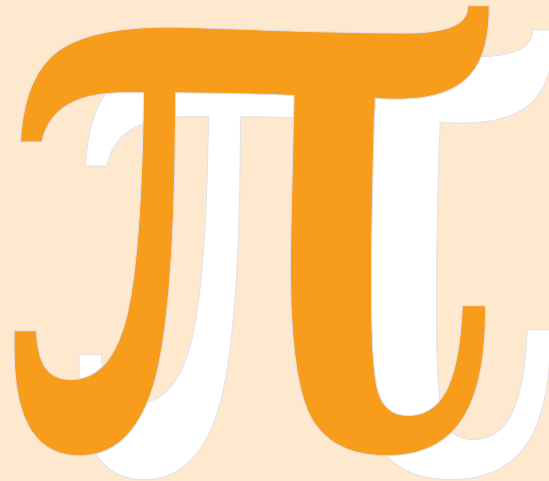


FAT 292



Innenhochdruckumformen
laserstrahlgelöteter Tailored
Hybrid Tubes aus Stahl-
Aluminium-Mischverbindungen
für den automobilen Leichtbau



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 18028 N der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

**Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter
Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-
Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau**

Laser Zentrum Hannover e.V.

Dr.-Ing. Stefan Kaieler

Institut für integrierte Produktion Hannover gGmbH

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	3
Erzielte Ergebnisse.....	3
AP1 Erstellung von Anforderungsprofilen für Lotwerkstoffe (LZH, IPH)	3
AP2 Aufbau eines Prozesskopfes zum Laserlöten mit variablen Temperaturregimen (LZH).....	4
AP3 Prozessentwicklung zum Laserstrahllöten an Flachmaterial mit und ohne Einsatz von Flussmittel (LZH)	6
AP4 Umformversuche an laserstrahlgelötetem Flachmaterial (IPH)	13
AP5 Metallographische Analyse der Fügeergebnisse und Analyse der Versagensbilder umgeformter Proben (LZH, IPH).....	19
AP6 Aufbau einer Spanntechnik für das Laserstrahllöten von Tailored Hybrid Tubes (LZH).....	19
AP7 Modellaufbau und Simulation des IHU-Prozesses (IPH)	20
AP8 Laserstrahllöten von Tailored Hybrid Tubes (LZH)	23
AP9 IHU von Tailored Hybrid Tubes (IPH).....	25
AP10 Validierung des Umformens von Tailored Hybrid Parts (LZH & IPH).....	28
AP11 Erarbeitung eines Anwenderleitfadens (LZH, IPH)	29
2. Verwendung der Zuwendung.....	30
Einsatz wissenschaftlich-technisches Personal	30
3. Notwendigkeit und Angemessenheit geleisteter Arbeit	30
4. Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen	31
5. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	32
6. Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	32
7. Danksagung	33

Zusammenfassung

Das Ziel des Projekts „IHU-THT“ ist die Verbesserung des Leichtbaupotenzials von Blechbauteilen mit Fokus auf den Automobilbau. Dieses Ziel soll durch die Kombination von werkstoffseitigem Leichtbau durch Stahl-Aluminium-Mischverbindungen und konstruktivem Leichtbau, durch geschlossene Hohlprofile erreicht werden. Die hybriden Rohrstrukturen werden mittels Laserstrahllöten hergestellt. Zur Fertigung der geschlossenen Hohlprofile kommt das Verfahren der Innenhochdruckumformung zum Einsatz.

In der Projektlaufzeit wurden zunächst Untersuchungen zum Laserlöten mit unterschiedlichen Werkstoffen (HCT600X, DC 05, EN AW-6082 und EN-AW 7075) und verschiedenen Blechstärken (1 mm und 2 mm) an Flachmaterial im Stumpfstoß durchgeführt. Hierfür wurde im Vorfeld ein modularer Prozesskopf entsprechend den speziellen Anforderungen an den Laserlötprozess entwickelt. Weiterhin wurden FEM-Simulationen des einstufigen Innenhochdruckumformprozesses als explizites Schalenmodell in LS-DYNA durchgeführt. Für eine Auswahl der oben genannten Materialkombinationen wurden zudem Zugversuche, Erichsentests sowie hydraulische Tiefungsversuche durchgeführt. Die dabei gewonnenen Materialdaten wurden anschließend in die FEM-Simulation integriert. Zusätzlich wurden im realen Lötversuch der Einfluss der Kantenqualität auf die Verbindungsqualität sowie Möglichkeiten zur Verbesserung der Benetzung beim Löten höherer Materialstärken untersucht.

Nachdem der Fügeprozess charakterisiert werden konnte, wurde die Übertragung der zweidimensionalen Geometrie auf dreidimensionale Rohrgeometrien vorgenommen und Innenhochdruckumformversuche an den erzeugten Stahl-Aluminium-Rohren durchgeführt. Dabei konnte eine Umformung sowohl im Aluminium- als auch im Stahlteil erzeugt werden. Dies zeigt die Machbarkeit der gemeinsamen Innenhochdruckumformung von laserstrahlgelöteten Stahl-Aluminium-THTs. Die Umformung eines Demonstratorbauteils wurde mithilfe des Simulationsmodells untersucht, ebenso konnte in Studien mit dem Simulationsmodell gezeigt werden, dass die Anpassung der Rohrwandstärken eine Angleichung des Umformverhaltens ermöglicht.

Als Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse werden zusätzlich zum Abschlussbericht zwei Anwenderleitfäden nach Art eines Whitepapers zu den Themen IHU von THT und Laserstrahllöten von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen veröffentlicht.

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Verbesserung des Leichtbaupotenzials von Blechbauteilen mit Fokus auf den Automobilbau. Dieses Ziel soll durch die Kombination von werkstoffseitigem Leichtbau durch Stahl-Aluminium-Mischverbindungen und konstruktivem Leichtbau, durch geschlossene Hohlprofile erreicht werden. Die hybriden Rohrstrukturen sollen mittels Laserstrahllöten hergestellt werden. Zur Fertigung der geschlossenen Hohlprofile soll das Verfahren der Innenhochdruckumformung zum Einsatz kommen.

Zunächst wurde der Laserlötprozess für Stahl und Aluminium an Flachmaterial entwickelt. Die Auswahl eines geeigneten Lotwerkstoffs fand dazu in AP 1 statt. Im Anschluss daran wurde in AP 2 ein Prozesskopf zum automatisierten Laserlöten konstruiert. Mithilfe dieses Prozesskopfes wurde in AP 3 ein Prozess zum Laserlöten von Stahl- und Aluminiumblechen entwickelt. Die in AP 3 entstandenen Flachmaterialproben wurden in AP 4 für Untersuchungen zur gemeinsamen Umformbarkeit verwendet. Nach der Auswertung der Ergebnisse von AP 4 und zusätzlichen metallographischen Untersuchungen der umgeformten Proben in AP 5, wurde eine geeignete Parameterkombination für die Umformung von dreidimensionalen Bauteilen ausgewählt. Zur Herstellung der Halbzeuge für die dreidimensionalen Bauteile wurde in AP 6 eine geeignete Spanntechnik zum Laserlöten mit dem Prozesskopf aufgebaut. Für die Umformung wurde in AP 7 ein Simulationsmodell auf Basis der Finite Elemente Methode (FEM) erstellt und weiterentwickelt, um den IHU-Prozess auslegen zu können. In AP 8 wurden schließlich die entsprechenden Stahl-Aluminium-Halbzeuge (THTs) hergestellt, die in AP 9 erfolgreich im IHU-Prozess umgeformt wurden. In AP 10 wurde der IHU-Prozess eines THT durch die Simulation eines Demonstratorbauteils validiert. Die Ergebnisse wurden fortwährend dokumentiert und abschließend in AP 11 Anwenderleitfäden für das Laserlöten von Stahl und Aluminium und die IHU solcher Hybridbauteile zusammengefasst.

Das Ziel des Forschungsprojektes wurde somit erreicht: mittels IHU gefertigte lasergelötete Tailored Hybrid Tubes aus Stahl und Aluminium konnten realisiert werden.

Erzielte Ergebnisse

AP1 Erstellung von Anforderungsprofilen für Lotwerkstoffe (LZH, IPH)

Unter Berücksichtigung der für die zu fügenden Werkstoffe (Aluminium und Stahl) benötigten und durch deren Schmelztemperatur begrenzten Temperaturen wurde die Auswahl der Lotwerkstoffe getroffen. Diese sind in der folgenden Tabelle 1 genannt. Jeweils ein Hart- und ein Weichlot wurden verwendet. Die zu berücksichtigten Kriterien zur Lotwahl sind die folgenden: die Arbeitstemperatur soll unter der Schmelztemperatur der Fügepartner liegen, da so ein Aufschmelzen der Grundwerkstoffe verhindert wird. Das Lot soll weiterhin einen möglichst kleinen Schmelzbereich aufweisen, die Arbeitstemperatur liegt darin bzw. darüber.

Weiterhin ist eine gute Benetzungsfähigkeit der Fügepartner notwendig, diese ist ggf. mithilfe von Flussmitteln zu realisieren. Für die im Projekt geplante Verwendung der laserstrahlgelöteten Tailored Hybrid Tubes zum Innenhochdruckumformen sollten die Festigkeitskennwerte und Umformigenschaften des Lotes passend zur Materialpaarung (d.h. die Abweichungen (R_m und A) zwischen den Fügepartner mit der geringeren Festigkeit und dem Lot sollten möglichst gering sein) gewählt werden und eine Verträglichkeit mit der Temperaturführung bei der IHU gegeben sein. Ein weiterer begrenzender Faktor ist das Einsatzgebiet der zu lötenen Bauteile, d. h. die herrschenden Temperaturen und Belastungsarten (statische oder wechselnde Belastungen, Kriechfestigkeit (vor allem für Weichlote)).

Tabelle 1: Übersicht der ausgewählten Lote

Lot	Schmelzbereich °C	Ø mm
AlSi12	575 - 585	1,2
ZnAl15	382 - 450	1,6

Abbildung 1 zeigt einen Vergleich der Schmelzbereiche der Lote und der zu fügenden Aluminiumwerkstoffe. Anhand der niedrigen Solidustemperatur der hochfesten Aluminiumlegierung EN AW-7075 lässt sich die Notwendigkeit eines lokalen Energieeintrags verdeutlichen, um den Aluminiumgrundwerkstoff im Lötprozess nicht aufzuschmelzen.

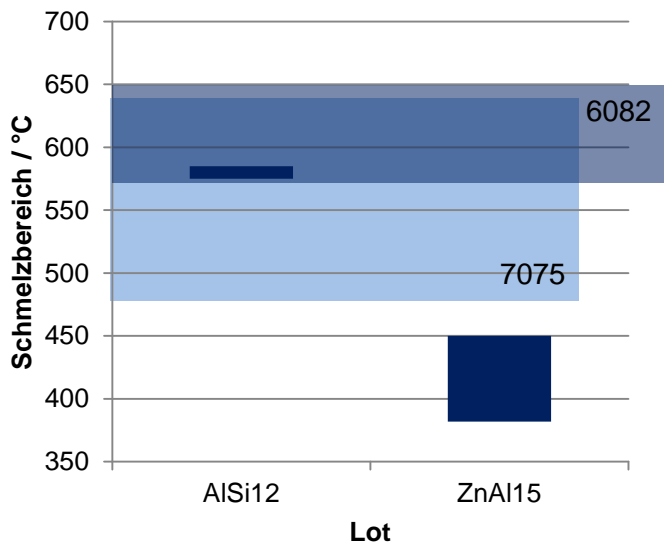


Abbildung 1: Schmelztemperaturen der Aluminiumwerkstoffe (horizontale farbige Bereiche) und Lote (x-Achse)

Um die Benetzung des Aluminiums mit aluminiumhaltigen Loten zu ermöglichen, ist aufgrund der bei Kontakt mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre unverzüglich entstehende und äußerst widerstandsfähige Oxidschicht, die die Benetzung verhindert, die Verwendung eines entsprechenden Flussmittels nötig. Diese Flussmittel basieren auf Salzen (Calciumfluorid, Kaliumfluorid) und sind mit Vorsicht zu verwenden.

AP2 Aufbau eines Prozesskopfes zum Laserlöten mit variablen Temperaturregimen (LZH)

Parallel zu AP1 wurde ein Prozesskopf entworfen, der die Anforderungen, die der Laserstrahlprozess stellt, erfüllt. Die Anforderungen beinhalten unter anderem den Wunsch nach einem flexibel anpassbarerem Arbeitskopf, der einen einachsigen Scanner zu Strahlpendelung und eine pyrometrische Beobachtung zur Regelung des Temperaturregimes beinhaltet, gleichzeitig Robustheit gegenüber den Prozessemissionen aufweist und durch eine modulare Bauweise einen schnellen Wechsel der Optiken ermöglicht.

Abbildung 2 zeigt links schematisch den entsprechenden Aufbau des Bearbeitungskopfes für den Laserstrahlprozess. Die wichtigsten Komponenten sind ein Scanner, dessen beweglicher Spiegel sich im Strahlengang befindet, ein Pyrometer zur Beobachtung der Prozesstemperatur und eine Vorrichtung zur reproduzierbaren Einbringung des drahtförmigen Lotzusatzwerkstoffes in die Fügezone. In Abbildung 2 rechts ist der Ansatz dargestellt, der die Verwendung des Scanners begründet. Der Laserstrahl wird mit dem beweglichen Spiegel mit einstellbarer Frequenz und Amplitude längs zur Vorschubrichtung gependelt. Die Temperaturkurve für den unbewegten Laserstrahl mit rundem Querschnitt ist steiler und die maximal erreichte Temperatur liegt im Vergleich zum durch Scannereinsatz oval geformten Strahl deutlich höher. Die leichte Überhitzung der Prozesszone ist erforderlich, um das Lot für einen angemessenen Zeitraum auf Schmelztemperatur zu

bringen und ein Fließen des Lots in den zwischen den Werkstücken eingestellten Spalt zu ermöglichen. Durch die Aufweitung des Strahls im Bearbeitungsbereich kann die nötige Maximaltemperatur reduziert werden, da der Energieeintrag auf einer größeren Fläche erfolgt und somit ein größerer Bereich des Lotwerkstoffes aufgeheizt wird. Zusätzlich kann durch eine pyrometerbasierte Laserleistungsregelung der Energieeintrag reduziert werden (vgl. Temperaturmessungen in Abbildung 14 und Abbildung 15).

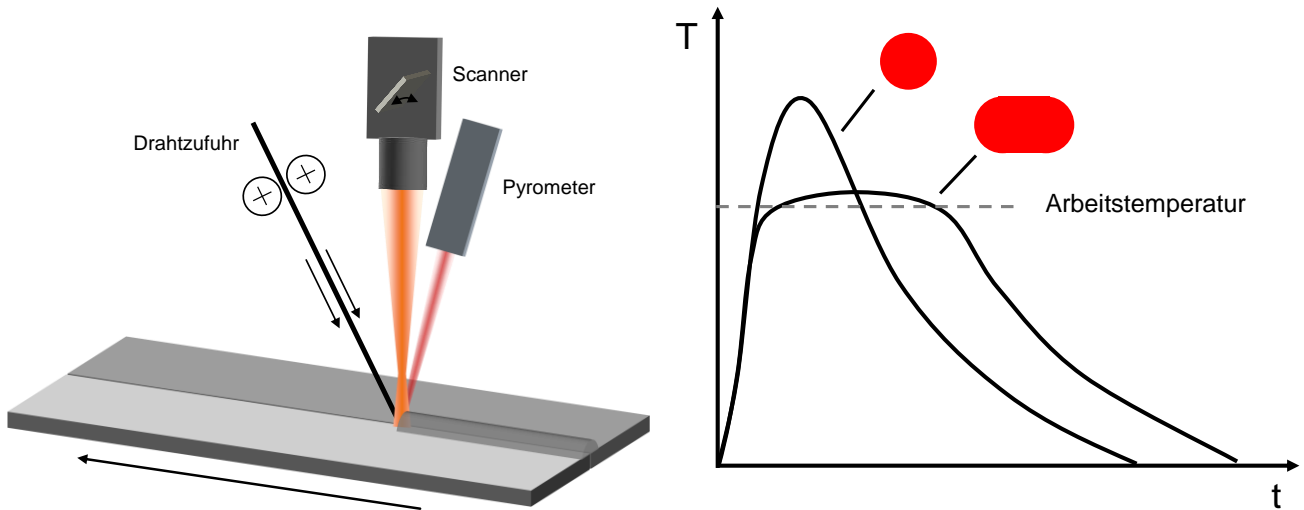


Abbildung 2: links: Prozesskonzept als Skizze, rechts: Einfluss der Strahlpendelung auf das Temperatur-Zeit-Regime

Der reale Aufbau des Prozesskopfes zum Laserstrahllöten ist in Abbildung 3 zu sehen. In Abbildung 3 links sind die einzelnen Komponenten im CAD-Modell dargestellt. Für den Prozess wurde als Laserstrahlquelle ein Trumpf TruDisk Scheibenlaser mit 16 kW maximaler Ausgangleistung sowie folgende optische Bauteile verwendet: der Faserdurchmesser des Lichtwellenleiters beträgt 600 μm , die Brennweite der Kollimationslinse 200 mm, die Brennweite der Fokussierlinse 280 mm. Der aus dem sich ergebenden Abbildungsverhältnis von 1:1,4 resultierende Fokussierdurchmesser liegt bei 840 μm . Die Zuführung des Laserstrahls erfolgt horizontal, der Spiegel des Scanners fungiert gleichzeitig als Umlenkspiegel. Die Drahtzufuhr wird über ein Dinse DIX Drahtfördersystem realisiert. Abbildung 3 rechts zeigt ein Foto des realen Bearbeitungskopfes, der im Vergleich zum CAD-Modell spiegelverkehrt aufgebaut wurde.

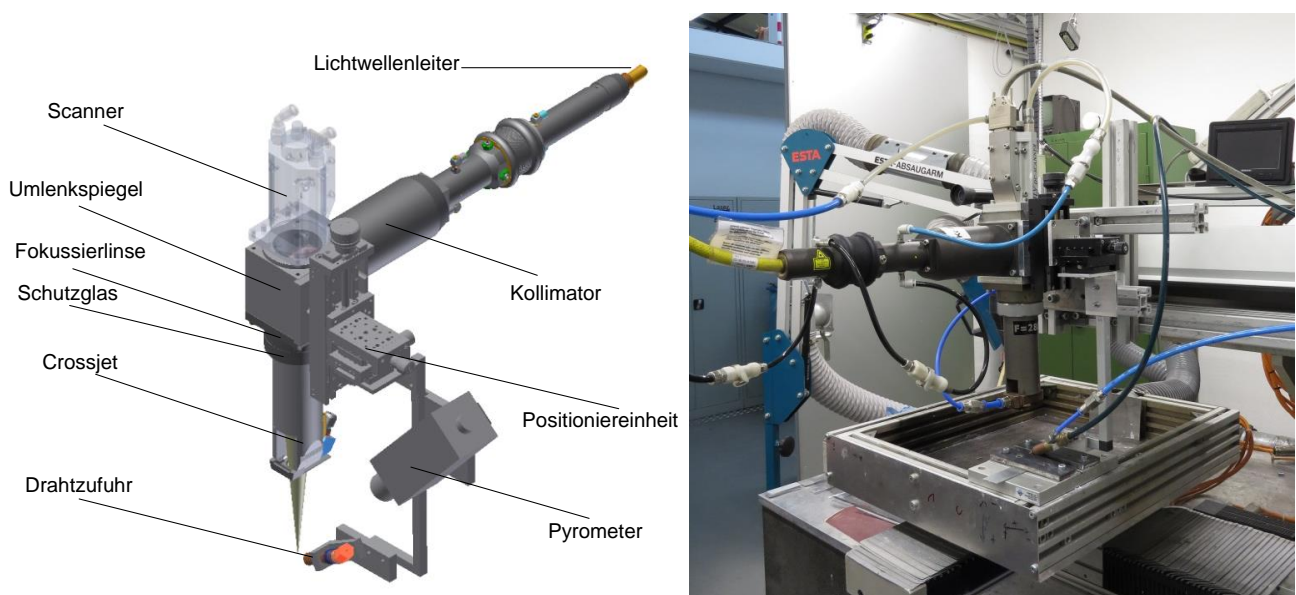


Abbildung 3: Prozesskopf: links: als CAD-Modell mit Beschriftung der Komponenten, rechts: realer Versuchsaufbau

Zum Schutz des Bearbeitungskopfes und des Lichtwellenleiters vor Rückreflexionen, die bei Auftreffen des Laserstrahls auf die Aluminiumoberfläche auftreten können, wurde der Kopf 10° ange stellt. In Abbildung 3 ist dieser Winkel nicht eingestellt, um der CAD-Zeichnung möglichst nahe zu kommen.

AP3 Prozessentwicklung zum Laserstrahllöten an Flachmaterial mit und ohne Einsatz von Flussmittel (LZH)

Das AP 3 gliedert sich in einen ersten Teil mit Versuchen zur Lötbarkeit und Parameteruntersuchung und einen zweiten Teil, der sich mit der Optimierung der Löt Nähte befasst. Am Schluss folgen eine detaillierte Auswertung der Einflussgrößen und eine Bewertung detaillierte Auswertung der Einflussgrößen und eine Bewertung des besten Parametersatzes.

- **Lötversuche**

Mit dem Aufbau aus AP2 wurden zunächst Lötversuche an Flachmaterial durchgeführt. Im Projekt wurden folgende Werkstoffe als Flachmaterial verwendet: die Stähle DC 05 (1.0312) und HCT600X (1.0941) mit je 1 und 2 mm und die Aluminiumlegierungen EN AW-6082 (3.2315) in 1 und 2 mm sowie EN AW-7075 (3.4365) in 2 mm Blechstärke. Die Aluminiumlegierung EN AW-7075 ist aufgrund ihres geringen Schmelzpunktes von ca. 480 °C für den Lötprozess und weiterhin aufgrund der hohen Fließspannung für den IHU-Prozess in einer Mischverbindung weniger geeignet.

Die Anschmelzungen des Aluminiumwerkstoffes (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5) sollten gering gehalten werden, um möglichst einen reinen Lötprozess zu erhalten. Diese Reduzierung soll durch Pendeln des Laserstrahls längs zur Vorschubrichtung und die pyrometrische Leistungssteuerung erreicht werden.

Tabelle 2 zeigt die untersuchten Materialkombinationen (Werkstoffe und Blechstärken) des Versuchsmaterials, welches in Absprache mit dem PbA festgelegt und beschafft wurde. Anhand der in AP5 durchgeführten metallographischen Untersuchungen lassen sich die Lötverbindungen bewerten.

Tabelle 2: Darstellung der möglichen Material und Blechstärkenkombinationen und jeweiliger Zinkbeschichtung

	t	HCT600X+Z100		DC 05+ZE75/75	
		1,0 mm	2,0 mm	1,0 mm	2,0 mm
EN AW-6082	1,0 mm	x	x	x	x
	2,0 mm	x	x	x	x
EN AW-7075	2,0 mm	x	x	x	x

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die Reduzierung des thermischen Einflusses während des Lötprozesses. Auf der linken Seite ist jeweils eine nur einseitige Lötverbindung zu sehen, da ein größerer Teil des Aluminiumgrundwerkstoffes während des Lötprozesses in den flüssigen Zustand übergeht. Rechts ist jeweils eine Verbindung zu erkennen, bei der es zu einem stark reduzierten thermischen Einfluss und dadurch zu einer bedeutend geringeren Aufschmelzung Aluminiumgrundwerkstoffes des kam. Dies konnte durch Verwendung des AlSi12-Lot (Ø1,2 mm) und eine deutliche Erhöhung des Draht/Vorschub-Verhältnisses (v_D/v_F) erreicht werden. Für ZnAl15 (Ø1,6 mm) wurde das gezeigte Ergebnis durch eine Verdoppelung der Laserleistung (P_L) bei einer gleichzeitigen Verdoppelung der Vorschubgeschwindigkeiten erreicht. Der zwischen den Blechen eingestellte Spalt ist in den Parametern in den Bildunterschriften mit der Abkürzung s vermerkt.

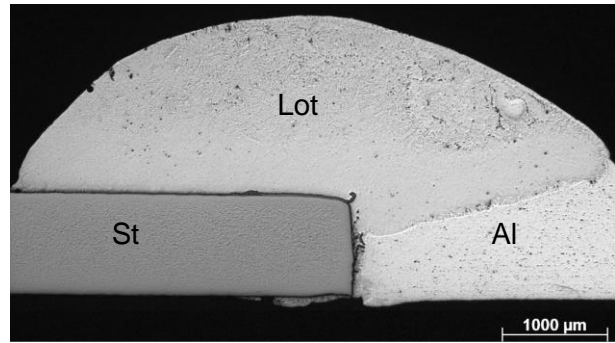
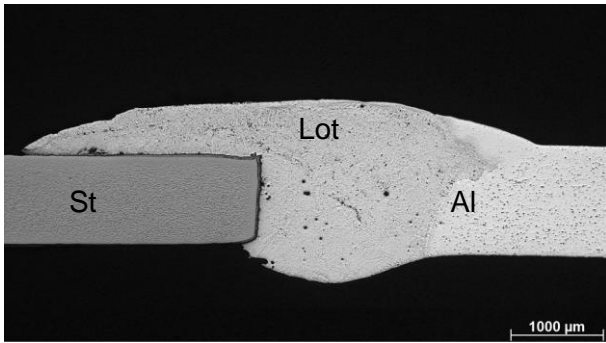


Abbildung 4: ZnAl15-Lot, Blechstärke: 1 mm (links: $P_L = 2,5$ kW, $v_F = 2,00$ m/min, $v_D = 3,50$ m/min, $s = 0,2$ mm, rechts: $P_L = 2,0$ kW, $v_F = 1,50$ m/min, $v_D = 1,50$ m/min, $s = 0,2$ mm)

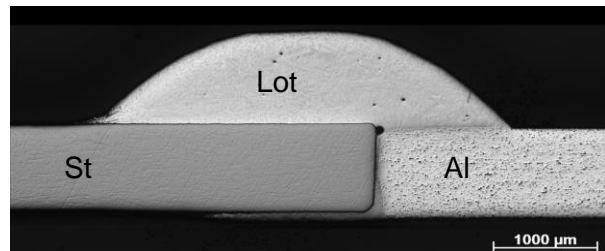
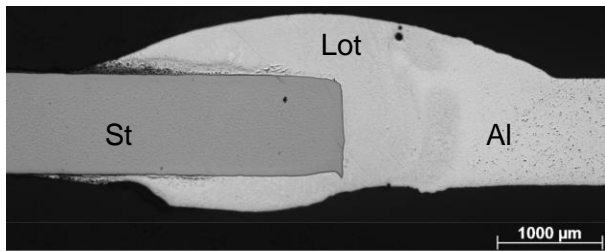


Abbildung 5: AlSi12-Lot, Blechstärke: 1 mm (links: $P_L = 1,4$ kW, $v_F = 0,75$ m/min, $v_D = 1,2$ m/min, $s = 0,2$ mm, rechts: $P_L = 2,5$ kW, $v_F = 1,5$ m/min, $v_D = 4,5$ m/min, $s = 0,2$ mm)

Auch die Spaltfüllung ist im Schlibbild gut zu beurteilen. Abbildung 6 zeigt eine 2 mm Blechpaarung, die mit dem Zinklot verbunden werden sollte. Dabei wurde festgestellt, dass aufgrund der fehlenden Parallelität der Kanten das Eindringen des Lotes in den Spalt verhindert wurde. Der große Schmelzbereich des Lotes verstärkt diesen Effekt zusätzlich. In Abbildung 7 wurde in einem nächsten Versuch unter Verwendung des AlSi12-Lotes und mittels Laser zugeschnittener Kanten gezeigt, dass parallele Kanten die Benetzung im Spalt erhöhen. Allerdings kam es auch hier zu keiner vollständigen Füllung des Spaltes mit dem Lot, welche zur gewünschten Festigkeit der Verbindung nötig ist. Dies ist bedingt durch eine zu geringe Temperatur im Spalt. Somit konnte das Flussmittel nicht wirken und eine Benetzung der Aluminiumseite war nicht möglich. Die Wärme wird bei der hohen Blechstärke vor allem durch das Aluminium abgeleitet. Als mögliche Gegenmaßnahme wurden in der Optimierungsphase das Material vorgewärmt und eine alternative Kantenvorbereitung untersucht.

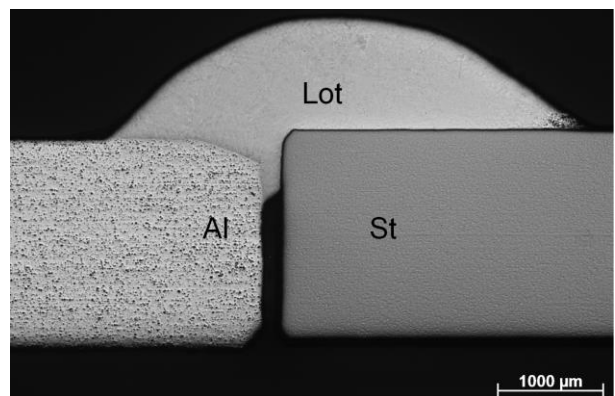
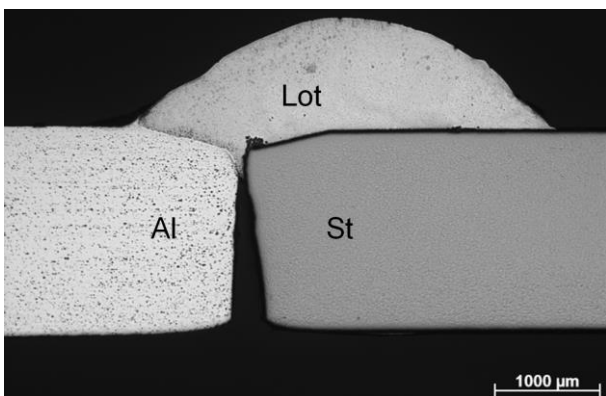


Abbildung 6: ZnAl15-Lot, Blechstärke 2 mm, Zuschnitt Blechscherer ($P_L = 2,1$ kW, $v_F = 1,05$ m/min, $v_D = 1,58$ m/min, $s = 0,2$ mm)

Abbildung 7: AlSi12-Lot, Blechstärke 2 mm, Laserzuschnitt ($P_L = 3,9$ kW, $v_F = 1,5$ m/min, $v_D = 5,0$ m/min, $s = 0,4$ mm)

In Abbildung 8 ist das Schlibbild einer Probe unter Einsatz von EN AW-7075 dargestellt, deren Schmelzpunkt 100 °C unterhalb dessen von EN AW-6082 liegt. Daher kam es bei dieser Werkstoffpaarung zu einem Anschmelzen des Fügepartners. Für diese Kombination muss der Wär-

meintrag deutlich reduziert werden. Alternativ kann Zinklot mit einer geringeren Arbeitstemperatur eingesetzt werden.

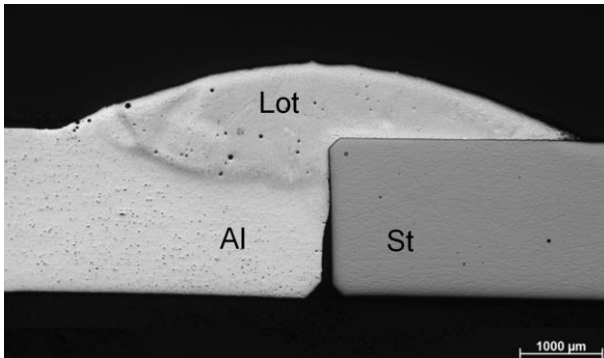


Abbildung 8: AISi12-Lot, 2 mm, Laserzuschnitt, EN AW-7075 ($P_L=3,9$ kW, $v_F=1,5$ m/min, $v_D=5,0$ m/min, $s=0,4$ mm)

- **Optimierung**

Die Optimierung des Lötprozesses an den 2 mm dicken Blechen für die Aluminiumlegierung EN AW-6082 wird im nächsten Schritt untersucht. Abbildung 9 zeigt links die Ausgangslage am unveränderten Stumpfstoß, rechts ist eine Kantenvorbereitung in Y-Form zu erkennen. Genau am Übergang des „V“ zum Spalt zeigt sich eine große Pore. Eine Füllung des Spaltes ist nicht zu beobachten lediglich das V wurde mit Lot aufgefüllt.

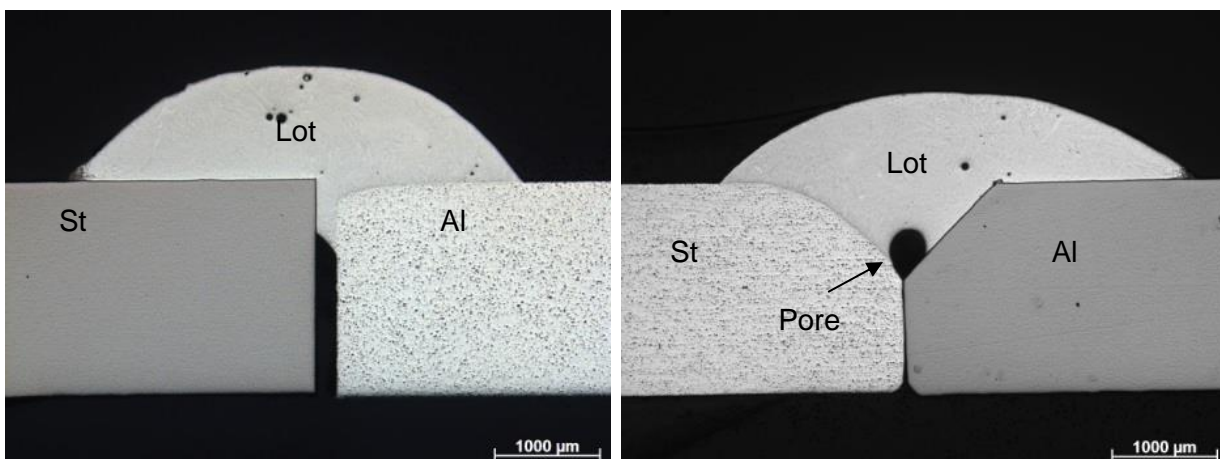


Abbildung 9: AISi12-Lot, 2 mm, EN AW-6082 (links: $P_L = 3,9$ kW, $v_F = 1,5$ m/min, $v_D = 5,0$ m/min, $s = 0,4$ mm, rechts: Y-Nahtvorbereitung, $P_L = 3,3$ kW, $v_F = 1,5$ m/min, $v_D = 5,0$ m/min, $s = 0,2$ mm)

Der nächste Schritt ist die vollständige Vorbereitung der Kante zu einem V. Der Schliff einer entsprechend präparierten Probe ist in Abbildung 10 links zu sehen. Auffällig ist die große Anzahl von Poren, die sich im Lot gebildet haben. Dies ist aufgrund des geringen Wärmeintrags in den unteren Bereich der Fügezone auf die nicht vollständig erfolgte Ausgasung des Flussmittels zurück zu führen. Bei Betrachtung des Bereichs des Aufeinandertreffens des Aluminiumlotes und des Stahlgrundwerkstoffes zeigt sich, dass es hier zu keiner vollständigen Benetzung der Stoßkante und somit auch zu keiner auf Diffusion basierenden Verbindung kommt. Die Festigkeit der auf diese Weise vorbereiteten Stoßform ist gering (40 MPa im Zugversuch), ein großer Teil der Proben brachen schon beim Einspannen für den Zugversuch. Abbildung 10 rechts zeigt einen weiteren Ansatz, um den Spalt während des Lötprozesses mit dem Lot füllen zu können. Von oben betrachtet zeigt das verwendete Aluminiumblech vier Vorsprünge (0,2 mm, vgl. Abbildung 11) die als Abstandhalter dienen sollen, um den Spalt offen zu halten. Die Benetzung im oberen Bereich wurde verbessert. Durch die schnell sinkende Temperatur im unteren Bereich der Fügezone ist allerdings auch mit dieser Kantengestaltung keine vollständige Füllung des Spaltes möglich.

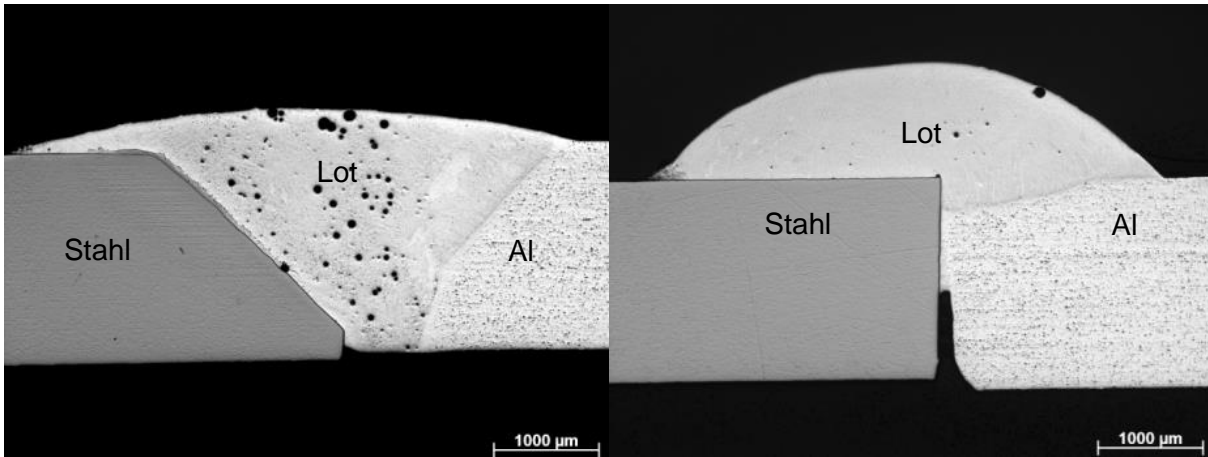


Abbildung 10: AISi12-Lot, 2 mm, EN AW-6082 (links: V-Nahtvorbereitung $P_L = 2,5$ kW, $v_F = 1,5$ m/min, $v_D = 5,0$ m/min, $s = 0,2$ mm, rechts: Abstandshalter, $P_L = 3,9$ kW, $v_F = 1,5$ m/min, $v_D = 5,0$ m/min, $s = 0,2$ mm)

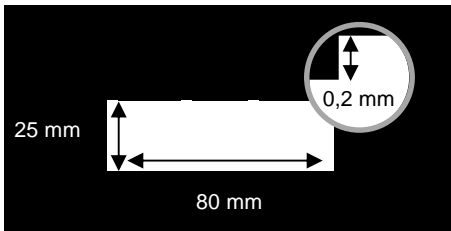


Abbildung 11: Skizze eines mit Abstandshaltern versehenen Probebleches (mit Vergrößerung des rechten der vier Abstandshalter)

Abbildung 12 zeigt den Schliff eines Versuchs mit unterschiedlichen Blechstärken (2 mm Aluminium an 1 mm Stahl). Diese Kombination ist aufgrund der sich angleichenden Fließspannungen günstig für den Umformvorgang. Damit die beim Umformvorgang am Werkzeug anliegenden Seite keinen Absatz aufweist, wurde die hier gezeigte Anordnung (Bleche im Stoß bündig an der Oberseite) gewählt. Die Benetzung der Oberflächen mit dem Lot ist erfolgreich, allerdings fließt das Lot nicht in den vorgesehenen Spalt, sondern führt zu einer Anschmelzung der Aluminiumstoßkante. Die Festigkeit wurde im Zugversuch getestet und lag bei 110 MPa. Der gezeigte Fügeprozess ist eher dem Schweißen zugehörig, da es zum einen zu einem Aufschmelzen des Aluminiumfügepartners kam und zusätzlich keine Spaltfüllung durch das Lot zur Festigkeit der Naht beiträgt, denn die Benetzung findet hauptsächlich auf der Oberseite und nicht in Fügespalt statt.

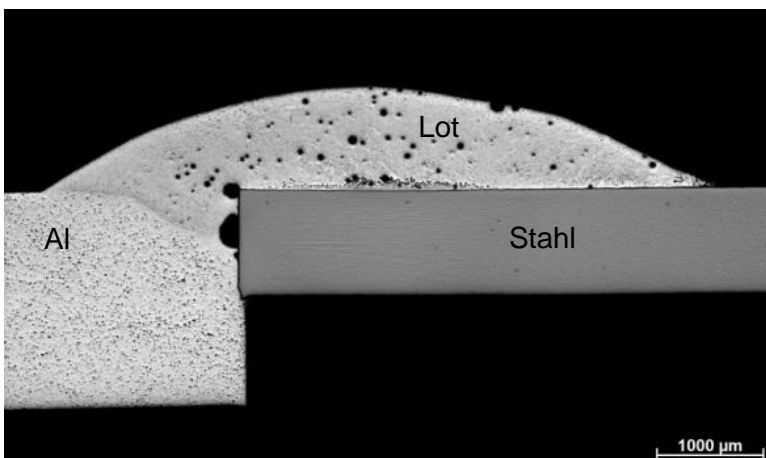


Abbildung 12: AISi12-Lot, 2 mm EN AW-6082, 1 mm HCT600X ($P_L = 2,5$ kW, $v_F = 1,5$ m/min, $v_D = 4,5$ m/min, $s = 0,2$ mm)

- **Einflussgrößen**

Die Qualität der Lötnaht und die Spaltfüllung sind abhängig von der Kantenqualität. Diese wiederum ist zu einem großen Teil auf das verwendete Trennverfahren zurück zu führen. Abbildung 13 zeigt den Vergleich von drei Kantenqualitäten. Zum besten Ergebnis in Hinsicht auf die Spaltfüllung führt die Verwendung von planparallelen, senkrechten Kanten a). b) zeigt eine akzeptable Kantenqualität und c) steht beispielhaft für eine schlechte Kantenqualität. Dabei zeigt sich, dass sowohl für Fall a) (Trennschleifen) als auch bei reduzierter Kantenqualität in b) (Blechschere) eine gute Spaltfüllung möglich war. Die schlechte Kantenqualität aus c) (hier beispielhaft ein Laserschnitt mit starker Gratbildung) führte allerdings zu einer schlechteren Füllung des Spalts und damit zu einer unvollständigen Anbindung.

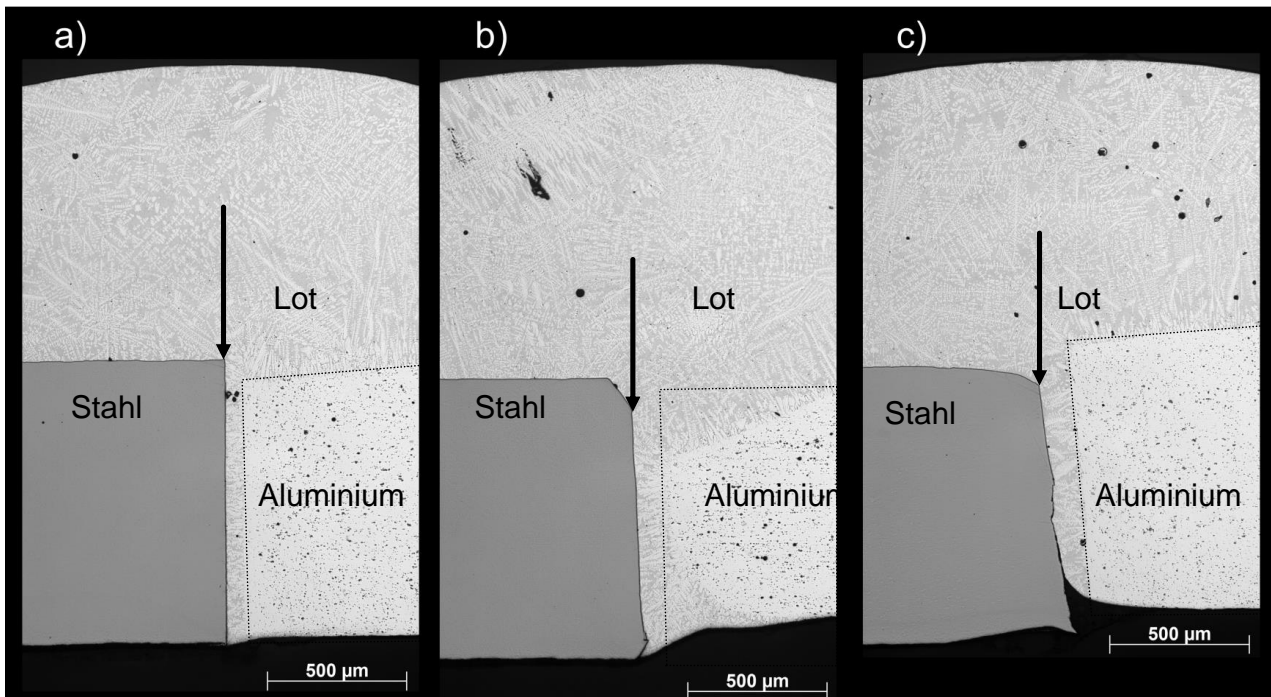


Abbildung 13: Vergleich der Spaltfüllung beim Laserstrahllöten bei verschiedenen Kantenqualitäten

Im Bearbeitungskopf wurde ein Scanner verbaut, der den Laserstrahl in Vorschubrichtung mit einstellbarer Frequenz und Amplitude pendeln lässt. Damit wird im Vergleich zum unbewegten Strahl bei gleicher Laserleistung ein größerer Bereich über eine längere Zeit erwärmt. Dabei ist die zum Löten benötigte Maximaltemperatur geringer. Abbildung 14 zeigt den mitlaufend gemessenen Temperaturverlauf eines Lötprozesses mit den gleichen Parametern mit und ohne Einsatz des spiegelgesteuerten Scanners. Das Diagramm enthält nur eine qualitative Auswertung ohne Angabe der Messwerte, da aufgrund der Prozessemissionen diese nicht verlässlich sind. Zu erkennen ist eine deutliche Reduzierung der erreichten Temperatur an der Lötstelle bei der Verwendung gleicher Leistung.

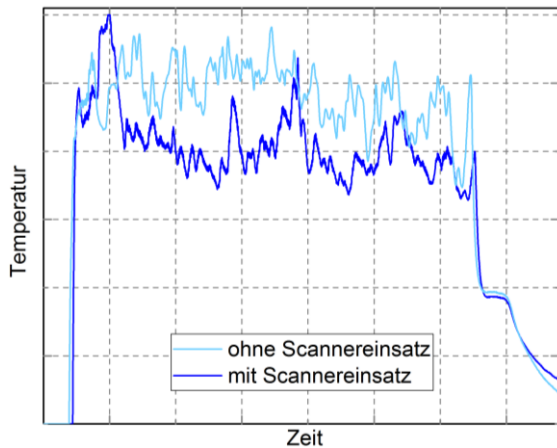


Abbildung 14: Temperaturverlauf mit und ohne Scannereinsatz: Pyrometer mitlaufend

Abbildung 15 zeigt zwei weitere Temperaturaufzeichnungen an einem festen Punkt neben bzw. in der Fügezone. Die dunkelblaue Linie zeigt jeweils den Prozess mit Verwendung des Scanners zur Formung des Strahls. Links wird gezeigt, dass die Maximaltemperatur deutlich geringer ist als beim Vergleichsprozess ohne Scanner. Rechts wird gezeigt, dass in der Prozesszone die Dauer des detektierbaren Temperatureinflusses deutlich länger ist, hier wurden wie schon in Abbildung 14 die Einheiten der Temperaturskala nicht aufgeführt, da die aufgezeichneten Werte durch den Prozess beeinflusst wurden und nur qualitativ verlässlich sind. Bei Überlagerung der beiden Kurven mit Scannereinsatz, lässt sich ein Profil, das in seiner Ausformung Abbildung 2 rechts ähnelt, ableiten.

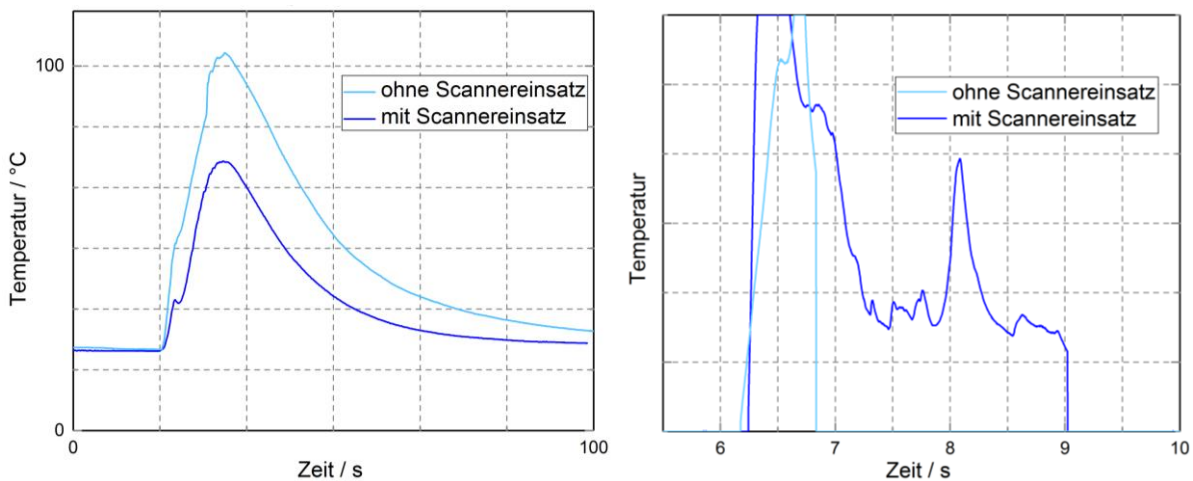


Abbildung 15: Temperaturverlauf mit und ohne Scannereinsatz: links: Thermoelement an festem Punkt neben der Fügezone, rechts: Pyrometer an festem Punkt neben der Fügezone

- **Bewertung des ermittelten besten Parametersatzes**

Abbildung 16 links zeigt den Querschliff einer Lötnaht mit den Bestparametern (EN AW-6082, 1 mm HCT600X $P_L = 2,5$ kW, $v_F = 1,5$ m/min, $v_D = 4,5$ m/min, $s = 0,2$ mm). Auf der rechten Seite ist eine Rasterelektronenaufnahme (REM) ebener Naht zu sehen. Die Diffusionszone, in der es zur Bildung intermetallischer Phasen kommen kann, ist auf der gesamten Länge der Verbindungszone auf einen kleinen Bereich $< 2 \mu\text{m}$ beschränkt.

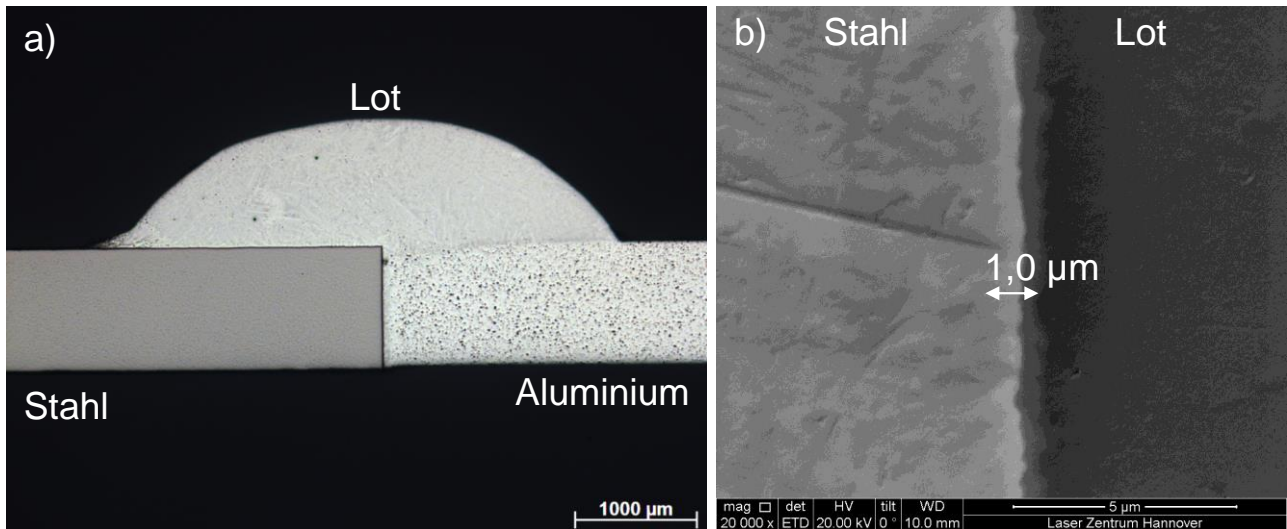


Abbildung 16: Phasensaum, links: a) Übersichtsaufnahme Lichtmikroskop, rechts: b) Sekundärelektronenbild REM

Zusätzlich zu den gezeigten Aufnahmen wurde die Zusammensetzung mittels EDX-Analyse im REM und die Härte des Stahlgrundmaterials über die Fügezone bis zum Aluminiumgrundwerkstoff aufgenommen. In Abbildung 17 sind die Ergebnisse dieser Messungen dargestellt. Auf der linken Seite wird die Zusammensetzung der Verbindung anhand der drei Elemente Aluminium, Eisen und Silizium dargestellt. Der grau eingefärbte Bereich markiert den mit Lot gefüllten Spalt. Nur in diesem Bereich befindet sich aufgrund der Zusammensetzung des Lotes ein erhöhter Siliziumanteil. Bei Betrachtung des Bereichs links davon (Kontaktbereich Stahl-Lot), lässt sich die Aussage, welche anhand des Sekundärelektronenbildes getroffen wurde, unterstützen. Der Bereich, in dem Aluminium in das eisenreiche Stahlgefüge diffundieren konnte, ist sehr gering. Der Härteverlauf (Abbildung 17 rechts) zeigt den zu erwartenden starken Abfall der Härte am Übergang zwischen Stahl und Aluminiumlot, von dem aus die Härte fließend in die Aluminiumlegierung übergeht. Weiterhin lässt sich anhand dieser Messwerte davon ausgehen, dass keine messbare Wärmeinflusszone mit durch den Wärmeintrag während des Lötens veränderten Gefügeeigenschaften besteht. Die harten intermetallischen Phasen im Phasensaum können aufgrund ihrer geringen Größe nicht mit der Mikrohärtemessung gemessen werden.

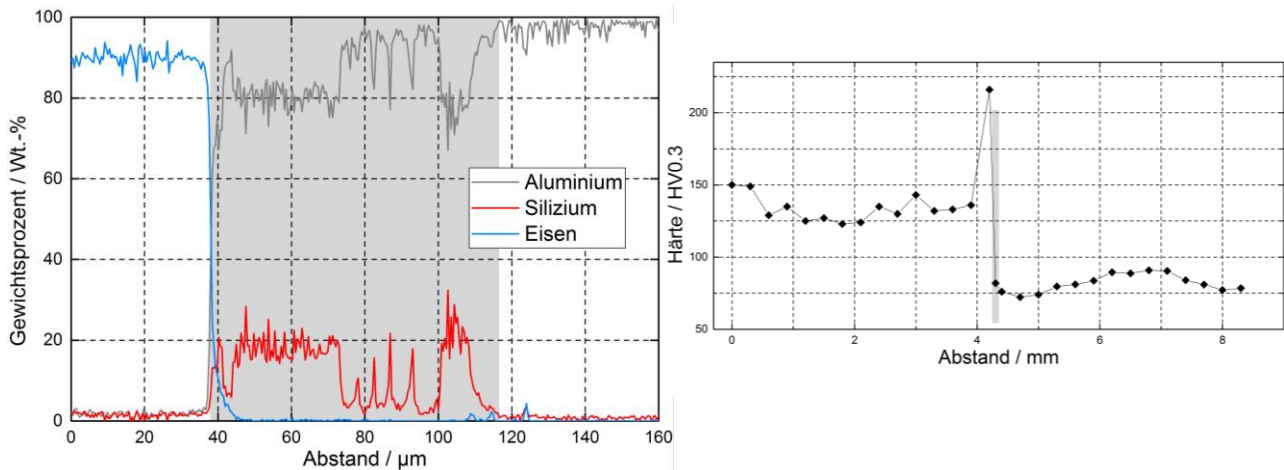


Abbildung 17: Eigenschaften der Fügezone: links: EDX-Linescan, rechts: Härteverlauf

Flussmittelfreie Lötversuche wurden ebenfalls durchgeführt. Die auf diese Weise erzeugten Nähte zeigten keine ausreichende Fügequalität. Für eine flussmittelfreie Verbindung von Stahl und Aluminium sind zusätzliche Maßnahmen (z.B. Vakuum- oder Schutzgasatmosphäre) nötig, um die Benetzung zu realisieren.

Zusammenfassend erwies sich die Kombination aus Blechen der Stärke 1 mm aus HCT600X und EN AW-6082 aus fgetechnischer Sicht am geeignetsten, um eine reproduzierbare Herstellung der gefügten Proben sicherzustellen. Die genannte Kombination lässt sich ohne zusätzliche Kanten-
vorbereitung oder Vorwärmung fügen, die Benetzung beider Fügepartner mit dem AlSi-Lot ist möglich. Ein reiner Lötprozess lässt sich einstellen, keine Anschmelzungen des Aluminiumwerkstoffes
treten auf, keine Gefügeveränderungen konnten festgestellt werden. Die intermetallischen Phasen konnten auf ein Minimum begrenzt werden, dies ist den mechanischen Eigenschaften zuträglich. Die Festigkeiten dieser Verbindung wurden in AP4 getestet und liegen im oberen Bereich der er-
zielten Festigkeiten.

AP4 Umformversuche an laserstrahlgeltetem Flachmaterial (IPH)

Um die geeignetste Parameterkombination von Stahl- und Aluminiumwerkstoff für eine gleichm-
ige Umformung in einem Prozessschritt zu ermitteln, sollten die gelöteten Flachmaterialproben im
hydraulischen Tiefungsversuch (siehe Abbildung 18) getestet werden. Im Tiefungsversuch kann
der reale Belastungsfall des Hybridmaterials wie er im IHU-Prozess auftritt, der biaxiale Span-
nungszustand, erzeugt werden. Außerdem sollten im Tiefungsversuch die Flieskurven der ver-
wendeten Ausgangsmaterialien, die für die Simulationen in AP 7 benötigt werden, aufgenommen
werden.

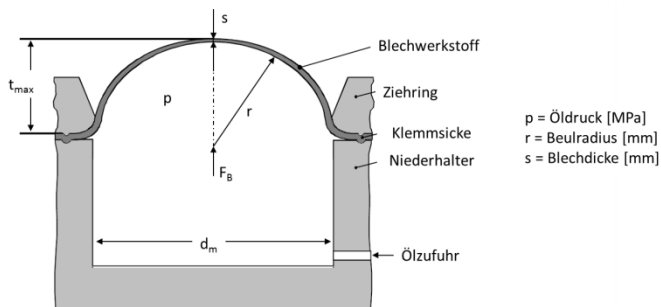


Abbildung 18: Prinzipdarstellung des hydraulischen Tiefungsversuchs [Beh10]

- **Hydraulische Tiefung der einzelnen Werkstoffe**

Die Fliespannungskurven der verwendeten Einzelwerkstoffe, aus denen die Hybridproben herge-
stellt werden sollen, wurden im hydraulischen Tiefungsversuch ermittelt, siehe **Fehler! Verweis-
quelle konnte nicht gefunden werden.** Die Daten wurden verwendet, um in den FEM-
Simulationen in AP7 das Werkstoffverhalten realistisch abbilden zu können. Weiterhin ist die
Kenntnis über das Fließverhalten der Einzelwerkstoffe unumgänglich, um das Fließverhalten der
Hybridproben analysieren zu können. Untersucht wurden die Stahlsorten DC 05 und DP600, sowie
die Aluminiumlegierung EN AW-6082. Die Untersuchung von EN AW-7075 war auf Grund der ho-
hen Festigkeit des Werkstoffes nicht erfolgreich: beim Einspannen des Probenbleches mit Sicke
brach das Blech, beim alternativen Einklemmen des Probenbleches war die Haltekraft nicht aus-
reichend groß, sodass das Blech durch den Öldruck aus der Einspannung gezogen wurde, bevor
es zu einer ausreichenden Verformung kam.

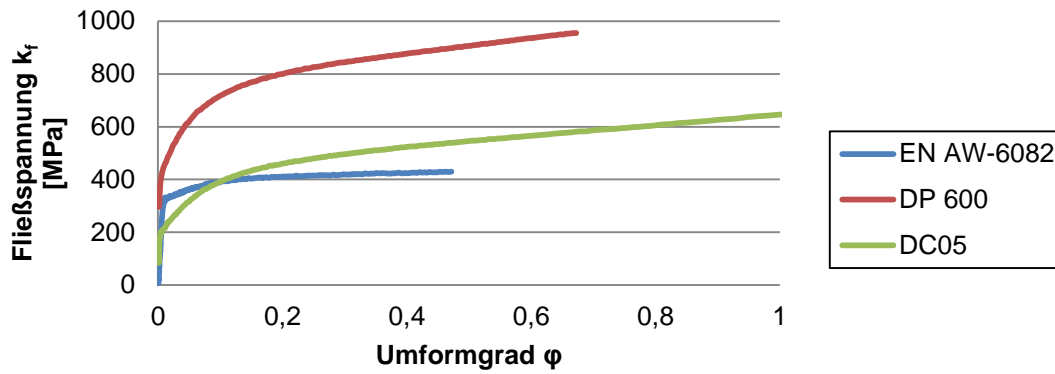


Abbildung 19: Fließkurven der Stahlbleche DC 05 und DP600, sowie für die Aluminiumlegierung EN AW-6082

Der Versuchsaufbau und eine vergrößerte Darstellung des Niederhalters ohne Sicke sind in Abbildung 20 dargestellt.

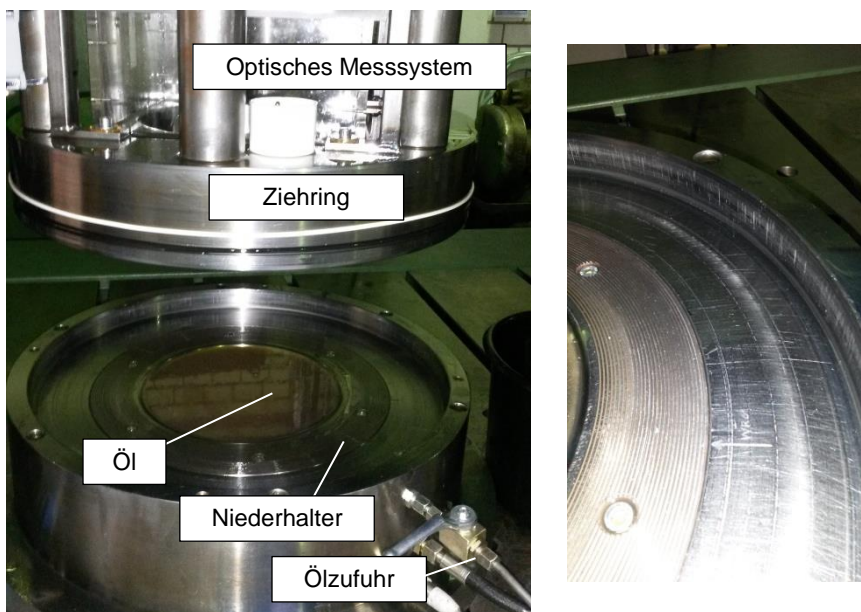


Abbildung 20: links: realer Aufbau des Versuchsstands; rechts: vergrößerte Darstellung des Einspannungsbereichs

Abkühlung

Ursprünglich geplant war eine lokale Temperierung einer Werkstoffhälfte zur Angleichung der Fließspannungen von Stahl und Aluminium. Dieses war nicht realisierbar, da die Rohrhalbzeuge sehr gute Wärmeleiteigenschaften und eine relativ geringe Masse im Vergleich zur verwendeten IHU-Flüssigkeit besitzen. Sobald die IHU-Flüssigkeit in das Rohr eingeleitet wird, kühlt es stark ab. Um die Abkühlung in Abhängigkeit zu den Prozesszeiten setzen zu können, wurden FEM-Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse in Abbildung 21 zeigen, dass ein auf 200 °C erwärmtes Aluminiumrohr (EN AW-6082, Wandstärke 1 mm, Länge 300 mm), welches mit Wasser der Temperatur $T = 20$ °C gefüllt wird, in weniger als zwei Sekunden nahezu 20 °C annimmt.

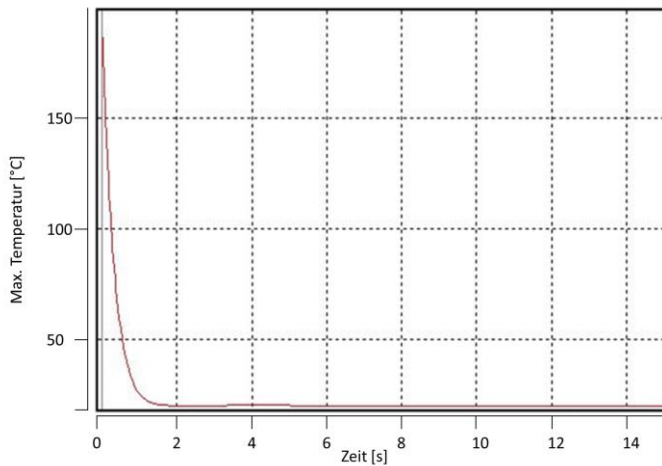


Abbildung 21: Temperatur-Zeit-Diagramm des Abkühlvorgangs aus FEM-Simulation

In Absprache mit dem PbA wurde die Möglichkeit diskutiert, den Versuchsparameter Temperierung durch den Versuchsparameter Blechdicke zu ersetzen, um den Gesamtfließwiderstand der Rohre über unterschiedliche Querschnittsflächen anzugleichen. In Abbildung 22 ist dargestellt, wie durch die Querschnittsfläche, bzw. die Blechdicke t , die unterschiedlichen Fließspannungen angeglichen werden könnte. Die Umsetzbarkeit dieses alternativen Ansatzes, bzw. in wie weit der Lötprozess zum Fügen der unterschiedlichen Blechstärkenkombinationen geeignet ist, wurde in zeitlicher Reihenfolge anschließend, inhaltlich zugehörig in AP2, untersucht. Dabei zeigte sich, dass unterschiedliche Wandstärken von Stahl und Aluminium nur sehr schwierig im Laserlötverfahren gefügt werden können.

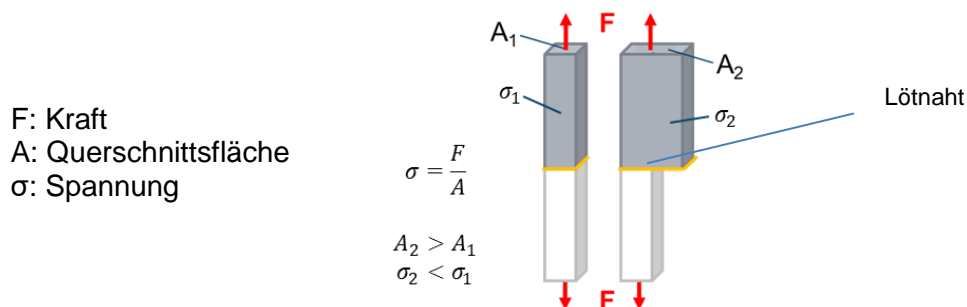


Abbildung 22: Hybridmaterial aus zwei Grundwerkstoffen und Lot unter Zugbelastung: Verringerte Spannung σ_2 gegenüber σ_1 bei gleicher Kraft F durch größere Querschnittsfläche A_2 in der dunkelgrauen Werkstoffhälfte der rechten Probe

- **Schema der Hybrid-Zugversuche**

Bevor hydraulische Tiefungsversuche, die aufgrund hoher Versuchszeiten und der notwendigen Größe der Proben sehr aufwändig sind, durchgeführt werden, werden zunächst Zugversuche mit unterschiedlich ausgerichteten Lötnahten durchgeführt, um den Versuchsaufwand gering zu halten. Bei einer Lötnaht senkrecht zur Krafrichtung herrscht der kritische Fall der Zugbelastung, während durch eine geneigte Lötnaht die Belastung zur Scherbelastung übergeht, siehe Abbildung 23. Gegenüber Scherung ist die Lötnaht deutlich widerstandsfähiger. Im Anschluss sollen als geeignet identifizierte Proben zusätzlich im hydraulischen Tiefungsversuch geprüft werden.

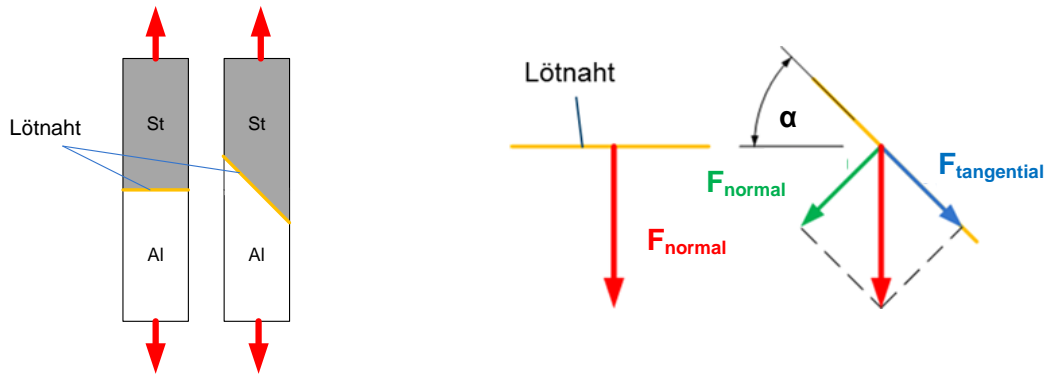


Abbildung 23: links: Zugproben der Hybridverbindung mit Löt-nahten unterschiedlicher Ausrichtung; rechts: Kräfteverhältnis an der Löt-naht der Zugprobe

• **Ergebnis Hybrid-Zugversuche**

Es entstanden 40 Parameterkombinationen für die Versuche, aufgelistet in Tabelle 3, welche jeweils fünf Mal wiederholt wurden. Bei Parameterkombinationen mit stark schwankenden Resultaten wurden die Versuche bis zu zehn Mal wiederholt. Insgesamt ergab sich somit ein Gesamtumfang von 323 Versuchen. Die Proben wurden in AP 3 hergestellt.

Tabelle 3: Parameterkombinationen der durchgeführten Hybridzugversuche

Nr.	St	Al	t _{St} [mm]	t _{Al} [mm]	Prüfgeschwindigkeit [mm/min]	Löt-naht-neigung
1	DC 05	EN AW-6082	1	1	1	0°
2	DC 05	EN AW-6082	2	2	1	0°
3	DP600	EN AW-6082	2	2	1	0°
4	DP600	EN AW-7075	2	2	1	0°
5	DC 05	EN AW-7075	2	2	1	0°
6	DP600	EN AW-6082	1	2	1	0°
7	DC 05	EN AW-6082	1	2	1	0°
8	DC 05	EN AW-7075	1	2	1	0°
9	DP600	EN AW-6082	1	1	1	0°
10	DP600	EN AW-7075	1	2	1	0°
11	DC 05	EN AW-6082	1	1	1	45°
12	DC 05	EN AW-6082	2	2	1	45°
13	DP600	EN AW-6082	2	2	1	45°
14	DP600	EN AW-7075	2	2	1	45°
15	DC 05	EN AW-7075	2	2	1	45°
16	DP600	EN AW-6082	1	2	1	45°
17	DC 05	EN AW-6082	1	2	1	45°
18	DC 05	EN AW-7075	1	2	1	45°
19	DP600	EN AW-6082	1	1	1	45°
20	DP600	EN AW-7075	1	2	1	45°
21	DC 05	EN AW-6082	1	1	10	0°
22	DC 05	EN AW-6082	2	2	10	0°
23	DP600	EN AW-6082	2	2	10	0°
24	DP600	EN AW-7075	2	2	10	0°
25	DC 05	EN AW-7075	2	2	10	0°
26	DP600	EN AW-6082	1	2	10	0°
27	DC 05	EN AW-6082	1	2	10	0°
28	DC 05	EN AW-7075	1	2	10	0°
29	DP600	EN AW-6082	1	1	10	0°

30	DP600	EN AW-7075	1	2	10	0°
31	DC 05	EN AW-6082	1	1	10	45°
32	DC 05	EN AW-6082	2	2	10	45°
33	DP600	EN AW-6082	2	2	10	45°
34	DP600	EN AW-7075	2	2	10	45°
35	DC 05	EN AW-7075	2	2	10	45°
36	DP600	EN AW-6082	1	2	10	45°
37	DC 05	EN AW-6082	1	2	10	45°
38	DC 05	EN AW-7075	1	2	10	45°
39	DP600	EN AW-6082	1	1	10	45°
40	DP600	EN AW-7075	1	2	10	45°

Die höchsten Festigkeitswerte mit bis zu 120 MPa Bruchspannung zeigten sich bei Hybridproben der Werkstoffkombination DC 05 mit EN AW-6082 (Abbildung 24, links) bei gleichen Blechstärken von $t=1$ mm. Generell zeigten Zugproben mit EN AW-6082 höhere Festigkeiten als mit EN AW-7075. Der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit war nicht signifikant. Die Auswertung zeigte weiterhin, dass die Variation der Blechstärkenkombination den größten Effekt auf die Nahtfestigkeit hat (Abbildung 24, rechts).

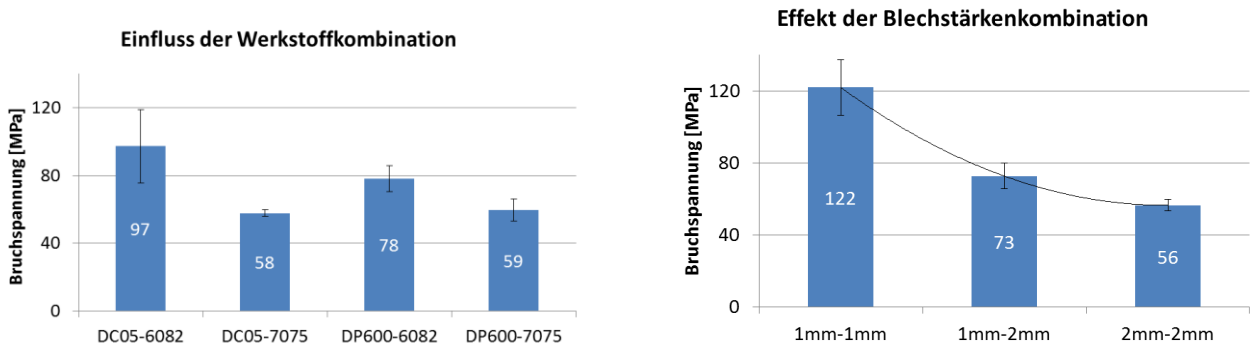


Abbildung 24: links: Bruchspannung der Lötnaht in Abhängigkeit der Werkstoffkombination (0°-Proben); rechts: Effekt der Blechdicke auf Bruchspannung der Lötnaht (0°-Proben); jeweils mit Angabe der Standardabweichung

Das Lot hat eine geringere Festigkeit als die Stahl- und die verwendeten Aluminiumlegierungen. Die Proben versagten daher wie zu erwarten im Fügebereich bevor es zur plastischen Umformung des Blechmaterials kam. Eine Neigung der Lötnaht um 45° führte zu einer proportionalen Erhöhung der Bruchkraft aller Parameterkombinationen gegenüber den 0°-Proben. Qualitativ entsprechen die Ergebnisse der 45°-Proben hinsichtlich der Bruchspannung denen der 0°-Proben. Diese Erhöhung der Bruchspannung war allerdings nicht ausreichend, um durch die Belastung den plastischen Verformungsbereich der Bleche zu erreichen. Gegenüber einer durchschnittlichen Bruchspannung von 76 MPa bei den 0°-Proben beträgt die gemittelte Bruchspannung bei den 45°-Proben 114 MPa. Der Unterschied im Faktor 1,5 entspricht mit der um den Faktor $\sqrt{2}$ größeren Fügefläche zuzüglich der Ergebnisstreuung.

Die Ergebnisse der Zugversuche eignen sich allerdings gut, um die Festigkeit der Lötverbindungen in Abhängigkeit von Blechstärke, Werkstoffkombination und Prüfgeschwindigkeit zu bestimmen. Die Festigkeitswerte der Lötnaht in Abhängigkeit der Parameterkombination wurden in das Simulationsmodell in AP7 implementiert, um so realistischere Simulationsergebnisse zu erhalten.

Das spröde Verhalten der Lötnaht wurde durch eine High-Speed-Kamera aufgezeichnet.

• Erichsenprüfung mit Hybridproben

Der Tiefungsversuch nach Erichsen wurde neben den Zugversuchen als zusätzliche Alternative zu den hydraulischen Tiefungsversuchen ausgewählt und durchgeführt. Dieser Versuch ist hinsichtlich der Versuchsführung und der -ergebnisse dem hydraulischen Tiefungsversuch sehr ähnlich, erfordert aber wesentlich weniger Aufwand in der Versuchsdurchführung und benötigt geringere Mengen an Probenmaterial. Die Belastungsfläche unterscheidet sich zu Prüfungsbeginn ebenfalls:

Bei der hydraulischen Tiefung wird von Beginn an die gesamte Prüffläche belastet, während es bei der Erichsenprüfung zu Anfang nur einen Berührungspunkt oder eine kleine Fläche gibt, die sich mit zunehmender Eindringtiefe des Kugelstempels langsam vergrößert. Bei einem Blechdickenunterschied wird im Erichsenversuch zudem zuerst das dickere Blech solange verformt, bis der Stempel ebenfalls mit dem dünneren Blech Kontakt hat. Das Fenster geeigneter Parameterkombinationen sollte daher durch den Erichsen-Tiefungsversuch eingegrenzt werden. Es wurden für vier Parameterkombinationen mit jeweils sechs Wiederholungen insgesamt 24 Proben untersucht, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Parameterkombinationen der durchgeführten Erichsenversuche

Nr.	St	t _{St} [mm]	Al	t _{Al} [mm]
1	DC 05	1	EN AW-6082	1
2	DC 05	1	EN AW-6082	2
3	DP600	1	EN AW-6082	1
4	DP600	1	EN AW-6082	2

Als günstigste Kombination stellte sich DP600 mit EN AW-6082 in gleicher Blechstärke (1 mm) heraus. In einem Teil der Versuche mit dieser Werkstoffkombination konnte der Umformstempel das Blech bis zum Bruch im Aluminiumgrundmaterial um bis zu 10 mm tiefen (Abbildung 25 und Abbildung 26). Im Gegensatz zu den Zugversuchen wurde aufgrund der veränderten Beanspruchungsart ein duktiler Verhalten der Lötnaht beobachtet.

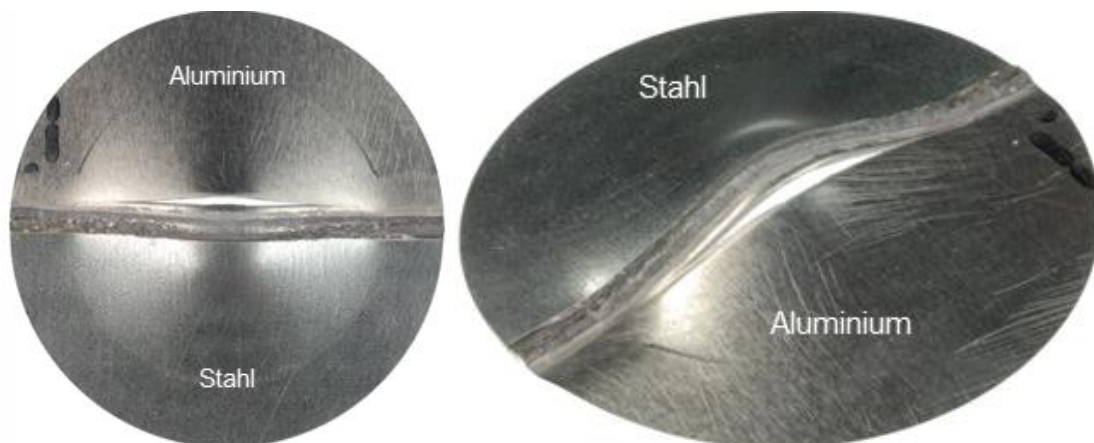


Abbildung 25: Umgeformte Erichsenprobe (Ø50 mm) DP600-EN AW-6082 1 mm/1 mm; Tiefung im Dombereich 10 mm; Vorderansicht (links), Ansicht schräg auf die Naht (rechts)

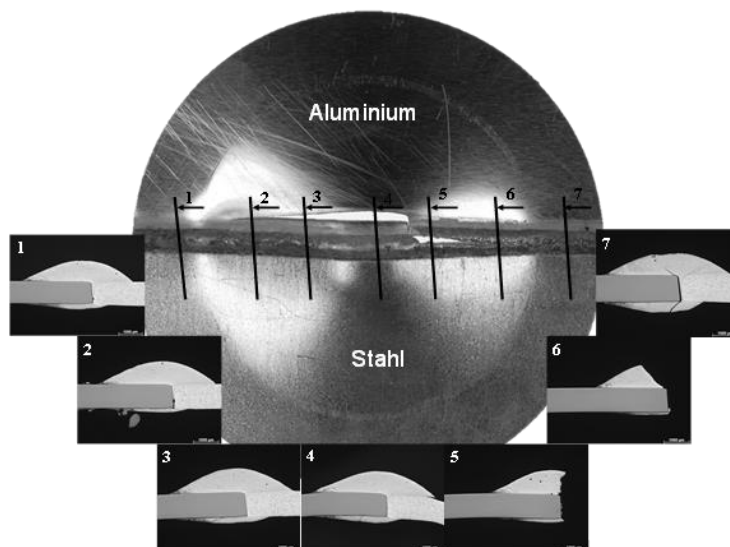


Abbildung 26: Schliffbilder der Probe aus Abbildung 25

- **Hydraulischer Tiefungsversuch mit Hybridproben**

Der hydraulische Tiefungsversuch wurde abschließend für die Untersuchungen an Flachmaterial sechs Mal mit zwei Parameterkombinationen durchgeführt. Untersucht wurde dabei die Kombination, die sich im Erichsen-Tiefungsversuch als gemeinsam umformbar erwiesen hatte (DP600-EN AW-6082-1 mm/1 mm) und die Kombination, deren Lötnaht sich im Zugversuch als besonders fest erwiesen hatte (DC 05-EN AW-6082-1 mm/1 mm). Die höchste Umformbarkeit wurde mit der Materialkombination DC 05-EN AW-6082-1 mm/1 mm erreicht (Abbildung 27). Diese Probe konnte bei einem Öldruck von 10 bar um 15 mm getieft werden, bis das Versagen des Aluminiumblechmaterials zum Abbruch führte. Da das Versagen der Proben im Aluminiumblechmaterial entstanden ist, ist somit die final ermittelte Lötnaht stärker umformbar als das Aluminiumgrundmaterial. Durch die erfolgreiche Umformung des gelöteten Flachmaterials wurde die generelle Umformbarkeit der hybriden Stahl-Aluminium-Halbzeuge in einem Prozessschritt nachgewiesen.

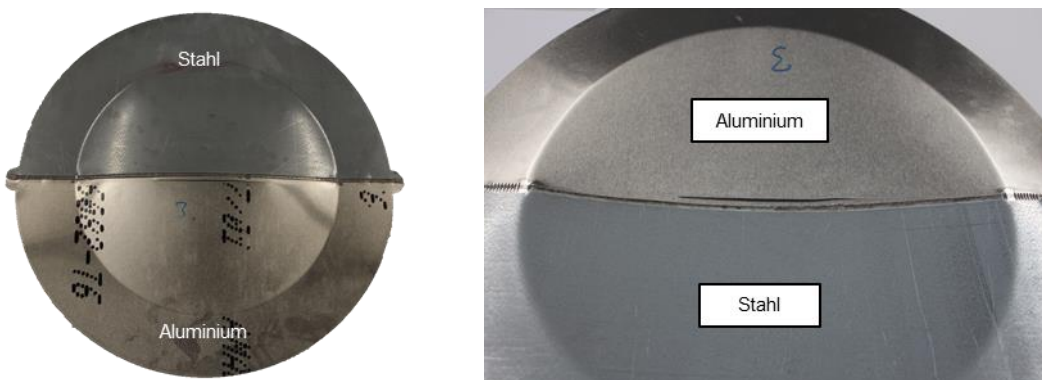


Abbildung 27: Umgeformte Hybridblechprobe (Ø100 mm) aus hydraulischem Tiefungsversuch DC 05-EN AW-6082-1 mm/1 mm; Tiefung im Dombereich 15 mm; Vorderansicht (links) und schräge Rückansicht (rechts)

AP5 Metallographische Analyse der Fügeergebnisse und Analyse der Versagensbilder umgeformter Proben (LZH, IPH)

Von den in AP3 erzeugten Proben wurden Querschliffe erstellt und mit dem Lichtmikroskop untersucht. Die Schliffbilder (Abbildung 4, - Abbildung 17) zeigen eine Auswahl der Ergebnisse und lassen eine Einschätzung der Qualität der Verbindungen anhand von aufgeschmolzenen Bereichen und der Durchmischung von Lot und Grundmaterial zu. Im weiteren Projektfortschritt wurden sowohl an gelöteten als auch an umgeformten Proben Mikrohärtemessungen (Abbildung 17) durchgeführt, weiterhin wurden mittels EDX-Analysen die Phasensäume im REM untersucht sowie die Bruchflächen der Zugproben in Hinblick auf die Bruchentstehung betrachtet. Dabei konnten weitere Erkenntnisse über die Belastbarkeit der Fügeverbindung gewonnen werden.

Die Prozessübertragung auf Rohrwerkstoffe sowie die Innenhochdruckumformung wurden ebenfalls von metallographischen Untersuchungen begleitet, um die Qualität bewerten und sicherstellen zu können (Abbildung 35 und Abbildung 42). Mit einer μ CT-Aufnahme konnte die Naht auf 360° zerstörungsfrei betrachtet und ihre Homogenität beurteilt werden (Abbildung 37 in AP 8).

AP6 Aufbau einer Spanntechnik für das Laserstrahllöten von Tailored Hybrid Tubes (LZH)

Nach einer Recherche im Hinblick auf am Markt erhältliche Spanntechniken, wurde eine ebensolche beschafft und an die gegebenen Bedingungen (Abmessungen der Rohre, Anschlag für wiederholgenaue Positionierung, Einspannung in Rotationsachse) angepasst. Abbildung 28 zeigt rechts die Spannvorrichtung im eingebauten Zustand mit gespannten Rohren und links die Funktionsweise der zugekauften Innenrohrspanntechnik beispielhaft an einem Halbrohr. Die Rotationsachse kann ebenfalls über die CNC-Steuerung des Portalsystems angesteuert werden. Durch die Verwendung eines Dreibackenfutters kann die Spannvorrichtung mittig und dauerhaft an der Drehachse befestigt werden. Mithilfe eines hier nicht dargestellten Anschlags lassen sich die Rohrab-

schnitte reproduzierbar positionieren. Der Spalt lässt sich wie schon zuvor für die Flachmaterialversuche mit einem Fühlerlehrband einstellen.

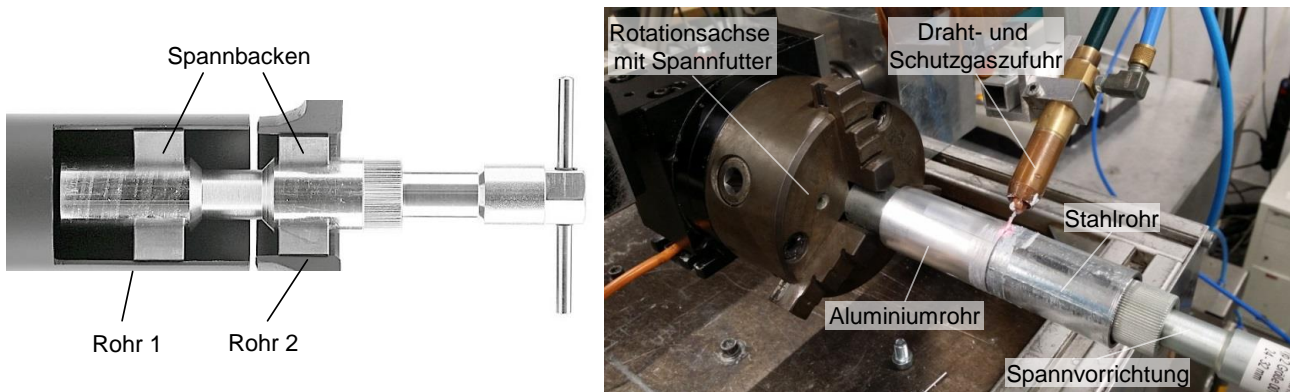


Abbildung 28: Spannvorrichtung, links: Darstellung Funktionsprinzip [Quelle: <http://www.centromat.de>; Innenzentrier-Vorrichtung Typ 2], rechts: eingebauter Zustand der modifizierten Spannvorrichtung

AP7 Modellaufbau und Simulation des IHU-Prozesses (IPH)

- **Entwicklung des Simulationsmodells**

Die einstufige Auslegung des IHU-Prozesses wurde mittels FEM (LS-DYNA) als explizites Schalenmodell durchgeführt. In ersten Simulationen konnte gezeigt werden, dass sich die Fließgrenzen von Stahl und Aluminium über die Blechdicken so anpassen lassen, dass eine gemeinsame Umformung auch bei stark unterschiedlichen Fließspannungen, wie z. B. DP600 mit EN AW-6082 (siehe Abbildung 19, AP 4), möglich ist. In Abbildung 29 ist das Ergebnis der FEM-Simulation mit gleichen Wandstärken der Werkstoffe DP600 und EN AW-6082 zu sehen. Die geringere Fließspannung führt zu einer Umformung des Aluminiumteils bevor sich der Stahlteil verformt. Die größten Spannungen treten am Übergang der beiden Teile auf, sodass es an der Lötnaht zum Bruch kommt. Abbildung 30 zeigt die Simulation eines erfolgreichen Umformprozesses eines THTs mit unterschiedlichen Wandstärken, Parameter siehe Tabelle 5.

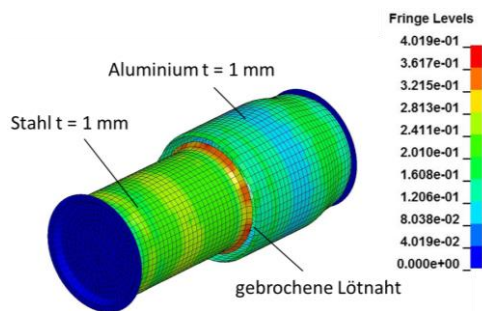


Abbildung 29: FEM-Simulation des Umformprozesses für IHU-THT mit gleichen Blechdicken; Darstellung ohne Formwerkzeug; farbliche Darstellung der v.-Mises-Vergleichsspannung, Werte in GPa

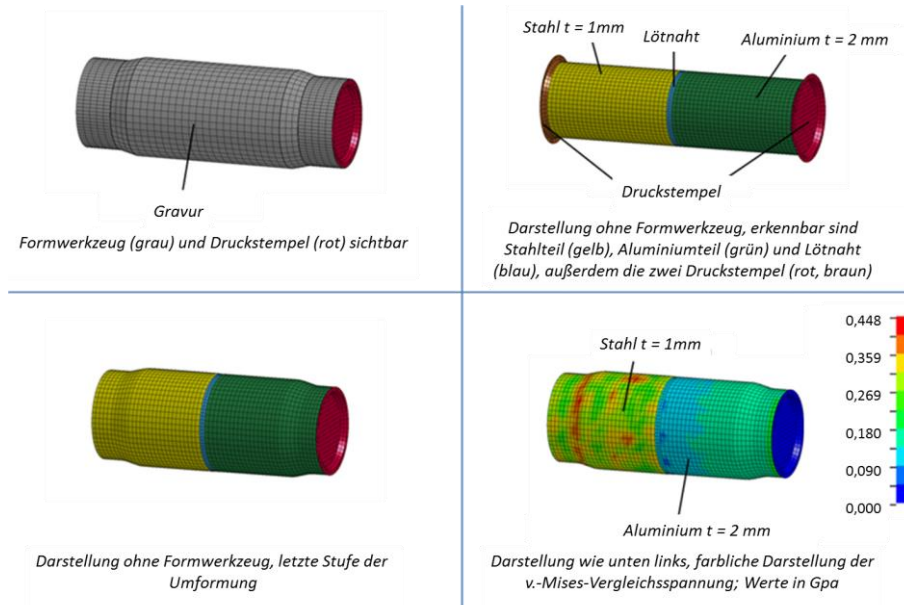


Abbildung 30: Erstes Simulationsmodell für IHU-THT mit vereinfachter Geometrie anstelle T-Stück-Gravur im Kontaktbereich

Tabelle 5: Parameter der in Abbildung 30 dargestellten Simulation

Werkstoff	Wandstärke	Rohr		Stempelweg	Umformdauer	max. Druck
		Mitten-Ø	Länge			
DP600	1 mm	85 mm	300 mm	22 mm	10 s	150 bar
EN AW-6082	2 mm					

• **Parameterstudie FEM-Simulation**

Mit dem vorhandenen Simulationsmodell wurde eine Parameterstudie zur Umformbarkeit von Stahl-Aluminium-THTs im IHU-Verfahren durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss

- des Innendrucks und
- der Wandstärke

auf den Verlauf der Verschiebung bestimmter Modellelemente der FEM-Simulation betrachtet. Zur Beurteilung des Umformverhaltens wurde die Verschiebung von zwei Elementen des Stahl- und des Aluminiumrohrteils in radialer Richtung betrachtet, welche direkt an den Fügebereich angrenzen (Abbildung 31). Die Verschiebung über den zeitlichen Verlauf der Umformung betrachtet ergibt das Verschiebungsdiagramm (Abbildung 33).

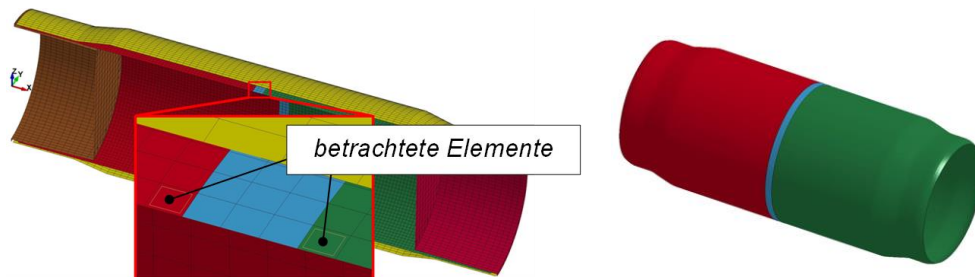


Abbildung 31: links: Halbschnittsdarstellung des IHU-THT-Simulationsmodells im Initialzustand mit Ursprung des Koordinatensystems; vergrößerte Darstellung des Übergangsbereichs des THT mit Stahlteil (rot), Fügezone (blau) und Aluminiumteil (grün); beispielhafte Markierung zweier Schalenelemente im Randbereich, die sich zur Beurteilung der Verschiebung eignen; rechts: ausgeformte THT-Geometrie

Untersucht wurden drei unterschiedliche Druckverläufe und ihre Auswirkung auf die Umformung (Abbildung 32). Der Verlauf der drei Druckkurven ist qualitativ gleich und beginnt mit einer schnell-

len Erhöhung bis zum Arbeitsdruck und ab $t = 3,5$ s mit einem langsameren Anstieg auf hohem Druckniveau zum Kalibrieren. Die Druckkurven p1 und p2 sind empirisch so ausgewählt worden, dass es bei p1 noch zu keiner vollständigen Ausformung kommt ($p1_{\max} = 90$ bar) und bei p2 eine vollständige Ausformung stattfindet ($p2_{\max} = 97,5$ bar). Der Druckverlauf p3 wurde so ausgelegt, dass $p3_{\max} = 195$ bar doppelt so hoch wie $p2_{\max}$ liegt. In der Betrachtung des Verschiebungsdiagramms in Abbildung 32 zeigt sich, dass der Innendruck die Dauer des Innendrucks beeinflusst. Sobald ein Mindestdruck erreicht wird, hier 97,5 bar, bleibt die Qualität der Umformung gleich und höhere Drücke führen ab dann zu niedrigeren Umformdauern. Darüber hinaus konnten keine weiteren Wechselwirkungen festgestellt werden. In den Fällen beider Werkstoffkombinationen war es möglich, durch die Wandstärkenvariation das Umformverhalten von Stahl- und Aluminiumteil für eine gleichmäßige Umformung anzupassen.

Außerdem wurde der Einfluss unterschiedlicher Wandstärken von Stahl- und Aluminiumteil für eine Aufweitung einer rotationssymmetrischen Geometrie nach Abbildung 31 gezielt untersucht. Dabei wurde die Wandstärke des Werkstoffs mit der geringeren Festigkeit erhöht, um die Angleichung des Umformverhaltens zu erreichen. Im realen Versuch ist dieses aufgrund von aktuell begrenzt lieferbaren Blechstärken, sowie Einschränkungen bei der Lötbarkeit, noch nicht möglich.

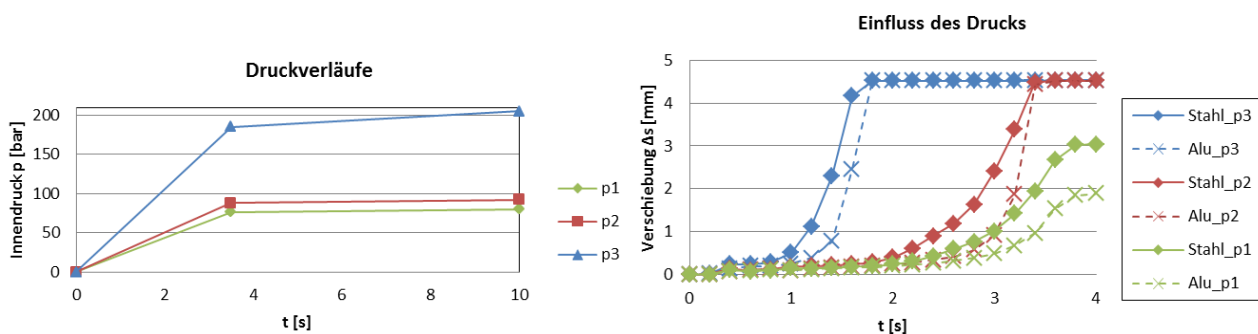


Abbildung 32: links: verwendete Druckverläufe; rechts: Verschiebungsdiagramme der IHU-THT-Simulation mit DC 05 und EN-AW 6082 in gleicher Wandstärke 1 mm, vollständige Ausformung ab Druckkurve p2

Die Werkstoffkombinationen DC 05-EN/AW-6082 und DP600/EN AW-6082 wurden untersucht, da für diese Werkstoffe alle relevanten Materialkennwerte aufgenommen werden konnten. In den Simulationsreihen wurde die Wandstärke des Werkstoffs mit der geringeren Festigkeit in Zehntelmillimeterschritten erhöht, während die Wandstärke des zweiten Werkstoffs konstant gehalten wurde. So entspricht bspw. in Abbildung 33 links die Kurve *St1,4* dem Verlauf des Stahlelements mit der Wandstärke 1,4 mm und die Kurve *Al(1,4)* dem des Aluminiumelements mit der Wandstärke 1,0 mm aus derselben Simulation.

Die Simulationen zeigen, dass auf diese Art und Weise für beide Werkstoffkombinationen eine Angleichung des Umformverhaltens der Stahl-Aluminium-Halbzeuge möglich ist. Im Verschiebungsdiagramm zeigt sich dies durch einen deckungsgleichen Verlauf der gestrichelten und der Volllinie einer Farbe (Abbildung 33). Danach lassen sich die Kombination DC 05 in 1,2 mm und EN AW-6082 in 1,0 mm Blechstärke, sowie die Kombination DP600 in 1,0 mm und EN AW-6082 in 1,6 mm nahezu gleichmäßig als THT im IHU-Prozess umformen. Das geeignetste Umformverhalten einer Kombination von Rohren gleicher Wandstärke von 1,0 mm zeigt die Kombination DC 05-EN AW-6082. Diese Kombination (blaue Kurven in Abbildung 33 links) formt sich nahezu genauso gleichmäßig um, wie die Kombination der optimal angepassten Wandstärken (rote Kurven in Abbildung 33 links).

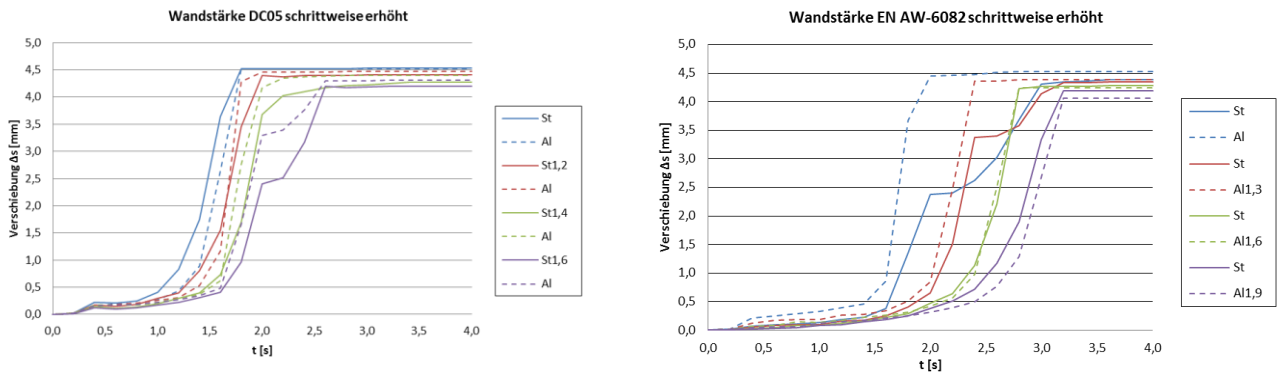


Abbildung 33: Elementverschiebungsdiagramme, links: DC 05-EN AW-6082, rechts: DP600-EN AW-6082

• Weiterentwicklung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell wurde außerdem um eine T-Stück-Geometrie erweitert, um die Umformversuche in AP 9 auslegen zu können. Mit dem neuen Modell konnte die gemeinsame Umformung eines THTs gleicher Wandstärke (1 mm) in einer T-Stück-Gravur erfolgreich simuliert werden (Abbildung 34). Dabei konnte ein IHU-THT im Bereich der Fügezone um bis zu 2 mm ausgeformt werden, ohne ein Versagen in Lötnaht, Stahl- oder Aluminiumgrundwerkstoff auftrat.

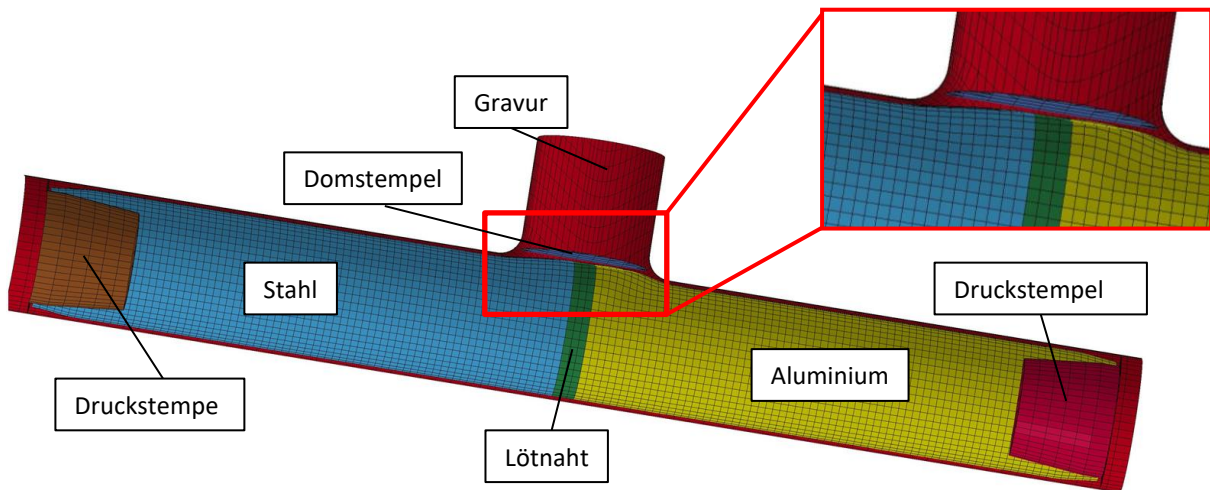


Abbildung 34: Halbschnittdarstellung des Simulationsmodells des IHU-THT-Prozesses am Ende des IHU-Prozesses mit vergrößertem Ausschnitt der Ausformung im Dombereich

AP8 Laserstrahllöten von Tailored Hybrid Tubes (LZH)

Zur Übertragung des Lötprozesses von Blechen auf 3D-Bauteile (Rohre) wurden die in AP 3 ermittelten Prozessparameter an die veränderten Bedingungen angepasst. Da die bisher verwendeten Stahl- und Aluminiumwerkstoffe als Rohre in den benötigten Wandstärken zunächst nicht erhältlich waren, wurden ein unverzinkter Stahl (E235+C) und der Aluminiumwerkstoff EN AW-6060 gewählt. Abbildung 35 zeigt einen Querschliff einer Rohrlötung an einer solchen Mischverbindung. Aufgrund der veränderten Geometrie im Vergleich zum Flachmaterial mussten die Parameter überprüft und angepasst werden. Der benötigte Energieeintrag für den Lötprozess stellte sich als ein wenig größer heraus, da mehr Material zum Ableiten der Wärme vorhanden war. Gleichzeitig kompensierte dies aber auch die Wirkung der vorausseilenden Wärme, die sich aufgrund der Geometrie anders als bei Flachmaterial auswirken kann. Ein Überlappungsgrad von 10° zwischen Anfang und Ende stellte sich als zielführend heraus, um die Naht an dieser kritischen Stelle dicht herstellen zu können, den zusätzlichen Energieeintrag aber gleichzeitig möglichst gering halten zu können.

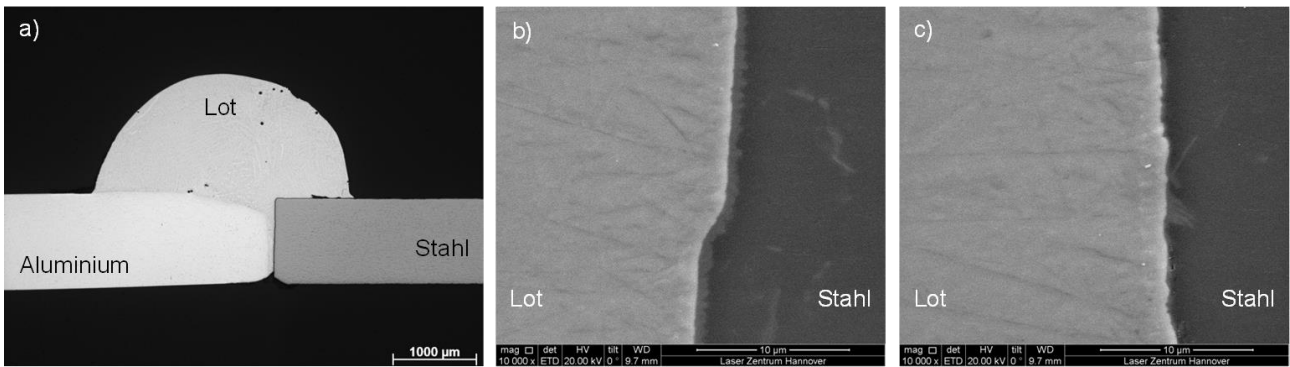


Abbildung 35: Stahlrohr unverzinkt und EN AW-6060 30x1 mm ($P_L = 2,6 \text{ kW}$, $v_F = 1,5 \text{ m/min}$, $v_D = 4,5 \text{ m/min}$, $s = 0,2 \text{ mm}$), a: Querschliff als Übersicht, b/c: Detailaufnahme Übergang Lot-Stahl

Hiermit ist ein Vergleich zwischen den in AP3 gewonnenen Erkenntnissen und Eigenschaften der Rohrverbindung möglich. Der Diffusionsbereich ist ähnlich klein, womit gezeigt werden konnte, dass die Übertragung des Lötprozesses vom Flachmaterial auf Rohre erfolgreich gelungen ist. Die im Vergleich zum Flachmaterial deutlich höhere und schmalere Lotüberhöhung resultiert aus dem reduzierten Benetzungsverhalten des unverzinkten Stahls im Zusammenhang mit dem Aluminiumlot.

Um in einem zerstörungsfreien Verfahren die Naht in ihrem vollständigen Umfang abbilden zu können und um die Homogenität der Naht beurteilen zu können, wurde eine der Rohrproben mit dem auf Röntgenstrahlung basierenden μ CT-Scanner aufgenommen. Abbildung 36 wird die Ausgangsprobe (links), die Entstehung sowie das Ergebnis der μ CT-Aufnahmen gezeigt. Das Verfahren basiert auf Röntgenaufnahmen, die von verschiedenen Ebenen (Abbildung 36 rechts) aufgenommen werden. Diese Bilder aus verschiedenen Blickwinkeln werden durch eine Rotation der Probe um wenige Grad ermöglicht. Aus diesen Aufnahmen lässt sich eine dreidimensionale Abbildung des Probekörpers und damit eine Art virtueller Durchlauf durch die Probe in Form eines Videos erstellen. In Abbildung 37 ist unten beispielhaft eine dieser Aufnahmen dargestellt. Bei Betrachtung aller Aufnahmen lässt sich der Schluss ziehen, dass das Lot an allen Stellen den Spalt füllen konnte. Die Nahtüberhöhung und Nahtwurzel variieren in ihren Abmessungen, dies sollte allerdings keinen Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung und ihre Umformeigenschaften mit sich bringen.

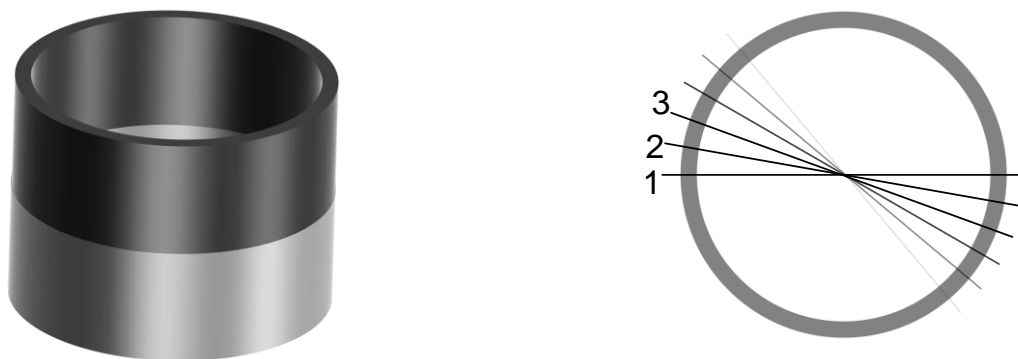


Abbildung 36: μ CT-Aufnahmen: links: Skizze der untersuchten Probe, Abschnitt von gelötetem THT, rechts: Darstellung der Schnitte, die in den Probekörper gelegt werden,

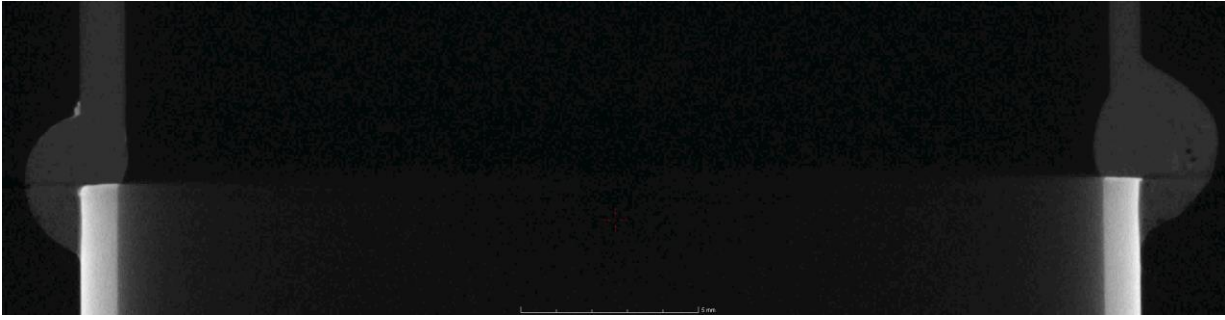


Abbildung 37: µCT-Aufnahme: beispielhafte Darstellung eines aufgenommenen Schnittes

Da diese Materialkombination aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften (wie nachfolgend in AP9 gezeigt wird) nicht für eine gemeinsame Umformung geeignet sind, wurden für einen weiteren Umformversuch die Materialien angepasst. Durch nachträgliche Anpassung von überdimensionierten Rohren konnten ab diesem Punkt mit Versuche mit EN AW-6082) durchgeführt werden. Die Überprüfung der Fügezone anhand eines metallographischen Schliffes (Abbildung 38, links) zeigt, dass es sich, auch bedingt durch den deutlich geringeren Schmelzpunkt der gewählten Legierung (EN AW-6060: 610-655 °C, EN AW-6082: 575-650 °C), um einen aluminiumseitigen Schweißlötprozess handelt. Der Übergangsbereich (Abbildung 38, rechts) zwischen Stahl und Aluminiumlot zeigt jedoch trotz dieser Veränderung im Prozess keine größere Ausbildung eines Phasensaums. Aufgrund der ebenfalls auf dieser Abbildung (Abbildung 38, links) zu erkennen Kantenqualität des Stahlrohrs (vgl. Erkenntnisse aus AP2) ist ein Schweißlötprozess der Festigkeit und Anbindungs-länge zuträglich und unvermeidbar.

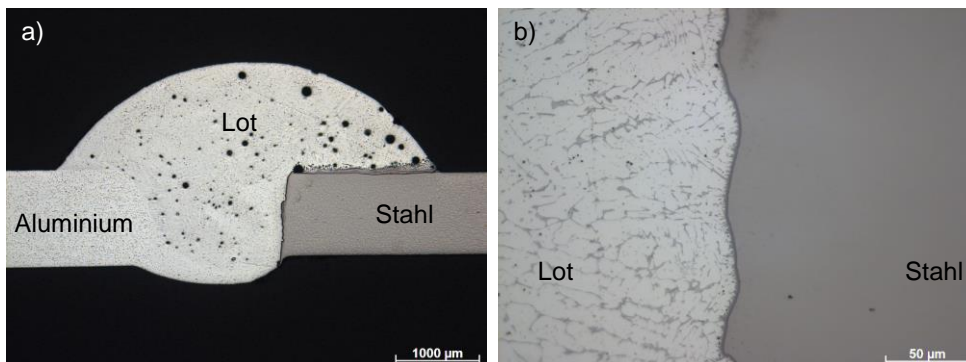


Abbildung 38: Stahlrohr unverzinkt und EN AW-6082 30x1 mm ($P_L=2,6$ kW, $v_F=1,5$ m/min, $v_D=4,5$ m/min, $s=0,2$ mm), a: Querschliff als Übersicht, b: Detailaufnahme Übergang Lot-Stahl

AP9 IHU von Tailored Hybrid Tubes (IPH)

Die in AP8 hergestellten Proben aus E235+C und EN-AW 6060 wurden anschließend in einem IHU-Prozess untersucht. Die gelöteten Proben wurden in eine T-Stück-Gravur eingelegt und bis zum Versagen des Bauteils umgeformt. Die Versuchsanlage ist in Abbildung 39 dargestellt.

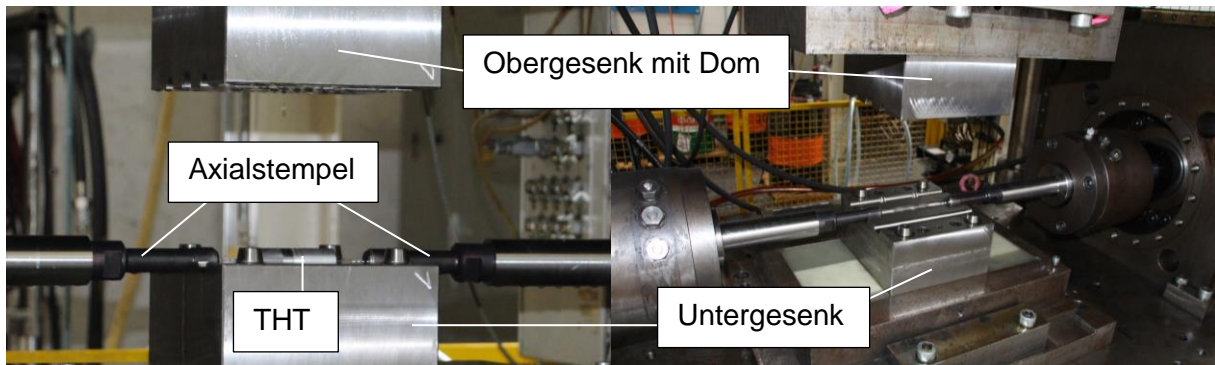


Abbildung 39: Versuchsaufbau mit T-Stück-Gravur und IHU-Anlage bei Gräbener Maschinentchnik

Die Lötnaht zeigte dabei eine hohe Festigkeit und ließ sich mit einem Innendruck von bis zu 600 bar belasten, bevor sie brach. Bis zum Bruch der Naht fand eine deutlich erkennbare Ausformung im Aluminiumteil statt. Im Stahlteil kam es aufgrund der hohen Festigkeit zu keiner Umformung.



Abbildung 40: THTs aus E 235+C und EN-AW 6060 vor (links) und nach dem Umformvorgang (mittig) und Bruchbereich der umgeformten Probe 1 (rechts)

Deutlich bessere Ergebnisse hinsichtlich einer gemeinsamen Umformung konnten mit Proben der Werkstoffkombination E235+C und EN-AW 6082 erzielt werden. Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen eine erfolgreich umgeformte Probe. Bei der Umformung wurden die Parameter Innendruck, Stempelverfahrweg und Umformdauer variiert, siehe Tabelle 6.

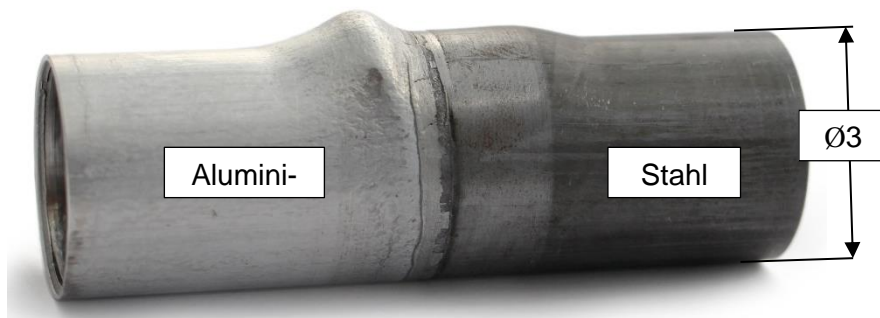


Abbildung 41: umgeformtes THT aus E235+C und EN AW-6082 mit Ausformung in Aluminium- und Stahlteil ohne dass es zu einem Versagen der Lötnaht kam (Versuch 14)



Abbildung 42: Innenhochdruckumgeformte Probe aus Versuch 12, oben EN AW-6082, unten: E235+C, Umformparameter: Druck 700 bar, Prozesszeit 7 s, Gegenhalter in äußerster Position, Stempelnachschub je 3 mm; links: Ansicht aus drei Richtungen, mittig: Querschliff der gleichen Probe, blaue Linie markiert die ursprüngliche Geometrie, rechts: vergrößerte Aufnahme der umgeformten Lötnaht

Tabelle 6: Parameterkombinationen der durchgeführten IHU-Versuche

Versuchsreihe	Innendruck [bar]	Stempelweg [mm]	Umformdauer [s]	Bemerkungen
1	300	0	4	Riss im Aluminium
2	300	0	8	Riss im Aluminium
3	300	1	8	Riss im Aluminium
4	300	1	8	Riss im Aluminium; Lötnaht nicht abgedreht
5	300	1	8s	Riss im Aluminium
6	300	1	20	erfolgreich
7	500	1	20	erfolgreich
8	500	2	20	Riss im Aluminium
9	800	2	20	Naht gebrochen
10	800	2	20	erfolgreich
11	800	3	20	erfolgreich
12	800	3	10	erfolgreich
13	1500	3	20	Naht gebrochen
14	900	3	20	erfolgreich

Es zeigte sich, dass ein geringer Stempelverfahrweg von $s = 1$ mm, um den beide Axialstempel verfahren müssen, benötigt wird, um die erforderliche Abdichtung im IHU-Prozess zu gewährleisten. Mit $s = 1$ mm waren Umformungen mit Innendrücken von bis zu 500 bar möglich, bevor die Proben bei höheren Drücken brachen. Durch eine Vergrößerung des Nachschiebeweges auf bis

zu 3 mm konnte die Umformung mit bis zu 900 bar mit größtmöglichen Verformungen durchgeführt werden. Eine beschleunigte Versuchsdurchführung beeinflusste das Umformergebnis nicht negativ. Die Druckverläufe ausgewählter Versuche sind mit Nachschiebeweg in Abbildung 43 dargestellt.

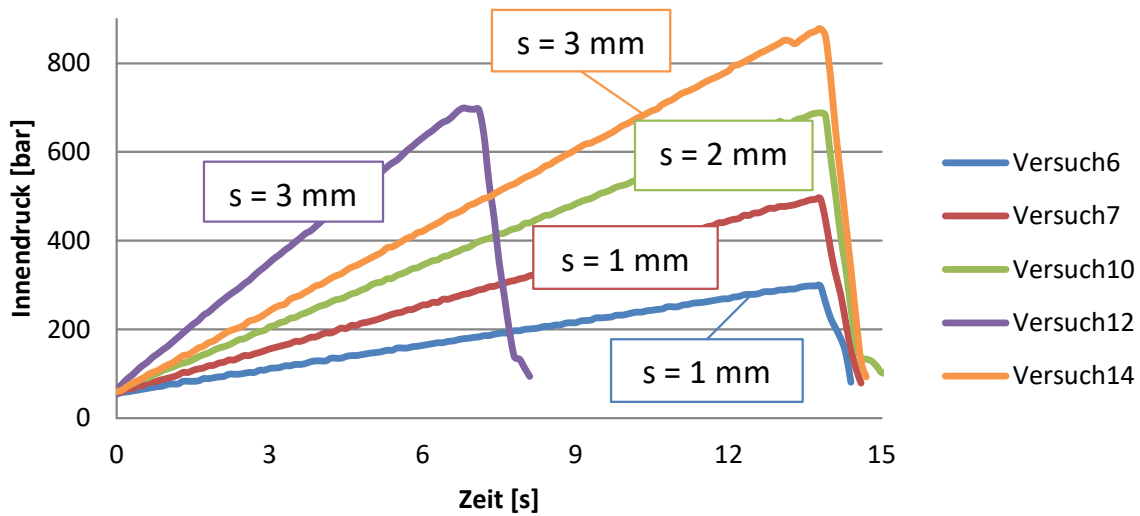


Abbildung 43: Verlauf des Innendruckes über die Zeit mit Stempelverfahrweg s für ausgewählte Versuche

Die Umformung wurde ebenfalls mit den Simulationen aus AP7 verglichen. Dabei zeigte sich, dass das Modell bei der Simulation von E235+C und EN-AW 6082 eine erfolgreiche Ausformung beider Werkstoffhälften prognostizierte. Danach ließen sich die THTs bis zu einem maximalen Innendruck von 700 bar umformen, was in guter Näherung mit dem getesteten Maximum von ca. 900 bar übereinstimmt. Im Unterschied zum realen Experiment, stellte sich in der Simulation eine gleichmäßigere Verformung von Stahl- und Aluminiumteil ein (siehe Abbildung 34 in AP 7). Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass für beide Werkstoffe ein vereinfachtes Materialmodell ausgewählt wurde. Für ein angepasstes Materialmodell müssen zunächst weitere Werkstofftests durchgeführt werden.

AP10 Validierung des Umformens von Tailored Hybrid Parts (LZH & IPH)

Die Validierung des Umformens von Tailored Hybrid Parts wurde in Absprache mit dem PbA an einem Konzeptentwurf für eine gewichtsreduzierte Autositzstruktur durchgeführt. Die Rückenlehne wurde nach einem Entwurf der Firma Johnson Controls aus dem Antrag angepasst, indem der obere Bereich durch einen Aluminiumteil ausgeführt wurde, siehe Abbildung 44. An diesen Aluminiumteil wurden vorgebogene Stahlrohre angelötet. Für die Verbindung der Rückenlehne mit der Nackenstütze und Querstreben sind Bohrungen oder Flansche nötig, welche sich nur aufwendig auf den runden Rohraußenflächen anbringen lassen. Daher wurden aus dem Demonstratorbauteil im IHU-Verfahren Verbindungsstellen als plane Flächen ausgeformt, Abbildung 45 zeigt die gelungene Ausformung der Flächen mit einem Umformgrad ϕ im Bereich von $\phi = 0,1 \dots 0,2$. Dabei wurden in der Simulation die Parameter nach Tabelle 7 verwendet.

Tabelle 7: Parameter der Simulation der Rückenlehne

Werkstoff	Wandstärke	Rohr		Stempelweg	Umformdauer	max. Druck
		Mitten-Ø	Länge			
DP600, EN AW-6082	1 mm	30 mm	800 mm (St) + 400 mm (Al)+ 800 mm (St)	1 mm	4 s	800 bar

Durch die Verwendung des Zwischenstücks aus Aluminium konnte das Bauteilgewicht um 14 % gegenüber einer reinen Stahlausführung reduziert werden. Die anschließende Ausformung der Verbindungsflächen vereinfacht die anschließende Weiterverarbeitung.

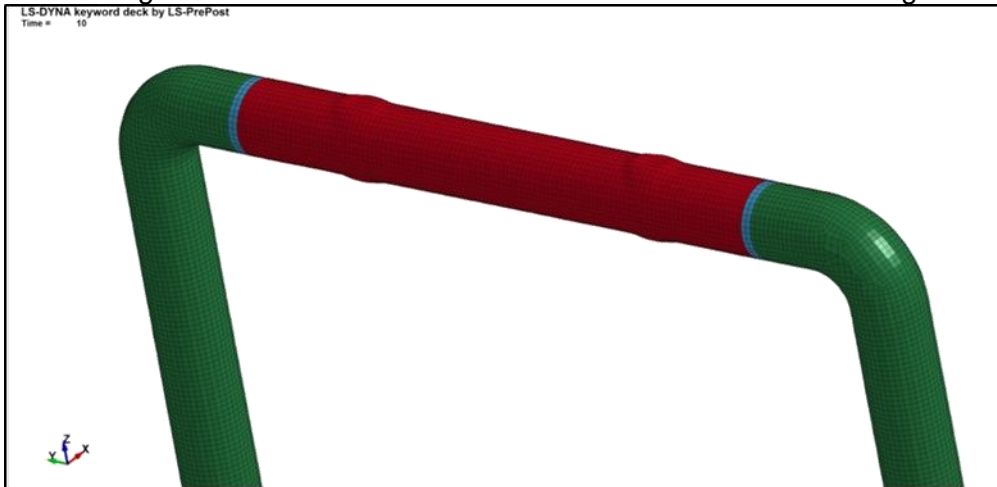


Abbildung 44: oberer Bereich der ausgeformten Rückenlehne, mittig der Aluminiumteil (rot) mit Lötbereich (blau) und Stahlteilen (grün)

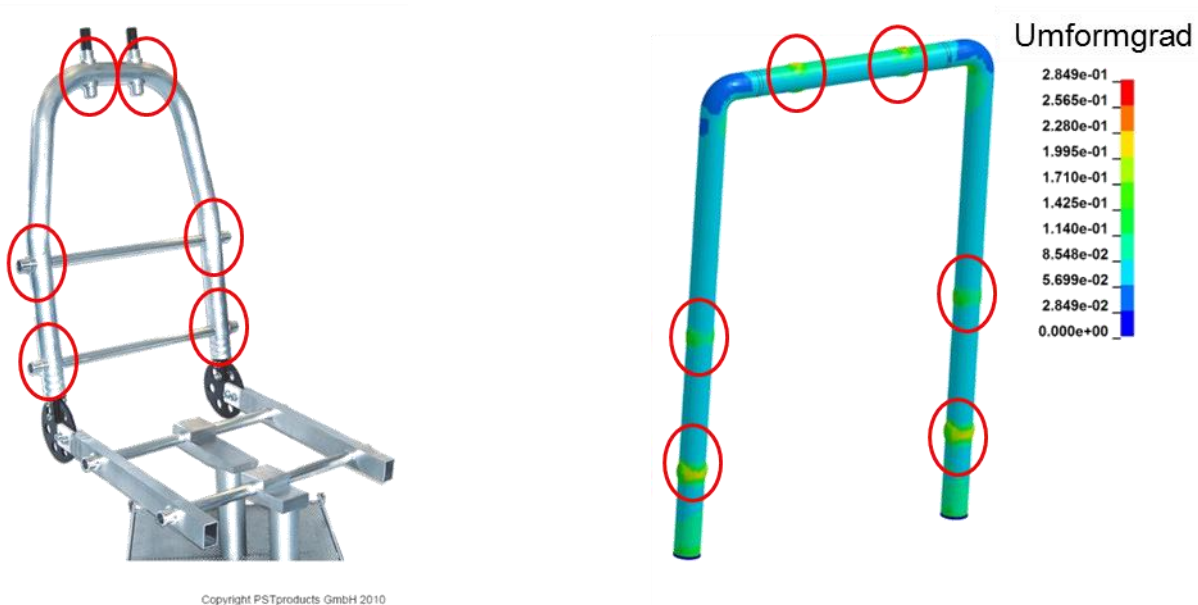


Abbildung 45: Konzept einer Leichtbausitzstruktur mit gekennzeichneten Verbindungsstellen für Kopfstütze und Querverstrebungen (links) und daran angelehnte Rückenlehnenstruktur als IHU-THT-Bauteil mit gekennzeichneten ausgeformten Verbindungsstellen (rechts)

AP11 Erarbeitung eines Anwenderleitfadens (LZH, IPH)

Die Erarbeitung eines Anwenderleitfadens erfolgte zeitgleich mit der Projektbearbeitung. Zum Thema des Stahl-Aluminium-Laserstrahl-lötens wurden praktische Hinweise und Überlegungen zusammengestellt. Der Anwenderleitfaden „Laserstrahl-lötens von Stahl-Aluminium-Verbindungen“ behandelt stichpunktartig drei Abschnitte mit Fragen und Überlegungen, die vor dem Lötprozess, beim Laserstrahl-lötprozess und nach dem Laserstrahl-lötprozess bei der Beurteilung der Verbindung auftauchen können. Eingeflossen sind dabei Erfahrungen und Erkenntnisse, die während der Bearbeitung des Projekts aufgetreten sind, um einem potenziellen Anwender diese als Wissensvorschluss an die Hand zu geben.

In gleicher Weise wurde der Anwenderleitfaden „Innenhochdruckumformung mit hybriden Materialien“ für die IHU-Prozesse erstellt. In diesem wird vor allem auf die umformtechnischen Anforderungen der Einzelmaterialien im Sinne des gemeinsamen Umformprozess eingegangen. Darin wird die Auswahl der zu verwendenden Materialien bis hin zu ihrer Prüfung und Charakterisierung zur Simulationserstellung behandelt.

Die Anwenderleitfäden sind auf der Projekthomepage (ihu-tht.de) zu finden. Weitere Veröffentlichungen und Vorträge, die der Verbreitung der Forschungsergebnisse dienen, sind im Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft zu finden.

2. Verwendung der Zuwendung

Das Projekt wurde am Laser Zentrum Hannover e.V. und am Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH vom 01.03.2014 bis 31.07.2016 bearbeitet. Zur Bearbeitung standen wissenschaftliche Mitarbeiter mit fundierten Kenntnissen in den Bereichen Lasertechnologie, Materialwissenschaften, Maschinenbau, Umformtechnologien und Simulationsmethoden zur Verfügung. Die Arbeiten wurden von Technikern mit abgeschlossener staatlicher Ausbildung und großer Erfahrung unterstützt. Studentische Hilfskräfte wurden zusätzliche als Unterstützung in die Entwicklung des Verfahrens und in die Durchführung des Versuchsprogramms eingebunden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind Studien-, Projekt- und Bachelorarbeiten erarbeitet worden, in denen die studentischen Hilfskräfte ihre Untersuchungen darstellen.

Einsatz wissenschaftlich-technisches Personal

Die verwendeten Zuwendungen wurden abrechnungsgemäß vorrangig für die Finanzierung der Bruttogehälter von zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern, Technikern und studentischen Hilfskräften verwendet. Deren Aufgabenbereiche erstreckten sich von der Versuchsplanung und -durchführung bis zur Prüfung und Auswertung der erzeugten Proben sowie der anschließenden Ergebnisinterpretation und Dokumentation. Zusätzlich übernahmen sie die Koordination der Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses.

Bei Forschungsstelle 1 wurden 24 Personenmonate und bei Forschungsstelle 2 25 Personenmonate wissenschaftlich-technisches Personal eingesetzt.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit geleisteter Arbeit

Aufgrund des Neuheitsgrades des zu entwickelnden Verfahrens konnte nur eingeschränkt auf allgemein vorhandene, theoretische Grundlagen sowie Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Die Entwicklung eines laserbasierten Lötprozesses von Stahl und Aluminium zur Erzeugung von umformbaren Mischverbindungen machte fundierte Grundlagenuntersuchungen notwendig. Neben der Bestimmung des Prozessfensters unter Beachtung der werkstofflichen Besonderheiten der entstehenden Mischverbindungen, waren ausführliche Tests der erzeugten Probekörper erforderlich.

In gleicher Weise stellen die geleisteten Arbeiten neue Grundlagen im Bereich der Umformtechnik dar. Der Nachweis der umformtechnischen Herstellbarkeit hybrider Bauteile im IHU-Prozess wurde in diesem Projekt erstmalig erbracht. Zur Auslegung der Umformversuche, musste das Umformverhalten des Hybridmaterials intensiv getestet und charakterisiert werden, um für die Simulationen verwendet werden zu können. Durch die Simulationen konnte abschließend die Anzahl der zeit- und kostenintensiven experimentellen Versuche relativ gering gehalten werden.

Die geleisteten Arbeiten waren somit notwendig und angemessen. Es mussten keine zusätzlichen Ressourcen zur Durchführung des Vorhabens aufgewendet werden. Der Verlauf der Arbeit im Projekt folgte der im Projektantrag formulierten Planung, wobei eine aufwendungsneutrale Verlängerung um 6 Monate genehmigt wurde.

4. Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen

Projektbegleitender Ausschuss

25.03.2014, 12.08.2014, 12.02.2015, 04.08.2015, 03.02.2016, 07.07.2016

FAT-Arbeitskreis

16.09.2014, 01.10.2015, 15.09.2016

EFB-Arbeitskreis

28.01.2015, Januar 2017

Internetpräsenz

<http://ihu-tht.de/> online seit 17.06.2014

Publikationen

Ross, J.; Nothdurft, S.; Stonis, M.; Kaieler, S.; Behrens, B.-A.: „Hydroformen lasergelöteter Rohre“. BlecheRohreProfile, 2014, 6, 28-31

Ross, J.; Nothdurft, S.; Stonis, M.; Springer, A.; Kaieler, S.; Behrens, B.-A.: Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau. In: Intermezzo der hybriden Werkstofflösungen; Tagungsband T 40 des 35. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung 2015 24./25. März Bad Boll; EFB Hannover 2015; S. 175-184. ISBN 978-3-86776-452-0

Kaieler, S.; Nothdurft, S.; Pfeifer, R.; Seffer, O.; Springer, A.: Laser Beam Welding, Brazing and Soldering of Steel-Aluminum-Dissimilar Joints: Innovative Joining for Lightweight Constructions European Automotive Laser Applications (EALA), 16. Europäische Fachkonferenz, 28.–29. Januar 2015, Bad Nauheim

Nothdurft, S.; Springer, A.; Kaieler, S.; Ross, J.; Stonis, M.: Laser Soldering and Brazing of Steel-Aluminum Sheets for Tailored Hybrid Tubes. Journal of Laser Applications, 2016, 2

Nothdurft, S., Seffer, O., Springer, A., Kaieler, S.: Leichtbau durch laserstrahlgefügte Stahl-Aluminium-Mischverbindungen. Schweißen und Schneiden, 2016, 11

Anwenderleitfaden zum Laserstrahllöten und zur IHU von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen

Pressemitteilungen

Johnson Controls: „Johnson Controls investiert als Kooperationspartner bei Leichtbauprojekt in Zukunftstechnologie - Kombination von Stahl und Aluminium in lasergelöteten Tailored Tubes bietet attraktive Sparpotenziale bei der Volumenfertigung von Sitzlehnen“ 2014

IPH: „Hybrid und maßgeschneidert: Neues Leichtbau-Konzept für die Autoindustrie - Wissenschaftler aus Hannover kombinieren erstmals Tailored Tubes mit Werkstoffverbunden“, 25.06.2014

LZH: „LZH entwickelt Laserlötverfahren für Stahl-Aluminium-Rohre“. 19.06.2014

Messepräsenz

Euroblech Oktober 2016

Fachvortrag

17.-18. März 2015: „Strategien des Karosseriebaus 2015“ (Bad Nauheim) und „EFB-Kolloquium Blechverarbeitung“ (Bad Boll)

Messe April 2015 „Werkstoff-Forum der Hannover Messe“

Nothdurft, S.; Springer, A.; Kaieler, S.; Ross, J.; Stonis, M.: Laser Soldering and Brazing of Steel-Aluminum Sheets for Tailored Hybrid Tubes. ICALEO - International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 18.-22.10.2015, Atlanta

Kaieler, S.; Nothdurft, S.; Pfeifer, R.; Seffer, O.; Springer, A.: Laser Beam Welding, Brazing and

Soldering of Steel-Aluminum-Dissimilar Joints: Innovative Joining for Lightweight Constructions. European Automotive Laser Applications (EALA), 16. Europäische Fachkonferenz, 28.-29.01.2015, Bad Nauheim

Kaierle, S.; Springer, A.; Nothdurft, S.; Pfeifer, R.; Seffer, O.: Automotive lightweight construction by using hybrid materials combinations. 8th International Congress Automotive Doors, 30.06.-01.07. 2015, Köln

Kaierle, S.: Efficient and Reliable Joining of Lightweight Materials. Stuttgarter Lasertage (SLT), 31.05.-01.06.2016, Stuttgart

Kaierle, S.; Nothdurft, S.; Seffer, O.; Springer, A.: Recent Advances in Aluminum Laser Welding. 23rd Annual Advanced Laser Applications Workshop 2016“ (ALAW). 06.-08.06.2016, Plymouth

Lehrinhalte

Seminar „Laserstrahllöten - Grundlagen und Anwendung des Lasers in der Löttechnik“, LZH Laser Akademie seit Juni 2015

Ergebnisveröffentlichung

Endbericht IV. Quartal 2016

5. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Systemtechnik und das gewonnene Prozessverständnis bilden die Basis für eine Umsetzung des Verfahrens im industriellen Maßstab. Anhand der im Schlussbericht dargestellten Ergebnisse erhalten die Anwender die Möglichkeit, im Vorfeld zu prüfen, ob der dargestellte Prozess ihren jeweiligen Anforderungen entspricht und wie dieser ggf. an ihre jeweiligen Bedürfnisse angepasst werden kann. Aufgrund des minimierten, metallurgisch jedoch nicht vollständig zu verhindernden Anteils an intermetallischen Sprödphasen, sind die erzeugten Lötverbindungen hinsichtlich Umformbarkeit zwar Schweißverbindungen überlegen, aber nicht mit Verbindungen aus gleichartigem Material vergleichbar. Durch das hohe Automatisierungspotential des entwickelten Prozesses, ist eine Umsetzung der Technologie für verschiedene Anwendungen mittelfristig wahrscheinlich. Damit kann das Produktportfolio der KMUs erweitert und die Stellung gegenüber Konkurrenten im Markt durch eine Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit gestärkt werden. Die im Projekt realisierten Ansätze und Vorgehensweisen bei der Simulation der Innenhochdruckumformung von laserstrahlgelöteten Stahl-Aluminium-Schweißverbindungen können von den Unternehmen (auch KMUs), die sich mit der situativen Prozessauslegung befassen, verwendet werden.

Das simulierte Demonstratorbauteil zeigt, dass es möglich ist reale Bauteile zur Gewichtsreduktion als IHU-THT zu fertigen. Auf Basis des Simulationsmodells können die Anwender der IHU Technologie in Zukunft die Entwicklung von weiteren Bauteilen als IHU-THT wagen und damit neue Anwendungsmöglichkeiten für die IHU schaffen.

Die erfolgreiche Umformung von Stahl und Aluminium in einem gemeinsamen Prozessschritt bietet weiterhin Potenzial für KMUs aus dem Bereich IHU, sowie der gesamten Blechumformung. Der IHU-THT-Prozess ermöglicht neue Leichtbauprodukte, die aufwendige Fügestrukturen hinfällig machen.

6. Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Im Projektverlauf wurden die Zwischenergebnisse dem projektbegleitenden Ausschuss (PbA) als Vertreter der Wirtschaft halbjährlich vorgestellt, auf diesem Weg erhielten die anwendungsnahen Vertreter der Industrie Einblick in die laserbasierte Löttechnologie zum Fügen von Stahl und Aluminium. Die Mitglieder des PbA beteiligten sich bei diesen Gelegenheiten mit Vorschlägen und Änderungswünschen konstruktiv am Projekt. Zusätzlich zur Unterstützung bei der Planung und

Durchführung der IHU-Versuche, wurden die Forschungsstellen durch die Bereitstellung von Versuchsmaterial und Bereitstellung von Versuchsanlagen unterstützt.

Hinsichtlich eines industriellen Transfers konnte zunächst die generelle Funktionsweise des angestrebten Konzeptes gezeigt werden. Hier wurden wichtige Grundlagen für die Weiterentwicklung zu einer industriellen Anwendung geschaffen, die mittelfristig zu einer Erweiterung der bislang eingesetzten Halbzeuge um laserstrahlgelötete Mischverbindungen aus Stahl und Aluminium zum Einsatz in der Innenhochdruckumformung führen. Das neu geschaffene Modell zur Simulation des Verfahrens bietet dazu die Möglichkeit, die Herstellung von IHU-THT-Bauteilen schnell und kostengünstig abzuschätzen. Die mit den Erkenntnissen aus dem Projekt gefüllten Anwenderleitfäden stehen als öffentlich verfügbare Transferquelle zur Verfügung.

Dieser Transfer der Ergebnisse wird als realisierbar eingeschätzt.

7. Danksagung

Das Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) und das Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH (IPH) danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke e.V. (AiF) für die Förderung (IGF-Nr.: 18028 N) sowie der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) und der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB) für die Unterstützung.

Den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses sei für ihre Mitarbeit und die konstruktiven Diskussionen gedankt:

Hr. M. Bistron	Benteler Steel Tube GmbH
Hr. C. Rauber	BMW Group
Hr. A. Dannheisig	Ehemals Johnson Controls GmbH
Hr. T. Junge	Fischer Hydroforming GmbH
Hr. A. Edelmann	Gräbener Maschinenteknik GmbH & Co. KG
Hr. M. Fuest	Gräbener Maschinenteknik GmbH & Co. KG
Hr. H. Valpertz	Gräbener Maschinenteknik GmbH & Co. KG
Hr. M. Löcker	Kirchhoff Automotive GmbH
Hr. O. Meier	Laser on demand GmbH
Hr. K. Margraf	LMB Laser-Materialbearbeitungs GmbH
Hr. P. Schlüter	LMB Laser-Materialbearbeitungs GmbH
Hr. B.-H. Maas	Poppe+Potthoff Präzisionsstahlrohre GmbH
Hr. M. Hübner	Scansonic
Hr. C. Schmid	SET Ltd.
Hr. J. Meschke	Volkswagen AG
Fr. S. Tegel	weil engineering GmbH

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2010)

Nr.	Titel
227	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünnbleche aus Stahl, 2010
228	Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010
229	Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010
230	Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010
231	Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2011
232	Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011
233	Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, 2011
234	Konsistentes Materialmodell für Umwandlung und mechanische Eigenschaften beim Schweißen hochfester Mehrphasen-Stähle, 2011
235	Makrostrukturelle Änderungen des Straßenverkehrslärms, Auswirkung auf Lästigkeit und Leistung, 2011
236	Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation, 2011
237	Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, 2011
238	Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, 2012
239	Überlasten und ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Feinblechstrukturen, 2012
240	Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte, 2012
241	Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens, 2012
242	Nutzung des Leichtbaupotentials von höchstfesten Stahlfeinblechen durch die Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen auf die Festigkeitseigenschaften, 2012
243	Aluminiumschaum für den Automobileinsatz, 2012
244	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch belastungsgerechte Gestaltung und innovative Lösungen für lokale Verstärkungen von Fahrzeugstrukturen in Mischbauweise, 2012
245	Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit dem geringen Geräuschniveau von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, 2012
246	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch die Entwicklung von Crashabsorbieren aus textilverstärkten Kunststoffen auf Basis geflochtener Preforms und deren Abbildung in der Simulation, 2013
247	Zuverlässige Wiederverwendung und abgesicherte Integration von Softwarekomponenten im Automobil, 2013
248	Modellierung des dynamischen Verhaltens von Komponenten im Bordnetz unter Berücksichtigung des EMV-Verhaltens im Hochvoltbereich, 2013
249	Hochspannungsverkopplung in elektronischen Komponenten und Steuergeräten, 2013
250	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung, 2013

- 251 Parametrischer Bauraum – synchronisierter Fahrzeugentwurf, 2013
- 252 Reifenentwicklung unter aerodynamischen Aspekten, 2013
- 253 Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte – Phase 2, 2013
- 254 Qualifizierung von Aluminiumwerkstoffen für korrosiv beanspruchte Fahrwerksbauteile unter zyklischer Belastung (Salzkorrosion), 2013
- 255 Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen, 2013
- 256 Naturalistic Driving Data, Re-Analyse von Daten aus dem EU-Projekt euroFOT, 2013
- 257 Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge, 2013
- 258 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen, Teile 1 und 2, 2013
- 259 Erweiterung des Kerbspannungskonzepts auf Nahtübergänge von Linienschweißnähten an dünnen Blechen, 2013
- 260 Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss, 2013
- 261 Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit, 2013
- 262 Modellierung der Auswirkungen verkehrsbedingter Partikelanzahl-Emissionen auf die Luftqualität für eine typische Hauptverkehrsstraße, 2013
- 263 Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
- 264 Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
- 265 Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
- 266 Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crash-simulation von Punktschweißverbindungen, 2014
- 267 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
- 268 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
- 269 Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
- 270 Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
- 271 Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
- 272 Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
- 273 UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
- 274 Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
- 275 Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
- 276 Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
- 277 Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015

- 278 Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
- 279 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
- 280 PCM from iGLAD database, 2015
- 281 Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
- 282 Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
- 283 Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
- 284 Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
- 285 Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016
- 286 χ MCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
- 287 Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
- 288 Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
- 289 Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
- 290 Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
- 291 Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
- 292 Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2017

VDA

Verband der
Automobilindustrie

FAT

Forschungsvereinigung
Automobiltechnik

Behrenstraße 35
10117 Berlin
www.vda.de
www.vda-fat.de