

EFB-Merkblatt Nr. 5712

## **Innenhochdruck-Umformung höchstfester Aluminiumlegierungen**

EFB-Facharbeitskreis: Technologie (Feinbleche)  
Stand: Mai 2024

Dieses Merkblatt wurde durch die Forschungseinrichtungen *Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Chemnitz* und *dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg* erstellt und wird als wichtige Erkenntnisquelle empfohlen.

Die Anwender und Anwenderinnen haben jeweils zu prüfen, inwieweit der Inhalt auf ihre speziellen Fälle anwendbar ist und ob die vorliegende Fassung Gültigkeit besitzt. Die Haftung der Erstellenden, der an der Ausarbeitung und Freigabe Mitwirkenden sowie der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. ist ausgeschlossen.

Bezug über <https://shop.efb.de>

© EFB Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V.  
Lothringer Str. 1 | 30559 Hannover  
Fon +49 (511) 971 75-0 | Fax +49 (511) 971 75-19 | [www.efb.de](http://www.efb.de)

**Nachdruck und Kopie, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers**

## Inhalt

Schlagworte.....	2
1 Ziel und Zweck des Merkblatts .....	3
2 Grundlagen.....	3
2.1 Abkürzungs- und Formelverzeichnis .....	3
2.2 Stand der Technik .....	3
3 Werkstoffcharakterisierung.....	5
3.1 Adaptierte Halbzeugcharakterisierung im Zugversuch .....	5
3.1.1 Anlieferungszustand .....	5
3.1.2 Charakterisierung der Wärmebehandlungsrouten .....	5
3.2 Prozessnahe Materialcharakterisierung im Rohraufweitversuch .....	6
3.2.1 Versuchsaufbau und Werkzeugkonzept.....	6
3.2.2 Experimentelle Ergebnisse.....	7
4 Prozessauslegung .....	8
5 Experimentelle Versuchsdurchführung .....	9
5.1 Versuchsaufbau.....	9
5.2 Ergebnisse.....	10
6 Bauteilcharakterisierung.....	11
7 Einsatzgrenzen, Gültigkeitsbereiche, Kennwerte bei Anwendungen und Prozessen .....	12
8 Literatur .....	13
Forschungseinrichtungen .....	14
Beteiligte Unternehmen.....	14

## Schlagworte

- (1) Hydroforming, Innenhochdruck-Umformung, IHU, Warmumformung, hochfest, Aluminium, 7xxx, Wärmebehandlung

## 1 Ziel und Zweck des Merkblatts

- (2) Dieses Merkblatt richtet sich an Hersteller von Rohr- und Hohlprofilbauteilen, die rohrverarbeitende Industrie, Anlagenhersteller für Rohr- und Blechverarbeitung, Automobilzulieferer und Unternehmen anderer Branchen sowie Unternehmen der Hydroforming-Industrie, die Profilbauteile aus hochfesten Aluminiumlegierungen der 7xxxer Serie mit temperaturgestützten Prozessrouten, wie dem W-Temper Umformen und dem Umformen unter Abschreckbedingungen, herstellen oder einsetzen wollen.
- (3) Das Merkblatt beinhaltet Empfehlungen zur Methodenentwicklung von temperaturgestützten IHU-Prozessen zur Herstellung komplexer Rohrbauteile aus Aluminiumlegierungen der 7xxxer Serie. Besonderes Augenmerk wird auf die prozessnahe Materialcharakterisierung, die Prozesssimulation sowie die experimentelle Versuchsdurchführung zur Prozessfensteridentifikation gelegt.
- (4) Das Merkblatt soll eine Übersicht zu möglichen Prozessrouten, der Vorgehensweise zur methodischen Entwicklung sowie eine Bewertung der Prozessrouten W-Temper-Umformung und Abschreckumformen hinsichtlich einer industriellen Implementierung geben. Das Merkblatt bezieht sich auf das IGF-Vorhaben 21434 BG „Innenhochdruck-Umformung höchstfester Aluminiumlegierungen“ [1].

## 2 Grundlagen

### 2.1 Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
HFQ	Hot Form Quench
IHU	Innenhochdruck-Umformung

Kurzzeichen	Einheit	Bezeichnung
$k_f$	MPa	Fließspannung
$R_m$	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Dehngrenze
$\varphi$	-	Umformgrad
$\mu$	-	Reibzahl nach Coulomb

### 2.2 Stand der Technik

- (5) Aluminiumlegierungen der 7xxx Serie gehören zu den ausscheidungshärtbaren Legierungen. Sie können durch thermisch aktivierte Ausscheidungs Vorgänge im Rahmen einer Auslagerungsbehandlung so behandelt werden, dass Festigkeiten von bis zu 550 MPa (Beispiel EN AW-7075 T6) eingestellt werden können [2].
- (6) Durch eine Erhöhung der Umformtemperatur oder durch eine vorgeschaltete Wärmebehandlung kann die Fließspannung dieser Legierungen herabgesetzt und das Umformvermögen erheblich verbessert werden [3]. Auf dem Gebiet der Warmumformung untersuchten Kumar et al. [4] sowie Shabadi et al. [5] die hochfeste Aluminiumlegierung EN AW-7020.
- (7) Es konnte gezeigt werden, dass dieser Werkstoff mit einer Festigkeit von 400 MPa bei Raumtemperatur eine Bruchdehnung von 22 % [5] aufweist und diese auf 40 % unter isothermer Umformung bei 450 °C (Dehnrates  $0,1 \text{ s}^{-1}$ ) gesteigert werden kann [6]. Die kupferhaltige Legierung EN AW-7075 wurde von Tajally et al. [6], Jenab et al. [7] sowie Sotirov et al. [8]

und Wang et al. [9] hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen untersucht.

- (8) Der Wärmebehandlungszustand ist bei 6xxx und 7xxx Aluminiumlegierungen abhängig von der Umformtemperatur sowie der Abkühlung und beeinflusst die resultierenden mechanischen Eigenschaften der Bauteile signifikant.

#### **Abschreckumformen – Hot Form Quench:**

- (9) Um einerseits ein verbessertes Umformvermögen einzustellen und andererseits eine hohe finale Festigkeit zu erreichen, wurde 2005 von Garret et al. eine neue Prozessführungsstrategie vorgestellt, welche sich an das Presshärten von Mangan-Bor-Stählen anlehnt [10]. Dabei werden die Aluminiumblechhalbzeuge nach Lösungsglühen und dem Transfer vom Ofen in die Presse im kalten Werkzeug umgeformt und gleichzeitig abgeschreckt.
- (10) Foster et al. [11] meldeten diesen Prozess 2009 zum Patent an und ließen sich den Begriff Hot Form Quench (HFQ) schützen. Die Literatur bietet eine Vielzahl an Untersuchungen zum HFQ aushärtbarer Aluminiumblechwerkstoffe.
- (11) In [12] wurde mittels Abschreckumformung das Umformvermögen verschiedener 5xxx, 6xxx und 7xxx Aluminiumlegierungen im Vergleich zur Kaltumformung um bis zu 50 % gesteigert. Numerisch und experimentell wurde das HFQ unter anderem von Klein [13] anhand der Legierung EN AW-6082 untersucht, wonach das Versagen des Werkstoffs beim Umformen stark dehnratenabhängig ist. Die Entwicklung seriennaher Technologien zur Anwendung des Abschreckumformens hatte das Projekt „LoCoLite“ zum Ziel [14].

#### **W-Temper-Umformen:**

- (12) Eine weitere Prozessroute stellt das Umformen im lösungsgeglühten, abgeschreckten und kaltausgelagerten Zustand dar (sog. W-Temper-Zustand), welche bereits 2011 von Smeyers et al. vorgestellt wurde [15]. Im Gegensatz zum Abschreckumformen wird der Werkstoff nach der Wärmebehandlung unter Zuhilfenahme von beispielsweise Wasser abgeschreckt und anschließend kalt umgeformt. Beide Prozessstrategien führen zu einer signifikanten Erweiterung der Formgebungsgrenzen von Aluminiumblechwerkstoffen.

#### **Innenhochdruck-Umformen:**

- (13) Ein äußerst bewährtes Verfahren zur Herstellung von geometrisch anspruchsvollen Crashbauteilen aus Rohren und Profilen ist das Innenhochdruck-Umformen. Strukturbedingt weisen geschlossene im Vergleich zu offenen Profilen ein höheres Flächenträgheitsmoment und somit eine höhere Steifigkeit auf. Werkstoffunabhängig können somit bei gleichen Steifigkeitsanforderungen leichtere Bauteile durch die Verwendung geschlossener Profile hergestellt werden.
- (14) Da auch bei stranggepressten Aluminiumlegierungen die Formgebung begrenzt ist, wird die temperierte Innenhochdruck-Umformung (T-IHU) eingesetzt, um das Formgebungsvermögen von Aluminiumrohren zu verbessern. Bereits 2005 wurde am Fraunhofer IWU das sogenannte T-IHU von Aluminium- und Magnesium-Hohlprofilen bis 300 °C Werkstücktemperatur untersucht [16].
- (15) 2008 war in Elsenheimer et al. [17] am PtU Darmstadt die Warm-Innenhochdruck-Umformung der Aluminiumlegierung EN AW-6060 bei Temperaturen zwischen 400 °C und 580 °C Forschungsgegenstand. Lee et al. [18] analysierten die Umformbarkeit von stranggepressten hochfesten Rohren der Legierung EN AW-7075 zwischen Raumtemperatur und 300 °C.

- (16) Durch Zwischenglühen konnte bei [19] ebenfalls einer unzureichenden Umformbarkeit begegnet werden, jedoch bestand hier die Gefahr der Grobkornbildung, da bei der Umformung nicht von einer homogenen Formänderungsverteilung ausgegangen werden kann. In [20] werden Untersuchungsergebnisse zur Umformbarkeit von Aluminiumrohren der Legierung EN AW-7003 in Abhängigkeit des Umformdruckes und des Nachschiebeweges des Rohres dargestellt.
- (17) Bei der Auslegung von Innenhochdruck-Umformprozessen kann grundlegend auf für Blechhalbzeuge entwickelte Prozess- und Wärmebehandlungsrouten als Ausgangspunkt zurückgegriffen werden. Eine 1:1-Übertragbarkeit ist jedoch nicht gegeben, da bspw. durch die Verwendung von Rohrhalbzeugen sowie gasförmigen Wirkmedien zur Kraftübertragung das Abkühlverhalten der Halbzeuge, die Spannungszustände während der Umformung sowie die tribologischen Bedingungen teils signifikant abweichen.
- (18) Das Erwärmen und Abkühlen der Halbzeuge gestaltet sich dahingehend als herausfordernd, dass die verwendeten Profilbauteile für die Automobilindustrie in der Regel deutlich höhere Wanddicken aufweisen als konventionelle Blechbauteile. Für das Abschreckumformen im IHU-Prozess ist entsprechend der einseitigen Wärmeleitung (nur Profilaußenseite hat Werkzeugkontakt) mit gradierten Eigenschaften über die Wanddicke zu rechnen.

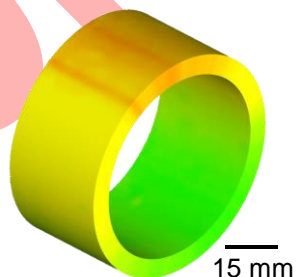
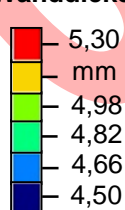
### 3 Werkstoffcharakterisierung

#### 3.1 Adaptierte Halbzeugcharakterisierung im Zugversuch

##### 3.1.1 Anlieferungszustand

- (19) Bei den untersuchten Halbzeugen handelt es sich um stranggepresste Rohre der Legierungen ENAW-7020 und ENAW-7075 im T6-Zustand. Diese weisen einen Außendurchmesser von 60 mm und eine Wanddicke von 5 mm auf. Aufgrund der besseren Halbzeugverfügbarkeit beschränken sich die nachfolgenden Betrachtungen auf ENAW-7020. Die Halbzeugeigenschaften sind nachfolgend in Abbildung 1 dargestellt.
- (20) In tangentialer Richtung liegt ein Wanddickengradient mit Werten zwischen 4,93 mm und 5,18 mm vor, zudem existieren Kornorientierungen in axialer und tangentialer Richtung. Beide Effekte sind auf das Strangpressen zurückzuführen. Diese sind für die Innenhochdruck-Umformung jedoch von hoher Relevanz, da diese zu einer inhomogenen Bauteilformung führen und an der Stelle mit der geringsten Wanddicke die höchste Rissgefahr besteht.

Wanddicke



n = 3	Korngröße in $\mu\text{m}$	Brinellhärte HB
<b>Axial</b>	$7,00 \pm 0,94$	$121,7 \pm 2,4$
<b>Radial</b>	$4,31 \pm 0,29$	-
<b>Tangential</b>	$9,39 \pm 2,46$	$121,0 \pm 1,3$

Abbildung 1 Halbzeugeigenschaften von EN AW-7020 T6

##### 3.1.2 Charakterisierung der Wärmebehandlungsrouten

- (21) Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften rohrförmiger Halbzeuge ist mithilfe von Zugversuchen möglich. Hierbei können die Zugproben mittels Laserschneiden aus den Rohrhalbzeugen entnommen werden. Es

muss jedoch eine Abschirmung der Laserstrahlung im Rohrinternen vorgesehen werden, ebenso wird die frästechnische Nachbearbeitung der Schnittkanten empfohlen.

- (22) Aufgrund des gewölbten Probenquerschnitts ist die Verwendung gewölbter Spannbacken empfehlenswert [21]. Für die im Projekt untersuchten Probenmaße konnte eine Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse mit flachen Zugproben numerisch und experimentell sichergestellt werden [22].
- (23) Daher eignet sich diese Vorgehensweise zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften in axialer Rohrrichtung. Die untersuchten Prozessrouten sind die W-Temper-Umformung und das Abschreckumformen. Bei beiden Varianten wurden die Zugstäbe in einem Umluftofen lösungsgeglüht sowie abgeschreckt und anschließend in einer thermomechanischen Versuchsanlage geprüft. Dabei zeigte sich, dass eine Variation der Lösungsglüh-temperatur zwischen 460 °C und 480 °C nur einen geringfügigen Einfluss auf die Materialeigenschaften hat.
- (24) Ähnliches konnte für die Lösungsglühdauer (5 bis 15 Minuten) und die anschließende Kaltauslagerungsdauer (15 bis 45 Minuten) ermittelt werden. Die für beide Prozessrouten erzielten mechanischen Eigenschaften sind nachfolgend in Abbildung 2 dargestellt.

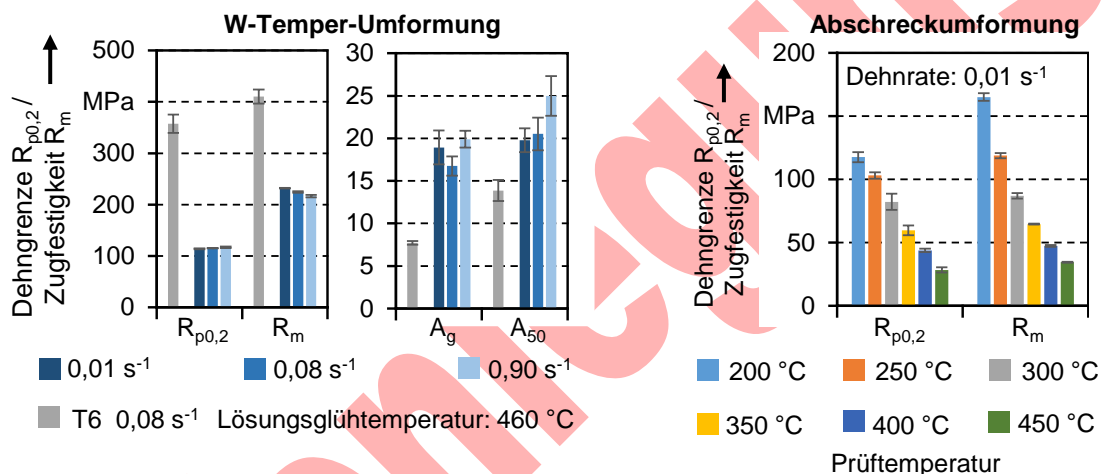


Abbildung 2 Mechanische Eigenschaften für das W-Temper-Umformen und das Abschreckumformen

- (25) Dabei zeigte sich, dass eine Variation der Lösungsglüh-temperatur zwischen 460 °C und 480 °C nur einen geringfügigen Einfluss auf die Materialeigenschaften hat. Ähnliches konnte für die Lösungsglühdauer (5 bis 15 Minuten) und die anschließende Kaltauslagerungsdauer (15 bis 45 Minuten) ermittelt werden.
- (26) Die für beide Prozessrouten erzielten mechanischen Eigenschaften sind in Abbildung 2 dargestellt. Bei der W-Temper-Umformung wurde eine negative und bei der Abschreckumformung eine positive Dehnratensensitivität ermittelt. Sowohl mit der W-Temper-Umformung als auch mit dem Abschreckumformen wird eine signifikante Reduktion der Festigkeit sowie eine Erhöhung der Gleichmaßdehnung erreicht. Somit eignen sich beide Routen für die Umformung von Rohren aus EN AW-7020.

## 3.2 Prozessnahe Materialcharakterisierung im Rohraufweitversuch

### 3.2.1 Versuchsaufbau und Werkzeugkonzept

- (27) Für eine prozessnahe Materialcharakterisierung wurde ein Rohraufweitprüfstand entwickelt und aufgebaut. Entsprechend Abbildung 3 wird das zu prüfende Rohr in wechselbare Werkzeugeinsätze eingelegt, welche eine freie Aufweitung in der Rohrmitte ermöglichen. Die Rohrenden werden über

konische Axialstempel aufgeweitet und abgedichtet. Sowohl die Werkzeuge als auch das Wirkmedium sind beheizbar.

- (28) Zur Ableitung von Fließkurven werden der Innendruck als auch die Dehnungen an der Rohroberfläche mittels eines optischen 3D-Dehnungsmesssystem aufgezeichnet. Mithilfe eines analytischen Ansatzes wird die Fließspannung bestimmt. Zur Validierung dieses Ansatzes eignet sich eine numerische Simulation des Prozesses zur Bereitstellung von Vergleichsdaten. Diese können dann mit den analytisch bestimmten Werten abgeglichen werden.
- (29) Zusätzlich empfiehlt es sich anhand von experimentellen Versuchen die Aufwölbung in Abhängigkeit des Drucks zu validieren. Details zum analytischen Ansatz können dem zugehörigen Abschlussbericht entnommen werden [1].

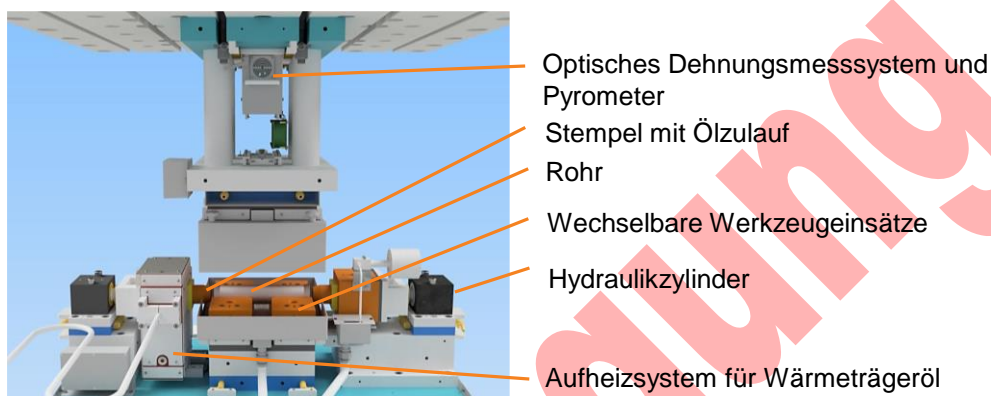


Abbildung 3 Aufbau des Rohraufweitprüfstands

### 3.2.2 Experimentelle Ergebnisse

- (30) In Abhängigkeit des Werkstoffs und des nötigen Innendrucks können unterschiedlich hohe Dichtkräfte über die Axialstempel aufgebracht werden. Daher wurde der Einfluss der Dichtkraft für 85 kN und 125 kN auf die resultierende Fließspannung evaluiert. Diese hat im Rahmen der Untersuchungen keinen signifikanten Einfluss.
- (31) Durch die Variation der Druckaufbaurrate können unterschiedliche Dehnraten geprüft werden. Für ENAW-7020 wurden im W-Zustand die Dehnraten  $0,039 \text{ s}^{-1}$  und  $0,067 \text{ s}^{-1}$  geprüft. Analog zum Zugversuch liegt eine schwache negative Dehnratensensitivität vor. Ein Abgleich der abgeleiteten Fließkurven ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Approximation erfolgte für beide Versuche infolge der geringsten Abweichungen mittels Hockett-Sherby.

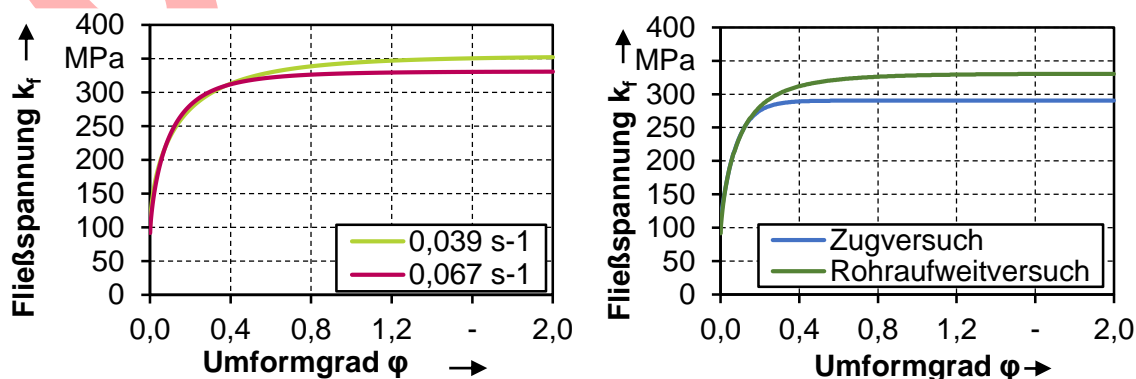


Abbildung 4 Experimentelle Ergebnisse aus dem Rohraufweitversuch

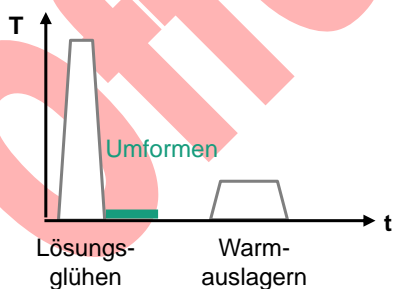


- (32) Im Vergleich zum Zugversuch ist die Anfangsfließspannung im Rohraufweitversuch niedriger. Diese liegt bei 91,7 MPa im Vergleich zu 114,9 MPa, die maximale Fließspannung hingegen erreicht höhere Werte als im Zugversuch. Im Gegensatz zum Zugversuch liegt die Hauptformänderung nicht in axialer Rohrrichtung, sondern in tangentialer Richtung vor, vergleichbar zum konventionellen Rohr-IHU.
- (33) Der Formänderungszustand ist hierbei biaxial, jedoch nahe des plane-strain-Zustands. Folglich ist dieses Charakterisierungsverfahren sehr prozessnah. In Verbindung mit höheren gemessenen Bruchdehnungen hat dieses Verfahren das Potential zur verbesserten numerischen Prozessabildung für die Rohr-IHU.
- (34) Dem gegenüber steht die deutlich aufwändigere Anlagentechnik im Vergleich zum Zugversuch. Dabei wurde eine hydraulische Presse mit einem Hydraulikaggregat sowie ein eigens dafür entwickeltes Werkzeug verwendet. Daraus ergeben sich höhere Kosten und Prüfzeiten. Zur Ermittlung der maximalen Dehnungen wird zudem empfohlen, die Rohrseite mit der geringsten Wanddicke ins Sichtfeld des optischen Messsystems zu legen. Dies erfordert eine präzise Lokalisierung der dünnsten Wanddicke.

## 4 Prozessauslegung

- (35) Bei der W-Temper-Umformung (Prozess A1) erfolgt das Abschrecken der Halbzeuge nach Lösungsglühen im Wasserbad. Um eine Festigkeitssteigerung durch Kaltauslagerung möglichst gering zu halten, wird innerhalb eines begrenzten Zeitfensters das abgeschreckte Halbzeug im kalten Werkzeug umgeformt. Beim Prozess A2 wird das noch temperierte Halbzeug nach Ofenentnahme in das kalte Umformwerkzeug eingelegt, umgeformt und gleichzeitig abgekühlt (Abschreckumformen).
- (36) Im Anschluss an die Formgebung erfolgt bei beiden Prozessen ein Warmauslagerungsvorgang, um die finalen Bauteileigenschaften einzustellen. Ziel ist es, eine hohe Festigkeit bei ausreichender Bruchdehnung von beispielsweise > 5 % der Bauteile zu erreichen und dabei die Prozesskette möglichst kurz zu halten. Die Prozessrouten sind schematisch in Abbildung 5 abgebildet.

**Prozess A1:** IHU nach Lösungsglühen und Abschrecken (W-temper Umformung)



**Prozess A2:** Integration des Abschreckens in den IHU-Prozess (Abschreckumformen)

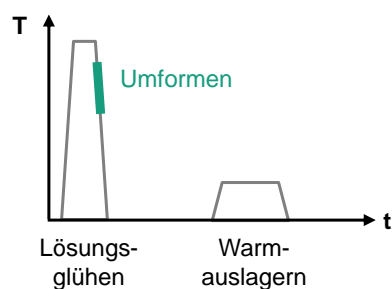


Abbildung 5 Untersuchte Prozessrouten A1 (W-Temper Umformen) und A2 (Abschreckumformen)

- (37) Beide Prozessrouten können in Verbindung mit dem Innenhochdruck-Umformen numerisch abgebildet werden, wie auch in [23] und [24] beschrieben.
- (38) Für das W-Temper-Umformen wird ein isothermes Simulationsmodell empfohlen, das Werkstoffdaten analog den Charakterisierungsversuchen in Abschnitt 3.1.2 und 3.2 nutzt. Die Materialmodelle beruhen demnach auf Werkstoffdaten bei Raumtemperatur nach Einstellung des W-Temper-Zustandes. Wie für IHU-Prozesse üblich, ist ein weites Dehnratenspektrum abzubilden, um eine ausreichend hohe Vorhersagegenauigkeit zu erreichen.



- (39) Im vorgestellten Projekt sind Dehnraten bis zu  $1,0 \text{ s}^{-1}$  aufgetreten, was im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung auch geprüft wurde. Geometrieabhängig können jedoch auch deutlich höhere Dehnraten auftreten, was bei der Prozessauslegung entsprechend zu berücksichtigen ist.
- (40) Für das Abschreckumformen wird ein transientes Simulationsmodell empfohlen, das sowohl temperatur- als auch dehnratenabhängige Materialmodelle voraussetzt. Die Ableitung dieser Materialmodelle basiert auf Charakterisierungsversuchen, wie sie in Abschnitt 3.1.2 und 3.2 beschrieben werden. Um das Abschreckverhalten der Halbzeuge zu berücksichtigen, ist die druckabhängige Wärmeübertragung zwischen Halbzeug und Werkzeug im Simulationsmodell zu berücksichtigen. Die Reibung wurde während des temperierten IHU-Prozesses mit  $\mu = 0,35$  berücksichtigt.
- (41) Im vorgestellten Projekt wurden numerische Prozessbetrachtungen mit unterschiedlichen Simulationsprogrammen durchgeführt. Je nach zu betrachtender Prozessroute sind Programme zu nutzen, die eine Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit (im Falle des Abschreckumformens) berücksichtigen können.
- (42) Hinsichtlich der zu untersuchenden Rohrwand-/Blechkicken ist mit zunehmender Dicke die Verwendung von Volumen- statt Schalenmodellen indiziert, um Ausdünnungseffekte entsprechend abbilden zu können. Auf Basis der im Projekt erreichten Vorhersagegenauigkeiten der numerischen Prozesssimulation kann zusammengefasst werden, dass die für die Blechumformung etablierten Prozessrouten W-Temper-Umformen und Abschreckumformen mit gängigen Simulationsprogrammen auch für das Innenhochdruck-Umformen abgebildet werden können.

## 5 Experimentelle Versuchsdurchführung

### 5.1 Versuchsaufbau

- (43) Ein möglicher Versuchsaufbau für die Durchführung von W-Temper-Umformung und Abschreckumformung ist in Abbildung 6 links zu sehen. Es empfiehlt sich für eine industrielle Anwendung, dass der Ofen für das Lösungsglügen der Halbzeuge im Falle des W-Temper-Umformens in Nähe der Abkühlstation und beim Abschreckumformen in unmittelbarer Nähe zum Umformwerkzeug positioniert ist.
- (44) So kann entweder schnell mit Wasser oder im Umformwerkzeug abgeschreckt werden. Eine längere Abkühlung an Luft ist gerade für abschreckraten-sensitive Legierungen, wie z. B. EN AW-7075, zu vermeiden.



		Prozessroute	
		I: W-Temper-Umformen	II: Abschreckumformen
Rohrhalbzeuge	Werkstoff	EN AW-7020 T6, EN AW-7075 (exemplarisch)	
	Rohrmaße	$\varnothing = 60 \text{ mm}$ , $s = 5 \text{ mm}$ , $l = 300 \text{ mm}$	
	Glühbehandlung	500 °C, Umluftofen, 60 min Heiz- und Haltedauer	
Umformwerkzeug	Temperatur	20 °C Raumtemperatur	
	Radienbereiche	R8, R14, R19, R24	
Prozess	max. Innendruck in MPa	80, 180, 220, 270, 320	117,5
	Druckaufbauraten in MPa/s	5, 25, 45	99

Abbildung 6 (links) Experimenteller Versuchsaufbau für IHU-Versuche mit W-Temper-Umformen sowie Umformen unter Abschreckbedingungen. (rechts) Versuchsplan und Prozessbedingungen

- (45) Die Aufheizdauer ist von Profilwanddicken und Erwärmungskonzept abhängig. Gerade für dickwandige Profile sind Schnellerwärmungskonzepte, wie z. B. konduktive Bauteilerwärmung, unabhängig oder in Kombination mit Homogenisierungsöfen indiziert.

- (46) Für die experimentelle Versuchsdurchführung im vorgestellten Projekt wurden die Rohre nach Entnahme aus dem Ofen im Wasserbad für 5 bis 10 s abgeschreckt. Die Prozessparameter für beide Prozessrouten sind in Abbildung 6 rechts abgebildet. Für den Fall des Abschreckumformens wurde auf die Abkühlstation verzichtet.
- (47) Für eine Serienanwendung des Abschreckumformens ist jedoch auf eine Werkzeugkühlung zu achten, da sich im Serienbetrieb die Werkzeugaktivteile aufwärmen und sich dadurch der Temperaturgradient zwischen heißem Rohr und kaltem Werkzeug verschlechtert, wodurch sich die Abschreckraten reduzieren.

## 5.2 Ergebnisse

- (48) In Abhängigkeit der gewählten Prozessroute unterscheiden sich die maximalen Innendrucke im IHU-Prozess, was wiederum zu unterschiedlich hohen notwendigen Schließ- und Dichtkräften führt. Das ist für die Auslegung eines industriellen Prozesses frühzeitig abzuschätzen. Das Abschreckumformen benötigt im vorgestellten Beispiel nur etwa ein Drittel des benötigten Innendrucks im Vergleich zum W-Temper-Umformen.
- (49) Darüber hinaus unterscheiden sich die genutzten Wirkmedien in beiden Prozessrouten. Während beim W-Temper-Umformen eine Wasser-Öl-Emulsion zum Einsatz kommt, wird für das Abschreckumformen Stickstoff genutzt, der auch bei höheren Einsatztemperaturen beständig ist. Das ist entsprechend in der Kostenbetrachtung und beim Vergleich beider Prozessrouten zu berücksichtigen. Die Druckverlaufskurven und die daraus resultierende Dehnrate sind in Abbildung 7 dargestellt.
- (50) Die Variation der Druckaufbauraten entsprechend des Versuchsplans in Abbildung 6 (rechts) führt zu keinen Unterschieden in der Ausformung und Ausdünnung der Bauteile, weshalb von keiner Dehnratensensitivität im betrachteten Dehnratenbereich auszugehen ist. In Abbildung 9 (links) ist die Druckverlaufskurve für das W-Temper-Umformen abgebildet. Es wird ein Innendruck von 320 MPa mit einer Druckaufbauraten von 45 MPa/s erreicht.
- (51) In Abbildung 7 (rechts) ist der Druckverlauf für das Abschreckumformen zu sehen. Dabei wird deutlich, dass die Druckaufbauraten gerade zu Beginn des Umformprozesses deutlich höher ist im Vergleich zum W-Temper-Umformen, um schnellstmöglich einen Kontakt zwischen Halbzeug und Aktivteilfläche und damit den direkten Wärmeübergang zum Abschrecken einzustellen.

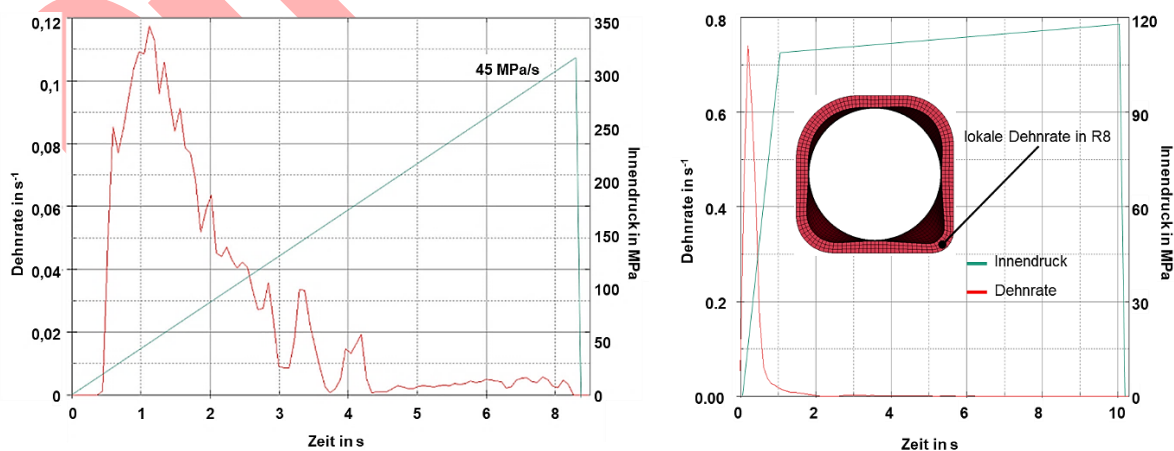


Abbildung 7 Simulierter Dehnraten-Innendruck-Zeit-Verlauf für das W-Temper-Umformen (links) und Abschreckumformen (rechts). Auswertung der Dehnraten exemplarisch im kritischsten Bereich des Demonstrators

- (52) In Abhängigkeit der Rohrwanddicke kann ein Halten des Innendrucks über mehrere Sekunden notwendig sein, um eine durchgehende Abkühlung des Bauteils zu gewährleisten.
- (53) In den Versuchsreihen konnten mit beiden Prozessrouten und sowohl mit EN AW-7020 als auch EN AW-7075 defektfreie Demonstratorbauteile hergestellt werden, die lokal bis zu 40 % plastische Dehnung aufwiesen.

## 6 Bauteilcharakterisierung

- (54) Zur Charakterisierung der finalen Bauteileigenschaften eignet sich eine einfache Demonstratorgeometrie, welche die Extraktion von Proben ermöglicht. Im zugehörigen Projekt wurde eine einfache Tonnengeometrie entsprechend Abbildung 8 a) herangezogen.
- (55) Nachfolgend sind die Ergebnisse für ENAW-7020 nach W-Temper-Umformung und Warmauslagerung abgebildet. Aufgrund der Rohraufweitung wurde der tangentielle Wanddickengradient vergrößert. Zudem zeigten Gefügeuntersuchungen, dass ein starkes Kornwachstum hervorgerufen wurde.
- (56) Dies könnte auf langsame Aufheizraten beim Lösungsglügen zurückzuführen sein. Daher wird eine schnelle Aufheizgeschwindigkeit für das Lösungsglügen empfohlen. In diesem Zusammenhang wurde kein statistisch signifikanter Einfluss der Innenhochdruck-Umformung auf die Korngröße identifiziert. Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Warmauslagerungsparameter wurden Zugstäbe aus den Demonstratoren geschnitten, die ermittelten Kennwerte sind in Abbildung 8 c) dargestellt.

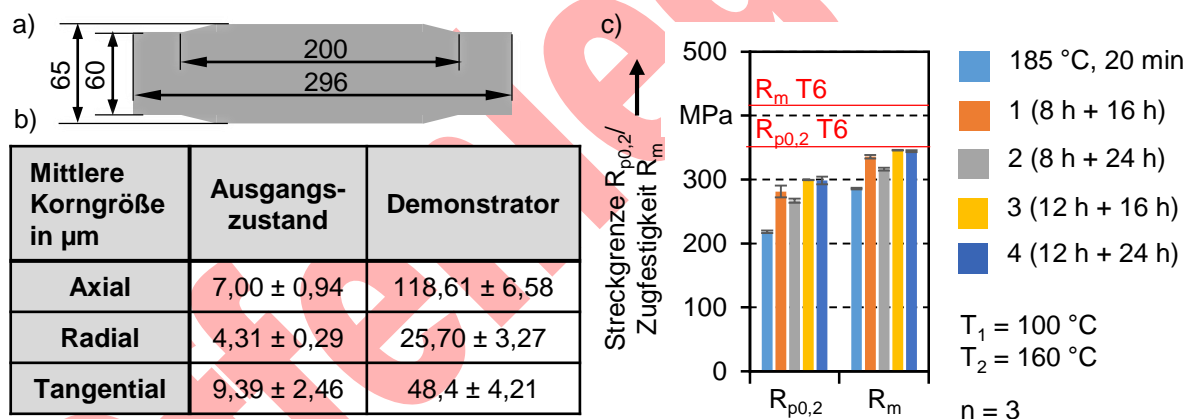


Abbildung 8 Eigenschaften der Demonstratorbauteile: a) Geometrie, b) Korngröße und c) mechanische Eigenschaften

- (57) Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Warmauslagerungsparameter wurden Zugstäbe aus den Demonstratoren geschnitten, die ermittelten Kennwerte sind in Abbildung 8 c) dargestellt. Die einstufige Warmauslagerung mit einer Dauer von 20 Minuten generiert die niedrigsten Festigkeitswerte aufgrund der kurzen Wärmebehandlungsdauer.
- (58) Bei den zweistufigen Auslagerungsbehandlungen steigt die Festigkeit tendenziell mit zunehmender Auslagerungsdauer. Eine längere Wärmebehandlungsdauer in Stufe 1 führt zu einer gesteigerten Verfestigung, während Stufe 2 eine Entfestigung bewirkt. Dies könnte auf eine Überalterung infolge der hohen Wärmebehandlungstemperatur zurückzuführen sein. Zum Erreichen der maximalen Festigkeit ist eine lange Wärmebehandlung in Stufe 1 zielführend.
- (59) Die Vorverfestigung durch den IHU-Prozess bewirkt zudem eine leichte Entfestigung. Möglicherweise führt die gesteigerte Versetzungsdichte zu

einer Überalterung der Ausscheidungen. Generell werden die hohen Festigkeiten des Ausgangszustands T6 nicht erreicht. Ursache hierfür könnte das Kornwachstum und eine Überalterung der Ausscheidungen durch die zweistufige Auslagerung sein [25].

- (60) Für das Abschreckumformen mit anschließender Warmauslagerung bei 12 und 24 Stunden wurden leicht reduzierte Festigkeitswerte gemessen. Die Dehngrenze sank hierbei auf 273 MPa, die Zugfestigkeit auf 337 MPa. Die erzielbaren Festigkeiten sind demnach beim W-Temper-Umformen höher.

## 7 Einsatzgrenzen, Gültigkeitsbereiche, Kennwerte bei Anwendungen und Prozessen

- (61) Wie für die Aluminiumumformung im Allgemeinen bereits bekannt, ist auch für das IHU in beiden vorgestellten Prozessvarianten mit einem hohem Werkzeugverschleiß zu rechnen. So wurden auch im Rahmen der Versuchsreihen Aluminiumadhäsionen an den Dichtstempeln und Einlaufbereichen des Werkzeugs deutlich, wie in Abbildung 9 ersichtlich.
- (62) In Abhängigkeit der geforderten Oberflächenqualität der herzustellenden Bauteile und der zu erreichenden Stückzahlen sind Schmier- und Trennmittel oder Werkzeugbeschichtungen in Betracht zu ziehen.

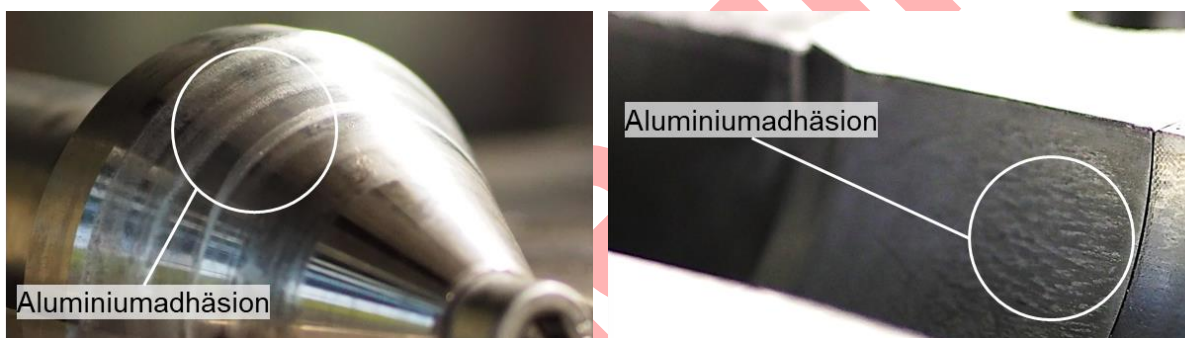


Abbildung 9 (links) Aluminiumablagerungen am Dichtstempel. (rechts) Aluminiumablagerungen an den Einlaufbereichen im Umformwerkzeug.

- (63) Während beim W-Temper-Umformen die Anhaftung vor allem durch hohe Dichtstempel- und Umformkräfte begünstigt wird, sorgt beim Abschreckumformen die hohe Temperatur des Halbzeugs beim Einlegen für eine erhöhte Anhaftungsneigung.
- (64) In Abhängigkeit der gewählten Bauteilgeometrie und Prozessroute sind große Unterschiede hinsichtlich des wirkenden Innendrucks anzunehmen. Die daraus resultierenden notwendigen Schließ- und Dichtkräfte und die unterschiedlichen prozessabhängigen Wirkmedien setzen prozessangepasste Anlagentechnik voraus. Darüber hinaus sollte in der Prozessbewertung der jeweilige Wirkmedieneinsatz als möglicher Kostentreiber berücksichtigt werden.
- (65) Zum Erreichen einer möglichst hohen Verfestigung nach der Umformung und der Auslagerung müssen einige Einflussfaktoren beachtet werden. Für das Lösungsglügen ist eine möglichst hohe Aufheizrate zu wählen, um Grobkornbildung zu vermeiden. Parameter wie die Lösungsglühdauer und -temperatur sind robust gegenüber geringfügigen Schwankungen.
- (66) Aufgrund der Umformung beim IHU wird der Ausscheidungsprozess während der Warmauslagerung beschleunigt, ebenso durch hohe Temperaturen. Dies wurde auch durch Hebbar et al. [26] nachgewiesen, die durch eine geeignete Wahl der Warmauslagerungsparameter dennoch den T6-Zustand erreichten. Bei vorherigem Abschreckumformen wird eine geringfügig niedrigere Festigkeit als beim W-Temper-Umformen erzielt.



## 8 Literatur

- [1] TRÂN, R.; REBLITZ, J.; HAASE, R.; MERKLEIN, M.; KRÄUSEL, Verena; DROSSEL, Welf-Guntram: *Innenhochdruck-Umformung höchstfester Aluminiumlegierungen*. EFB-Forschungsbericht 599; Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover; ISBN: 978-3-86776-658-6; 2023.
- [2] BRAUNER, Jambolka; LEIBER, Rolf: *Aluminium-Premium-Werkstoffe für den Automobilbau* (Werkstoffe im Automobilbau - Konstruktiver und werkstofflicher Leichtbau im Dialog). Stuttgart, 16.04.2013
- [3] ABEDRABBO, Nader; POURBOGHRAT, Farhang; CARSLY, John: *Forming of aluminum alloys at elevated temperatures – Part 1: Material characterization*. In: *International Journal of Plasticity* 22 (2006), Nr. 2, S. 314–341
- [4] KUMAR, M.; SOTIROV, N.; CHIMANI, C. M.: *Investigations on warm forming of AW-7020-T6 alloy sheet*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014), Nr. 8, S. 1769–1776
- [5] SHABADI, R.; SUWAS, S.; KUMAR, S.; ROVEN, H. J.; DWARKADASA, E. S.: *Texture and formability studies on AA7020 Al alloy sheets*. In: *Materials Science and Engineering: A* 558 (2012), S. 439–445
- [6] TAJALLY, Mohammad; EMADODDIN, Esmaeil: *Mechanical and anisotropic behaviors of 7075 aluminum alloy sheets*. In: *Materials & Design* 32 (2011), Nr. 3, S. 1594–1599
- [7] JENAB, A.; KARIMI TAHERI, A.: *Experimental investigation of the hot deformation behavior of AA7075: Development and comparison of flow localization parameter and dynamic material model processing maps*. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 78 (2014), S. 97–105
- [8] SOTIROV, Nikolay; SIMON, Peter; CHIMANI, Christian; UFFELMANN, Dirk; MELZER, Carsten: *Warm Deep Drawability of Peak-Aged 7075 Aluminum Sheet Alloy*. In: *Key Engineering Materials* (2012), Vol. 504-506 pp 955-960
- [9] WANG, hui; LUO, Ying-Yang; FRIEDMANN, peter; CHEN, MING-HE; GAO, LIN: *Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075*. In: *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* (2011)
- [10] GARRETT, R. P.; LIN, J.; DEAN, Trevor A.: *Solution Heat Treatment and Cold Die Quenching in Forming AA 6xxx Sheet Components: Feasibility Study*. In: *Advanced Materials Research* 6-8 (2005), S. 673–680
- [11] FOSTER, Alistair; DEAN, Trevor A.; LIN, Jianguo: *Process of forming Aluminum Alloy Sheet Components*. Veröffentlichungsnr. EP 2324137B1
- [12] MOHAMED, Mohamed S.; FOSTER, Alistair D.; LIN, Jianguo; BALINT, Daniel S.; DEAN, Trevor A.: *Investigation of deformation and failure features in hot stamping of AA6082: Experimentation and modelling*. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 53 (2012), Nr. 1, S. 27–38. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695511001374>
- [13] KLEIN, C.: *Lotus profitiert von Hot Form Quench*. URL <http://www.automobil-produktion.de/technik/produktion/>. – Aktualisierungsdatum: 2015-09-07
- [14] AP&T: *AP&T liefert die weltweit erste Produktionsanlage für die Warmumformung von Aluminium gemäß HFQ*. 2016
- [15] SMEYERS, A.; SCHEPERS, B.; BRAUNSCHWEIG, W.; BÜRGER, A.; VIEREGGE, K.: *7xxx grades for automotive applications*. In: *Aluminum International Today* (2011), S. 37–39
- [16] NEUGEBAUER, Reimund; SEIFERT, Michael: *Innenhochdruck-Umformen von Leichtmetallwerkstoffen: Bestimmung der umformtechnischen Grenzen beim temperierten Innenhochdruck-Umformen (T-IHU) von Magnesium- und Aluminiumhohlprofilen*. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 100 (2005), S. 481–489
- [17] ELSENHEIMER, D.; TAPLICK, C.; GROCHE, P.: *Warm-Innenhochdruck-Umformung von Aluminiumrohren*. In: *Werkstatttechnik online* 98, S. 775–780
- [18] LEE, Mun-Yong; SOHN, Sung-Man; KANG, Chang-Yong; SUH, Dong-Woo; LEE, Sang-Yong: *Effects of pre-treatment conditions on warm hydroformability of 7075 aluminum tubes*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 155-156 (2004), S. 1337–1343
- [19] HANICKE, L.; ET AL: *Lighter car body in aluminium with hydroforming technology*. Detroit, 1996

- [20] CERETTI, E.; CONTRI, C.; GIARDINI, C.: *Tube-hydroforming experiments on an Al 7003 extruded tube*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 177 (2006), 1-3, S. 672–675
- [21] REBLITZ, J.; WIESENMYER, S.; TRÂN, R.; MERKLEIN, M.: Investigation of Geometrical and Microstructural Influences on the Mechanical Properties of an Extruded AA7020 Tube. In: LIEWALD, Matthias; VERL, Alexander; BAUERNHANSL, Thomas; MÖHRING, Hans-Christian (Hrsg.): *Production at the Leading Edge of Technology*. Cham : Springer International Publishing, 2023, S. 439–450
- [22] REBLITZ, Jonas; REUTHER, Franz; TRÂN, Ricardo; KRÄUSEL, Verena; MERKLEIN, Marion: *Numerical and Experimental Investigations on the Mechanical Properties of Milled Specimens from an AA7020 Tube*. In: *Key Engineering Materials* 926 (2022), S. 1949–1958
- [23] TRÂN, Ricardo; REBLITZ, Jonas; HAASE, Rico; PSYK, Verena; KRÄUSEL, Verena; MERKLEIN, Marion: Hydroforming of High-Strength Aluminum Tubes with Thermo-Mechanical Manufacturing Processes. In: *The 28th Saxon Conference on Forming Technology SFU and the 7th International Conference on Accuracy in Forming Technology ICAFT*. Basel Switzerland : MDPI, S. 13
- [24] TRÂN, Ricardo; REBLITZ, J.; HAASE, Rico; MERKLEIN, M.; KRÄUSEL, Verena: *Herausforderungen, Prozessrouten und Methodenentwicklung bei der Innenhochdruck-Umformung von ausscheidungshärtbaren Aluminiumlegierungen*. EFB-Tagungsband Nr. T-53 zum Kolloquium "Blechverarbeitung von MORGEN unter den Aspekten der Nachhaltigkeit und Digitalisierung" am 08./09.Mai 2023 in Würzburg, Seite 151-172, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover; ISBN: 978-3-86776-647-0; 2023.
- [25] REBLITZ, J.; TRÂN, R.; KRÄUSEL, Verena; MERKLEIN, M.: Evaluation of the properties of AA7020 tubes generated by a heat treatment based hydroforming process. In: *Sheet Metal 2023 : Materials Research Forum LLC*, 2023 (Materials Research Proceedings), S. 221–228
- [26] HEBBAR, S.; KERTSCH, L.; BUTZ, A.: *Optimizing Heat Treatment Parameters for the W-Temper Forming of 7xxx Series Aluminum Alloys*. In: *Metals* 10 (2020), Nr. 10, S. 1361

## Forschungseinrichtungen

### Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel  
Reichenhainer Straße 88  
09126 Chemnitz

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

### Lehrstuhl für Fertigungstechnologie LFT

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein  
Egerlandstraße 13  
91058 Erlangen

## Beteiligte Unternehmen

Albert Schmutzler GbR, Aue  
AP&T Vertriebs GmbH, Burbach  
AutoForm Eng. GmbH, Dortmund  
BMW Group, Dingolfing  
Cosma Eng. GmbH, Weikersdorf  
Finow Automotive GmbH, Eberswalde  
fischer Hydroforming GmbH, Menden  
Salzgitter Hydroforming GmbH & Co. KG, Crimmitschau  
Schnupp GmbH & Co. Hydraulik KG, Bogen  
Schuler Pressen GmbH  
Siebenwurst Werkzeugbau GmbH, Zwickau