3-2**. Bei weiterer Drucksteigerung und durch gezielte Materialkombination der beiden Fügepartner wird die Welle plastisch, die

Nabe elastisch oder teilplastisch verformt, **Bild 3-3**. 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 3-4**.

Durch die unterschiedlichen Nachgiebigkeiten und aufgrund 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 plastifizierte Welle, sorgt für einen festen Presssitz der Welle-Nabe-Verbindung, **Bild 4-c**. Es ergibt sich ein Eigen-

spannungszustand ähnlich dem eines Pressverbandes oder nach einer Autofrettage, der das Rohr in der Bohrung festhält. Wird eine ungünstige Materialpaarung gewählt, bei der das Rückfederungsverhalten der Nabe kleiner ist als das der Welle, kann sich ein Presssitz nicht ausbilden, Bild 4-e.

Den Grenzzustand bei dem die Rückfederung der Nabe gleich der Rückfederung der Welle ist, wird in Bild 4-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 Experimentelle Untersuchungen zum Abdichtungsverhalten des Fügebereichs

Beim Innenhochdruckfügen begrenzen in axialer Richtung Dichtlippen die Ausbreitung des Hydromediums innerhalb der Welle. Die Verformung der Welle bei gleichem Druck kann durch die Positionen der Dichtung beeinflusst werden. Eine Verschiebung der Lippen tritt auch ohne Beeinflussung von außen auf und ist nicht zu verhindern. Ein genaues Wissen über die Position ist aber eine Grundvoraussetzung für ein realistisches FE-Modell. Je größer der Drucküberstand ist, desto stärker ist die Ausbeulung der Welle. Damit wächst auch der nach dem Fügen entstandene Kontaktdruck und somit die mechanische Belastbarkeit. Bei einem sehr großen Drucküberstand, kann es passieren, dass die Welle eine Wulst neben dem Nabenrand bildet.

Damit das FE-Modell, welches unter anderem den Fügevorgang nachvollziehen soll, zu realitätsnahen Ergebnissen kommt, müssen die Drucküberstände bekannt sein. Hierzu werden die im Versuch verwendeten Welle-Nabe-Verbindungen vorher mit einer Koordinatenmessmaschine ausgemessen. Da hierbei die Objekte nicht zerstört werden sollten, wird der Verlauf des Welleninnenradius im Fügebereich ermittelt. Mit diesen Daten und einem zweidimensionalen FE-Modell werden die wahrscheinlichen Drucküberstände ermittelt. Auf diese Weise soll verhindert werden, dass eine schlecht sitzende Dichtung eine Messung verfälscht und bei der anschließenden FE-Berechnung keine übereinstimmenden Ergebnisse erzielt werden können. Die Ergebnisse zum Verhalten des Dichtungssystems und der Aufweitung werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

### 3.1 3D-Koordinatenmessanlage

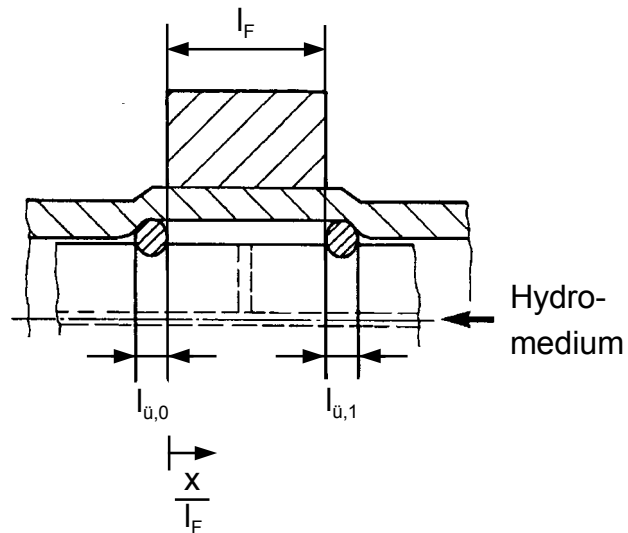
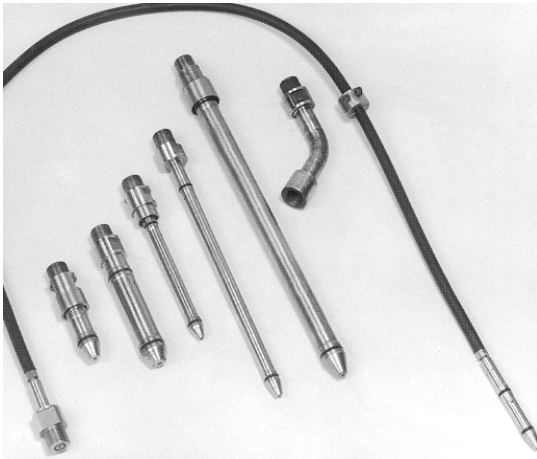
Das Institut für Maschinenwesen verfügt über ein 3D-Koordinatenmessgerät der Fa. Zeiss, Oberkochen. Diese Anlage erlaubt nach einer rechnerischen Ausrichtung des Werkstücks die Messung einfacher und komplexer geometrischer Körper im Dialog- und CNC-Betrieb. Sie ist ein komplett ausgestattetes Messzentrum mit integriertem Rundtisch zur Messung von rotationssymmetrischen Teilen und messendem Tastkopf für Scanning-Betrieb, **Bild 5**. Der Messfehler der UMM 550 ist kleiner als 1 ‰. Gemessen wird in einem klimatisierten Raum bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 45 %.



**Bild 5:** Messung der IHF-Prüflinge mit der 3-D-Koordinatenmessanlage UMM 550 der Fa. Zeiss

Vor Messung der Welle und Nabe wird festgelegt, in welchem Punkt der Werkstücke das Koordinatensystem und deren Ursprung liegen soll. Mit diesem sog. Werkstückkoordinatensystem (WKS) ist die rechnerische Ausrichtung des Werkstücks und das unmittelbare Ablesen der Tasterkugelmittelpunkte möglich. Die Längsachse der IHF-PV wird in z – Richtung der Koordinatenmessmaschine gelegt. Anhand der oberen planen Nabenflanschfläche wird das Bauteil Rechtwinklig in x, y – Richtung ausgerichtet, so dass ein exaktes Anfahren der zu scannenden Messpunkte ermöglicht wird.

Die Aufnahme der Wellen- und Nabendurchmesser erfolgt berührend ohne Drehtischbetrieb. Der messende Tastkopf der 3-D-Koordinatenmessmaschine



**Bild 6:** Verwendete Aufweitesonden im Apparatebau und Prinzipskizze der Ringspaltabdichtung, /5/, /6/

führt die Scanning-Linien im positiven Umlaufsinn nacheinander ab und speichert die Koordinaten mit entsprechendem Antastvektor. Die Schrittweite der Antastungen beträgt 0,2 mm. Neben den Innen- und Außendurchmessern wird die radiale Verformung der Innenkontur der Welle in Längsrichtung aufgenommen und die Rechtwinkligkeit der Welle-Nabe-Verbindung bestimmt.

### 3.2 Simulation der Abdichtung des Fügebereiches

Im Apparatebau werden zum Fügen von Rohr-Rohrplatten-Verbindungen O-Ringdichtungen verwendet. Bei einem größeren zu überbrückenden Fügespalt werden zusätzlich Stahlfederringe zur Unterstützung des O-Ringes in die Sonde eingebaut. Zum Fügen beispielsweise von Nockenwellen verwendet die Automobilindustrie spezielle Kunststoffdichtringe. **Bild 6** zeigt verschiedene Aufweitesonden zur Ringspaltabdichtung.

Hölzl hat in seinen Arbeiten den Einfluss der Dichtungen während des Fügeprozesses untersucht. Dabei konnte er die vermuteten Lastspitzen nachweisen, die durch das Hineindrücken der Dichtung zwischen Aufweitesonde und Rohr infolge des Innendrucks entstehen. Die daraus resultierende Spannungsüberhöhung im Bereich des Dichtungskontaktes lässt sich durch eine Hyperbelfunktion in Abhängigkeit des Fügedrucks gut beschreiben. Für hohe Fügedrücke nähert sich die Funktion allerdings asymptotisch an eins an, so dass für mehrere hundert bar Fügedruck eine Vernachlässigung dieser überhöhten Kontaktspannungen zulässig ist, /7/. Der axiale Druckanlagebereich vergrößert sich entsprechend um die von der Dichtung eingenommene Fläche.

Die von Hölzl theoretisch mittels der FEM ermittelten Ergebnisse liefern wertvolle Erkenntnisse über die Auswirkung der Dichtung und damit hilfreiche Grundlagen für die Simulation des Fügeprozesses. Um diese numerischen Ergebnisse mit den in der Praxis durchgeführten Fügeprozesse zu verifizieren, wird mit der 3-D-Koordinatenmessanlage die Verformung des Aufweitebereichs der Welle nach dem Fügevorgang aufgenommen. Im Gegensatz zu Hölzl wird nun nicht die Dichtung unter bestimmten Annahmen simuliert, sondern durch systematische Änderung des Drucküberstands (Aufweitebereich) im FEM-Modell die aus der Simulation ermittelte Verformung variiert bis sie mit der gemessenen Verformung übereinstimmt. Das Ergebnis ist ein wirksamer Aufweitebereich, der das Verhalten der Dichtung während des Fügeprozesses berücksichtigt. Die genaue Abbildung der Drucküberstandslänge ermöglicht eine effektive numerische Simulation. Die Abweichungen infolge fehlerhafter Sondenpositionierung werden ebenfalls im Mittel ersichtlich.

Zur vergleichenden Untersuchung des Abdichtverhaltens wird das rotationssymmetrische FEM-Modell mit Flansch verwendet. Die geometrischen Abmessungen sind identisch mit den experimentellen Versuchsproben. Die Eckdaten des FEM-Modells und der Versuchsproben sind **Tab. 1** zu entnehmen.

Es zeigt sich, dass der im Versuch und in der FEM-Simulation verwendete Fügedruck und die im Zugversuch ermittelten Werkstoffeigenschaften eine gute Übereinstimmung in Bezug auf das Verformungsverhalten haben. Damit ist die Variation des

wirksamen Aufweitebereichs als Parameter ausreichend.

Probe	Q <sub>A</sub>	p <sub>Fluid</sub> [bar]	Drucküberstand		
			Versuch	aus FEM	
			l <sub>ü,0</sub> /l <sub>ü,1</sub> [mm]	l <sub>ü,0</sub> [mm]	l <sub>ü,1</sub> [mm]
1	0,64	2813	1,5/1,5	2,8	3,2
2	0,64	2813	1,5/1,5	2,5	2,5
3	0,73	2819	1,5/1,5	2,7	3,0
4	0,73	2816	1,5/1,5	2,0	3,2
5	0,56	2819	1,5/1,5	1,7	3,3
6	0,56	2819	1,5/1,5	2,5	2,0

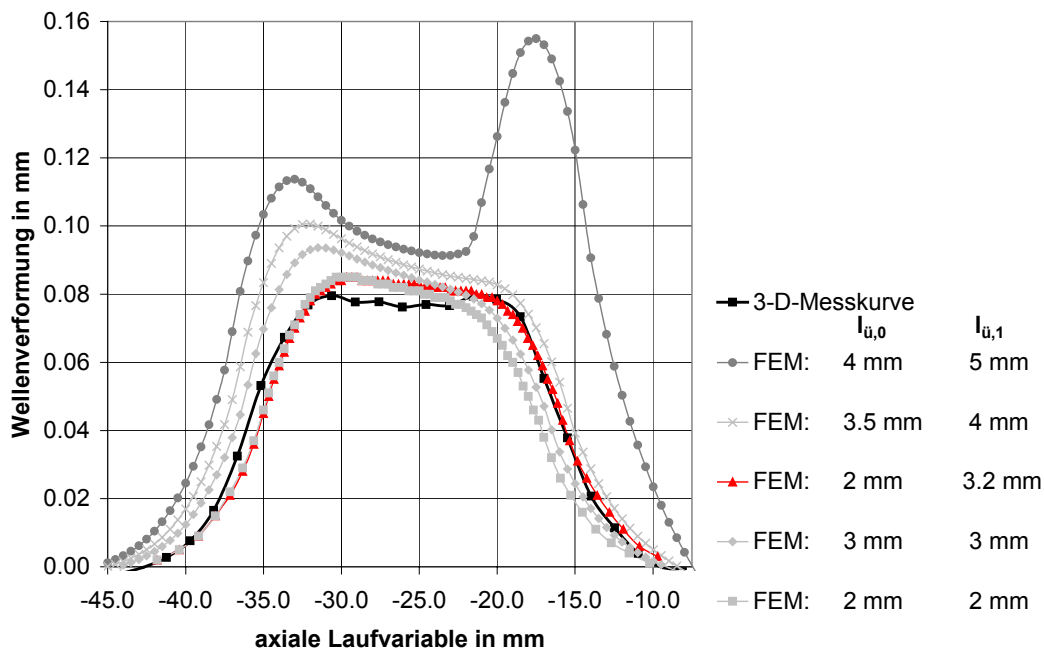
**Tab.1:** Eckdaten der Geometrie der untersuchten Proben, Q<sub>i</sub> = 0,75

**Bild 7** zeigt exemplarisch für alle untersuchten Proben die Auswirkung der Variation der Drucküberstandslänge auf die Radialaufweitung der Welle. Der Vergleich der Verformungsmessung mit den numerischen Ergebnissen belegt, dass der wirksame Anlagebereich des Fluiddrucks über den eingestellten Abstand der Dichtung zur Nabenkante hinausgeht. Die Dichtung wandert radial nach außen und presst sich an die Welleninnenseite. Die Umfangsspannungen behindern zwar die radiale Ausdehnung, die axiale Verschiebung kann jedoch ungehindert bis zur Begrenzung (Stahlring oder Kunststoffverstärkung) erfolgen. Durch Füllen mit dem Hydromedium und der Druckbeaufschlagung presst sich die Dichtung in den Spalt zwischen der axiale Begrenzung (Stahlring/Kunststoff) - die ebenfalls ein gewisses Maß nachgibt - und der Welle. Damit wird der axiale Druckanlagebereich vergrößert, d.h. die belastete Rohrinnefläche erwei-

tert sich, um die von der verformten Dichtung eingenommene Fläche. Diese einnehmende Fläche der Dichtung muss in der Simulation entsprechend berücksichtigt werden. Aus Bild 7 ist weiterhin ersichtlich, dass eine unsymmetrische Verteilung der Drucküberstandslänge eine axial unsymmetrische Steifigkeit, verursacht durch eine Flanschanbindung, ausgleicht. Damit lässt sich eine gleichförmige radiale Wellenaufweitung genauso wie eine gleichförmige Passfugendruckverteilung durch gezieltes Einstellen der jeweiligen Drucküberstandslänge erzielen.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Proben mit einem um  $\Delta(l_{ü,0} + l_{ü,1}) = +1$  bis  $+3$  mm größeren wirksamen Aufweitebereich gefügt wurden. Der Stellfehler der Sonde lag hier bei  $\Delta l_{ü,i} = \pm 0,5$  mm. Die ermittelten Lösemomente T<sub>i</sub> und die Versuche zur Ermittlung des Klaffmoments bestätigen ebenfalls diesen stark erweiterten Aufweitebereich.

Das Verhalten der Werkstoffe, der Deformationen und der Fließvorgänge aufgrund des Fügevorgangs sowie Steifigkeitsunterschiede durch den Flansch werden indirekt mit berücksichtigt. Diese Faktoren haben sicherlich einen Einfluss, dennoch zeigt der Wechsel der Dichtung bei gleichbleibenden Rohrwerkstoff (gleiches Los) einen markanten Unterschied im Verformungsverhalten der IHF-PV. Grundlegend kann also als Ergebnis festgehalten werden, dass die Fläche, die die Dichtung berührt sowie die Positionierungsgenauigkeit durch Wandern oder Stellfehler berücksichtigt werden müssen. Werden andere Dichtungen verwendet, ist ihr Verhalten genau zu prüfen.



**Bild 7:** Radiale Verformung der Innenkontur der Welle bei unterschiedlichen Drucküberstandslängen

### 3.3 Schiefstellung

Ein weiterer Aspekt ist die mögliche Schiefstellung der Welle in der Nabenbohrung, der im Zusammenhang mit der Plastifizierung der Welle zu vermuten ist. Messungen mit der 3D-Koordinatenmessmaschine haben gezeigt, dass die Rechtwinkligkeit zwischen der Wellenachse und dem Nabenflanschblatt kleinen Abweichungen unterliegt. Ein direkter Zusammenhang mit der Plastifizierung der Welle konnte nicht nachgewiesen werden. Eine Abhängigkeit zur Nabenbreite wurde dagegen festgestellt, d.h. je kürzer die Nabenbreite, desto höher ist die Abweichung, vgl. hierzu **Tab. 2**. Hier spielt sicherlich die exakte Ausrichtung der Probe in der Fügeanlage und der Fügespalt (hier:  $s_F = 0,5 \text{ mm}$ ) eine entscheidende Rolle. In der Tabelle sind die Abweichungen in Grad der Rechtwinkligkeit der Wellenachse zum Flanschblatt dargestellt.

IHF-PV	$l_F/D_F$	Rechtwinkligkeit der Nabenbohrung in °	Rechtwinkligkeit der „IHF-PV in °
1	0,55	0,02...0,05	< 0,35
2	0,79	0,02...0,05	< 0,18
3	1,18	0,02...0,05	< 0,10

**Tab. 2:** Rechtwinkligkeit von IHF-Pressverbindungen nach dem Fügen

Im Wesentlichen haben die experimentellen Untersuchungen ergeben, dass die Güte der Rechtwinkligkeit durch breite Naben und eine Spielpassung günstig beeinflusst werden können. Die Stellung der Dichtung sollte experimentell ermittelt werden, um für die Simulation entsprechend exakte Randbedingungen zu definieren.

## 4 Statische Drehmomentbelastung

Zur Beurteilung der Übertragungsfähigkeit von torsionsbelasteten IHF-Pressverbindungen werden statische Drehmomentversuche durchgeführt. Diese Versuche dienen dazu, das schlupflose Grenzdrehmoment  $T_{sl}$ , das statische Lösemoment  $T_{l1}$  und das Rutschmoment  $T_{r1}$  experimentell zu bestimmen. Mit diesen Versuchswerten können dann unter anderem Aussagen über die Tragfähigkeit der Verbindung getroffen werden. Die Ermittlung dieser Kennwerte erfolgt durch eine kontinuierliche Steigerung des Drehmoments bis zum Durchrutschen der Welle in der Nabe und dem gleichzeitigen Aufzeichnen der einander zugeordneten Verläufe von Drehmoment und Verdrehwinkel. Das statische Lösemoment ist hierbei nicht nur ein Versagenskrite-

rium für die Übertragbarkeit der IHF-Pressverbindung, sondern ist ebenso für die Ermittlung der Tragfähigkeitssteigerung bei dynamischer Belastung eine wichtige Bezugsgröße. Treten in der Pressfuge keinerlei Relativbewegungen auf, so wird das Drehmoment schlupflos übertragen. Dieses schlupflose Grenzdrehmoment kann als Versagenskriterium für die dynamische Drehmomentbelastung aufgefasst werden. Liegt das dynamische Torsionsmoment unter dem Grenzdrehmoment, so ist keine Reibkorrosion zu erwarten und eine Dauerfestigkeit gegeben. Die Dauerfestigkeit ist ebenfalls gewährleistet, wenn ein gewisser Schlupf zugelassen wird, der tribologisch zu keiner Schädigung der Fügepartner führt. Damit kann mit einem tribologisch noch zulässigen Grenzdrehmoment gerade noch die Reibkorrosion verhindert werden.

### 4.1 Statische Durchrutschversuche

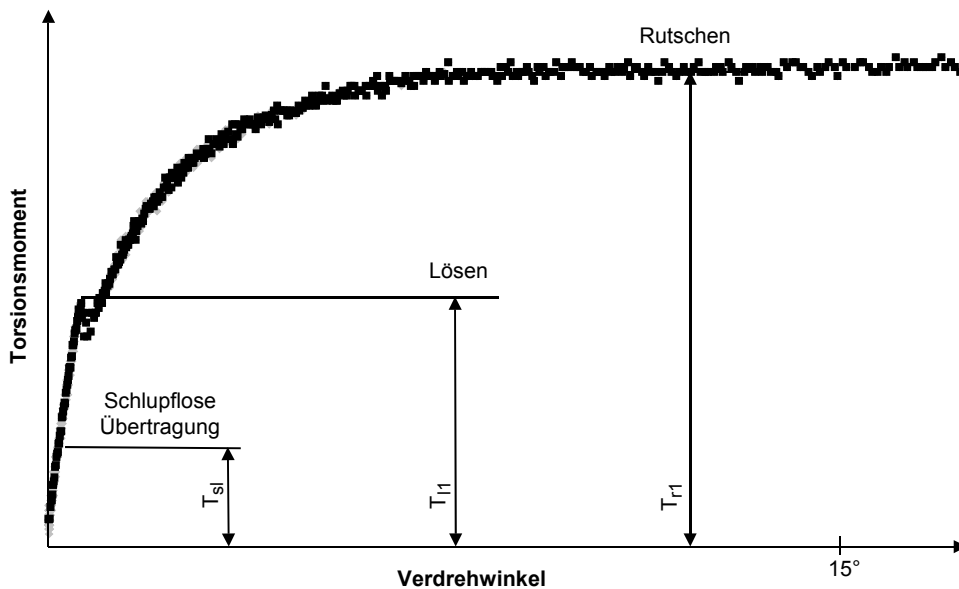
Im Gegensatz zu den Stahl/Stahl IHF-Pressverbindungen steigt das Drehmoment der Stahl/Al IHF-Pressverbindungen nach dem Lösen der Verbindung sehr stark an, **Bild 8**. Die Tragfähigkeit wächst bis zu einem Verdrehwinkel von ca.  $15^\circ$  stetig an und verbleibt auf diesem Niveau. Dieser Effekt konnte aus prüfstandstechnischen Gründen nur bis zu einem Verdrehwinkel von  $30^\circ$  beobachtet werden. Das langsame kontinuierliche Durchrutschen der Verbindung führt jedoch dazu, dass die harten Rauheitshügel der Welle in die „weiche“ Al-Nabe eindringen und unterstützt von adhäsiven Bindekräften zum erheblichen Reibungswiderstand sowie zur Erhöhung des Reibkoeffizienten beitragen. Wird die Steigerung des Rutschmoments im Bezug auf das Lösemoment im Verhältnis der Reibbeiwerte angegeben, so folgt für Stahl/Al IHF-PV:

$$\frac{\mu_{ru}}{\mu_{lu}} \approx 1,4 \dots 2$$

Ein ähnliches Verhalten der Reibwertsteigerung ist bei der V2A/Stahl IHF-PV festzustellen.

### 4.2 Reibbeiwerte

Unter Berücksichtigung des axialen Verformungsverhaltens der Dichtungen während des Aufweitprozesses wurden die in **Tab. 3** dargestellten Reibbeiwerte ermittelt. Eingangparameter sind das experimentell ermittelte statische Lösemoment  $T_{l1}$  und der aus der FEM-Analyse bestimmte Passfu-



**Bild 8:** Drehmoment-Verdrehwinkel-Verlauf einer trocken gefügten Stahl/Al IHF-PV mit deutlicher Verfestigung

gendruckt. Das FEM-Modell entspricht geometrisch und werkstofftechnisch den Prüflingen. Das Verformungsverhalten der Dichtung wird bei den Untersuchungen mit berücksichtigt.

Die Drehmomentübertragbarkeit der Pressverbindungen mit starken Drehriefen (Tiefe bis 500 µm) in der Nabenbohrung ist im Vergleich zu den ohne wesentlichen Riefen deutlich geringer. Die Riefen führen während des Fügeprozesses zu starken plastischen Deformationen. Die Spitzen bohren sich in den Fügepartner ein. Mit zunehmender Aufweitung wird der Riefenspalt infolge der Querkontraktion schmaler. Nach Entlastung öffnet sich der Spalt geringfügig und sorgt dadurch für eine Verminderung des Traganteils. Die übertragbaren Schubspannungen sinken etwas und führen zu einer niedrigeren Drehmomentübertragung. Dies wird dann im geringeren Haftreibbeiwert deutlich. Außerdem haben Nabenbohrungen mit starken Drehriefen größere Abweichungen in der Kreisform und der Parallelität. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, gedrehte Pressflächen mit starken Drehriefen zu vermeiden und zur Erhöhung der Trag-

anteile am Besten eine geschliffene Pressfläche anzustreben. Werden starke Drehriefen bei der spanabhebenden Bearbeitung der Nabenbohrung vermieden, so ist kein direkter Zusammenhang der Übertragungsfähigkeit und der Oberflächenrauigkeit der Fügepartner zu erkennen. Andere Einflüsse, wie der kraftgesteuerte Aufweiteprozess, verzerren diesen Zusammenhang, wobei eine leichte Tendenz zwischen der Übertragungsfähigkeit und der Rauigkeit vorliegt. Dieses tolerante Verhalten der Oberflächencharakteristik der IHF-PV wurde von Garzke und Hölzl ebenfalls festgestellt, /6/, /7/.

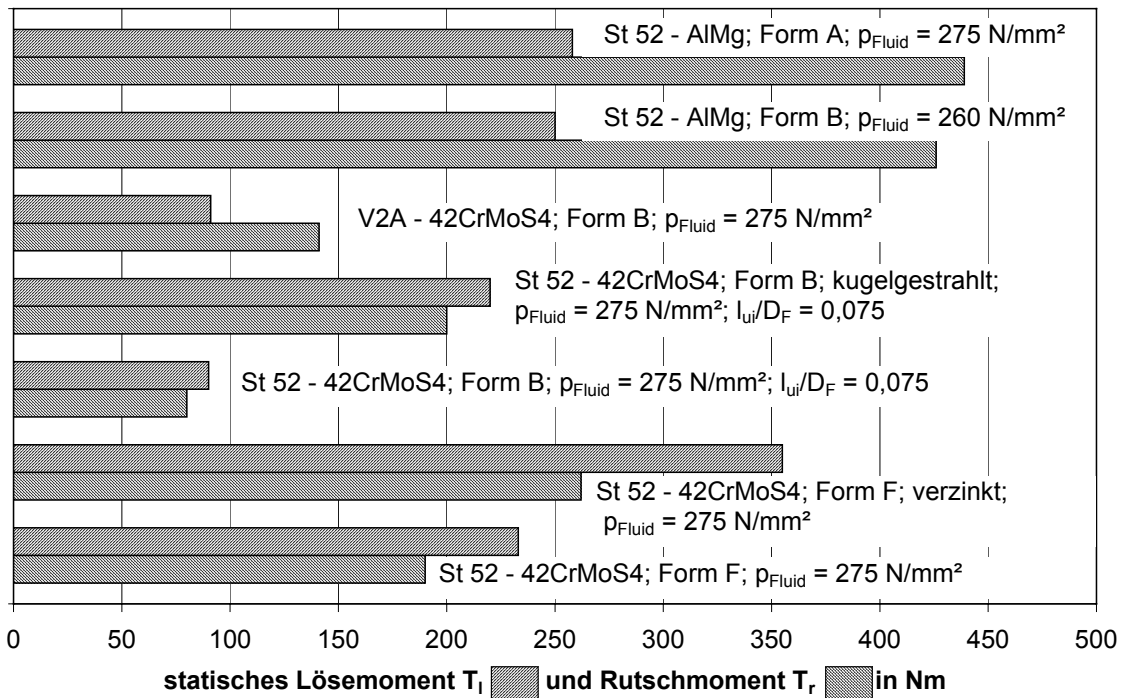
Eine beeindruckende Übertragungsfähigkeit stellte Garzke an IHF-PV mit kugelgestrahlten Nabenbohrungen fest. Diese Steigerung begründet er mit einem gekoppelten Mechanismus von Form- und Kraftschluss, wobei der Einfluss der muldenförmigen Topografie mit höheren Passfugendrücken stärker zur Geltung kommt.

IHF-Pressverbindungen mit galvanisch verzinkten Wellen verfügen über eine höhere Übertragungsfähigkeit als Verbindungen ohne Zwischenschicht. Infolge der statischen Verdrehung kommt es zur

Relativbewegung, die eine Oberflächenaktivierung der Pressflächen bewirkt. In der Pressfuge bilden sich lokale stoffschlüssige Verbindungen aus. Dadurch wird der übliche kraftschlüssige Übertragungsmechanismus durch lokale Kaltpresslötungen, Kaltpressschweißungen oder adhäsive Bindekräfte unterstützt, /8/.

IHF-PV Welle/Nabe	Passfläche	$\mu_{lu}$	$\mu_{ru}$
St-52/42CrMoS4	gedreht	0,19 ... 0,25	0,15 ... 0,20
St-52/42CrMoS4	starke Drehriefen	0,15 ... 0,18	0,12 ... 0,14
St-52/42CrMoS4	verzinkt	0,28 ... 0,31	0,21 ... 0,23
St-52/42CrMoS4	kugelgestrahlt	0,45 ... 0,53	0,43 ... 0,48
St-52/AlZnMgCu	gedreht	0,19 ... 0,22	0,32 ... 0,38
V2A/42CrMoS4	gedreht	0,18 ... 0,20	0,31 ... 0,40

**Tab. 3:** Haftreibbeiwerte der IHF-PV



**Bild 9:** Ausgewählte Versuchsergebnisse statischer Durchrutschversuche mit verschiedenen Pressflächenzuständen. ( $l_{\text{üf}}/D_F = 0,15$ )

Zusammenfassend ist in **Bild 9** eine Auswahl von Versuchsergebnissen mit unterschiedlichen Pressflächeneigenschaften dargestellt. Die Stahl/Al IHF-Pressverbindungen zeigen, dass entsprechend den theoretischen Folgerungen durch kleinere Nabendurchmesser-Verhältnisse eine Verringerung des Fluiddrucks bei einem annähernd gleichem Passfugendruck möglich ist. Eine Reduzierung des Passfugendrucks erhöht die Standzeit der Dichtung und damit die Wirtschaftlichkeit.

## 5 Zusammenfassung

Die Herstellung und Nutzung kraftschlüssiger Welle-Nabe-Verbindungen mittels dem „Innenhochdruckfügen“ hat bedingt durch seine geringere Abmaßempfindlichkeit gegenüber den klassischen Fügetechniken (z.B. thermisches Querfügen oder Längspressen) entscheidende Vorteile. Für einen technologisch-wirtschaftlichen Einsatz bietet die IHF-PV großes Entwicklungspotential, insbesondere wenn unterschiedliche Werkstoffe zur Anwendung kommen oder die Passflächen durch Kugelstrahlen sowie Beschichtungen modifiziert werden.

## 6 Literatur

/1/ Titze, H.; Wilke, H.-P.: Elemente des Apparatebaues. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1992

/2/ Jantscha, R.: Über das Einwalzen und Einpressen von Kessel- und Überhitzerrohren bei Verwendung verschiedener Werkstoffe. Dissertation, TH Darmstadt, 1929

/3/ Podhorsky, M.; Krips, H.: Hydraulisches Aufweiten – ein neues Verfahren zur Befestigung von Rohren. VGB Kraftwerkstechnik, 56, 1976, H. 7, S. 456-464

/4/ N., N.: Die gebaute Nockenwelle - eine innovative Systemlösung aus dem DaimlerChrysler Werk Hamburg. Firmenprospekt, 2001

/5/ Podhorsky, M.; Krips, H.: New Design Possibilities for Heat Transfer Equipment using Hydraulic Expansion. VGB Kraftwerkstechnik, 1984, S. 435-441

/6/ Garzke, M.: Auslegung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung. VDI 1 Nr. 350, Düsseldorf, 2001

/7/ Hölzl, R.: Beanspruchungssimulation an hydraulisch gefügten Rohr-Rohrplattenverbindungen. VDI 20 Nr. 277, Düsseldorf, 1998

/8/ Gropp, H.: Das Übertragungsverhalten dynamisch belasteter Pressverbindungen und die Entwicklung einer neuen Generation von Pressverbindungen. Habilitationsschrift Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 1997