

# Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Fügezonen

Thilo Hammers<sup>1, a</sup>, Kay André Weidenmann<sup>1, b</sup>, Volker Schulze<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup>Institut für Werkstoffkunde I, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

<sup>a</sup>thilo.hammers@kit.edu, <sup>b</sup>kay.weidenmann@kit.edu, <sup>c</sup>volker.schulze@kit.edu

**Keywords:** Elektromagnetisches Umformen, Rührreibschweißen (FSW), Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen, mechanische Charakterisierung, Gestaltungsregeln

## Zusammenfassung

Innerhalb des Teilprojektes A9 werden Parametervariationen von drei verschiedenen Fügeverfahren untersucht. Im Falle der elektromagnetischen Umformung (EMU) wurde der Einfluss der Oberflächenvorbehandlungen auf die Festigkeit der Fügeverbindung untersucht. Es zeigte sich, dass durch Strahlen oder Fräsen der Dornoberflächen die Auszugskräfte entscheidend erhöht werden können. Beim Reibrührschweißen (FSW) beschränken sich die aktuellen Untersuchungen auf die Festlegung eines geeigneten Prozessfensters der Parameter Vorschub- sowie Umfangsgeschwindigkeit des Pins. Hierbei wirken sich sowohl für verstärkte als auch unverstärkte Profile niedrigere Vorschubgeschwindigkeiten und hohe Drehzahlen positiv auf die Festigkeit aus. Beim Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen (BHLS) soll das Prozessfenster verschiedener Stoßgeometrien für Diodenlaser und Nd:YAG Laser aufgestellt werden. Zu untersuchende Einflussparameter sind hierbei die Laserleistungen sowie die Vorschubgeschwindigkeit.

## Summary

Within the subproject A9 parameter variations of three different joining methods of reinforced and unreinforced compound extruded profiles of AA6060 have been investigated. The transmittable force of electromagnetic formed tube-mandrel joints is influenced by different surface pretreatment of the mandrels whereas shot peened as well as milled surfaces lead to a significant increase of the pull-out force. The actual investigations on the friction stir welding (FSW) and the bifocal-hybrid-laserbeamwelding (BHLS) process are restricted to the determination of adequate process parameters. For FSW joints lower feeds and higher rotation speeds lead to higher strengths. The BLHS process parameters consisting of feed and laser capacities have to be adapted for different joints.

### Einleitung

Das Teilprojekt A9 - "Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Fügstellen" bringt im Rahmen zentraler und zwingend notwendiger Arbeiten innerhalb des SFB/TR 10 fügetechnische Aspekte in die Auswahl der geeigneten Werkstoffsysteme für das (Verbund-)Strangpressen in den Teilprojekten A1 bis A3 ein. Darüber hinaus beteiligt es sich durch Charakterisierung und Bewertung der aus der Fügstellenvorbereitung resultierenden Randschichtzustände an der Prozessoptimierung im Teilprojekt A6 und ermittelt gemeinsam mit den Teilprojekten A10 und A11 die je nach Verbindungsart besten Fügeverfahren und Fügeparameter. Hierbei wird jeweils die Integrierbarkeit in die Prozesskette des SFB/TR 10 beachtet. Durch systematische Bewertung der gesammelten Erkenntnisse ist es anschließend möglich, gemeinsam mit dem Teilprojekt C1 Gestaltungsregeln für Fügeverbindungen aus Strangpressprofilen abzuleiten, die in den Produktentwicklungsprozess eingehen können.

Durch die zentrale Stellung des Teilprojekt A9 innerhalb des SFB/TR 10 ist es hier möglich, die Auswirkungen der gesamten Prozesskette vom Halbzeug bis zu gefügten Knoten-Profil-Bauteilen zu untersuchen. Des Weiteren wird durch die Charakterisierung der Fügezonen die Schnittstelle zwischen der Charakterisierung auf Probenebene (TP A3) und Strukturebene (TP C6) dargestellt.

### Zielsetzung

Wissenschaftliche Zielsetzung des Teilprojekts A9 ist die Systematisierung und wissenschaftliche Durchdringung der Zusammenhänge zwischen Gestalt sowie Mikrostruktur und dem mechanischen Verhalten von Fügstellen unverstärkter und verstärkter Strangpressprofile. Dazu wurden für unterschiedlich hergestellte Fügeverbindungen Struktur-Eigenschafts- bzw. Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen hergeleitet. Technologisches Ziel war es, damit die Fügstellen hinsichtlich Fügstellenvorbereitung, Fügeverfahren und Fügeparametern zu optimieren und Gestaltungsregeln für Fügeverbindungen aus Strangpressprofilen zu erarbeiten. Durch systematische Bewertung der gesammelten Erkenntnisse ist es anschließend möglich, Gestaltungsregeln für Fügeverbindungen aus Strangpressprofilen abzuleiten.

### Übersicht über die experimentellen Arbeiten

Im Folgenden werden die wesentlichen Arbeiten innerhalb des Teilprojekts A9 - „Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Fügstellen“ aus der Phase II der SFB/TR 10 genannt. Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Charakterisierung von Profil- und Knotenzuständen vor dem Fügen

- Erarbeitung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen bzw. Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen für Fügezonen
- Untersuchungen zum Einfluss von Vorschädigungen
- Ableitung von Gestaltungsregeln für Fügezonen

Zu Beginn soll jedoch zunächst auf die Versuchsführung und die verwendeten Werkstoffe eingegangen werden. Dies geschieht für jedes der Fügeverfahren getrennt. Die Ausführungen sind nach den Fertigungsverfahren Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen (BHLS), Fügen durch elektromagnetische Umformung (EMU) bzw. Rührreibschweißen (Friction Stir Welding - FSW) unterteilt.

### **Werkstoffe und Versuchsführung**

#### ***Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen (BHLS)***

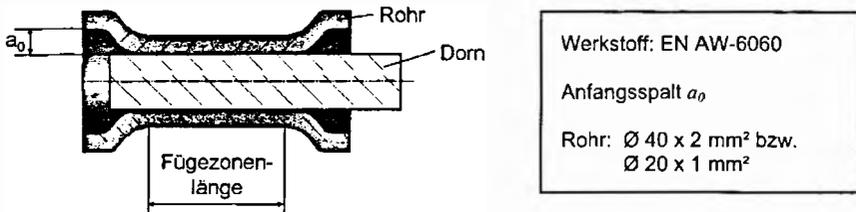
Die Untersuchungen wurden zum einen an Flachprofilen mit den Abmessungen 100 x 2 mm<sup>2</sup> und zum anderen an Rohren mit den Abmessungen 40 x 2 mm<sup>2</sup> aus der Legierung EN AW-6060 (AlMgSi0,5) durchgeführt. Diese wurden im Teilprojekt A11 als I-Stoß bzw. T-Stoß geschweißt. Beim Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen (BHLS) kommen sowohl ein Nd:YAG-Laser als auch ein Hochleistungsdiodenlaser zum Einsatz, deren Fokusslage unabhängig voneinander einstellbar ist. Beim Schweißen der Proben wurden beide Laserleistungen variiert. Zudem wurden Schweißgeschwindigkeiten zwischen 2 m/min und 7 m/min eingestellt. Der verwendete Zusatzdraht aus der Legierung AlSi12 wurde mit variierender Geschwindigkeit zugeführt. Die technologische Beschreibung des Prozesses und die Vorgehensweise zur Bestimmung einer geeigneten Prozessführung zur Herstellung der geschweißten Proben sind dem Beitrag des Teilprojekts A11 "Fügezentrum" zu entnehmen.

Metallographische Querschliffe senkrecht und parallel zur Schweißrichtung wurden angefertigt, um das Schweißnahtgefüge zu analysieren, die Schweißnahtgeometrie zu bestimmen und eventuell gebildete Poren und Heißrisse zu identifizieren. An diesen Proben wurden zusätzlich Mikrohärtmessungen mit einem Mikrohärtprüfer der Bauart Shimadzu durchgeführt, um die Abmessungen der Wärmeeinflusszone zu bestimmen.

Die Zugproben wurden gemäß DIN EN 895 so gefertigt, dass die Schweißnaht jeweils in der Mitte der Messstrecke quer zur Beanspruchungsrichtung verlief. Die Zugversuche wurden mit einer elektromechanischen Prüfmaschine der Bauart Zwick mit einer Nennlast von 100 kN durchgeführt. Die Querhauptgeschwindigkeit wurde mit 2 mm/min so gewählt, dass die nominelle Verformungsgeschwindigkeit in der Messstrecke  $1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  betrug. Die Dehnung wurde, falls nicht anders angegeben, indirekt über den Verfahrensweg der Maschine bestimmt.

### ***Fügen durch elektromagnetische Umformung (EMU)***

Die Untersuchungen erfolgten an, im Teilprojekt A10 hergestellten, elektromagnetisch umformend gefügten Proben. Die Rohre aus EN AW-6060 (AlMgSi0,5) mit 40 mm Durchmesser, 2 mm Wandstärke bzw. 20 mm Durchmesser und 1 mm Wandstärke wurden auf entsprechende Dorne aus dem gleichen Werkstoff gefügt, nachdem diese mit Aceton gereinigt wurden. Der Einfluss von verschiedenen Dornwerkstoffen sowie von verschiedenen Anfangsspaltgrößen wurde bereits untersucht [Bar08b, Bar06]. Ziel der jetzigen Untersuchungen war es, den Einfluss von gezielten Vorbehandlungen der Dorne auf die erreichbaren Fügezonenfestigkeiten zu untersuchen. Eine schematische Zeichnung der Fügezone ist in Bild 1 dargestellt.



**Bild 1:** Fügezone schematisch

Der Fügeprozess erfolgte mit variierenden Ladeenergien, und damit variierenden Druckimpulsen auf die Rohre, je nach Geometrie der Fügepartner und gewünschter Auftreffgeschwindigkeit des Rohres auf den Dorn. Weitere Details zur Herstellung der elektromagnetisch umformend gefügten Proben sind dem Beitrag "Umformtechnisches Fügen leichter Tragwerksstrukturen" zu entnehmen.

Um das Verformungsverhalten der Proben analysieren zu können, wurden in einer elektromechanischen Prüfmaschine der Bauart Zwick mit einer Nennlast von 100 kN Zugversuche bei einer Querhauptgeschwindigkeit von 2 mm/min durchgeführt. Zyklische Versuche wurden bei Zugschwellbeanspruchung ( $R = 0$ ) in einer servohydraulischen Prüfmaschine der Bauart Instron mit einer Nennlast von 63 kN bei einer Frequenz von 2 Hz durchgeführt. Dabei wurde das Wechselverformungsverhalten in Form von Verschiebungen zwischen Rohr und Dorn, die mit Hilfe eines kapazitiven Wegaufnehmers gemessen wurden, analysiert.

### ***Rührreibschweißen (Friction Stir Welding - FSW)***

Die Halbzeuge für die von Teilprojekt A11 gefertigten, rührreibgeschweißten Proben wurden aus verbundstranggepressten 56 x 5 mm<sup>2</sup> Profilen aus EN AW-6060 entnommen. Der beim

Rührreibschweißen eingesetzte, leicht konische Pin mit einer Länge von 4,7 mm und einem Durchmesser von 4 mm bzw. 5 mm besitzt ein linksgängiges Gewinde, wohingegen die Rotation des Pins rechtsgängig ist [Ruh8]. Die Drehzahl und damit die Umfangsgeschwindigkeit sowie der Vorschub wurden variiert. Weitere Details zum Prozess sowie zur Herstellung der rührreibgeschweißten Proben sind dem Beitrag des Teilprojekts A11 "Fügezentrum" zu entnehmen. Anschließend wurden quasistatische Zugversuche an einer elektromechanischen Universalprüfmaschine der Bauart Zwick durchgeführt, um die Festigkeit der unverstärkten und mit Federstahl (1.4310) verstärkten FSW-Proben zu ermitteln. Die Nennlast der Prüfmaschine betrug 100 kN und die Querhauptgeschwindigkeit 1 mm/min.

Bei den verstärkten Proben wurde der Einfluss der Verstärkungselemente auf die Schweißnaht selbst und deren mechanische Eigenschaften untersucht. Dabei war keine Festigkeitssteigerung im Vergleich zu den unverstärkten Proben zu erwarten, da durch das Rührreibschweißen die Verstärkungselemente nicht verbunden werden können.

## **Charakterisierung von Knoten- und Profilständen vor dem Fügen**

### Charakterisierung der Profile vor dem Fügen:

Um Einflüsse, welche durch Schwankungen beim Strangpressen entstehen könnten, von vornherein auszuschließen, wurde stets zu den gefügten Bauteilen das Ausgangsprofil bezüglich seiner mechanischen Eigenschaften charakterisiert. Die angegebenen Werkstoffkennwerte zur Beurteilung der Fügezonqualität beziehen sich auf diese Versuchsergebnisse.

Die Untersuchungen zur Vorbehandlung wurden sowohl beim BHLS, also auch beim FSW nicht durchgeführt, da z.B. Oberflächenrauheiten oder eingebrachte Eigenspannungen bei diesen Verfahren keinen Einfluss auf den Zustand nach dem Schweißen haben können.

### Oberflächenvorbehandlung von Dornen für unverstärkte Fügeverbindungen:

Um die zwischen Dorn und Rohr übertragbaren Kräfte zu erhöhen, wurde eine Oberflächenvorbehandlung vor dem Fügen untersucht. Hierbei wurden zwei Methoden betrachtet: Strahlen der Dornoberfläche mit zwei verschiedenen Strahlmitteln und eine Fräsbearbeitung der Dornoberfläche. Beide Verfahren bringen im Vergleich zu den gedrehten Dornen Eigenspannungen und eine veränderte Oberflächenmorphologie mit sich.

Die Strahlbehandlung wurde mit zwei verschiedenen Strahlmitteln auf einer Mikrostrahlanlage (IEPCO Peenmatic 770) durchgeführt: Als Strahlmittel kamen Glasperlen (MS 550 B) mit einem mittleren Durchmesser von 20-30  $\mu\text{m}$  und alternativ kantige  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Partikel (EKR 320 A) der gleichen Größe zum Einsatz. Während die Verfahrensgeschwindigkeit von 0,5 mm/s und der Ab-

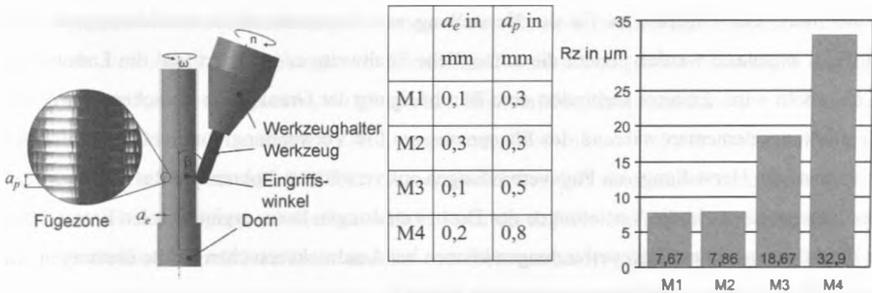
stand zur Probenoberfläche von 10 mm konstant gehalten wurden, wurde der Strahlruck zwischen 0,5 und 1,5 bar variiert [Bar08a].

Die Strahlbehandlung erzeugt bereits ab einem Strahlruck von 0,5 bar eine deutliche und für beide Strahlmedien vergleichbare Oberflächenrauheit. Durch eine weitere Erhöhung des Strahldruckes nimmt die Rauheit auf Grund der Größe des verwendeten Strahlgutes nicht weiter zu. Die Druckeigenspannungen in der Dornoberfläche steigen allerdings mit steigendem Strahlruck für beide Strahlmedien an. Durch Glasperlen werden dabei betragsmäßig höhere Werte erzielt, was auf die Form der  $Al_2O_3$ -Partikel zurückzuführen ist. Obwohl die Rauheitswerte der mit  $Al_2O_3$ -Partikel gestrahlten Oberflächen lediglich geringfügig höher sind, zeigt sich eine sehr unterschiedliche Oberflächentopographie in Abhängigkeit des Strahlmittels [Ham09a].

Die Fräsbehandlung der Dornoberfläche wurde im Rahmen des Teilprojektes A6 auf einer Fünf-Achs-CNC-Fräsmaschine (DMU 50 Evolution) der Firma Deckel-Maho durchgeführt. Der Fräsprozess ist in Bild 2 links schematisch dargestellt. Als Fräser kamen Kugelfräser mit einem Durchmesser von 6 mm zum Einsatz, welche mit TiAlN beschichtet waren, um die Anhaftung des Aluminiums zu reduzieren. Durch Variation der Fräsparameter Restaufmass  $a_e$  und axiale Schnitttiefe  $a_p$  wurden vier verschiedene Oberflächenzustände M1 - M4 hergestellt (siehe Bild 2 Mitte). Details des Prozesses und die Fräsparameter werden im Beitrag "Gestaltung, Analyse und Bewertung von Prozessen für die flexible mechanische Bearbeitung von Leichtbaukomponenten" genauer ausgeführt. Die resultierende gemittelte Rautiefe  $R_z$  der verschiedenen Dornoberflächen ist in Bild 2 rechts dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Rauheiten der Oberflächen M1 und M2 nahezu gleich sind, obwohl  $a_p$  bei M2 im Vergleich zu M1 deutlich erhöht wurde. Durch weitere Erhöhung der Parameter  $a_p$  bzw.  $a_e$  wurden M3 und M4 erzeugt und damit steigende Rauheiten erzielt.

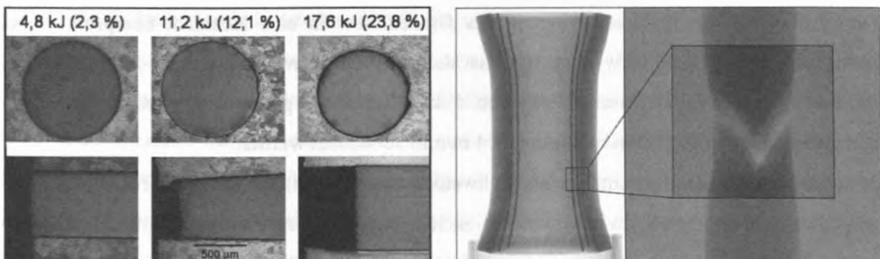
In REM-Aufnahmen der Dornoberflächen von M1, M2 und M4 war zu erkennen, dass M1 und M2 sich optisch kaum unterscheiden wohingegen die Oberfläche M4 taschenähnliche Strukturen mit einer Größe von  $600 \times 800 \mu m^2$  zeigt, welche zu einem Formschluss in der Fügeverbindung führen können [Ham09a].



**Bild 2:** links: Schematische Darstellung des Fünf-Achs-Fräprozesses; Mitte: Auszug der Fräsparmeter der Oberflächen M1 - M4; rechts: Gemittelte Rautiefe  $Rz$  der verschiedenen Dornoberflächen, Quelle: ISF, TP A6

### Untersuchungen zur freien Umformung von verbundstranggepressten Profilen:

Eine unzulässige Verformung der verstärkten Rohre ist entweder durch das Versagen der Verstärkungselemente oder durch die Beschädigung der Grenzfläche zwischen Matrix und Verstärkungselementen gegeben. Bei der Umformung treten infolge der radialen Kompression und der axialen Verlängerung des Rohres in der Grenzfläche Spannungen auf, da sich der im Vergleich zur Matrix steifere und festere Draht in geringerem Maße verformt [Bar07a]. Die dadurch hervorgerufenen Spannungen führen im Fall von zu großen Ladeenergien zu einem Versagen der Grenzfläche (Bild 3 links) oder des Drahtes (Bild 3 rechts). Der duktile Bruch des Drahtes deutet an, dass das Werkstoffverhalten trotz der extrem hohen Dehnraten während des Umformprozesses duktil ist. Auch wurde bestätigt, dass die Grenzfläche zwischen Matrix und Verstärkungselementen bei niedrigen Umformgraden bzw. bis zu einer tangentialen Stauchung von 6,8 % nach der Umformung intakt bleibt [Mar07, Bar08b].



**Bild 3:** Verstärktes Rohr, links: Querkontraktion bzw. Einziehen der Verstärkungselemente ins Profil in Abhängigkeit der Ladeenergie (tangentialen Stauchung) [Bar08b]; rechts: frei umgeformt mit 17,6 kJ Ladeenergie, duktiler Bruch des Verstärkungselements (CT-Aufnahme) [Mar07].

Daher muss der Fügeprozess für die Herstellung von Bauteilen mit verbundstranggepressten Profilen angepasst werden, indem die anfängliche Spaltweite  $a_0$  reduziert und die Ladeenergie ( $LE$ ) erhöht wird. Ersteres verhindert eine Beschädigung der Grenzfläche zwischen Matrix und Verstärkungselementen während des Fügeprozesses. Die Verwendung von gerändelten Dornen erleichtert die Herstellung von Fügeverbindungen aus verstärkten Rohren. Da das Rohr während des Fügeprozesses in die Vertiefungen des Dornes eindringen kann, ergibt sich ein Formschluss in der Fügezone. Diese Fügeverbindungen können bei Ausdrucksversuchen Kräfte übertragen, die bis zu 75 % von  $R_{p0,2}$  des Rohres entsprechen [Mar07].

Zusätzlich wurden verbundstranggepresste quadratische Hohlprofile ( $50 \times 50 \text{ mm}^2$ , Wandstärke 5 mm) mit verschiedenen Ladeenergien aufgeweitet, um zu untersuchen, bis zu welcher Umformung die Verstärkungselemente bzw. die Grenzfläche unbeschädigt bleiben. Hierbei zeigten sich bereits ab einer Ladeenergie von 1,8 kJ, was einer axialen Dehnung von 0,64 % entspricht, Ablösungen zwischen Draht und Aluminiummatrix [Mar10].

### **Erarbeitung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen bzw. Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen für Fügezonen**

#### ***Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen (BHLS)***

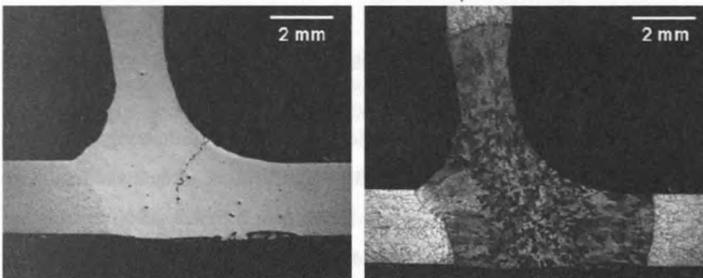
##### Einfluss der Prozessparameter auf die Fügezone:

Zur Darstellung des Demonstrators des SFB/TR 10 ist es notwendig, mittels BHLS einen Rohr-Rohr-T-Stoßes zu verschweißen. Hierbei bleibt der Querträger unbearbeitet, wobei der Fügepartner so gefertigt werden muss, dass entlang der Schweißnaht möglichst konstante Fügezonensbreiten herrschen, um ruckartige Umorientierungen des Laserstrahls zu vermeiden. Dies soll bei konstanter Laserleistung ein Aufschmelzen dünnerer Bereiche verhindern.

Zunächst wurde die Wärmeeinbringung des Diodenlasers in eine Kehlnaht überprüft. Dabei wurde kein Zusatzdraht verwendet, um das Volumen der Schweißzone nicht zu erhöhen. Es wurden mit einer Diodenlaserleistung von 5 kW Kehlnähte geschweißt, wobei Schweißgeschwindigkeiten von  $v_s = 3 \text{ m/min}$  und  $v_s = 4 \text{ m/min}$  verwendet wurden.

Es zeigte sich hierbei, dass eine geringe Schweißgeschwindigkeit zu einer größeren Einschweißtiefe führt. Eine größere Schweißgeschwindigkeit dagegen führt zu einer geringeren Einschweißtiefe und durch die höhere Abkühlrate entstehen Heißrisse innerhalb der Schweißnaht [Wal01]. Aufgrund des Diodenlasers kommt es nur zum Wärmeleitungsschweißen und nicht, wie bei der Verwendung des Nd:YAG-Lasers möglich, zum Tiefschweißen. Dadurch ist in beiden Fällen die zu geringe Einschweißtiefe zu erklären.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurden mit der Kombination aus Dioden- und Nd:YAG-Laser mit Zusatzdraht Schweißungen am Rohr-Rohr-T-Stoß mit folgenden Parametern durchgeführt: Schweißgeschwindigkeit  $v_s = 1,5$  m/min, Drahtzuführgeschwindigkeit  $v_d = 2,2$  m/min, Laserleistung Nd:YAG-Laser = 2,5 kW, Laserleistung Diodenlaser = 1,5 kW. Dabei zeigte sich, dass es möglich ist, mittels des Nd:YAG-Lasers die Schweißtiefe ausreichend zu erhöhen (Bild 4 rechts). Auch die Neigung zur Heißbrissbildung kann durch Verwendung des Zusatzdrahtes und damit Auflegieren der Schweißnaht deutlich reduziert werden (vgl. Bild 4 links). In weiteren Untersuchungen muss nun die Größe der Wärmeeinflusszone und die Ausdehnung der Schweißnaht minimiert werden, sowie der Gefügevergrößerung in der Schweißnaht entgegengewirkt werden.



**Bild 4:** Schliff einer BHLS-Schweißnaht ungeätzt (links) und geätzt (rechts)

#### Einfluss der Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften unter quasistatischer Beanspruchung:

Es wurden Rohrproben mit einer Schweißgeschwindigkeit von  $v_s = 4,5$  m/min im I-Stoß geschweißt. Die Zuführgeschwindigkeit des Zusatzdrahtes betrug  $v_d = 4,5$  m/min. Die Laserleistung für beide Laser wurde konstant auf 3 kW eingestellt.

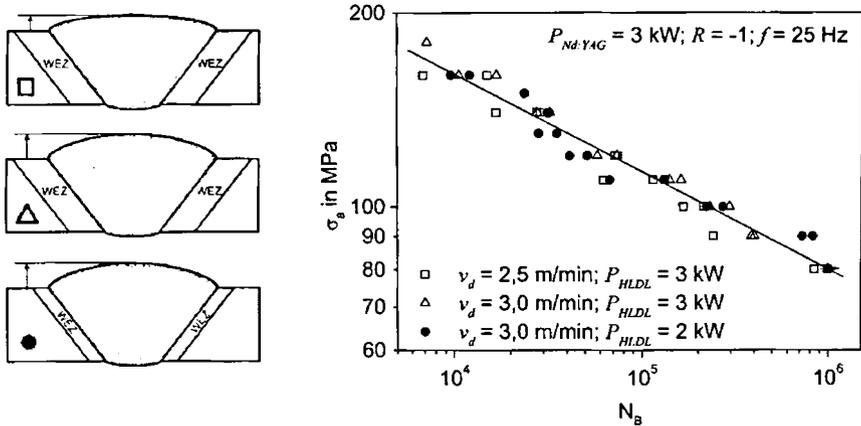
Zur Durchführung von Zugversuchen an derart geschweißten Proben wurden Zugproben gemäß DIN EN 895 aus der Schweißnaht sowie am Endkrater entnommen. Der Endkrater stellt den Bereich des Auslaufs der Schweißnaht dar, wo sich Anfang und Ende der Schweißnaht überlappen. Des Weiteren wurde die Festigkeit des ungeschweißten Rohres ermittelt. Der Unterschied in den Festigkeiten ungeschweißter Zugproben und Rohre ist auf die fehlende definierte Messstrecke und die somit resultierende Spannungskonzentration in der Einspannung der Rohre zurückzuführen. Die Zugproben am Endkrater sowie die Rohre mit Endkrater besitzen die geringsten Festigkeiten. Mittels Überschweißen und weiterer Zuführung von Schweißzusatzdraht konnte der Endkrater weitestgehend vermieden werden, was zu einer Festigkeitserhöhung um 25 MPa

führt. Die Festigkeit der geschweißten Rohre liegt aufgrund der niedrigeren Festigkeit im Bereich der Wärmeeinflusszone unterhalb der Festigkeit des ungeschweißten Rohres.

Bei Endkrater gehafteten Proben war während des Zugversuchs zu erkennen, dass der Riss vom Endkrater ausging und sich anschließend entlang der Wärmeeinflusszone ausbreitete, was die Kerbwirkung des Endkraters verdeutlicht. Die Kerbwirkung wird allerdings nicht nur durch den Endkrater verursacht, sondern auch, durch Fehlstellen, wie Heißrisse und Poren im Bereich des Endkraters. Im Querschliff der Schweißnaht mit Endkratervermeidung zeigte sich, dass dadurch sowohl die geometrische Kerbwirkung als auch die Heißrisseigung deutlich reduziert werden konnten. Die weiterhin vorhandene Schwächung ist auf die vermehrte Porenbildung in diesem Bereich zurückzuführen, welche in Zukunft reduziert werden muss [Hub09].

### Einfluss der Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften unter zyklischer Beanspruchung:

Um den Einfluss der Wärmeeinflusszone und der Schweißnahtüberhöhung auf die Ermüdigungseigenschaften von BHLS-geschweißten Blech-Blech-Verbunden zu untersuchen, wurden Wechselbiegeversuche durchgeführt. Hierzu wurden Bleche aus EN AW-6060 mit einer Dicke von 2 mm im Stumpfstoß verschweißt und dabei drei verschiedene Kombinationen von Schweißparametern verwendet. Die Diodenlaserleistung von 3 kW wurde konstant gehalten, während Zusatzdrahtgeschwindigkeiten von 2,5 m/min und 3,0 m/min verwendet wurden. Hierdurch konnte der Einfluss der Kerbwirkung durch die Schweißnahtüberhöhung untersucht werden. Die Schweißnahtüberhöhung entsprach in allen Fällen den Anforderungen aus DIN EN ISO 13919-2. Anschließend wurde bei einer Zusatzdrahtgeschwindigkeit von  $v_d = 3,0$  m/min eine Diodenlaserleistung von 2 kW verwendet, wodurch der Einfluss der Größe der Wärmeeinflusszone untersucht werden konnte. Die Schweißgeschwindigkeit betrug bei allen Versuchen 4,0 m/min. Bild 5 links zeigt schematisch die Ausprägung der verschiedenen Schweißnähte. Die Schweißnahtüberhöhung nimmt mit steigender Drahtzuführgeschwindigkeit zu, während die Größe der Wärmeeinflusszone durch die geringere Diodenlaserleistung reduziert werden kann [Sch04]. Bild 5 rechts zeigt die Wöhlerkurven der gewählten Schweißnahtgeometrien. Alle Kurven befinden sich innerhalb desselben Streubandes und in allen drei Fällen ergibt sich eine Wechselfestigkeit von 80 MPa. Dies lässt nicht auf einen Zusammenhang zwischen geometrischer Kerbwirkung (auf Grund der Nahtüberhöhung) und Wechselfestigkeit schließen, was mit früheren Ergebnissen von [Mad03] übereinstimmt.



**Bild 5:** links: Resultierende Schweißnahtgeometrien (schematisch); rechts: Wöhlerkurve im Stumpfstoß geschweißter Blech-Blech-Verbunde

Fraktographische Untersuchungen an den ermüdeten Proben zeigten, dass sich die Risse entlang der Wärmeinflusszone ausbreiten. Durch Erhöhung der Drahtzuführgeschwindigkeit und damit der Nahtüberhöhung verschiebt sich der Ort der Rissinitiierung aus der Wärmeinflusszone in Richtung der Schweißnaht. Dies ist auf eine Erhöhung der geometrischen Kerbwirkung zurückzuführen. Die Reduktion der Diodenlaserleistung auf 2 kW führt dagegen zu einer verschlechterten Schweißqualität durch Porenbildung und somit erneut zur Rissinitiierung innerhalb der Wärmeinflusszone. So werden die Wärmeeinflusszone und damit die metallurgische Kerbwirkung verkleinert, jedoch wird dieser Effekt durch die abnehmende Schweißnahtqualität vollständig kompensiert [Bar07b].

#### Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen Bifokal-Hybridlaserstrahl geschweißter Proben:

Mit dem Einsatz einer Kombination aus Hochleistungsdiodenlaser und Nd:YAG-Laser ist es im Vergleich zum konventionellen Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Lasern möglich, bei doppelter Schweißgeschwindigkeit geeignete und vergleichbare Schweißnahtgeometrien zu erzeugen. Dabei sind hinreichend große Mengen an AlSi12-Zusatzwerkstoff zuzuführen und vergrößerte Wärmeeinflusszonen hinzunehmen [Sch04]. In Schwingversuchen wurden sowohl die Nahtüberhöhung (geometrische Kerbwirkung) als auch die vergrößerte Wärmeeinflusszone (metallurgische Kerbwirkung) auf ihre Auswirkung auf die Wechselfestigkeit untersucht. Es zeigte sich, dass weder das Ermüdungsverhalten noch die Wechselfestigkeit durch die hier eingestellten Kerbwirkungen negativ beeinflusst wurden [Bar07b].

Des Weiteren zeigten Querschliffe nach Schweißungen von Kehlnähten mit dem Diodenlaser, dass höhere Vorschubgeschwindigkeiten zum Wärmeleitungsschweißen mit geringer Einschweißtiefe führen und die Heißrissbildung durch die höhere Abkühlrate begünstigt wird. Die Untersuchungen zur Schweißung von Rohr-Rohr-I-Stößen mittels BHLS zeigten, dass die Endkratervermeidung durch Überschweißen der Anfangsschweißnaht zu einer um etwa 20 % gesteigerten Festigkeit führt. Zur Optimierung der Endkratervermeidung muss jedoch die Porenbildung im Endkrater weiter reduziert werden [Hub09].

### *Fügen durch elektromagnetische Umformung (EMU)*

#### Einfluss von verbundstranggepressten Profilen auf die Prozessparameter:

Die anfängliche Spaltweite  $a_0$  muss für die Herstellung von Bauteilen aus verbundstranggepressten Profile angepasst werden. So soll eine Beschädigung der Grenzfläche zwischen Matrix und Verstärkungselementen während des Fügeprozesses vermieden werden. Eine maximale Durchmesser einschnürung von 2 mm ist nach [Mar07] zulässig, was einer Verringerung des Durchmessers um 9,7 % entspricht. Allerdings wird die maximal erreichbare Festigkeit der Verbindung durch diese Einschränkung wesentlich beeinflusst, da die maximale Einschnürungsgeschwindigkeit während der Umformung für niedrige anfängliche Spaltweiten  $a_0$  nicht erreicht werden kann.

Des Weiteren ist die Herstellung von überwiegend formschlüssigen Verbindungen ausgeschlossen, da eine sehr starke Verformung des Rohres notwendig wäre, um das Rohr in eine Nut des Dorns einzuformen. Die Verwendung von gerändelten Dornen ermöglicht hingegen die Herstellung von Fügeverbindungen aus verstärkten Strangpressprofilen. Obwohl die Geschwindigkeit des Rohres wegen der geringeren anfänglichen Spaltweite  $a_0$  sehr niedrig ist, können die erreichbaren Ausdruckkräfte erheblich verbessert werden, da sich das Rohr bei der Umformung an die Dornrändelung anschmiegt und es so zu einer Einförmigkeit der Rändelstruktur in die Rohrinnenwand kommt [Mar07].

#### Einfluss der Dornvorbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften:

Auf gestrahlte und gefräste Dorne wurden Rohre mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Wandstärke von 1 mm gefügt. Das Fügen wurde innerhalb des Teilprojekts A10 durchgeführt. Der anfängliche Spalt  $a_0$  zwischen Dorn und Rohr betrug 1,2 mm. Es wurde eine Ladeenergie von 1,1 kJ (entspricht einem Druckimpuls von 150 MPa nach 9  $\mu$ s) verwendet, da vorangegangene Versuche mit 1,5 kJ zu Verschweißungen in der Fügezone führten. Dadurch ließen sie kei-

ne Untersuchungen des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit der Dorne auf die Auszugskräfte der Fügeverbindungen zu [Ham09a].

Durch die Strahlbehandlung mit  $Al_2O_3$ -Partikeln kann die Auszugskraft gegenüber dem Ausgangszustand auf 4 kN verdreifacht werden. Die Steigerung der Auszugskraft durch das Strahlen mit Glasperlen ist deutlich geringer. Die Steigerung der Auszugskraft durch das Strahlen mit  $Al_2O_3$ -Partikeln kann zum einen auf Verhakungen in der Oberfläche zurückgeführt werden (Mikro-Formschluss). Zum anderen steigt mit höheren Druckeigenspannungen die erreichbare Auszugskraft trotz sinkender Rauheit, was auf eine höhere Pressung in der Verbindung hinweist [Ham09a].

Die Auszugskräfte der Verbindungen mit gefrästen Dornen in Abhängigkeit von der gemittelten Rautiefe  $R_z$  der Dornoberflächen zeigen zwei unterschiedliche Effekte: Zum einen kann die Auszugskraft durch die steigende Rauheit auf bis zu 8 kN gesteigert werden. Dies hängt im Fall der Oberfläche M4 (siehe Bild 2) damit zusammen, dass sich die Dornoberfläche in der Rohroberfläche abformt (Makro-Formschluss). Ein anderer Effekt ist bei der Oberfläche M2 zu erkennen: Trotz gleicher Rauheit verglichen mit Oberfläche M1 steigt auch hier die Auszugskraft auf nahezu 8 kN an. Als Ursache wird die Verfestigung in der Oberfläche angesehen, welche zu einer höheren Pressung in der Fügezone und damit zur Erhöhung der Auszugskraft führt [Ham09a].

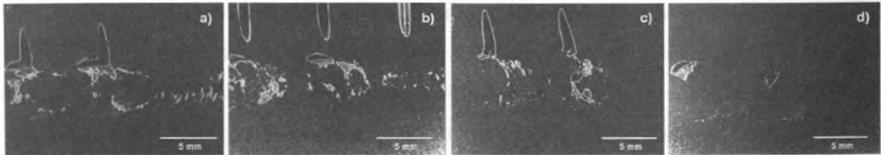
#### Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen elektromagnetisch umformend gefügter Proben:

In Zugversuchen wurde der Einfluss von Oberflächenvorbehandlungen der Dorne auf die Auszugskräfte bei elektromagnetisch gefügten Rohr-Dorn-Verbunden untersucht und hinsichtlich der Abhängigkeit von Strahl- bzw. Fräsparametern analysiert. Es zeigte sich, dass bei gestrahlten Dornen die Auszugskräfte mit steigenden Rauheiten und induzierten Druckeigenspannungen ansteigen. Als Strahlmedium sind hierbei  $Al_2O_3$ -Partikel bei möglichst hohem Strahlendruck zu bevorzugen, da es hierbei zu einem Mikro-Formschluss kommt. Das Fräsen der Dornoberfläche steigert zum einen die Auszugskräfte durch eine deutliche Erhöhung der Oberflächenrauheit, was zu einem Makro-Formschluss zwischen Rohr und Dorn führt. Zum anderen kann durch Erhöhung des Restauffmaßes die Verfestigung in der Oberfläche gesteigert und damit die Pressung in der Fügezone vergrößert werden.

### ***Rührreibschweißen (Friction Stir Welding - FSW)***

#### Einfluss der Prozessparameter auf die Fügezone:

Bild 6 zeigt metallographische Aufnahmen der Schweißnaht von FSW-Proben, die mit Drehzahlen von 750, 1000, 1200 und 1500  $\text{min}^{-1}$  geschweißt wurden. Es wurde eine konstante Vorschubgeschwindigkeit von 150 mm/min verwendet und der Pindurchmesser betrug 5 mm. Die Blickrichtung der Aufnahmen ist parallel zur Werkzeugachse, wobei die Schweißrichtung von rechts nach links verläuft. Die geschweißten Proben wurden um ca. 2 mm abgeschliffen, um das Innere der Schweißnaht untersuchen zu können (die Bildebene des Bildes d) ist geringfügig höher).

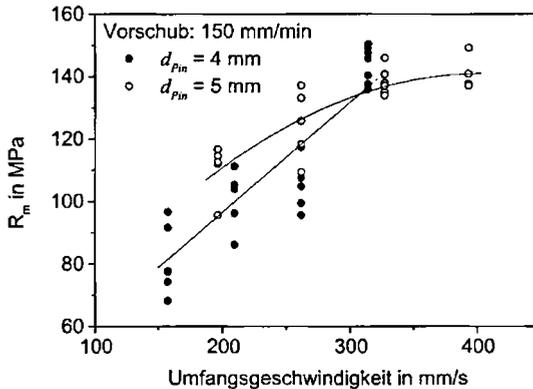


**Bild 6:** Metallographische Aufnahmen von FSW-Proben. Pinlänge: 5 mm, verwendete Drehzahlen: a): 750  $\text{min}^{-1}$ ; b): 1000  $\text{min}^{-1}$ ; c): 1250  $\text{min}^{-1}$ ; d): 1500  $\text{min}^{-1}$

Es zeigt sich, dass das Erscheinungsbild der Schweißnaht sehr von den verwendeten Parametern abhängt. Die Verstärkungselemente sind lediglich in den oberen Bildhälften zu erkennen, da sie durch das Gewinde des Pins auf dieser Seite hoch und auf der gegenüberliegenden Seite herunter gedrückt wurden. Außerdem wurden die Verstärkungselemente in Schweißrichtung verbogen. Ferner sind in der Schweißnaht Splitter der Verstärkungselemente und Poren zu erkennen. Mit Erhöhung der Drehzahl nimmt bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit die Wahrscheinlichkeit von Defekten in der Schweißnaht ab. Bei einer Drehzahl von 1500  $\text{min}^{-1}$  und einer Vorschubgeschwindigkeit von 150 mm/min sind kaum noch Poren, jedoch weiterhin Splitter zu erkennen.

#### Einfluss der Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften:

Um den Einfluss der Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften von FSW-geschweißten Profil-Profil-Verbunden zu untersuchen, wurden zum einen der Pindurchmesser  $d_{Pin}$  und zum anderen die Pindrehzahl und damit die Umfangsgeschwindigkeit variiert. Der Vorschub betrug bei allen Versuchen 150 mm/min. Zunächst wurden Zugversuche an Proben durchgeführt, welche mit zwei verschiedenen Pindurchmessern sowie mit vier verschiedenen Umfangsgeschwindigkeiten geschweißt wurden. Bild 7 zeigt die Abhängigkeit der Zugfestigkeit  $R_m$  rührreibgeschweißter Proben von Pindurchmesser und Umfangsgeschwindigkeit.



**Bild 7:** Abhängigkeit der Zugfestigkeit  $R_m$  von Umfangsgeschwindigkeit und Pindurchmesser rührreibgeschweißter Proben (Vorschub: 150 mm/min)

Es zeigt sich, dass mit steigender Umfangsgeschwindigkeit die Zugfestigkeit zunimmt. Im unteren Bereich der Umfangsgeschwindigkeit bis 320 mm/s können mit dem 5 mm Pin geringfügig größere Zugfestigkeiten erreicht werden. Bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten verschwindet dagegen der Einfluss des Pindurchmessers und die Zugfestigkeit nimmt kaum zu. Im Vergleich zur Zugfestigkeit der Matrix im Zustand T4 von 185 MPa [Hub10] sind bei diesen Versuchen nach dem Rührreibeisweissen maximal 140 MPa zu erreichen. Diese Abweichung könnte zum einen an der durch den Schweißprozess eingebrachten Wärme liegen, welche zu einem Überalterungsprozess in sehr kurzer Zeit führt [Bar08a]. Zum anderen kommt es im Bereich der geringen Umfangsgeschwindigkeiten vermehrt zur Porenbildung, was die erreichbaren Festigkeiten deutlich reduziert. Dagegen kann die Durchmischung in der Schweißzone durch Verwendung des größeren Pindurchmessers verbessert werden und hierdurch die Festigkeit leicht erhöht werden.

Die Untersuchungen zur Festigkeit von unverstärkten rührreibgeschweißter Proben in Abhängigkeit von Vorschub- bzw. Umfangsgeschwindigkeit bei konstantem Pindurchmesser  $d_{Pin} = 4 \text{ mm}$  und Schulterdurchmesser  $d_{Sch} = 10 \text{ mm}$  zeigten, dass die höchsten Festigkeiten bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten und hohen Umfangsgeschwindigkeiten erreicht wurden. Umfangsgeschwindigkeiten größer als 262 mm/s und Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich von 100 bis 150 mm/min führen hierbei zu höheren Festigkeiten [Ham09b].

Die gleichen Untersuchungen an verstärkten rührreibgeschweißten Proben zeigten, dass im Allgemeinen die Festigkeiten unterhalb derer von unverstärkten Proben liegen, was durch die Zersplitterung der Verstärkungselemente durch den Pin verursacht wird [Ruh08]. Darüber hinaus zeigte sich, dass analog zu den unverstärkten Proben die größte Festigkeit bei einer Vorschubge-

schwindigkeit von 150 mm/min vorliegt und mit zunehmender Umfangsgeschwindigkeit die Festigkeit ansteigt. Umfangsgeschwindigkeiten größer als 262 mm/s mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 150 mm/min zeigen sich hier als optimale Fügeparameter. Alle untersuchten Proben versagen ausgehend von Kavitäten, so genannten Schlauchporen. Diese innere Kerbwirkung wird bei verstärkten Proben noch durch die vorhandenen Stahlsplitter verstärkt [Ham09b]. Radioskopische Aufnahmen der mit Federstahldraht verstärkten rührreibgeschweißten Proben zeigten, dass auf der Gegenlauf-Seite die Verstärkungselemente nahe der Stirnseite vom Pin abgeschert wurden, die Position der Verstärkungselemente bleibt jedoch unverändert. Auf der Gleichlauf-Seite werden die Verstärkungselemente dagegen abgeschert und mitgeschleppt, was zu einer Lageänderung der Verstärkungselemente führt. Des Weiteren wird die Stirnseite der Verstärkungselemente auf der Gegenlauf-Seite nach unten und die der Verstärkungselemente auf der Gleichlauf-Seite nach oben verschoben.

Außerdem wurde der Einfluss der Probenvorbereitung auf die Festigkeiten von rührreibgeschweißten Proben untersucht. Hierzu wurden verstärkte Profile mit einer Drehzahl von  $1500 \text{ min}^{-1}$  und einem Vorschub von 300 mm/min verschweißt, nachdem sie durch Sägen oder Fräsen getrennt wurden bzw. nicht getrennt wurden. Es zeigte sich in metallographischen Untersuchungen, dass die Schlauchpore vermieden werden konnte. Zudem konnten Festigkeiten im Bereich des unverstärkten Werkstoffs (185 MPa) gemessen werden, welche durch die Probenvorbereitung nicht wesentlich beeinflusst wurden [Hub10].

### Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen rührreibgeschweißter Proben:

Durch höhere Drehzahlen und damit Umfangsgeschwindigkeiten lässt sich beim Rührreibschweißen die Qualität der Schweißnaht deutlich verbessern. Hierbei ist das Zusammenspiel von Umfangsgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit besonders wichtig. Indem man die Umfangsgeschwindigkeit erhöht, ist es möglich, mehr Wärme in die Schweißnaht einzubringen und die Durchmischung zu verbessern. Dadurch wird die Porenbildung reduziert. Während sich bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten eine Variation des Pindurchmessers kaum auswirkt, verbessert ein großer Pin bei kleinen Umfangsgeschwindigkeiten die Durchmischung. Andererseits führt die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit zu einem geringeren Wärmeeintrag und es bilden sich wieder Poren.

Schweißnähte an verbundstranggepressten Profilen verhalten sich im Prinzip analog zu denen an unverstärkten Profilen. Hinzu kommt allerdings, dass die Verstärkungselemente durch den Pin zersplittet werden. Die so auftretenden Stahlsplitter liegen in der Schweißnaht vor und führen hier zu einer inneren Kerbwirkung, was sich negativ auf die erreichbaren Festigkeiten auswirkt.

Des Weiteren steigen auf Höhe der Verstärkungselemente die Prozesskräfte in Schweißrichtung deutlich an. Weiterhin konnte mittels Röntgenaufnahmen gezeigt werden, dass die Auslenkung der Verstärkungselemente auf der Gleichlauf-Seite, sowohl in Schweißrichtung als auch in axialer Richtung des Pins am größten ist. Wird durch den Schweißprozess eine Schlauchpore nahe der Gegenlauf-Seite erzeugt, stellt sich diese als Rissausgangsort während der Zugversuche dar. Es zeigte sich jedoch, dass die Entstehung der Schlauchpore durch eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit vermieden werden konnte. Präzisere Aussagen zum Ablauf der Schädigung innerhalb der Schweißnaht und zu dem Verhalten der umgebogenen Verstärkungselemente sind das Ziel von zukünftigen Untersuchungen mittels in-situ Mikrocomputertomographie.

Weiter stellte sich heraus, dass die Art des Trennens der Profile vor dem Rührreibschweißen keinen signifikanten Einfluss auf die erreichbaren Festigkeiten zeigt.

### **Untersuchungen zum Einfluss von Vorschädigungen**

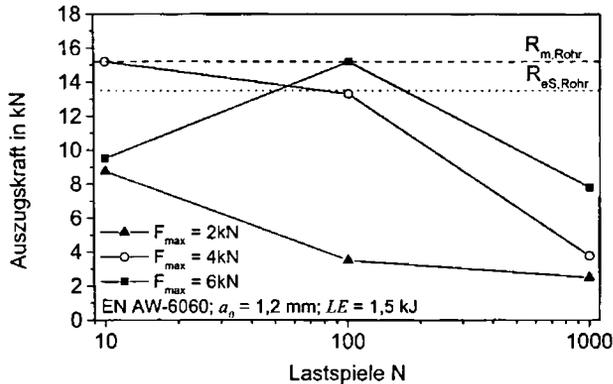
In den Schweißnähten von BHLS-geschweißten Proben waren immer noch Poren und Fehlstellen aufzufinden. Die Parameterfindung war demzufolge noch nicht abgeschlossen. Darum scheint es zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll, den Einfluss von Vorschädigungen zu untersuchen.

Auf Grund der Stahlsplitter und der umgebogenen Verstärkungselemente bei FSW-geschweißten Proben schien eine Untersuchung zum Einfluss von Vorschädigungen hier ebenfalls nicht sinnvoll. Sollten Möglichkeiten aufscheinen, diese zu vermeiden, können in der Zukunft Untersuchungen zur Vorschädigung in Betracht gezogen werden.

### ***Fügen durch elektromagnetische Umformung (EMU)***

Um die Vorschädigungsempfindlichkeit von elektromagnetisch umformend gefügten Verbindungen zu untersuchen, wurden Proben nach dem Fügen mit 1,5 kJ und einem Anfangsspalt von 1,2 mm auf verschiedenen Kraftniveaus und für verschiedene Zyklenzahlen beansprucht. Nach dieser Vorbeanspruchung wurden Zugversuche an den Proben durchgeführt. Die Entwicklung der Auszugskräfte ist in Bild 8 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die erreichbaren Auszugskräfte deutlich, nämlich bis zum Erreichen von Streckgrenze und Zugfestigkeit des Rohres, gesteigert werden können. Ursache hierfür ist, dass aufgrund von Reibeffekten während des zyklischen Versuchs beide Fügepartner verschweißt werden [Bar08b]. Allerdings hängen die erreichbaren Auszugskräfte sowohl von der maximalen Kraftamplitude als auch von der Zyklenzahl der Vorbeanspruchung ab. Es kommt zur Degradation der Verschweißung, wenn die Bauteile mehr als 100 Zyklen beansprucht werden.



**Bild 8:** Abhängigkeit der Auszugskraft von Maximalkraft und Zyklenzahl der Vorbeanspruchung

Damit konnte gezeigt werden, dass nach elektromagnetisch umformendem Fügen durch zyklische Vorbeanspruchungen die Auszugskräfte gesteigert werden können. Dieses Verhalten ist von wesentlicher Bedeutung im Hinblick auf die Betriebssicherheit, da eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften bei quasistatischer Beanspruchung erfolgt [Bar08a]. Wie sich dynamische oder stoßartige Vorbeanspruchungen auf die Verbindungsfestigkeiten auswirken, soll Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

### Ableitung von Gestaltungsregeln für Fügezonen

#### *Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen (BHLS)*

Das Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen ermöglicht es, Schweißverbindungen mit maximalen Festigkeiten im Bereich des Ausgangswerkstoffs zu erzeugen. Da es sich um ein thermisches Fügeverfahren handelt, wird von einer Vorbehandlung der Fügepartner abgesehen. Damit lassen sich folgende Gestaltungsregeln für die Konstruktion und die Prozessführung zum Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen ableiten:

1. Die Strahlachse der Laserstrahlen sollte auf der Schnittebene der zu verschweißenden Profile liegen. Ist dies nicht möglich, muss die Fokuslage in Richtung der Wand eines der Profile verschoben werden, um den Anbindungsquerschnitt zu erhöhen.
2. Sobald die zu fügenden Profile einen Spalt zwischen sich aufweisen, muss der Fokus der Laserstrahlen mittig in diesem Spalt liegen und zu dessen Auffüllen die Zusatzdrahtgeschwindigkeit erhöht werden. Im I-Stoß zeigte sich ein Fügespalt von 0,3 mm als prozessischer überbrückbar.

3. Um Nahtdurchfälle zu vermeiden, muss die Diodenlaserleistung reduziert und die Schweißgeschwindigkeit erhöht werden.
4. Die Zusatzdrahtgeschwindigkeit muss reduziert werden, falls es zu unzulässigen Nahtüberwölbungen kommt. Ist sie zu gering, steigt die Heißrisseigung. Unterhalb einer Zusatzdrahtgeschwindigkeit von 2 m/min wird der Prozess instabil, da der Draht zu schnell abtropft und so das Schmelzbad nicht erreicht.
5. Zur Endkratervermeidung haben sich zwei Strategien als erfolgreich herausgestellt:
  - a) Beim I-Stoß von Rohren konnte durch eine gezielte Anpassung der Leistungen der jeweiligen Laser beim erneuten Überschweißen des Nahtanfangs der Endkrater vermieden werden. Zum einen wird durch Reduktion der Nd:YAG-Laserleistung der Tiefschweißprozess beendet und zum anderen, durch die weiterhin eingebrachte Diodenlaserleistung, das Schmelzbad daran gehindert, sofort zu erstarren. Somit kann die Schmelze nachfließen und den Endkrater auffüllen, ohne dass eine markante Nahtunterwölbung entsteht.
  - b) Bei der zweiten Strategie wird die Laserleistung schrittweise zum Nahtende hin reduziert. Dabei wird zuerst die Leistung des Nd:YAG-Lasers und im Anschluss die des Diodenlasers um jeweils 750 W verringert. Anschließend wird der Vorschub des Drahtes auf Rückzug umgestellt, um ein Anhaften des Drahtes am Werkstück zu verhindern. Abschließend werden die Laser nacheinander kurz vor Nahtende abgeschaltet. Der verwendete Zusatzdraht füllt so die Stirnkehlnaht in diesem Bereich vollständig auf.

### ***Fügen durch elektromagnetische Umformung (EMU)***

Das Fügen mittels elektromagnetischer Umformung ermöglicht die Herstellung von Verbindungen, die quasistatische sowie zyklische Belastungen übertragen können. Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass axiale Kräfte bis zur Fließgrenze des Rohres übertragen werden können, wenn die Fügezonenlänge ausreichend ist. Damit lassen sich folgende Gestaltungsregeln für die Konstruktion und die Prozessführung mittels elektromagnetischer Umformung ableiten:

1. Der Luftspalt zwischen Spule und Rohr vor dem Fügeprozess muss möglichst gering sein, um die Kopplung des Magnetfeldes im Werkstück nicht zu beeinflussen. Der Wirkungsgrad des Prozesses sinkt mit steigendem Spalt zwischen Werkzeugspule und Rohr. Falls der Luftspalt geometrisch bedingt sehr groß ist, muss ein Feldformer verwendet werden.
2. Die elektrische Leitfähigkeit des Werkstückes, welches durch das elektromagnetische Feld umgeformt wird, muss so hoch wie möglich sein, um den magnetischen Druck durch eine Abschirmung des Magnetfeldes erhöhen zu können. Eine elektrische Leitfähigkeit für den anderen Fügepartner ist nicht erforderlich.

3. Vor dem Fügen müssen beide Fügepartner (Rohr und Dorn) koaxial angeordnet werden, um zu gewährleisten, dass das gefügte Bauteil ebenfalls axial fluchtet und eine Krümmung vermieden wird.
4. Die Ladeenergie für den Fügeprozess muss bei massiven Anschlussstücken möglichst hoch sein, um die Festigkeit der Verbindungen zu maximieren. Gerade bei hohen Ladeenergien kann es zum Verschweißen der Fügepartner kommen, was zu Verbindungsfestigkeiten in Höhe der Rohrfestigkeit führt.
5. Je nach ausgewählter Ladeenergie muss die anfängliche Spaltweite  $a_0$  zwischen Rohr und Dorn abgestimmt werden. In der Regel sind die optimale anfängliche Spaltweite und die Wandstärke des Rohres ähnlich.
6. Die Festigkeit des Dornes muss bei Volldornen möglichst hoch sein, damit eine hohe Festigkeit der Verbindung erreicht werden kann.
7. Falls die Möglichkeit besteht, sollte die Oberfläche des Dornes vorbehandelt werden. Bei einer Kugelstrahlbehandlung sollte der Strahl Druck möglichst hoch sein und es sollten möglichst kantige Partikel verwendet werden, um eine hohe Festigkeit der Verbindung zu erreichen. Beim Fräsen der Dornoberflächen sollten entweder ein hohes Restaufmass oder Parameterkombinationen gewählt werden, welche eine Strukturierung der Oberfläche erzeugen.
8. Ist die anfängliche Spaltweite  $a_0$  geometrisch bedingt gering, können hohlgebohrte Dorne verwendet werden, um die Festigkeit der Verbindung zu verbessern. Hierbei sollte das Verhältnis des inneren und äußeren Dorndurchmessers zwischen 0,55 und 0,75 liegen.
9. Gegebenenfalls sollten gefügte Bauteile aus dem gleichen Werkstoff zyklisch vorbeansprucht werden. Durch die entstehende Verschweißung zwischen Dorn und Rohr können Festigkeiten im Bereich von  $R_{eS}$  und  $R_m$  des Matrixwerkstoffes erzielt werden.
10. Im Fall von Fügeverbindungen verbundstranggepresster Profile muss die anfängliche Spaltweite beschränkt werden ( $a_0 \approx 0$ ), da es sonst zu unzulässiger plastischer Verformung der Verstärkungselemente kommt. Um die Festigkeit der Verbindung zu verbessern, sollte die Dornoberfläche gerändelt werden.

### ***Rührreibschweißen (Friction Stir Welding - FSW)***

Das Rührreibschweißen verstärkter wie auch unverstärkter Profile ermöglicht es, Schweißverbindungen mit maximalen Festigkeiten im Bereich des unverstärkten Ausgangswerkstoffes zu erzeugen. Hierbei ergeben sich die höchsten Festigkeiten aus dem optimierten Zusammenspiel zwischen Umfangsgeschwindigkeit und Vorschub. Damit lassen sich folgende Gestaltungsregeln für die Konstruktion und die Prozessführung des FSW-Prozesses ableiten:

1. Bei verstärkten Profilen zeigt eine unterschiedliche Art des Trennens (Sägen oder Fräsen) des Profils vor dem Fügen keinen Einfluss auf die erreichbaren Festigkeiten.
2. Beim Fügen verstärkter Profile kommt es zur Zersplitterung der Verstärkungselemente in der Rührzone, wobei die Prozesskräfte in Schweißrichtung ansteigen. Die Splitter wirken sich geringfügig negativ auf die erreichbaren Zugfestigkeiten aus.
3. Um Defekte zu vermeiden, indem die Durchmischung verbessert und der Wärmeeintrag erhöht wird, sollte die Umfangsgeschwindigkeit erhöht werden. Dies kann bei kleinen Drehzahlen durch eine Erhöhung des Pindurchmessers, insbesondere aber durch die Erhöhung der Drehzahl geschehen.
4. Beim Rührreißschweißen von Rohren kommt es auf Grund der fehlenden Nachverdichtung zu einer Nahtüberhöhung in der Mitte der Schweißnaht. Dieser Effekt wird mit abnehmendem Rohrdurchmesser stärker.
5. Die beim Rührreißschweißen auftretenden sehr hohen Kräfte in Richtung der Pinachse müssen beim Schweißen von dünnwandigen Profilen abgestützt werden, da es sonst zur Verformung des Profils kommt.
6. Falls möglich, sollte der Endkrater außerhalb des beanspruchten Bereichs liegen. Ist dies nicht möglich, müssen Strategien zur Endkratervermeidung ergriffen werden.

### **Zusammenfassung**

#### ***Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen (BHLS):***

- Mit dem Einsatz einer Kombination aus Hochleistungsdiodenlaser und Nd:YAG-Laser ist es im Vergleich zum konventionellen Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Lasern möglich, bei doppelter Schweißgeschwindigkeit geeignete und vergleichbare Schweißnahtgeometrien zu erzeugen. Dabei sind beim Schweißen von EN AW-6060 hinreichend große Mengen an AlSi12-Zusatzwerkstoff zuzuführen und vergrößerte Wärmeeinflusszonen hinzunehmen. Deren Auswirkungen wurden in Schwingversuchen überprüft und es konnte kein negativer Einfluss festgestellt werden.
- Die Untersuchungen zu der Schweißung von Rohr-Rohr-I-Stößen mittels BHLS zeigten, dass die Endkratervermeidung durch Überschweißen der Anfangsschweißnaht zu einer Festigkeitssteigerung von etwa 20 % führt.
- Des Weiteren zeigten Querschliffe an Schweißungen mit dem Diodenlaser an Kehlnähten, dass höhere Vorschubgeschwindigkeiten zu einer geringeren Einschweißtiefe beim Wärmeleitungsschweißen führen. Auch wird die Rissbildung durch die höhere Abkühlrate begünstigt.
- Schweißungen mittels BHLS unter Verwendung von Schweißzusatzdraht zeigen in der Kehlnaht bei Rohr-Rohr-T-Stößen eine ausreichende Einschweißtiefe und eine deutliche Abnahme der Heißrissneigung. Hier muss durch weitere Untersuchungen die Größe der Schweiß- und der Wärmeeinflusszone reduziert werden.

#### ***Fügen durch elektromagnetische Umformung (EMU):***

- Es zeigte sich, dass bei Verwendung von gestrahlten Dornen die Auszugskräfte mit steigenden Rauheiten und den Beträgen der induzierten Druckeigenspannungen ansteigen. Als Strahlmedium sind hierbei  $Al_2O_3$ -Partikel bei möglichst hohem Strahlendruck zu bevorzugen, da es hierbei zu einem Mikro-Formschluss kommt. Das Fräsen der Dornoberfläche steigert zum einen die Auszugskräfte, da die Oberflächenrauheit deutlich erhöht wird, was zu einem Makro-Formschluss zwischen Rohr und Dorn führt. Zum anderen kann durch Erhöhung des Restaufmasses die Verfestigung in der Oberfläche gesteigert und damit die Pressung in der Fügezone vergrößert werden.
- Da bei verbundstranggepressten Profilen die Umformbarkeit begrenzt ist, muss hier durch Rändeln der Dorne der Formschlussanteil erhöht werden.

***Rührreibschweißen (Friction Stir Welding - FSW):***

- Durch höhere Drehzahlen bzw. Umfangsgeschwindigkeiten beim Rührreibschweißen kann die Qualität der Schweißnaht deutlich verbessert werden. Durch eine erhöhte Drehzahl ist es möglich, mehr Wärmeeintrag in die Schweißnaht einzubringen. Durch eine erhöhte Umfangsgeschwindigkeit kann zudem die Durchmischung verbessert werden, was sich positiv auf die Porenbildung auswirkt.
- Bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten wirkt sich eine Variation des Pindurchmessers kaum aus, während ein großer Pin bei kleinen Umfangsgeschwindigkeiten die Durchmischung verbessert. Andererseits führt die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit zu einem geringeren Wärmeeintrag und es bilden sich vermehrt Poren.
- Schweißnähte an verbundstranggepressten Profilen verhalten sich im Prinzip analog zu denen an unverstärkten Profilen. Hinzu kommt allerdings, dass die Verstärkungselemente durch den Pin abgesichert werden. Die so auftretenden Stahlfragmente verbleiben in der Schweißnaht und führen dort zu einer inneren Kerbwirkung, was sich negativ auf die erreichbaren Festigkeiten auswirkt.
- Wird durch den Schweißprozess eine längliche Kavität nahe der Gegenlauf-Seite erzeugt, stellte sich diese als Rissausgangsort während der Zugversuche dar. Durch Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit kann diese jedoch vermieden werden.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die bislang untersuchten Fügeverfahren in der Lage sind, Fügeverbindungen herzustellen, die im Aufbau einer Leichtbau-Rahmenstruktur Verwendung finden können.

**Danksagung:**

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 10, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

**Literatur:**

- [Bar06] BARREIRO, P.; SCHULZE, V.; LÖHE, D.: Development and Effects of Residual Stresses in Joints Produced by Electromagnetic Compression and its Implication on the Mechanical Properties. In: Materials Science Forum, Vols. 524-525, S.485-490, 2006

- [Bar07a] BARREIRO, P.; SCHULZE, V.; LÖHE, D.: Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Fügstellen. In: Kleiner et al. (Hrsg.), Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen, Fortschr. Ber. VDI Reihe 2 Nr. 661, VDI-Verlag Düsseldorf, S.183-213, 2007
- [Bar07b] BARREIRO, P.; SCHULZE, V.; LÖHE, D.: Investigation of the Influence of Process Parameters on the Mechanical Behaviour under Cyclic Load at AA6060 Joints produced by Laser Bifocal Hybrid Welding. In: Proc. of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, 18.-21.06.2007, München, Germany, S.37-41
- [Bar08a] BARREIRO, P.; SCHULZE, V.; LÖHE, D.: Influence of Process Parameters on Structure and Mechanical Properties of Joints produced by Electromagnetic Forming and Friction Stir Welding. In: Advanced Materials Research: Flexible Manufacture of Lightweight Frame Structures - Phase II: Integration, Vol. 43, S.47-56, 2008
- [Bar08b] BARREIRO, P.: Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen bei überwiegend kraftschlüssig mittels elektromagnetischer Umformung gefügten Verbindungen. In: Schriftenreihe „Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik“, Löhe, D. et al. (Hrsg.), Dissertation an der Universität Karlsruhe (TH) , Shaker-Verlag Aachen, Nr. 042, 2008
- [Ham09a] HAMMERS, T.; MARRÉ, M.; RAUTENBERG, J.; BARREIRO, P.; SCHULZE, V.; BIERMANN, D.; BROSIUS A.; TEKKAYA, A.E.: Influence of Mandrel's Surface and Material on the Mechanical Properties of Joints Produced by Electromagnetic Compression. In: Steel Research Int., Vol. 80 [5], S.366-375, 2009
- [Ham09b] HAMMERS, T.; MERZKIRCH, M.; WEIDENMANN, K. A.; SCHULZE, V.: Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Fügstellen. In: Tekkaya et al. (Hrsg.), Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen, Fortschr. Ber. VDI Reihe 2 Nr. 668, VDI-Verlag Düsseldorf, S.115-132, 2009

- [Hub09] HUBER, S.; MERZKIRCH, M.; ZAEH, M. F.; SCHULZE, V.: Applications of high-power diode lasers for aluminium welding. In: Proc. of the SPIE, Vol. 7198, San Jose, USA, 2009
- [Hub10] HUBER, S.; RUHSTORFER, M.; HAMMERS, T.; KRONTHALER, M.; ZAEH, M. F.; SCHULZE, V.: Innovative joining methods for lightweight designs, Part I. In: Aluminium, International Journal for Industry, Research and Application, [1/2] S.78-83, 2010
- [Mad03] MADDOX, S. J.: Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures. In: International Journal of Fatigue, Vol. 25, S.1359-1378, 2003
- [Mar07] MARRÉ, M.; BARREIRO, P.; SCHOMÄCKER, M.; BROSIUS, A.; SCHULZE, V.; TEKKAYA, A.E.; LÖHE, D.: Characteristics of composite extruded tubes for joining by electromagnetic compression. In: Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Conference on New Forming Technology, 20.-21.09.2007, Bremen, Germany
- [Mar10] MARRÉ, M.; WEDDELING, C.; HAMMERS, T.; MERZKIRCH, M.; RAUTENBERG, J.; TEKKAYA, E.; SCHULZE, V.; BIERMANN, D.; ZABEL, A.: Innovative joining methods for lightweight designs, Part II. In: Aluminium, International Journal for Industry, Research and Application, [3], S.55-59, 2010
- [Ruh08] RUHSTORFER, M.; ZAEH, M. F.: Friction Stir Welding of Steel Reinforced Aluminium Extrusions. In: Proc. of the 7<sup>th</sup> International Friction Stir Welding Symposium, 20.-22.05.2008, Awaji island, Japan
- [Sch04] SCHULZE, V.; LÖHE, D.; BARREIRO, P.: Einfluss kombinierter Nd:YAG- und Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißprozesse auf die mechanischen Eigenschaften von AA6060 bei quasistatischer Beanspruchung. In: Aluminium, International Journal for Industry, Research and Application, Vol. 80 [12], S.1392-1396, 2004
- [Wal01] WALDMANN, H.: Werkstofftechnische Aspekte des Laserstrahlschweißens von Aluminiumlegierungen für den Fahrzeugbau. Herbert Utz Verlag, 2001