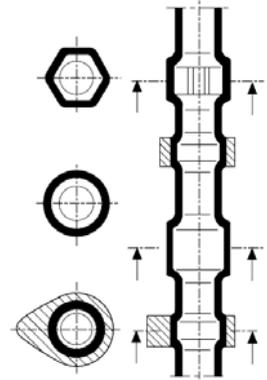


## Innenhochdruckfügen in der industriellen Anwendung

Hilgermann, J. L.; Lohrengel, A.

*Das Fertigungsverfahren des Innenhochdruckumformen (IHU) ermöglichen heute belastungsoptimierte Bauteilgeometrien, eine bessere Materialausnutzung und die Möglichkeiten zur Verarbeitung unterschiedlicher Werkstoffe. /7/ Durch die Integration des Innenhochdruckfügens und -lochens in den IHU-Prozess ergeben sich neue technische Möglichkeiten zur Herstellung von Hohlformleichtbauteilen mit lokal optimierten Eigenschaften und geringen Kosten. /1/ Der Artikel beschreibt die Fertigungsverfahren durch Innenhochdruck und den gemeinsamen, integrierten Fertigungsprozess von Umformen, Fügen, und Lochen wodurch neue Potenziale in der Fertigung entstehen.*

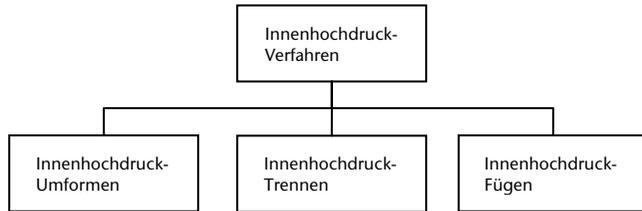


*Hydroforming enables producing machine parts with load-optimised geometry, better utilisation of material and joining of distinct materials. /7/ Integrating joining and punching by internal-high-pressure into hydroforming process new potentials of manufacturing light construction hollow mould parts with locally optimized properties and low manufacturing cost is realized. /1/ This article depicts the manufacturing-procedures by high-pressure as well as the integrated manufacturing process of hydroforming, assembling and cutting with gives new potentials in modern manufacturing.*

### 1 Fertigungsverfahren durch Innenhochdruck

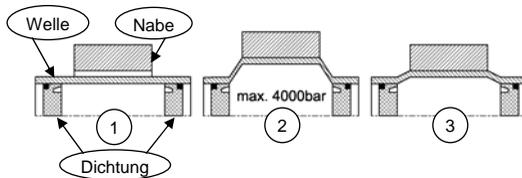
Innenhochdruck-Verfahren beinhalten neben dem Innenhochdruckumformen auch das Innenhochdruckfügen und -schneiden. Die Verfahren werden kurz einzeln vorgestellt, worauf im Anschluss der integrierte Fertigungsschritt aus Umformen, Fügen und Lochen durch Innenhochdruck diskutiert wird. Die Einordnung der Innenhochdruck-Verfahren in die Fertigungsverfahren wird in der VDI-Richtlinie 3146 gegeben. **Bild 1** stellt das Einteilungsschema der Innenhochdruckverfahren dar. Abweichend zur VDI-Richtlinie wurde hier auf die Darstellung möglicher weiterer Innenhochdruck-Verfahren verzichtet.

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



**Bild 1:** Innenhochdruck-Verfahren /9/

**Bild 2** zeigt schematisch den Fügeprozess des Innenhochdruckfügens. Die Hohlwelle wird in der Nabe ausgerichtet (**Bild 2-1**). Der Raum unterhalb der Nabe wird mit Druck beaufschlagt. Hierbei weitet sich die Welle lokal unterhalb der Nabe auf (**Bild 2-2**). Durch die gezielte Materialkombination verbleiben nach der Druckrücknahme in der Nabe tangentielle Zugspannungen, die für einen festen Presssitz sorgen (**Bild 2-3**).

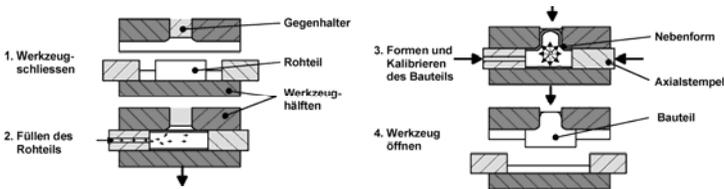


**Bild 2:** Prinzipskizze des Innenhochdruckfügens einer Welle-Nabe-Verbindung

Mit dem Begriff Innenhochdruck-Umformen bezeichnet man wirkmedienbasierte Umformverfahren [...]. Erste Anwendung fand das Verfahren in der Sanitärtechnik zum Biegen und Kalibrieren von Rohrbögen. /6/

Der Prozessablauf des Innenhochdruckumformens ist in **Bild 3** dargestellt. Ein Rohteil wird in das Werkzeug gelegt (**Bild 3-1**). Das Werkzeug besteht aus mindestens zwei Werkzeughälften und mindestens einem Axialstempel. Nach dem schließen des Werkzeuges wird das

Rohteil mit Hydromedium befüllt (**Bild 3-2**). Der Druck wird erhöht, Das Rohteil verformt sich plastisch und legt sich an die Werkzeuggeometrie an (**Bild 3-3**). Durch zuführen von Material über den Axialstempel kann die Wanddicke im Fertigteil eingestellt werden. Nach Druckrücknahme wird das Bauteil aus dem Werkzeug entnommen (**Bild 3-4**). Der hier dargestellte, vereinfachte Prozessablauf variiert je nach Anwendungsfall.



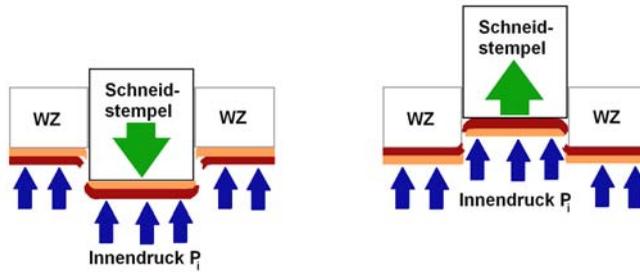
**Bild 3:** Prozessablauf des Innenhochdruck-Umformens /4/

Durch die Kaltverfestigung steigt die Festigkeit der geformten Werkstücke. Die Werkstofffasern liegen tangential zur Kontur, wodurch IHU-geformte Bauteile ein gutes Belastungsverhalten aufweisen. /6/

Das Schneiden und Lochen durch Innenhochdruck wurde 1998 und 1999 erstmals patentrechtlich geschützt. Erste wissenschaftliche Untersuchungen wurden 2002 und 2003 veröffentlicht. /1/ Es werden zwei Prozessarten je nach Wirkrichtung des Schneidstempels unterschieden (vgl. **Bild 4**). Unter hinreichend hohem Innendruck bewegt sich ein Stempel in das Werkstück hinein bzw. vom Werkstück weg. Durch die an den Kanten wirkenden Zug- und Schubbeanspruchungen reißt der Werkstoff an einer definierten Kante. Hierbei entsteht ein Grad, der in Abhängigkeit der Stempelbewegung nach Innen oder Außen zeigt. In /1/ wird die Problematik des Lochens bei nach innen wirkendem Schneidstempel beschrieben. In den aufgeführten Untersuchungen konnten zwei übereinander liegende Bleche nicht gelocht werden. Das äußere Blech wurde getrennt, das innere hingegen wurde nur eingebeult. Bei nach außen wirkendem Stempel konnten beide Bauteile sicher getrennt werden.

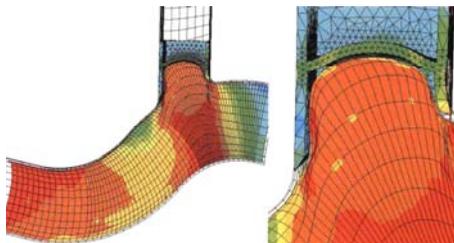
Weitere Schneidverfahren durch Innenhochdruck werden in der VDI-Richtlinie 3146 beschrieben. Deren Grundprinzip entspricht dem hier dargestellten Lochen durch Innenhochdruck.

/1,5/ beschreibt die Kombination der Innenhochdruckverfahren in einem Prozess. /5/ beschreibt im Beispiel von Spaceframe-Strukturen die Vorteile: „Konventionell besteht der Fertigungsprozess einer



**Bild 4:** Prinzipskizze des Innenhochdruck-Lochens

Spaceframe-Struktur aus vielen Schritten: Formen der Bauteile, Endbearbeitung, Transport zu einer Fügezelle, Positionierung Montage und Fügen, gegebenenfalls richten und nachbehandeln. Bei dem Fügen durch Schutzgas- oder Inertgasschweißen ist die Werkstoffwahl eingeschränkt. Im schlechtesten Fall sind dann lediglich gleichartige Werkstoffe nutzbar [...].<sup>/5/</sup>. Das gleichzeitige Umformen und Fügen reduziert die Anzahl der Fertigungsschritte und damit Zeit und Kosten bis zum Endprodukt. **Bild 5** zeigt eine Simulation des Fügevorganges einer Knotenstruktur. Das rechte Bild stellt den Ausschnitt der Fügestelle vergrößert dar. Das waagrecht angeordnete Rohr wird in einem IHU-Prozess umgeformt. In der Form wurde das zu fügende Bauteil bereits positioniert. Durch den Innendruck formen sich beide Bauteile in einander. Ein eingeschweißter Dom verhindert das Platzen des Rohres. Nach Druckrücknahme verbleibt neben dem Formschluss auch ein Kraftschluss zwischen beiden Bauteilen. Zur Stabilisierung des Doms kann ebenso das zu fügende Bauteil unter Druck gesetzt werden, wodurch der Prozessdruck, z.B. während des Kalibrierens, weiter gesteigert werden kann.

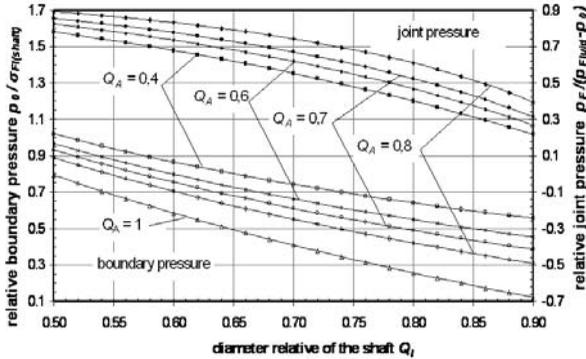


**Bild 5:** Simulation des Fügens einer Knotenstruktur durch Innenhochdruck. /5/

/1/ beschreibt die Prozessführung des Fügens- und Lochens durch Innenhochdruck in Verbindung mit einem IHU-Prozeß. Neben dem dominierenden Kraftschluss wird auch der dominierende Formschluss durch z.B. Sicken diskutiert. Fügeversuchen und anschließende Belastungsversuche zeigen die Übertragbarkeit der Verbindungen. Bei Verbindungen mit dominierendem Formschluss wurde eine Beanspruchung von etwa 32% der Streckgrenze des Grundwerkstoffes erreicht. Verbindungen mit dominierendem Kraftschluss ertrugen eine Reibschubspannung von bis zu  $1,65\text{N/mm}^2$ . /1/ nimmt einen Reibkoeffizient von 0,02 bis 0,05 zwischen den beiden Fügepartnern an. Der relativ geringe Reibkoeffizient begründet sich mit der vorhandenen, prozesstechnisch notwendigen Beölung der Fügeteile. Hieraus ergäbe sich ein mittlerer Passfugendruck von 33 bzw.  $82,5\text{ N/mm}^2$  Passfugendruck. Am Institut für Maschinenwesen durchgeführte FE-Untersuchungen lassen auf niedrigere mittlere Flächenpressungen schließen. Dies wird auch durch analytische Betrachtungen gestützt (vgl. **Bild 6**) Die Übertragbarkeit der vorgestellten Geometrie beträgt bezogen auf die Festigkeit des Grundwerkstoffes 12,9%. Der doch relativ hohe Wert wird nur durch die große Fügefläche mit einer Fügelänge von 1,3mal der Fügedurchmesser erreicht. Eine Fügefläche, die für das Fügen von Knotenstrukturen auf Grund der notwendigen großen Verformungen des Basisrohres nicht möglich ist.

Für die Steigerung der Übertragbarkeit vorwiegend kraftschlüssiger Verbindungen dünner Blechstrukturen durch Innenhochdruck muss entweder der Kontaktdruck, oder die Reibungszahl zwischen den Fügepartnern erhöht werden. Eine Erhöhung des Passfugendruckes erscheint auf Grund der ungünstigen Ausgangsgeometrien schwierig. **Bild 6** stellt den relativen Passfugendruck in Abhängigkeit der Durchmesserhältnisse der Fügepartner  $Q_i$  und  $Q_A$  dar. Für große  $Q_i$  und kleine  $Q_A$  ergibt sich ein minimaler Passfugendruck. Dünne Blechstrukturen weisen ein Durchmesserverhältnis größer 0,9 auf. Es ergibt sich also Prozesstechnisch bereits ein geringer mittlerer Passfugendruck in der Verbindung.

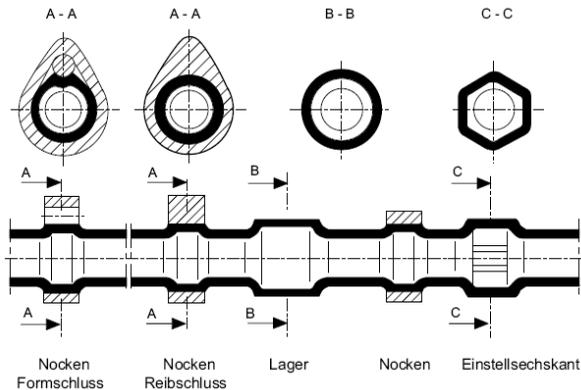
Eine Steigerung der Übertragungsfähigkeit vorwiegend kraftschlüssiger gefügter Welle-Nabe-Verbindungen wird entweder durch die Erhöhung des Reibkoeffizienten  $\mu$ , oder durch die Steigerung des Passfugendruckes durch eine Geometrieänderung (insbesondere die Senkung des Durchmesserhältnisses des innenliegenden Fügepartners) erreicht. /1,5/ beschreiben die Möglichkeit der Steigerung des Reibungskoeffizienten durch Klebstoffe oder Lote. Dies hat zusätzlich den Vorteil der Dichtheit der Verbindung gegen mögliche korrosive flüssige Stoffe.



**Bild 6:** relativer Passfugendruck in Abhängigkeit des Durchmesserverhältnisses /8/

## 2 Anwendungsfelder

Anwendung findet das gemeinsame Umformen und Fügen durch Innendruck bei gefügten Nockenwellen und Werkstücken in Verbundbauweise. Neue Anwendungsfelder sind der Bau von Space-Frame-Strukturen. /6/ beschreibt das Verfahren der gefügten Nockenwelle und die Verbundbauweise. Ausgehend von einem Rohr werden gelochte Nocken aufgeschoben und zu einander positioniert. Im IHU-Werkzeug wird das komplette Rohr mit Innendruck beaufschlagt. Hierdurch werden nicht nur die Nocken kraftschlüssig mit dem Rohr gefügt, sondern auch Lagersitze und weitere Geometrielemente in das Rohr eingeformt (**Bild 7**).



**Bild 7:** Gefügte Nockenwelle /6/

Neben der Nockenwellenfertigung im kombinierten Umform- und Fügeprozess werden heute Nockenwellen vor Allem im reinen Fügeprozess durch Innenhochdruck hergestellt.

/6/ beschreibt die Vorteile einer Verbundbauweise. Durch die Verbindung zweier Rohrwerkstoffe unterschiedlicher Eigenschaften kann ein Schutz gegen aggressive oder korrosive Medien hergestellt werden.

/5/ beschreibt die Potenziale des gleichzeitigen Umformens und Fügen von Space-Frame-Strukturen (s.o.).

Neben den hier dargestellten Anwendungen sind weiter im Bereich des Getriebebaus denkbar. Neben dem Fügen von Welle und Nabe könnte auch gleichzeitig die Zahnkontur ausgeformt werden. Zur Steigerung der Übertragbarkeit wäre das anschließende Ausgießen mit Polymeren oder anderen leichten Werkstoffen denkbar.

Weitere Möglichkeiten liegen in der Verbindung zweier Bauteile mit dominierendem Formschluss. Neben den klassischen Verzahnungen können Polygonverbindungen aber auch Verbindungen mit Mikroverzahnung (Rändelung) zum Einsatz kommen. Dabei ist nicht immer die Geometrie der Bohrung entscheidend. Für eine Verbindung mit dominierendem Formschluss kann ebenso die unterschiedliche Verformbarkeit der Nabe genutzt werden um eine Ortabhängige Verformung der Fügepartner zu generieren. In /10/ finden sich mögliche Geometrien einer solchen Verbindung. Die ortsabhängige Steifigkeit der Welle oder Nabe führen zu einem veränderten, über dem Umfang ungleichmäßigen Passfugendruckverlauf. Durch Nutzung einer geschwächten Nabe kann durch das Fügeverfahren ein Formschluss erzeugt werden.

### **3 Zusammenfassung**

Die Kombination von Innenhochdruck-Verfahren zur Fertigung schafft neue Potentiale in der Fertigung komplexer Bauteile. Durch die Integration des Umformens, Trennen und Fügen in einen Prozessschritt werden Kosten und Fertigungszeit gesenkt. Aktuelle und neue Anwendungsfelder wurden vorgestellt. Wesentlicher Vorteil der Innenhochdruck-Verfahren sind die Erfüllung von Leichtbau und die komplexen Gestaltungsmöglichkeiten der Bauteile. Leichtbau wird nicht nur durch die Nutzung von Hohlbauteilen sondern auch durch die Verfahrensbedingte lokale Änderung der Werkstoffeigenschaften durch Kaltverformung und Schaffung eines Richtungsabhängigen Werkstoffgefüges erreicht.

## 4 Literatur

- /1/ Eichhorn, A.; Meyer, F: Forschung für die Praxis P461, Innenhochdruckfügen von Rohren mit Rohrabschnitten: Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., 2004, ISBN 3-937567-00-3
- /2/ Marré, M.: Grundlagen der Prozessgestaltung für das Fügen durch Weiten mit Innenhochdruck, Dissertation, TU Dortmund, ISBN 978-3-8322-8361-2, Shaker Verlag, 2009
- /3/ NN: Schuler GmbH, Handbuch der Umformtechnik. Springer-Verlag, Berlin, 1998
- /4/ Doege, E.; Behrens, B.: Handbuch der Umformtechnik, Springer-Verlag, Berlin, 2007, ISBN 978-540-23441-8
- /5/ Stumpp, B.: Fügen und Umformen vereint, Automobil Produktion, Mai 2008
- /6/ Klocker, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4, Umformen, Springer-Verlag, 2006, ISBN 3-540-23650-3
- /7/ Kögel, G.: Aufbruchstimmung, [www.industrie-forum.net](http://www.industrie-forum.net), 26.10.2009
- /8/ Dietz, P.; Grünendick, T.; Guthmann, A.; Schäfer, G.: Internal high pressure assembled press fit shaft-hub connections. Network of Excellence, manufacturing, factories of the future, 2005
- /9/ VDI-Richtlinie 3146, Blatt 1 und 2
- /10/ Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen im elastischen und teilplastischen Bereich, Dissertation, TU-Clausthal, 1993