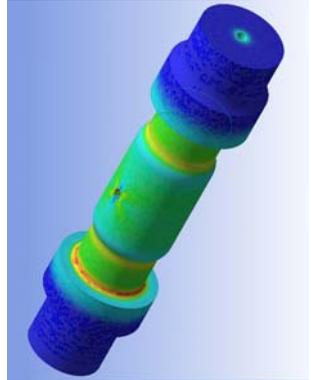


## Werkzeuge zum Innenhochdruckfügen

Hilgermann, J. L.; Lohrengel, A.

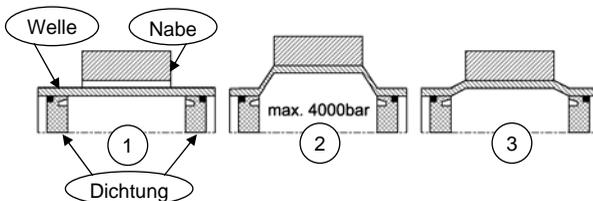
Zwischen Welle und Nabe wird durch hydraulisches Aufweiten der Hohlwelle unter hohem Innendruck und plastischer Verformung der Welle eine kraftschlüssige Verbindung zwischen beiden Bauteilen erzeugt. Werkzeuge nehmen die erforderlichen Dichtungen auf, dienen der Positionierung und der Lastübertragung zwischen den Dichtungen in axialer Richtung. Dieser Artikel stellt die unterschiedlichen Anforderungen an die Werkzeuge dar und beschreibt deren Werkzeugkonzepte. Des Weiteren wird am Beispiel einer Werkzeuggeometrie eine Beanspruchungsermittlung diskutiert.



Non-positive connections between hollow-shafts and hubs are established by hydraulic widening and plastic-deformation of the hollow-shaft by internal high pressure. Tols are used to locate and to position sealings as well as for load transfer in axial-direction. This Article presents the differing requirements to the tools and describes their design-concepts. Load-evaluation is discussed using the example of a tool-design.

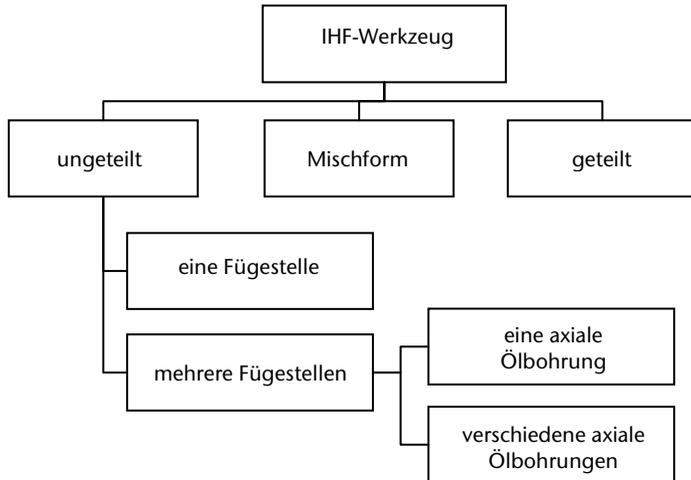
### 1 Werkzeuge aus der industriellen Anwendung

Innenhochdruckfügen erfolgt durch plastische Aufweitung einer Hohlwelle unter Innendruck wodurch sich nach Druckrücknahme zwischen Welle und Nabe eine bleibende kraftschlüssige Verbindung ausgebildet.



**Bild 1:** Prinzipskizze des Innenhochdruckfügens einer Welle-Nabe-Verbindung

**Bild 1** stellt den Fügeprozess qualitativ dar. Das Werkzeug zum Innenhochdruckfügen nimmt die Dichtungen auf und dient der Lastübertragung der durch den Innendruck wirkenden Axialkräfte. Werkzeuge zum Innenhochdruckfügen können grundsätzlich in fünf Klassen unterteilt werden. Sie unterscheiden sich in der Anzahl der möglichen Fügstellen und der Anzahl an axialen von einander unabhängigen Ölbohrungen. **Bild 2** stellt ein Schema zur Einteilung der Werkzeuge zum Innenhochdruckfügen dar.

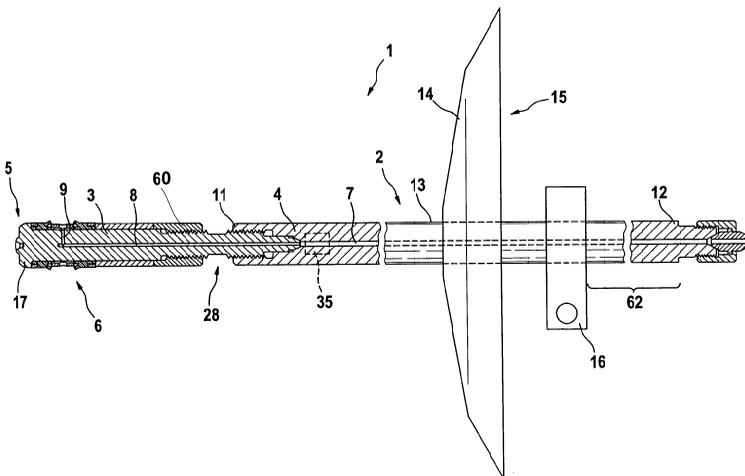


**Bild 2:** Schema zur Einteilung von Fügewerkzeugen zum Innenhochdruckfügen

Die Unterscheidung geteilte und ungeteilte Werkzeuge bezieht sich auf die Anordnung der Dichtungen einer Fügestelle. Befinden sich beide Dichtungen zum Fügen einer Fügestelle auf einem und demselben Grundkörper, so handelt es sich um eine ungeteilte Anordnung. Existiert nur eine Fügestelle und befinden sich die Dichtungen auf baulich getrennten Grundkörpern, zwischen denen keine Zugkräfte übertragen werden, so handelt es sich um eine geteilte Anordnung. Mischformen ergeben sich aus der Dichtungsanordnung mindestens einer Fügestelle in ungeteilter Form und gleichzeitig mindestens einer Fügestelle in geteilter Ausführung, ebenso wie die baulich getrennte Anordnung der Dichtungen auf verschiedenen Grundkörpern welche ein Teil der axial wirkenden Reaktionskräfte untereinander beim Fügevorgang übertragen.

Ungeteilte Fügwerkzeuge mit mehreren Fügstellen unterscheiden sich in Abhängigkeit ihrer Anzahl an axialen Ölbohrungen. Hierdurch ergibt sich eine verschiedenartige Druckbeaufschlagung in Bezug auf die zu fügenden Elemente. Fügwerkzeuge mit mehreren axialen Ölbohrungen ermöglichen die gleichzeitige Druckbeaufschlagung in unterschiedlichen Druckstufen auf die zu fügenden Elemente und zwischen den zu fügenden Elementen. Ebenso kann der Bereich zwischen zwei Fügstellen über eine Öldruck-Entlastungsbohrung druckfrei gehalten werden. Dies ist dann von Interesse, wenn durch große Leckverluste an den verwendeten Dichtungen ein nicht zu kontrollierender Druckaufbau zwischen den Fügstellen entsteht und damit die Hohlwelle ungewollt aufgeweitet wird. Solche Öldruck-Entlastungsbohrungen kommen auch aus sicherheitstechnischen Gründen zum Einsatz, da durch unkontrollierten Austritt bzw. durch das Versagen einzelner Dichtungen nicht immer Prozesssicherheit gewährleistet werden kann. Beim Fügen besonders dünner Hohlwellen mit Naben kann es bei Leckverlusten unter Umständen zum Platzen der Rohre kommen. Entlastungsbohrungen verhindern ein solches mögliches Versagen.

**Bild 4** stellt ein ungeteiltes Werkzeug dar. Es wird für die Herstellung der gebauten Nockenwelle eingesetzt. Das Werkzeug ermöglicht das gleichzeitige Fügen von 7 Elementen. Die Zwischenräume unterhalb der Nocken weisen eine Öldruck-Entlastungsbohrung auf. Ebenso kann aber auch in den Zwischenräumen ein Gegendruck aufgebaut werden, der geringer als der Fügedruck ausfällt. Hierdurch wird die Last auf die Dichtungen gesenkt und die Standzeit erhöht.



**Bild 3:** Fügwerkzeug mit einer Fügstelle /2/

## 1.1 Werkzeug für eine Fügestelle

**Bild 3** stellt ein ungeteiltes Werkzeug mit einer Fügestelle (6) dar. Das Werkzeug nimmt zwei Dichtungen auf welche axial über den Formschluss mit dem Dichtungsträger (17) und der Mutter (60) axial fixiert sind. In der Mitte des Werkzeuges befindet sich eine Bohrung (8,9), durch die der erforderlichen Ölvolumenstrom in den Hohlraum zwischen die Dichtungen unterhalb der Fügestelle zum Druckaufbau gefördert wird. Im Betrieb verschleißt der Dichtungsträger im Bereich der Dichtungsaufnahme und muss ausgetauscht werden. Je höher der Fügedruck, desto kürzer beträgt dessen Lebensdauer. Aus diesem Grund wurde in /2/ die Ablösung des Dichtungsträgers vom Rest des Werkzeuges patentiert. Dies führt zu geringeren Herstellkosten infolge der kürzeren Ölbohrung (8) und kürzeren Rüstzeiten. Des Weiteren können unterschiedliche Materialien in einem Werkzeug zum Einsatz kommen, welche die Funktionalität erhöht.

An den Dichtungsträger schließt sich eine planare Handhabungsfläche (13) mit Fluidabweiser (14) an. Eine kraftschlüssige Verbindung muss zur Übertragung hoher Lasten einen hohen Reibungskoeffizienten aufweisen. Während des Fügens eindringendes Öl mindert die Übertragungsfähigkeit der fertigen Verbindung. In senkrechter Anordnung schützt der Fluidabweiser die Fügestelle vor extern eintretendem Öl aus der Fügeanlage.

## 1.2 Werkzeuge zum gleichzeitigen Fügen mehrere Fügstellen



**Bild 4:** Werkzeug zur Herstellung der gebauten Nockenwelle /7/

Das gleichzeitige Fügen mehrerer Fügstellen erfolgt mit Werkzeugen welche jede Fügestelle mit dem selben Druck über eine gemeinsame

Ölbohrung versorgen oder mit Werkzeugen welche über mehr als eine Ölbohrung verfügen, wodurch verschiedene Druckniveaus auf die Fügestellen und zwischen den Fügestellen angefahren werden kann.

/3/ beschreibt ein Werkzeug zum gleichzeitigen Fügen mehrerer Fügestellen mit jeweils gleichem Druck über eine gemeinsame Ölbohrung. /1/ und /4/ beschreiben ein Werkzeug mit dem mehrere Fügestellen mit jeweils unterschiedlichen Drücken über jeweils separate Ölbohrungen beaufschlagt werden können. /5/ beschreibt ein Werkzeug mit dem mehrere Fügestellen gleichzeitig mit konstantem Druck über die gleiche Ölbohrung versorgt werden. Eine Zusätzliche Ölbohrung dient als Entlastungsbohrung für an den Dichtungen austretendes Leckageöl zwischen den Fügestellen bzw. zum Aufbau eines Gegendruckes zur Teilentlastung der Dichtungen. Durch Entlastungsbohrungen wird der ungesteuerte Druckaufbau und die damit verbundene Aufweitung der Hohlwelle zwischen den Fügestellen unterbunden (vgl. **Bild 4**). Durch die Druckbeaufschlagung zwischen den Fügestellen, verschieden vom Fügedruck werden die Dichtungen entlastet und die Standzeit der Dichtungen wird erhöht.

### 1.3 Geteiltes Werkzeug

Geteilte Werkzeuge kommen vor allem bei kleinen Baugrößen und variablen Fügelängen zum Einsatz. **Bild 5** stellt die Prinzipskizze eines geteilten Werkzeuges dar.

Bei konstantem Durchmesser der axialen Ölbohrung wird der Restquerschnitt mit kleiner werdendem Innendurchmesser der Hohlwelle kleiner. Bei konstantem Durchmesser Verhältnis der Dichtungen und konstantem Druck ergeben sich immer größere Zugspannungen im Werkzeug. In Kapitel 2, Beanspruchungsermittlung eines Werkzeuges zum Innenhochdruckfügen mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode, werden die Orte der maximalen Spannung und deren Beträge diskutiert. Die bei einem Innendurchmesser der Hohlwelle von 19mm und einem Fügedruck von 4000bar erreichten Spannungen überschreiten lokal 1500MPa. Der Einsatz von höchstfesten Werkstoffen erscheint möglich ist aber auf Dauer zu teuer. Vor allem, weil durch die wechselnden Beanspruchungen, hervorgerufen durch die Fügungen, Dauerbrücke entstehen und ein regelmäßige Ersatz des Werkzeuges erforderlich ist.

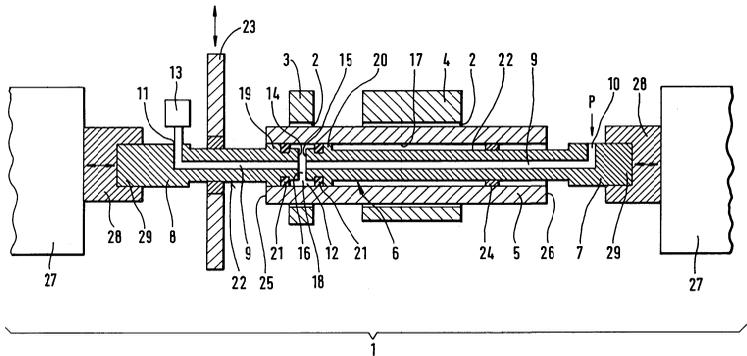
In der geteilten Werkzeugausführung werden ausschließlich Druckkräfte übertragen. Zwar sind die resultierenden Kräfte auf Grund des größeren wirksamen Querschnitts des Druckes auf die Werkzeuggeometrie größer. Infolge des größeren Querschnitts und der geringeren Kerbwirkung sinken die Spannungen gegenüber dem ungeteilten

Werkzeug auf etwa die Hälfte ab. Es können somit nicht nur niedrigfestere, preiswertere Werkstoffe zum Einsatz kommen, sondern die Standzeit des Werkzeuges wird gleichzeitig erhöht.

Die Möglichkeit des Fügens verschieden langer Fügestellen mit demselben Werkzeug schafft ein hohes Maß an Flexibilität. Nachteilig wirken sich das erforderliche höhere Ölvolumen sowie das sequentielle Fügen jeder einzelnen Fügestelle auf die Fertigungszeit der Verbindung im Vergleich zum ungeteilten Werkzeug aus.

Interessant gestaltet sich die Möglichkeit der Integration einer Entlüftungsfunktion in das Werkzeug. Bei vertikaler Anordnung kann über die zweite Ölbohrung (9) die Luft im Fügerraum (16) entweichen. Hierdurch ergibt sich eine bessere Dichtwirkung und eine längere Standzeit der Dichtungen im Prozess. Die Entlüftungsfunktion wird in /6/ um einen Speicher (13) erweitert. Dieser ist druckdicht verschlossen und gleicht prozessbedingte Druckstöße im System aus.

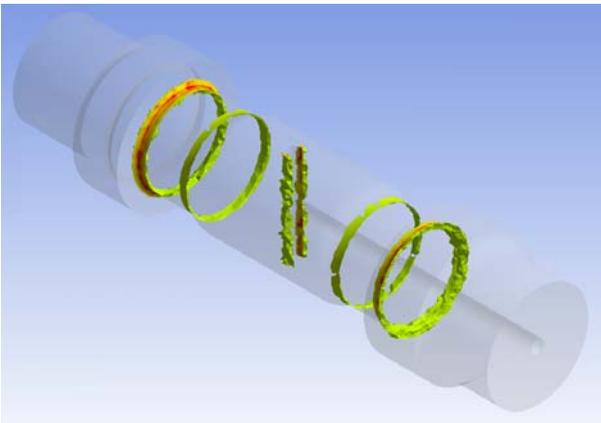
Geteilte Werkzeuge können nur dort zum Einsatz kommen, wo von beiden Seiten eine Zugänglichkeit zur Fügestelle möglich ist. Ebenso erfordern die hohen Drucklasten die Berücksichtigung der Knickfälle. Das Fügen in beliebig langen Hohlwellen wird damit erschwert. /6/ beschreibt daher unter Position 23 und 24 Stützringe zum Abstützen gegen seitliches Ausknicken des Werkzeuges beim Fügen.



**Bild 5:** geteiltes Werkzeug zum Innenhochdruckfügen /6/

## 2 Beanspruchungsermittlung eines Werkzeuges zum Innenhochdruckfügen mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode

Für die Beanspruchungsermittlung eines Werkzeuges zum Innenhochdruckfügen wurde ein Finite-Elemente-Modell erstellt welches den Abmessungen eines Werkzeuges zum Fügen eines Welleninnendurchmessers von 19mm entspricht. Als Dichtungsgeometrie wurde eine Dichtung der Firma Economos GmbH ausgewählt welche den erforderlichen maximalen Fügedruck von 4000bar stand hält und einen Innendurchmesser von 11mm aufweist. Es ergibt sich eine axial wirkende Kraft von 75.400N, welche von der Werkzeuggeometrie aufgenommen werden muss. Die Ölbohrung weist einen Durchmesser von 1mm auf. Die beschriebene Geometrie weist eine Normalspannung, ohne Berücksichtigung von Kerben, von bereits 800MPa auf. Infolge der Kerben an der Dichtungsaufnahme sowie der senkrechten Ölbohrungen erhöht sich die Beanspruchung im Werkzeug lokal auf über 1500MPa. Die Maxima der von-Mises Vergleichsspannungen sind in **Bild 6** dargestellt. Sie liegen im Bereich der Dichtungsaufnahme und den Querbohrungen. Ein Dauerfester Betrieb wäre bei der beschriebenen Geometrie auch bei Verwendung moderner höchstfester Werkstoff nicht zu gewährleisten.



**Bild 6:** Darstellung der maximalen Beanspruchungen in einem Werkzeuges zum Innenhochdruckfügen

Ein geteiltes Werkzeug ähnlicher Geometrie müsste einer Druckkraft von 113.400N aufnehmen. Durch den größeren wirksamen Quer-

schnitt sinkt dennoch die Normalspannung (ohne Kerbeinfluss) auf 400MPa ab. Das der Einfluss der Kerben sinkt fällt die maximale Vergleichsspannung auf rund die Hälfte der Vergleichsspannung des ungeteilten Werkzeuges. Ebenso entfällt der negative Einfluss der Querbohrung bei wirksamen Zuglasten.

Der Unterschied in den Beanspruchungen zwischen einem geteilten und ungeteilten Werkzeug sinkt mit größer werdendem Außendurchmesser des Werkzeuges.

### **3 Zusammenfassung**

Gestalt und Einsatzmöglichkeiten von Werkzeugen zum Innenhochdruckfügen sind vielfältig. Der Artikel stellt eine Einteilung der Werkzeuge vor und beschreibt wesentliche Eigenschaft und unterschiede der Werkzeuge untereinander. Es wurden Werkzeugbeispiele vorgestellt und erläutert. Neben den zu fügenden Bauteilen sind vor Allem äußere Parameter für die Auswahl und Konstruktion geeigneter Werkzeuge erforderlich. So sind der maximale Fügedruck, die Stückzahlen und die Anzahl der Fügestellen ebenso wichtig wie die Geometrie der zu fügenden Teile und die Anzahl an zu fügenden Varianten.

### **4 Literatur**

- /1/ Patentschrift: DE 103 38 348 B3 2005.04.07
- /2/ Patentschrift: DE 103 38 387 B4 2009.01.15
- /3/ Patentschrift: DE 198 21 807 C2
- /4/ Patentschrift: DE 199 46 340 C2
- /5/ Offenlegungsschrift: DE 38 42 589 A1
- /6/ Patentschrift: DE 199 57 508 C1
- /7/ NN: Die gebaute Nockenwelle – eine innovative Systemlösung aus dem DaimlerChrysler Werk Hamburg, Firmenprospekt, Hamburg, 2001