

---

## Anspruchsvolle Leichtbauteile in einem Schritt herstellen – durch Innenhochdruckumformung von Rohren und Profilen

---



### Zusammenfassung

---

Die Innenhochdruckumformung (IHU), auch Innenhochdruckumformen oder Hydroforming genannt, ist ein Fertigungsprozess, in dem metallische Rohre und Profile in einem geschlossenen Formwerkzeug mittels Innendruck umgeformt werden. Mit dem Verfahren lassen sich insbesondere rohrförmige Leichtbauteile mit hoher Steifigkeit herstellen. Auch komplizierte Bauteilgeometrien können durch IHU innerhalb sehr enger Maßtoleranzen gefertigt werden. Das Verfahren gehört in der Fertigungstechnik zur Hauptgruppe der umformtechnischen Verfahren in der Untergruppe Zugdruckumformen und ist nach DIN 8584 genormt.

Der Druck wird in der Regel durch eine Wasser-Öl-Emulsion in das Umformteil eingebracht. Die Öffnungen werden während des Umformprozesses durch hydraulisch betriebene Stempel abgedichtet. Die wesentlichen Stellgrößen bei der Herstellung sind der Innendruck, der bis zu 4.000 bar betragen kann, sowie das Nachschieben des Materials von den Bauteilenden her mit Hilfe der Dichtstempel. Der IHU-Prozess kann durch zusätzliche Verfahrensschritte, wie beispielsweise Vorform- oder Füge-Operationen, angepasst werden. Für gewöhnlich findet der gesamte Prozess bei Raumtemperatur statt. Eine Erwärmung der Werkzeuge oder der Druckflüssigkeit wird nur selten angewandt.

## Einleitung

---

### Hintergrundinformationen

---

In der Prozesskette zur Herstellung stellt die IHU oftmals den finalen Umformschritt dar, dem die Rohrherstellung sowie mechanische Biege- und Vorformoperationen vorgelagert sind.

Bereits seit den 1960er Jahren befinden sich IHU-Verfahren für die Fertigung von Rohrleitungsteilen aus Kupfer in der industriellen Anwendung. Seit den neunziger Jahren hat die Technologie Einzug in die Fahrzeugtechnik gehalten und hat dort seitdem einen hohen Stellenwert [Neu07]. Heute werden Abgasteile, Trägerstruktur- und Karosseriebauteile in hohen Stückzahlen durch IHU hergestellt, siehe Bild 1.

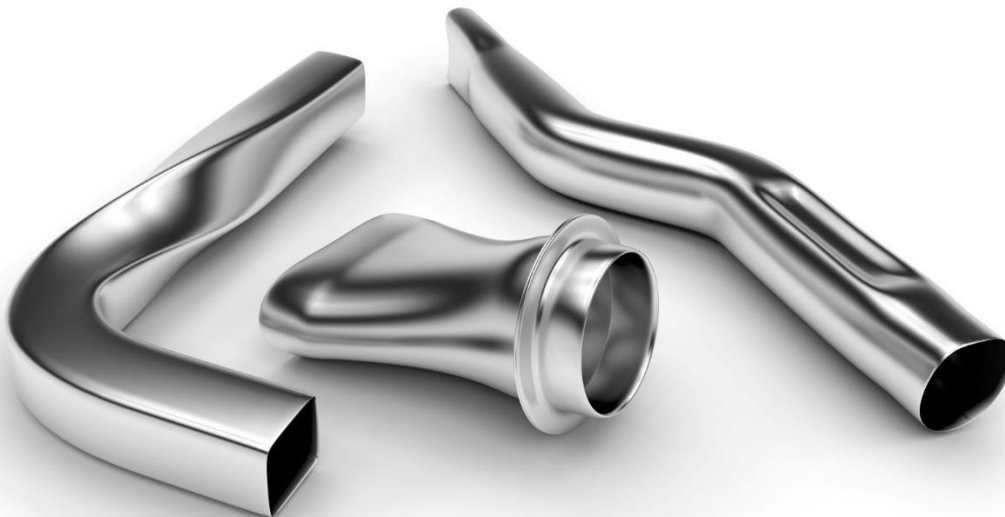


Bild 1: Mit Innenhochdruckumformung lassen sich beispielsweise Abgassysteme herstellen (Bildquelle: fotolia.com / kv\_san)

Wegen der ungewöhnlich hohen Gestaltungsfreiheit können Leichtbauteile aus einem Stück für extreme Anwendungen hergestellt werden, da keine Fügstellen benötigt werden, die die Teile schwerer oder schadensanfälliger machen.

Praktische Anwendung

Prozess

Das Halbzeug im IHU-Prozess ist ein Rohr oder ein Profil. Es wird durch den Innendruck und das Nachschieben der Druckstempel soweit umgeformt, bis es an der Werkzeuggravur anliegt und dadurch exakt jene Form annimmt [VDI99]. Das Werkzeug ist zweigeteilt, um die Teile einlegen und entnehmen zu können.

Der Prozess ist in Bild 2 skizziert und läuft dabei grundsätzlich wie folgt ab:

1. Das Halbzeug wird in das Werkzeug gelegt. Das Werkzeug wird geschlossen und die Stempel verfahren soweit, dass sie das Halbzeug abdichten.
2. Die Flüssigkeit wird unter Umgebungsdruck eingeleitet.
3. Der Flüssigkeitsdruck wird erhöht. Durch die Kombination des Innendrucks und des Nachschiebens der Dichtstempel wird das Halbzeug umgeformt, sodass es sich exakt der Werkzeuggravur anpasst. Weitere Stempel können den Prozess dabei unterstützen, um Nebenelemente auszuformen (zum Beispiel Abzweigungen, Dome). Wenn die Stempel die Endpositionen erreicht haben, wird der Druck im Kalibrierschritt noch einmal stark erhöht, damit das Bauteil an jeder Stelle an der Gravur anliegt
4. Abschließend wird der Innendruck abgesenkt und Stempel und Werkzeuge fahren auseinander, sodass das fertige Bauteil entnommen werden kann.

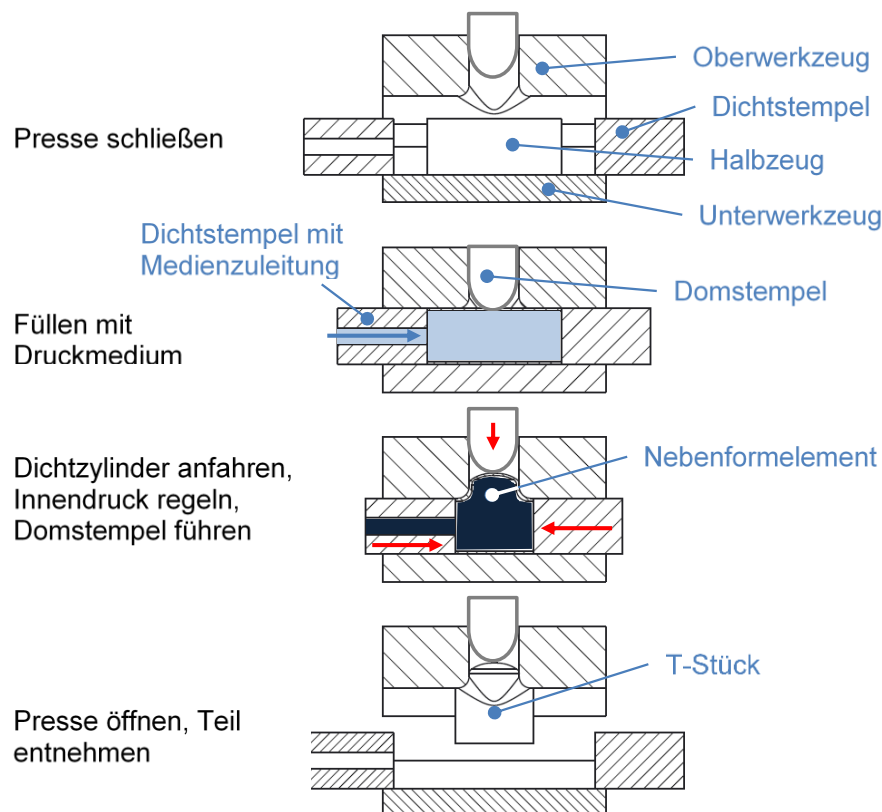


Bild 2: Typischer Ablauf eines IHU-Prozesses (Bildquelle: VDI99)

## Anlagentechnik

---

Durch die hohen Innendrucke entstehen große Kräfte in den Werkzeugen. Bei der IHU eines relativ kleinen rohrförmigen Halbzeugs mit 30 mm Durchmesser und 200 mm Länge entsteht bei einem typischen Umformdruck von 1.500 bar eine Druckkraft von 9000 kN, die auf die Werkzeuge wirkt. Daher werden ebenfalls hohe Schließkräfte für die Werkzeuge benötigt, um Sicherheitsrisiken, etwa durch berstende Teile, zu vermeiden und um die gewünschte Innengeometrie auszuformen.

Daher werden die Werkzeughälften in der Regel in eine hydraulische Umformpresse integriert, wie in Bild 3 dargestellt. Sie liefert oftmals zusätzlich die hydraulische Leistung für die Druckstempel und den Innendruckkreislauf.



Bild 3: Hydraulische Presse, in die ein IHU-Werkzeug eingebaut werden kann (Bildquelle: IPH)

Eignet sich die Presse nicht, um die weitere Hydraulik anzutreiben, werden zusätzliche Aggregate benötigt, um die Stempel anzutreiben. Bei den Aggregaten handelt es sich um leistungsstarke Pumpen, die für einen Kreislauf mit Hydrauliköl den Druck und den Volumenstrom zur Verfügung stellen.

Der Innendruck wird ebenfalls über Hydraulikaggregate erzeugt. Zusätzlich kommt ein Druckübersetzer zum Einsatz, der zwei Aufgaben hat:

1. Druck im Kreislauf weiter erhöhen, als es durch die Aggregate möglich ist
2. Ölkreislauf der Aggregate vom Öl-Wasser-Emulsionskreislauf für den Innendruck trennen

Ein Druckübersetzer wird verwendet, um einen Druck  $p_1$  zu einem Druck  $p_2$  zu erhöhen. In der einfachsten Bauform handelt es sich um einen hydraulischen Zylinder mit einer Hochdruck- und einer Niederdruckkammer, siehe Bild 4.

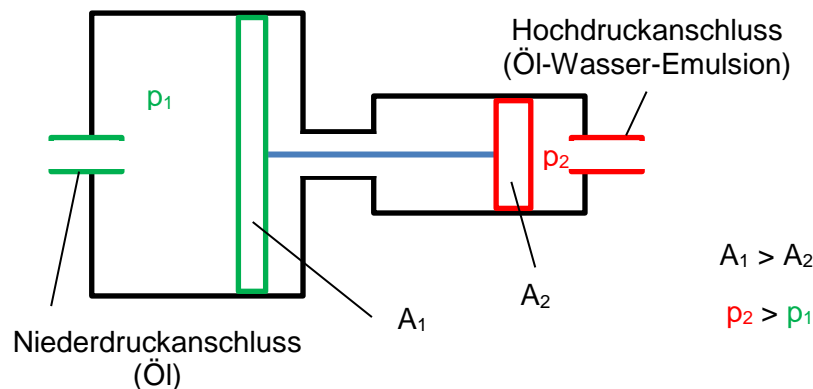


Bild 4: Funktionsprinzip eines Druckübersetzers (Bildquelle: IPH)

In jeder Kammer befindet sich ein Kolben mit einer Kolbengrundfläche  $A$ . Beide sind mit einer Kolbenstange verbunden, durch die die Kraft  $F$  übertragen wird.

Es gilt:

$$p = \frac{F}{A}, \text{ bzw. } p_1 = \frac{F}{A_1} \text{ und } p_2 = \frac{F}{A_2}$$

Daraus ergibt sich:

$$p_2 = \frac{F}{A_2} = \frac{p_1 \cdot A_1}{A_2} = p_1 \cdot \frac{A_1}{A_2}$$

Das Übersetzungsverhältnis eines Druckübersetzers wird daher aus dem Verhältnis der Kolbenflächen bestimmt.

Während eine Vorfüllpumpe am Prozessbeginn das Umformmedium zur Verfügung stellt, sorgt der Druckübersetzer anschließend für die Aufbringung des Drucks. Da für gewöhnlich in der IHU keine große Volumenänderung zwischen Halbzeug und Fertigteil stattfindet, ist die effektiv in das Bauteil eingebrachte Flüssigkeitsmenge häufig sehr gering.



Werkzeuge

In Bild 5 ist ein CAD-Modell eines typischen IHU-Werkzeugs für den Einbau in einer hydraulischen Presse dargestellt. Dieses Werkzeug ist modular aufgebaut, sodass die ebenfalls modular aufgebaute Gravur gewechselt werden kann.

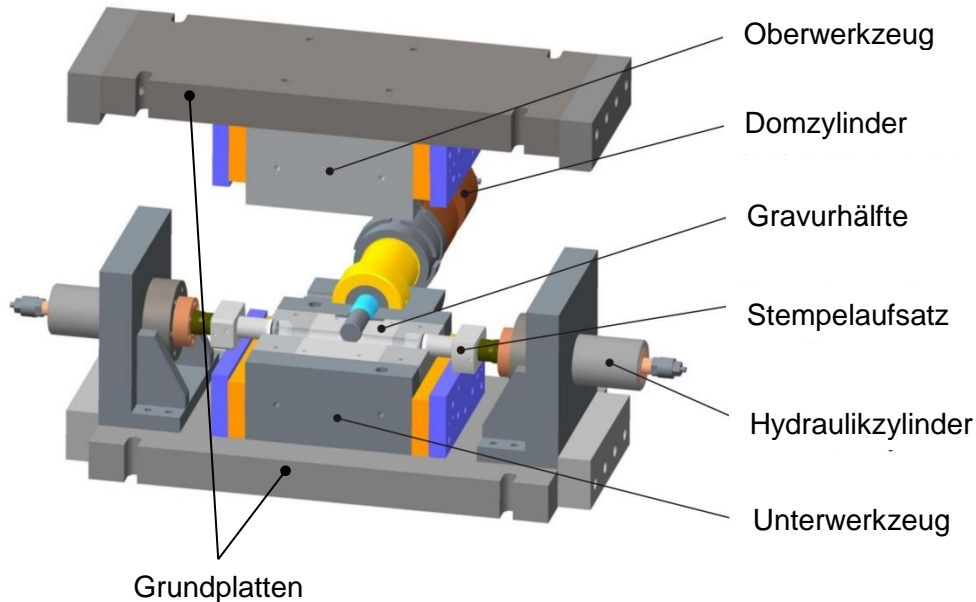


Bild 5: IHU-Werkzeug zum Einbau in hydraulischer Presse (Bildquelle: IPH)

Eine Gravurhälfte ist in Bild 6 zu sehen. Die Gravurhälften werden in Ober- und Unterwerkzeug eingesetzt.

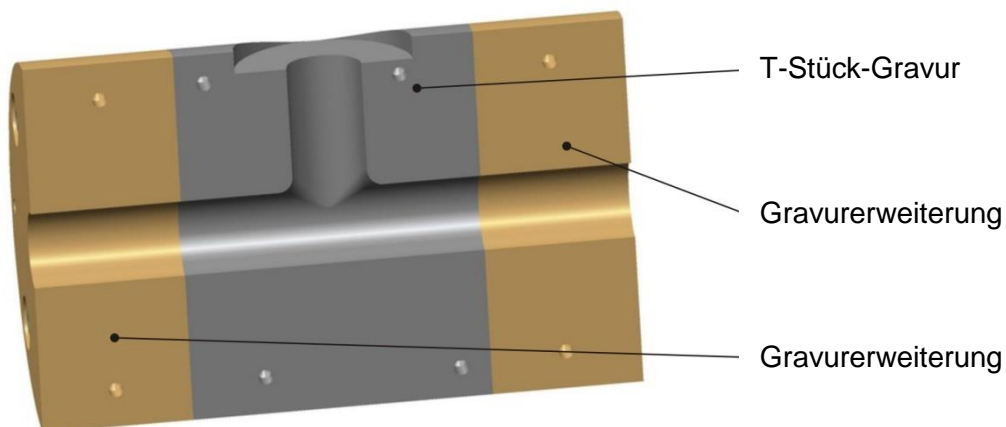


Bild 6: Modular aufgebaute Gravurhälfte (Bildquelle: IPH)

Mit geringem Spiel, zum Beispiel mit einer Passung H7/h6, sind die Dichtstempelaufsätze in die Gravur eingepasst, über sie wird die Druckflüssigkeit in das Bauteil eingeleitet. Zur Ausformung eines Domes verfügt dieses Werkzeug über einen zusätzlichen Stempel, dessen

Aufsatz ebenfalls in die Gravur eingepasst ist. Da der Domstempel nicht zum Abdichten verwendet wird, kann sein Stempelaufsatz mit größeren Maßtoleranzen und mehr Spiel als die Axialdichtstempel in das Gesenk eingepasst werden.

Die Stempelaufsätze werden jeweils von einem hydraulischen Zylinder angetrieben, welche zusammen mit dem Unterwerkzeug auf der unteren Grundplatte befestigt sind. Das Oberwerkzeug ist dazu auf der oberen Grundplatte angebracht. Die Grundplatten dienen dem Einbau und werden auf dem Pressentisch montiert.

### Prozessparameter

Die Durchführbarkeit und Ergebnisqualität eines IHU-Prozesses hängt von der genauen Abstimmung der Stempelkraft und des Innendrucks ab. Bei zu geringen Stempelkräften und Innendruck findet nur eine elastische Ausformung statt, sodass die Halbzeuge nicht die exakte Geometrie erhalten. Sind die Stempelkräfte bei höherem Druck zu gering, verringert sich die Dichtwirkung und die Leckageverluste werden zu groß, als dass sich ein ausreichender Druck aufbauen kann. Im entgegengesetzten Fall kann das Halbzeug bei hoher Stempelkraft und zu niedrigem Innendruck einknicken. Wird der Innendruck zu Beginn zu schnell erhöht, kann das Bauteil bersten. Der geeignete Arbeitsbereich in Abhängigkeit von Stempelkraft und Innendruck für einen fehlerfreien IHU-Prozess ist in Bild 7 qualitativ dargestellt.

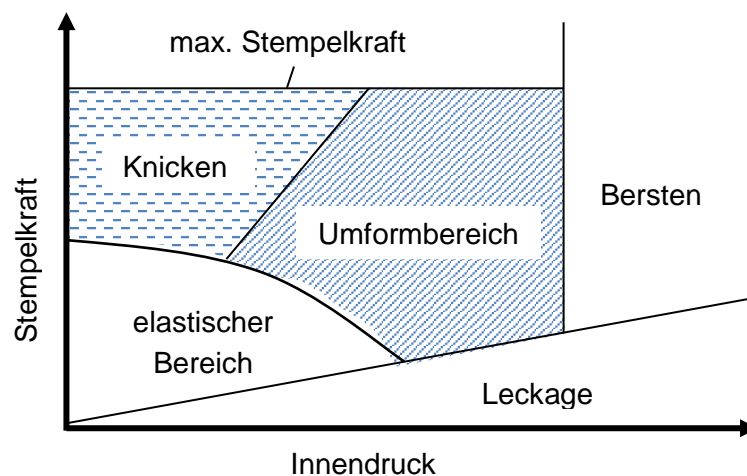


Bild 7: Arbeitsbereich in Abhängigkeit von Stempelkraft und Innendruck für einen IHU-Prozess (Bildquelle: VDI99)

### Bauteilgestaltung

Die Entwicklung eines Produktionsprozesses durch IHU sollte dabei, wie in Produktionsprozessen üblich, nach dem Prinzip des „Simultaneous Engineering“ erfolgen. Dabei wird versucht, so früh wie möglich die Anforderungen aller Beteiligten vom Produzenten bis zum Endanwender zu berücksichtigen, um so Zeit und Geld zu sparen.

Die Auslegung eines IHU-Prozesses findet wie in der Umformtechnik üblich durch die Unterstützung von Simulationen nach der Finite Elemente Methode (FEM) statt, siehe Bild 8.

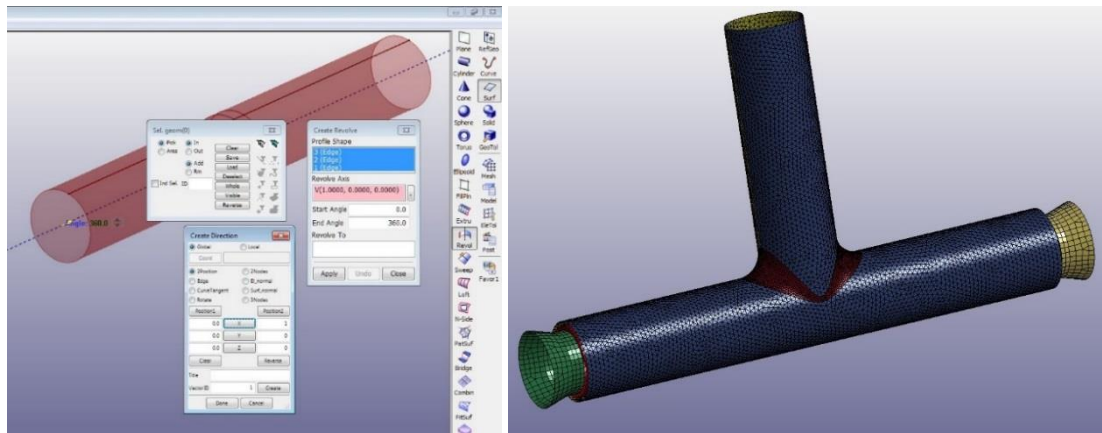


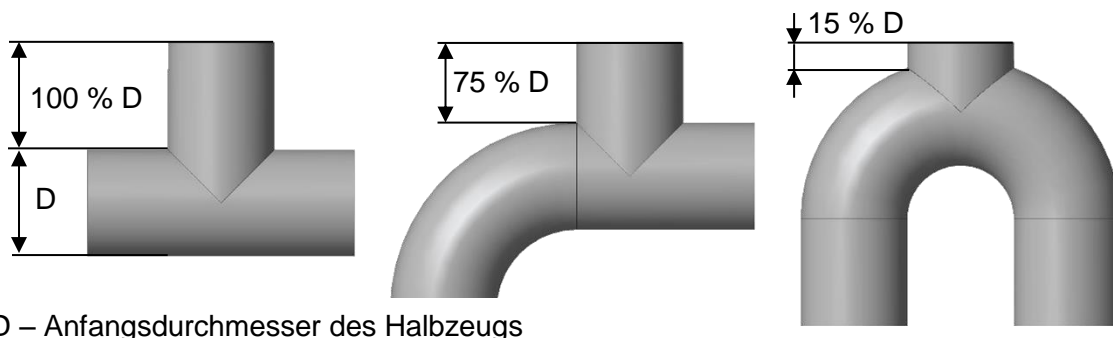
Bild 8: Entwurf einer Komponente (links) und finale Ansicht des 3D-Modells (rechts) mit Simulationssoftware (Bildquelle: IPH)

Die Prozess- und Werkstoffkenngrößen werden dazu so lange angepasst, bis ein zufriedenstellender Umformungsprozess entwickelt ist. Dennoch ist zur Auslegung eines IHU-Prozesses selbst bei der Verwendung aller verfügbaren Informationen und Software die Expertise eines Fachmanns unverzichtbar.

Grundsätzlich sollten beim Entwurf von IHU-Bauteilen die folgenden Gestaltungshinweise berücksichtigt werden [Neu07; VDI99]:

- Scharfe Kanten und kleine Radien vermeiden
- Übergangsbereiche verrunden und Übergänge von konvex zu konkav vermeiden
- homogene Umformgrade über das Bauteil anstreben
- größere ebene Flächen anpassen und krümmen, um elastische Rückfederung zu verhindern

Die maximal mögliche Ausformung von Nebenformelementen ist abhängig von der Bauteilgeometrie. Gebogene Bauteile eignen sich deutlich schlechter zur Ausformung als gerade, siehe Bild 9.



D – Anfangsdurchmesser des Halbzeugs

Bild 9: Beispiel für erreichbare Aushalsungshöhen (Bildquelle: VDI99)



Werkstoffe

---

Für das IHU-Verfahren eignen sich grundsätzlich alle metallischen Werkstoffe, die in anderen Kaltumformverfahren eingesetzt werden [Neu06; VDI99]. Für hohe Umformgrade sollten Werkstoffe mit hoher Bruchdehnung ausgewählt werden. Die meistverwendeten Werkstoffe für die IHU sind Stahl- und Aluminiumlegierungen, siehe Tabelle 1. Seltener wird auch Kupfer, Messing oder Magnesium verwendet.

Stähle	Weiche Stähle	DC04 (1.0338)
	Höherfeste Stähle	H240LA (1.0346), H400LA (1.0556)
	Hochfeste Stähle	DP600 (1.0940)
Aluminium	5000er	AlMg5Mn (AA 5182), AlMg3 (AA 5754)
	6000er	AlMg0,4Si1,2 (AA 6016), AlSi1Mg0,8 (AA 6181)

Tabelle 1: Geeignete Blechwerkstoffe für die IHU [Neu07]

Werkstoffe mit geringerer Umformbarkeit können beispielsweise durch zusätzliche Glühbehandlungen umgeformt werden. Durch eine Rekristallisation stellt sich ein Werkstoffgefüge wie vor der Umformung ein, sodass weiter umgeformt werden kann. Auch mehrere Umformschritte mit Glühstufen sind möglich. Allerdings erhöhen Glühbehandlungen die Prozesskosten deutlich.

Aktuelle Forschung

---

Titan

---

Im abgeschlossenen Forschungsprojekt „IHU Titanbauteile“ wurde eine mehrstufige Prozesskette zur Herstellung von IHU-Bauteilen aus Titan entwickelt. Dazu wurde ein geeignetes Werkstoffmodell der Legierung Titan Grade 2 und eine Glühbehandlung ausgelegt. Titan ist aufgrund des geringen maximalen Umformgrads normalerweise nur aufwendig umformbar. Durch die Glühbehandlung konnte der Werkstoff des umgeformten Bauteils in den Zustand vor der Umformung zurückversetzt werden und dadurch weiter umgeformt werden.

So konnte ein zweistufiger Umformprozess entwickelt werden und erstmals IHU-Teile aus Titan hergestellt werden, siehe Bild 10.



Bild 10: IHU-Teil aus Titan (Bildquelle: IPH)

Das IGF-Vorhaben 16452N der Forschungsvereinigung Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

#### Tailored Hybrid Tubes aus Stahl und Aluminium

Das Ziel des Projekts „IHU-THT“ war die Entwicklung verbesserter Leichtbauteile für den Automobilbau. Dazu sollte werkstoffseitiger Leichtbau durch Stahl-Aluminium-Mischverbindungen mit konstruktivem Leichtbau durch Rohre kombiniert werden. Die Rohrstrukturen werden mittels Laserstrahllöten hergestellt. Zur Fertigung der geschlossenen Hohlprofile kommt das IHU-Verfahren zum Einsatz. Auf diese Weise sollten Stahl-Aluminium-Rohre mit umformbarer Fügezone entwickelt werden, siehe Bild 11.

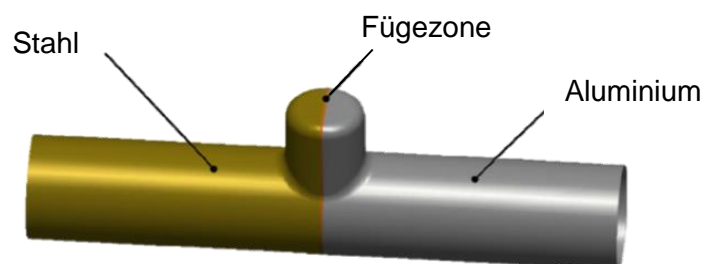


Bild 11: CAD-Modell eines Stahl-Aluminium-Rohrs mit umformbarer Fügezone (Bildquelle: IPH)

In der Projektlaufzeit wurden zunächst Untersuchungen zum Laserlöten mit unterschiedlichen Werkstoffen und verschiedenen Blechstärken durchgeführt. Weiterhin wurden FEM-Simulationen des Innenhochdruckumformprozesses durchgeführt. Durch Zugversuche, Erichsentests und hydraulische Tiefungsversuche wurden die Werkstoffkennwerte für die Simulationen ermittelt.

Nachdem der IHU-Prozess simuliert werden konnte, wurden IHU-Versuche ausgelegt und an den erzeugten Stahl-Aluminium-Rohren durchgeführt, siehe Bild 12. Dabei konnte eine Umformung sowohl im Aluminium- als auch im Stahlteil erzeugt werden. Die Umformung eines industriellen Bauteils als Stahl-Aluminium-IHU-Teil wurde mithilfe des Simulationsmodells nachgewiesen.

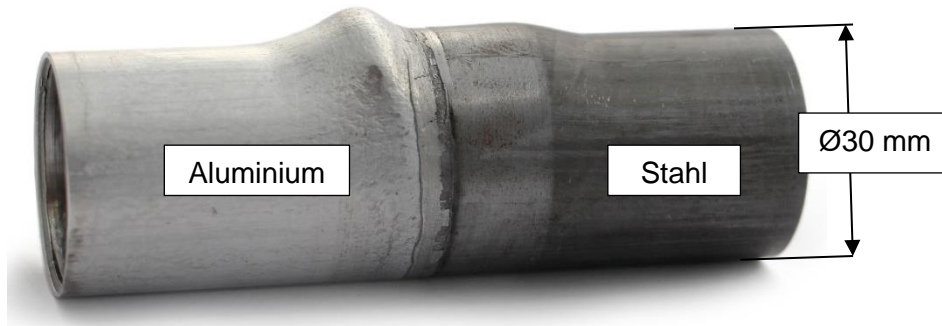


Bild 12: Real umgeformtes Stahl-Aluminium-Rohr mit umformbarer Fügezone (Bildquelle: IPH)

Das IGF-Vorhaben 18028 N der Forschungsvereinigungen Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) und der Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB) wurde über die im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

#### Literaturverzeichnis

---

- [Neu07] Neugebauer, R. (Hrsg.): Hydro-Umformung. Springer-Verlag, Berlin u. a. 2007.
- [Sch99] Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik. Springer-Verlag, Berlin u. a. 1999.
- [VDI99] Richtlinie VDI 3146, Blatt 1 (Entwurf): Innenhochdruck-Umformen – Grundlagen. Düsseldorf, VDI, 1999.

#### Kontaktdaten

---

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH  
Hollerithallee 6 | 30419 Hannover

☎ +49 (0)511 27976-0 | @ info@iph-hannover.de | 🌐 www.iph-hannover.de