

**ABSCHLUSSBERICHT ZUM PROJEKT
„RESSOURCENSCHONENDE
MISCHSCHWEIßVERBINDUNGEN
FÜR HOCHLEISTUNGS-LEICHTBAUVERBUNDE“**

**GEFÖRDERT VOM MINISTERIUM FÜR FINANZEN UND
WIRTSCHAFT DES LANDES BADEN-WÜRTTEMBERG**

**INSTITUT FÜR MATERIALPRÜFUNG, WERKSTOFFKUNDE UND
FESTIGKEITSLEHRE (IMWF) DER UNIVERSITÄT STUTTGART**



**MATERIALPRÜFUNGSANSTALT UNIVERSITÄT STUTTGART
(MPA STUTTGART)**



INSTITUT FÜR UMFORMTECHNIK (IFU) DER UNIVERSITÄT STUTTGART



| | |
|---|--|
| Projektkoordinator: Dipl.-Ing. Martin Werz | |
| Sachbearbeiter IMWF/MPA Universität Stuttgart | Sachbearbeiter IFU Universität Stuttgart |
| Florian Panzer, M.Sc. | Phuc Lanh Nguyen, M.Sc. |
| Dipl.-Ing. Martin Werz | Dipl.-Ing. Matthias Schneider |
| Institutsleiter IMWF/MPA Universität Stuttgart | Institutsleiter IFU Universität Stuttgart |
| Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe | Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. MBA Mathias Liewald |
| Laufzeit: Februar 2016 – April 2018 | |

Inhalt

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 1.1 | Projektziel..... | 4 |
| 1.2 | Grundlagen des Rührreißschweißens | 6 |
| 2 | Projektbegleitender Ausschuss | 8 |
| 3 | Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse: IMWF und MPA | 10 |
| 3.1 | Optimierung der Verbindungskonfiguration | 10 |
| 3.2 | Materialkombination HX340LAD+Z mit EN AW 6016 T4..... | 12 |
| 3.3 | Optimierung für eine verbesserte Umformbarkeit..... | 14 |
| 3.3.1 | Werkzeuggeometrie..... | 16 |
| 3.4 | Parameterstudie mit Werkstoffen DX54+ZM und EN AW 6111 T4 | 20 |
| 3.5 | Toleranzen | 24 |
| 3.5.1 | Position der Bleche | 24 |
| 3.5.2 | Dickenschwankungen..... | 26 |
| 3.5.3 | Adaptives Werkzeug..... | 27 |
| 3.6 | Hochfeste Werkstoffe: CR660Y980T und EN AW 7075 T6..... | 29 |
| 3.7 | Machbarkeitsstudie: 22MnB5 und EN AW 6016 T4 | 32 |
| 3.8 | Schweißungen mit Aluminium-Druckguss | 33 |
| 3.9 | Korrosion | 35 |
| 3.10 | Prozess-Monitoring | 36 |
| 3.11 | Übertragung auf industrielle Fertigung | 37 |
| 3.12 | Vergleich mit Laserschweißnähten | 40 |
| 3.13 | Wärmenachbehandlung | 42 |
| 4 | Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse: IFU..... | 45 |
| 4.1 | Umformtechnische Werkstoffcharakterisierung..... | 45 |
| 4.1.1 | Zugversuche mit unterschiedlichen Nahtorientierungen | 45 |
| 4.1.2 | Nakajima-Versuche | 46 |
| 4.1.3 | Biegeverfahren | 50 |
| 4.2 | Umformtechnische Untersuchungen | 51 |
| 4.2.1 | Werkzeug- und Prozessentwicklung..... | 51 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2.2 | Umformtechnische Untersuchungen anhand eines offenen U-Kanals | |
| | 53 | |
| 4.2.3 | Umformtechnische Untersuchungen beim Tiefziehen mit auftretender Tangentialspannung..... | 54 |
| 5 | Projektbezogene Veröffentlichungen..... | 61 |
| 5.1 | Veröffentlichungen und Vorträge:..... | 61 |
| 5.2 | Science Slams..... | 61 |
| 5.3 | Patente..... | 61 |
| 6 | Fazit und Ausblick | 63 |
| 6.1 | Rührreibschweißen | 63 |
| 6.2 | Umformtechnische Betrachtungen | 64 |
| 6.3 | Ausblick..... | 65 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 66 |

1 Einleitung

Dieser Abschlussbericht zeigt die Ergebnisse, die im Rahmen des Projektes „Ressourcenschonende Mischschweißverbindungen für Hochleistungs-Leichtbauverbunde“ erzielt wurden. Das Projekt wurde vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft des Landes Baden-Württemberg (MFWBW) im Rahmen des Themenfeldes „Technologischer Ressourcenschutz“ gefördert. Das übergeordnete Ziel des Themenfeldes ist die Einsparung von natürlichen Ressourcen durch eine höhere Effizienz im Umgang mit diesen, sowie eine Stärkung von mittelständischen Unternehmen in Baden-Württemberg. Im Rahmen des Projektes wurde das Rührreibschweißen als ressourceneffizientes und umweltfreundliches Fertigungsverfahren zur Herstellung von beanspruchungs- und gewichtsoptimierten Automobilbauteilen erforscht. Damit kann einerseits nicht nur Werkstoff und damit Kosten gespart werden, sondern andererseits durch ein reduziertes Bauteilgewicht auch der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen von Fahrzeugen gesenkt werden.

Das Projekt wurde gemeinsam von drei Instituten der Universität Stuttgart bearbeitet: Dem Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF), der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart) sowie dem Institut für Umformtechnik (IFU). Zudem wurde ein projektbegleitender Ausschuss mit 12 Vertretern aus der Industrie eingerichtet, dem in regelmäßigen Abständen der Projektstand präsentiert wurde. Zudem wurden im Rahmen der Projektsitzungen relevante Fragestellungen diskutiert.

1.1 Projektziel

Das Ziel des Projektes war es, den Rührreibschweißprozess als Fertigungsprozess für Aluminium-Stahl-Verbunde für die industrielle Fertigung vorzubereiten. Dabei galt es, Aluminium und Stahl in verschiedenen Dicken durch Rührreibschweißen zu fügen und durch anschließendes Umformen zum End- bzw. Zwischenprodukt umzuformen. Die auf die Festigkeiten der Werkstoffe angepassten Blechdicken führen zu einer optimalen Ausnutzung der Werkstoffe, da an jeder Stelle der Werkstoff verwendet werden kann, der die lokalen Anforderungen am besten erfüllt. Durch den Einsatz dieser sogenannten Tailor Welded Blanks sinkt der Werkstoffverbrauch insgesamt und es können auf Leichtbau optimierte Bauteile hergestellt werden. Die Einsparung von Gewicht führt bei Fahrzeugen zu reduziertem Treibstoffverbrauch und somit zu geringeren schädlichen Emissionen. Weiterhin werden durch den reduzierten Werkstoffverbrauch natürliche Ressourcen gespart.

Obwohl die Grundpatente des Rührreibschweißens inzwischen ausgelaufen sind, hat der Prozess bisher wenig Verbreitung in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) gefunden. Das Projekt war daher darauf ausgelegt, das Rührreibschweißen mittelständischen Unternehmen zugänglich zu machen, indem der Schweißprozess zur Herstellung von hochoptimierten Bauteilen angewandt wird. Neben den technologischen Eigenschaften wurde zudem Wert darauf gelegt, dass der Prozess eine wirtschaftliche Produktion erlaubt.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Aluminium- und Stahlgüten in unterschiedlichen Dicken durch Rührreibschweißen gefügt und die Festigkeits- sowie Umformeigenschaften ermittelt. Da die Einhaltung von engen Toleranzen mit hohen Kosten in der Fertigung einhergeht, wurden die für den Prozess notwendigen Toleranzen untersucht, Lösungen zum Umgang mit diesen Toleranzen erarbeitet und Anforderungen an Anlagen zur Produktion von Tailor Welded Blanks identifiziert. Zudem wurde das Umformen von Blechen mit unterschiedlichen Materialien und Blechdicken untersucht. Darüber hinaus wurde eine Reihe weiterer Themen wie das Verschweißen von Gusswerkstoffen und Wärmebehandlungsstrategien beleuchtet. Abschließend wurden Demonstratorbauteile in Form von Tailor Welded Blanks in Aluminium-Stahl-Mischbauweise durch Rührreibschweißen und anschließendes Umformen gefertigt. Wie Abbildung 1.1 zeigt, wurde das Projektziel erfolgreich erreicht.

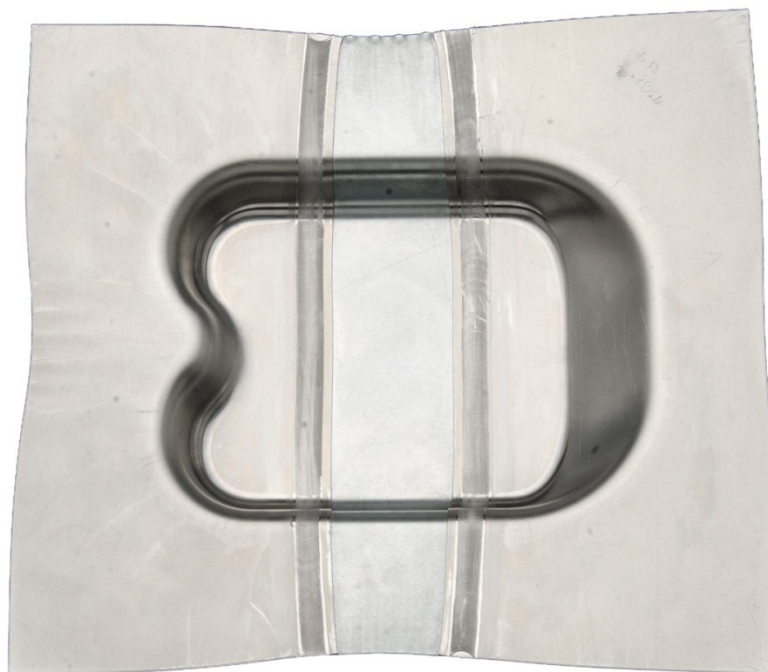


Abbildung 1.1: Tailor Welded Blank in Aluminium-Stahl-Mischbauweise – im Rahmen des Projektes gefertigter Demonstrator

1.2 Grundlagen des Rührreibschweißens

Das Rührreibschweißen (engl.: Friction Stir Welding; FSW) ist ein Solid-State-Schweißverfahren, das 1991 am The Welding Institute (TWI) in Großbritannien erfunden wurde [1] [2]. Die Werkstoffe werden dabei gefügt, ohne sie in die flüssige Phase überführen zu müssen. Da sich im Gegensatz zum Schmelzschweißen kein Erstarrungsgefüge bildet, besitzen rührreibgeschweißte Verbindungen sehr gute Festigkeitseigenschaften. Die beim Schmelzschweißen insbesondere von hochfesten Aluminiumwerkstoffen resultierende Entfestigung wird beim Rührreibschweißen auf ein Minimum reduziert. Durch die höhere Verbindungsfestigkeit lässt sich die eingesetzte Blechdicke reduzieren, was einerseits Werkstoff einspart, andererseits zu leichteren Komponenten führt und damit den Betrieb des Bauteils günstiger macht.

Der Prozess gliedert sich, wie in Abbildung 1.2 gezeigt, in drei Phasen. In der ersten Phase taucht ein rotierendes Werkzeug, bestehend aus Schulter und daraus hervorstehendem Schweißstift (Pin), in den Spalt zwischen den zu fügenden Werkstoffen ein. Durch die Reibung zwischen Werkzeug und Halbzeugen wird Wärme erzeugt, was zu einer Erweichung der Werkstoffe führt. In der zweiten Phase wird das rotierende Werkzeug entlang des Fügespalts verfahren, die beiden Fügepartner im teigigen Zustand verrührt und die Schweißnaht gebildet. In der letzten Phase wird die translatorische Bewegung gestoppt und das Werkzeug aus den Werkstoffen herausgezogen.

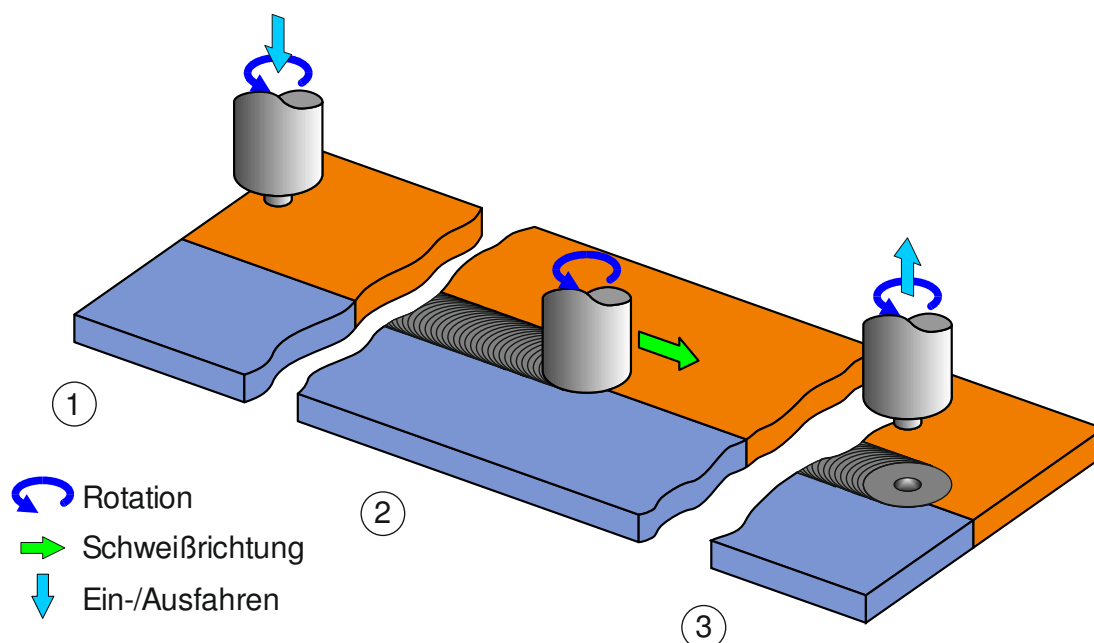


Abbildung 1.2: Rührreibschweißprozess

Prozessparameter, mit denen ein Einfluss auf das Ergebnis genommen werden kann, sind, wie in Abbildung 1.3 dargestellt, die Vorschubgeschwindigkeit v , die axiale Anpresskraft F , die Eintauchtiefe h_{pd} , der Anstellwinkel α , die Drehzahl n sowie das Drehmoment M . Da Drehzahl und Drehmoment sowie Anpresskraft und Eintauchtiefe nicht unabhängig voneinander sind, bleiben vier vorgebbare Parameter.

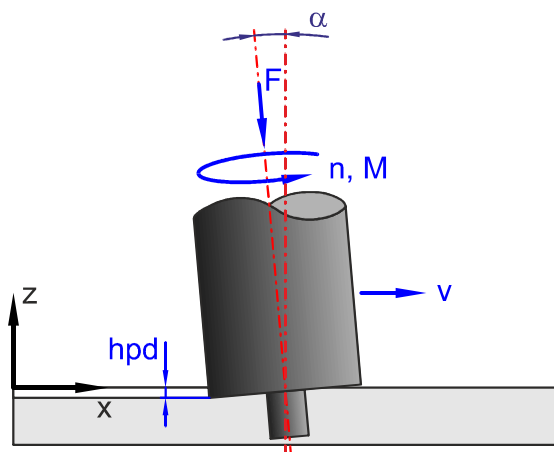


Abbildung 1.3: Prozessparameter Rührreißschweißen

Im Fall von Mischverbindungen, d. h. Verbindungen mit zwei unterschiedlichen verschweißten Werkstoffen, wie z. B. Aluminium und Stahl, ergibt sich aus der Position des Werkzeuges relativ zum festeren der beiden Werkstoffe ein weiterer Parameter, der sogenannte Offset. Der Offset gibt, wie in Abbildung 1.4 dargestellt, an, wie weit das Werkzeug in den festeren Werkstoff eindringt.

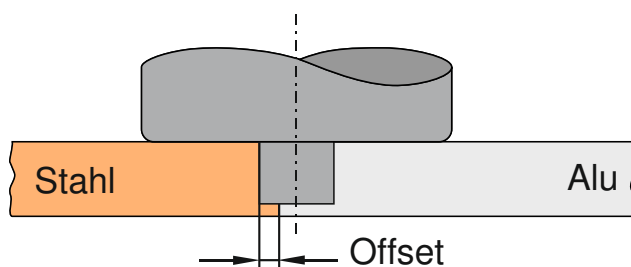


Abbildung 1.4: Definition des Offsets

2 Projektbegleitender Ausschuss

Entsprechend den Vorgaben des Zuwendungsbescheids wurde ein projektbegleitender Ausschuss (PBA) eingerichtet. Es konnten Vertreter von Firmen unterschiedlicher Größe und Anwendungsbereiche für den PBA gewonnen werden. Wie Tabelle 2.1 zu entnehmen ist, waren neben Automobilherstellern zudem Automobilzulieferer, Werkzeugmaschinenhersteller sowie Werkstoffproduzenten im Ausschuss vertreten.

Werkstoffe für die Schweißversuche wurden kostenfrei von den Firmen Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, Novelis Switzerland SA, Constellium Singen GmbH und Voestalpine Stahl GmbH zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus wurden von der Firma CeramTec GmbH kostenfrei Rührreißschweißwerkzeuge zur Verfügung gestellt.

Tabelle 2.1: Teilnehmer des projektbegleitenden Ausschusses sowie unterstützende Firmen

| PBA Teilnehmer | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Firmenname | Standort |
| Klaus Raiser GmbH & Co. KG | Eberdingen (Hochdorf) |
| Daimler AG | Stuttgart Untertürkheim |
| KUKA Systems GmbH | Augsburg |
| Gebr. Heller Maschinenfabrik GmbH | Nürtingen |
| ElringKlinger AG | Dettingen/Erms |
| Büttel & Marx | Dettingen/Erms |
| Volkswagen AG | Wolfsburg |
| Grenzebach Maschinenbau GmbH | Asbach-Bäumenheim |
| Constellium Singen GmbH | Singen |
| CeramTec GmbH | Plochingen |
| Robert Bosch GmbH | Renningen, Reutlingen |
| Audi AG | Neckarsulm |

| PBA Teilnehmer | |
|--|-------------------|
| Firmenname | Standort |
| Ministerium für Finanzen und Wirtschaft des Landes Baden-Württemberg | Stuttgart |
| IMWF Universität Stuttgart | Stuttgart |
| MPA Universität Stuttgart | Stuttgart |
| IFU Universität Stuttgart | Stuttgart |
| Unterstützende Firmen | |
| Hydro Aluminium Rolled Products GmbH | Grevenbroich |
| Voestalpine Stahl GmbH | Linz (Österreich) |
| Constellium Singen GmbH | Singen |
| CeramTec GmbH | Plochingen |
| Novelis | Sierre (Schweiz) |

3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse: IMWF und MPA

In diesem Kapitel sind die am Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) sowie der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart) erzielten Projektergebnisse dargestellt. Die Ergebnisse sind dabei nach dem Verlauf des Projektes dargestellt. Im Laufe des Projektes wurde eine Reihe verschiedener Aluminium- und Stahlwerkstoffe rührreibgeschweißt, eine Übersicht ist in Tabelle 6.1 zu finden. Im Laufe des Projektes wurden aufgrund der Verfügbarkeit drei verschiedene Aluminiumlegierungen der 6000er Reihe (EN AW 6016, EN AW 6111 und AC-600) mit jedoch ähnlichen Eigenschaften eingesetzt.

3.1 Optimierung der Verbindungskonfiguration

In dem Zeitraum zwischen dem Einreichen des Projektantrags und der Erteilung des Zuwendungsbescheids wurde eine zweite, verbesserte Fügekonfiguration entwickelt. Die Unterschiede zwischen der im Antrag vorgestellten Verbindungskonfiguration sowie der Weiterentwicklung werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Für die im Projektantrag vorgestellte Verbindungskonfiguration (im Folgenden Variante 1 genannt), dargestellt in Abbildung 3.1, muss der Stahl gefalzt werden.

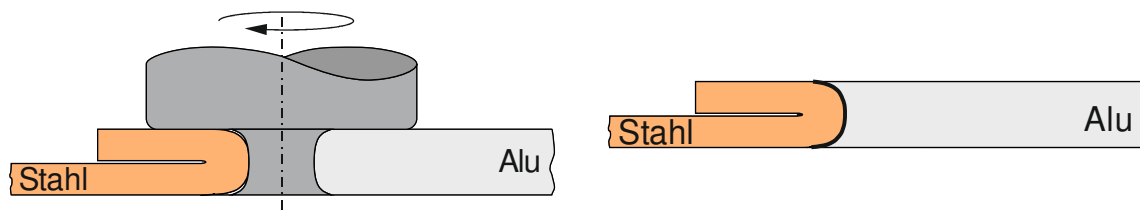


Abbildung 3.1: Verbindungskonfiguration mit Falz

Durch die starken Umformgrade kann es bereits zum Anreißen des Stahls im Falz vor dem Fügen kommen, was sich negativ auf die Festigkeit der Verbindung auswirken kann. Vor allem die Dauerfestigkeit kann durch einen vorhandenen Anriss stark herabgesetzt werden. Weiterhin muss für die Herstellung der Verbindung ein konkaves Werkzeug verwendet werden. Dies führt zu Herausforderungen bei der Herstellung des Werkzeuges, zudem ist ein Eintauchen des Werkzeuges in die Werkstoffe nicht problemlos möglich. Außerdem ist das Falzen des Stahls ein weiterer Arbeitsschritt, der ggf. schwierig in den Produktionsablauf zu integrieren ist und somit Zeit und Geld kostet.

Für die in Abbildung 3.2 gezeigte neu entwickelte Verbindungskonfiguration muss der Stahl nicht gefalzt werden, was zu einer Verbesserung der Festigkeitseigenschaften sowie zu Vorteilen bei der Anwendung führt.

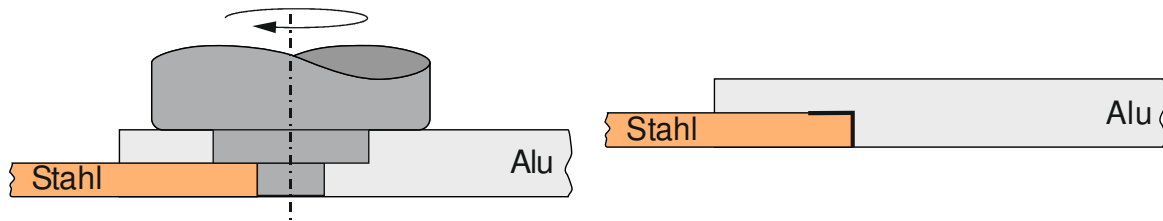


Abbildung 3.2: Neu entwickelte Verbindungskonfiguration

Durch ein Werkzeug mit zweistufigem Pin kann in einem Schweißvorgang gleichzeitig eine Stumpf- und Überlappverbindung erzeugt werden, ohne das Stahlblech dafür in einem vorherigen Arbeitsschritt umformen zu müssen. Diese „kombinierte Überlapp- und Stumpfstoßverbindung“ kann praktisch auf zwei unterschiedlichen Wegen realisiert werden. Eine Möglichkeit ist (im Folgenden Variante 2a genannt), einen Aluminiumstreifen gleicher Dicke auf das Stahlblech zu legen. Dieser gleicht den Höhenunterschied zwischen Stahlblech und dickerem Aluminiumblech aus und stellt sicher, dass zusätzlich zur Stumpfstoßverbindung auch eine Überlappverbindung gefertigt wird. Nachteilig ist, dass das Herstellen und Beilegen des Aluminiumstreifens zusätzliche Arbeitsschritte sind, zudem müssen hohe Positionierungstoleranzen eingehalten werden. Alternativ zum Beilegen des Blechstreifens kann, wie in Abbildung 3.2 auf der rechten Seite schematisch dargestellt, eine Kante mit der Höhe des Stahlbleches in das Aluminiumblech gefräst werden, die den Dickenunterschied ausgleicht.

Die andere untersuchte Verfahrensvariante zur Herstellung der kombinierten Überlapp- und Stumpfstoßverbindung (im Folgenden Variante 2b genannt) ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Das dickere Aluminiumblech wird hierbei überlappend über das dünnere Stahlblech gelegt. Durch die beim Schweißen vorhandene Axialkraft wird das Aluminiumblech niedergedrückt und gleichzeitig überlappend und stumpf mit dem Stahlblech verschweißt.

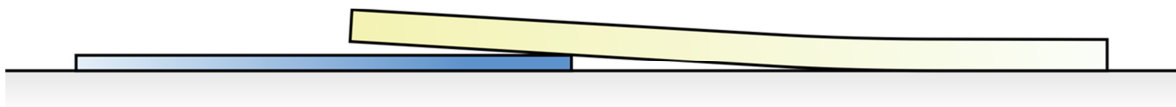


Abbildung 3.3: Verbindungskonfiguration Variante 2b

In Abbildung 3.4 sind Versuchsergebnisse dargestellt, die mit den beiden beschriebenen Verfahrensvarianten erzielt wurden. Das linke Bild zeigt hierbei eine Verbindung, welche mit Variante 2a (mit beigelegtem Blech) erzeugt wurde. Im rechten Bild ist eine mit Variante 2b (ohne zusätzlichem Blech) hergestellte Verbindung zu sehen.

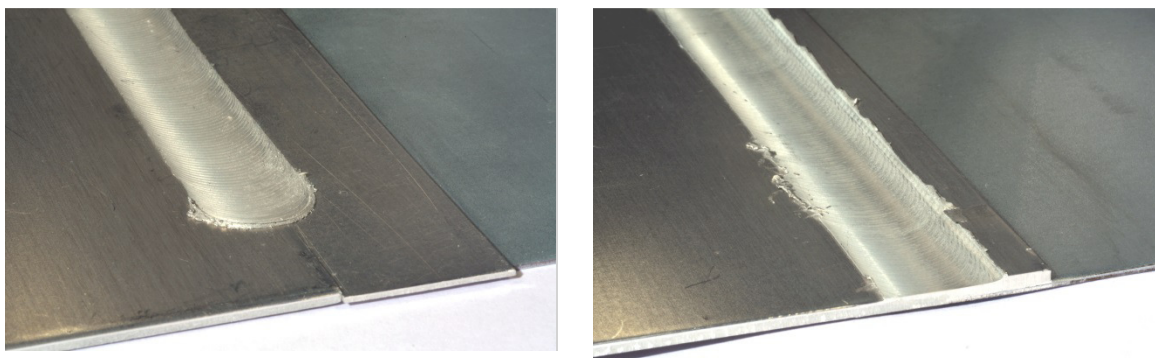


Abbildung 3.4: Mittels der Verfahrensvarianten 2a (links) und 2b (rechts) erzeugte kombinierte Überlapp- und Stumpfstoßverbindungen

In allen durchgeführten Experimenten wurde eine Blechdicke von 2 mm für die Aluminiumlegierung sowie eine Dicke von 1 mm für die Stahllegierung gewählt. Alle Bleche wurden vor dem Verschweißen mit Ethanol gereinigt sowie die Kanten entgratet, um gleichbleibende Versuchsbedingungen zu gewährleisten.

Die Auswahl und Kombination der Werkstoffe erfolgte in Abstimmung mit dem PBA. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Werkstoffkombinationen wirtschaftlich und im Leichtbausinne ökologisch sinnvolle Paarungen darstellen.

3.2 Materialkombination HX340LAD+Z mit EN AW 6016 T4

Die erste im Projekt untersuchte Materialkombination kombiniert den mikrolegierten Stahl HX340LAD+Z mit der aushärtbaren Aluminiumlegierung EN AW 6016 T4. Der Stahl ist dabei mit einer Zinkschicht zum Korrosionsschutz versehen. Bei beiden Materialien handelt es sich um typische im Automobilbau eingesetzte Werkstoffe. Wie aus Tabelle 3.1 ersichtlich ist, besitzt der Stahl eine in etwa doppelt so hohe Festigkeit wie die Aluminiumlegierung. Damit ergibt sich bei den gewählten Dicken von 2 mm und 1 mm eine in etwa gleich hohe Belastbarkeit der Ausgangsbleche.

Tabelle 3.1: Festigkeitskennwerte HX340LAD+Z und EN AW 6016 T4

| Werkstoff | Streckgrenze $R_{p0,2}$ | Zugfestigkeit R_m | Dehnung bei Höchstlast A_{gt} |
|---------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------|
| HX340LAD+Z | 380 MPa | 460 MPa | 21 % |
| EN AW 6016 T4 | 142 MPa | 243 MPa | 19 % |

Abbildung 3.5 zeigt im Rahmen der durchgeführten Zugversuche ermittelte Spannungs-Dehnungs-Diagramme des Grundwerkstoffes EN AW 6016 T4 sowie

einer rührreibgeschweißten Stahl-Aluminium-Verbindung. Die Schweißparameter, die für die Herstellung dieser Verbindung verwendet wurden, sind in Tabelle 3.2 angegeben. Die Dehnung wurde dabei über den gemessenen Traversenweg der Zugprüfmaschine ermittelt. Die Festigkeit der Schweißung ist auf die untersuchte Blechdicke von 2 mm des Aluminiums bezogen. Die geschweißte Verbindung weist eine Festigkeit von etwa 80 % (190 MPa) des Aluminium-Grundwerkstoffes auf, jedoch nur einen Bruchteil der maximalen Dehnung.

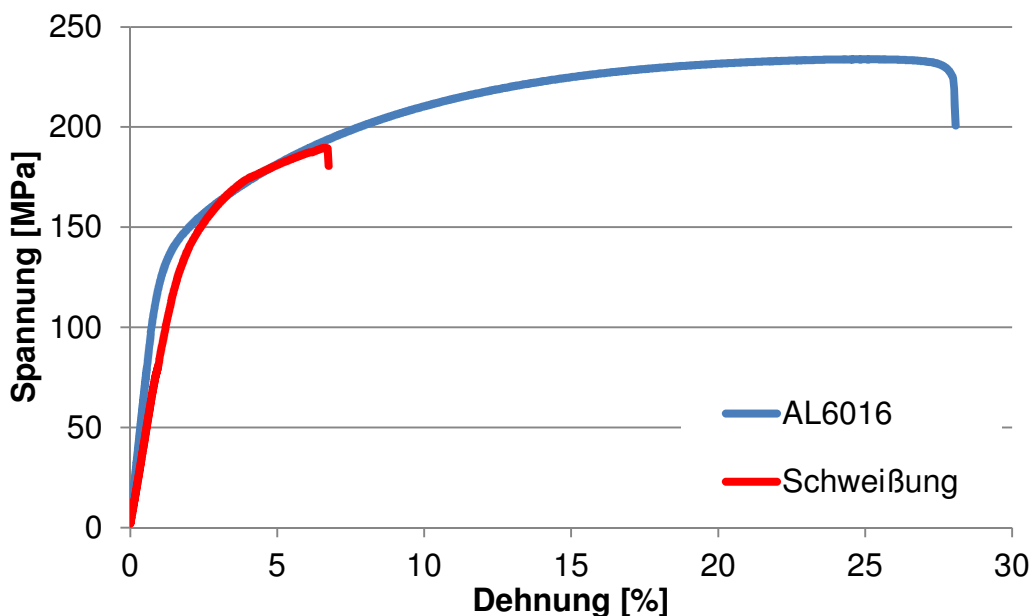


Abbildung 3.5: Ergebnisse der Zugversuche mit EN AW 6016 T4 und mit der HX340LAD+Z / EN AW 6016 T4-Schweißverbindung

Wie in Abbildung 3.6 gezeigt, tritt das Versagen der Schweißverbindung im Zugversuch sowie in Umformversuchen in der Schweißnaht direkt am Übergang von Aluminium zu Stahl auf. Eine zufriedenstellende Umformung ist hiermit noch nicht möglich, da die Schweißnaht versagt, bevor die Platine einen ausreichenden Umformgrad erreicht. Auch mit einer zweiten Werkstoffkombination, HX340LAD+Z mit EN AW 6111 T4, konnten zunächst keine zufriedenstellenden Umformergebnisse erzielt werden. EN AW 6111 T4 besitzt ähnliche Eigenschaften wie die EN AW 6016 T4 Legierung, vergleiche Tabelle 3.1 und Tabelle 3.3. Während die 6016-Legierung in Europa für Fahrzeugaußenhüllen eingesetzt wird, findet die etwas festere 6111-Legierung vor allem in den USA für gleiche Anwendungen Einsatz.

Tabelle 3.2: Schweißparameter für Materialkombination HX340LAD+Z und EN AW 6016 T4

| Drehzahl | Axialkraft | Vorschub- geschwindigkeit | Anstellwinkel | Offset |
|------------|------------|------------------------------|---------------|--------|
| 1400 1/min | 14000 N | 2 m/min | 4° | 0,3 mm |

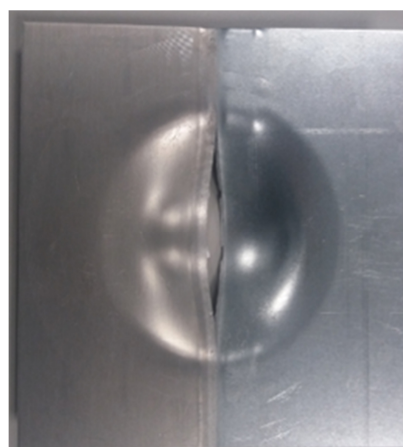
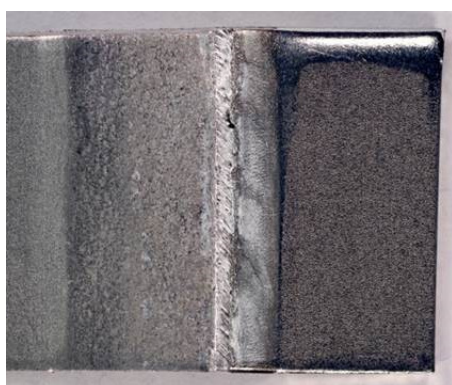


Abbildung 3.6: Bruchverhalten in Zug- (oben) und Umformversuchen (unten) der Materialkombination HX340LAD+Z und EN AW 6016 T4

3.3 Optimierung für eine verbesserte Umformbarkeit

Aufgrund der zunächst nicht zufriedenstellenden Umformbarkeit der in Kapitel 3.2 dargestellten Materialkombinationen wurde eine Optimierung für eine verbesserte Umformbarkeit der rührreibgeschweißten Verbindungen vorgenommen. Zum einen wurde der mikrolegierte HC340-Stahl durch einen weicheren DX54-Tiefziehstahl ersetzt. Weiterhin wurden Prozessdetails angepasst: Anstatt Beilegebleche oder Schweißnahtvariante 2b zu verwenden, wurde eine Stufe in das Aluminiumblech gefräst, um den Dickenunterschied zwischen Aluminium und

Stahl auszugleichen. Weiterhin wurde im Vergleich zu Tabelle 3.2 die Vorschubgeschwindigkeit auf 1 m/min begrenzt. Dieser Wert wurde in der ersten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses als akzeptabler Minimalwert für eine wirtschaftliche Produktion festgelegt. Weiterhin wurde eine Optimierung der Werkzeuggeometrie, siehe Kapitel 3.3.1, vorgenommen und die Schweißparameter in einer Parameterstudie auf die neue Materialkombinationen angepasst. Dabei wurde der ebenfalls verzinkte DX54-Stahl mit den Aluminiumlegierungen EN AW 6111 T4 sowie AC-600 verschweißt. AC-600 (EN AW 6451) ist eine Aluminiumlegierung, die speziell für automobiler Anwendungen angepasst wurde. Die Eigenschaften sind ähnlich wie die der anderen beiden Legierungen. Die Werkstoffeigenschaften sowie die optimalen Schweißparameter sind in Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4 aufgeführt.

Tabelle 3.3: Festigkeitskennwerte der Legierungen DX54D+ZM, EN AW 6111 T4 und AC-600

| Werkstoff | Streckgrenze $R_{p0,2}$ | Zugfestigkeit R_m | Dehnung bei Höchstlast A_{gt} |
|---------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------|
| DX54D+ZM | 151 MPa | 289 MPa | 39 % |
| EN AW 6111 T4 | 161 MPa | 274 MPa | 18 % |
| AC-600 | 170 MPa | 270 MPa | 21 % |

Tabelle 3.4: Schweißparameter für die Materialkombination DX54D+ZM / EN AW 6111 T4 (1) und DX54D+ZM / AC-600 (2)

| | Drehzahl | Axialkraft | Vorschubgeschwindigkeit | Anstellwinkel | Offset |
|-----|------------|------------|-------------------------|---------------|--------|
| (1) | 1100 1/min | 11000 N | 1 m/min | 3,5° | 0,3 mm |
| (2) | 1300 1/min | 11000 N | 1 m/min | 3° | 0,2 mm |

Abbildung 3.7 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Grundwerkstoffe sowie zweier Zugproben, entnommen aus der Rührreißschweißnaht. Die Dehnung wurde dabei über ein Extensometer ermittelt, die Festigkeit der Schweißung ist auf die Dicke von 1 mm des Stahls bezogen. Die Proben aus der Schweißnaht weisen die gleiche Zugfestigkeit wie der Stahlgrundwerkstoff auf. Die maximale Dehnung

ist auch hier deutlich niedriger als die der Grundmaterialien, was teilweise der Dehnungsbehinderung durch die unterschiedlichen Materialien und Blechdicken zugerechnet werden kann. Im Vergleich zur Materialkombination HX340LAD+Z / EN AW 6016 (siehe Abbildung 3.5) ist die maximale Dehnung jedoch höher. Wie in Abbildung 3.8 gezeigt, bricht die rührreibgeschweißte Verbindung hierbei im Stahlgrundmaterial und nicht in der Schweißnaht wie bei der Materialkombination HX340LAD+Z / EN AW 6016 (siehe Abbildung 3.6). Der Aluminiumgrundwerkstoff zeigt keine großen Verformungen, was durch die verschiedenen Blechdicken von DX54D+ZM und AC-600 im Verhältnis 1:2 bedingt ist. Obwohl die Aluminiumlegierung eine geringere Festigkeit als die Stahllegierung aufweist, sind die Aluminiumbleche damit aufgrund der größeren Dicke belastbarer als die dünnen Stahlbleche. Die fast ausschließlich im Stahl auftretenden Verformungen tragen ihrerseits zur vergleichsweise geringen maximalen Dehnung der Schweißnahtproben im Zugversuch bei.

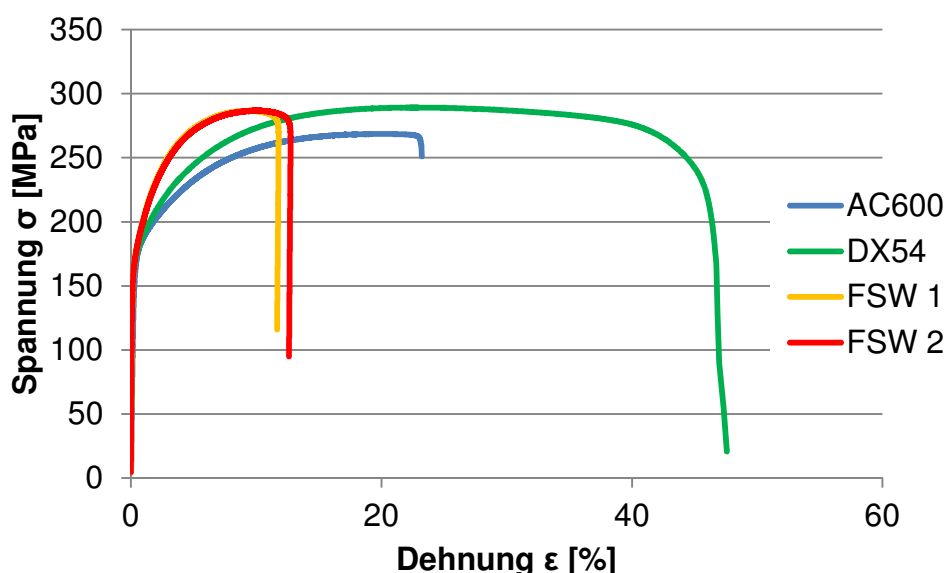


Abbildung 3.7: Ergebnisse aus Zugversuchen der Grundwerkstoffe AC-600 und DX54D+ZM sowie der rührreibgeschweißten Proben (FSW1/FSW2) aus diesen Grundwerkstoffen



Abbildung 3.8: Bruchverhalten der Materialkombination DX54D+ZM und AC-600

Die Ergebnisse der Materialkombination DX54D+ZM und EN AW 6111 T4 entsprechen weitestgehend den gezeigten Ergebnissen von DX54D+ZM und AC-600 und sind daher an dieser Stelle nicht explizit aufgeführt. Mit beiden Materialkombinationen wurden Umformversuche durchgeführt sowie Demonstratorbauteile gefertigt.

3.3.1 Werkzeuggeometrie

Um die Werkzeuggeometrie zu optimieren, wurde durch eine systematische Geometrieviation, ausgehend von der anfangs verwendeten Werkzeugversion, eine Reihe von neuen Werkzeugvarianten entwickelt.

Abbildung 3.9 zeigt eine Auswahl der konstruierten Werkzeuge. Variierte Parameter sind die Durchmesser der verschiedenen Stufen, Winkel der Schulter und die Form der Kanten.

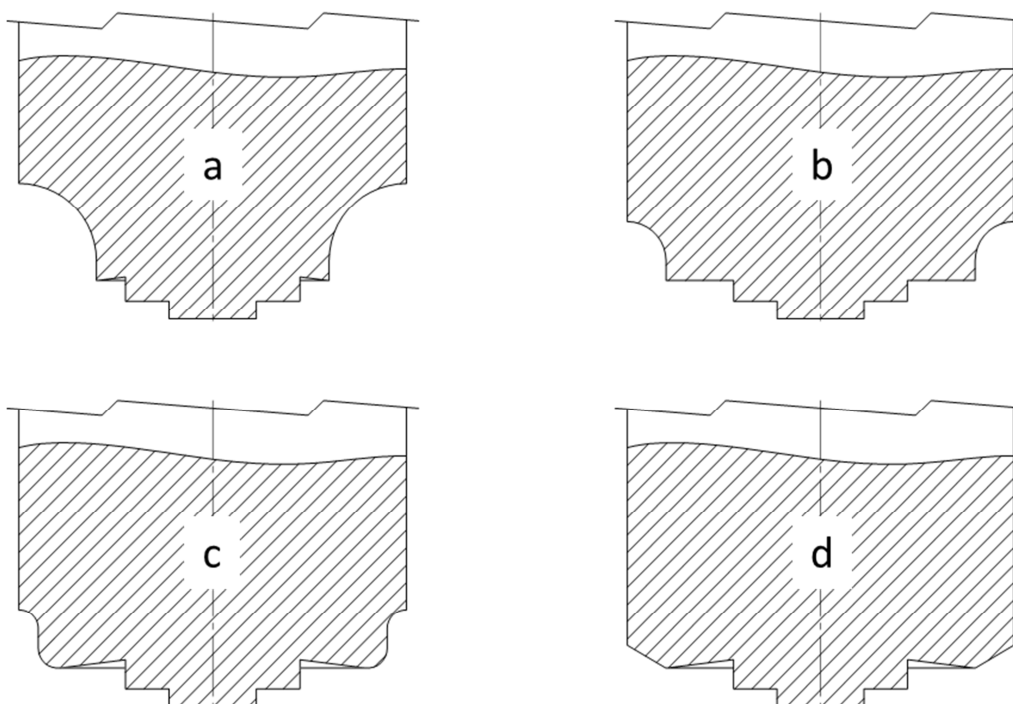


Abbildung 3.9: Untersuchte Werkzeugvarianten a-d

Abbildung 3.10 zeigt die Werkzeugvariante d, mit der die beste Kombination aus Schweißnahtfestigkeit sowie Nahtaussehen erreicht werden konnte. Die Einlaufschräge, in diesem Fall ausgeführt mit 30° , wurde in Kombination mit dem Schulterwinkel als wesentlicher Einflussfaktor auf die Oberflächengüte der Naht identifiziert. Im Rahmen der Variation der Schulterdurchmesser wurde festgestellt, dass akzeptable Nahtqualitäten bis zu einem Schulterdurchmesser von 12 mm erreicht werden können. Dies ist interessant, wenn schmale Schweißnähte gewünscht werden, z. B. um in Bereichen von Flanschen zusätzlich Werkstoff

einzusparen. Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Länge des Werkzeugpins. Der Pin des Werkzeuges kann nur wenig in den härteren Stahl oder die Schweißunterlage eindringen. Ist der Pin zu lang, führt dies, wie in Abbildung 3.11 schematisch links dargestellt, dazu, dass die Werkzeugschulter den Kontakt zu dem oberen Material – hier Aluminium – verliert. In diesem Fall fährt nur der Pin durch den Werkstoff und eine Nahtbildung ist nicht möglich. Ist der Pin zu kurz, kommt kein Kontakt zum Stahl zustande (Abbildung 3.11 rechts). In diesem Fall wird der Stahl nicht mechanisch-thermisch aktiviert und eine Verbindung der beiden Werkstoffe findet nicht oder nur unvollständig statt. In Anbetracht der Tatsache, dass die zu verschweißenden Materialien Dickenschwankungen unterlegen sein können, ist der Einsatz eines adaptiven Werkzeuges oder einer adaptiven Steuerung sinnvoll, siehe Kapitel 3.5.3.

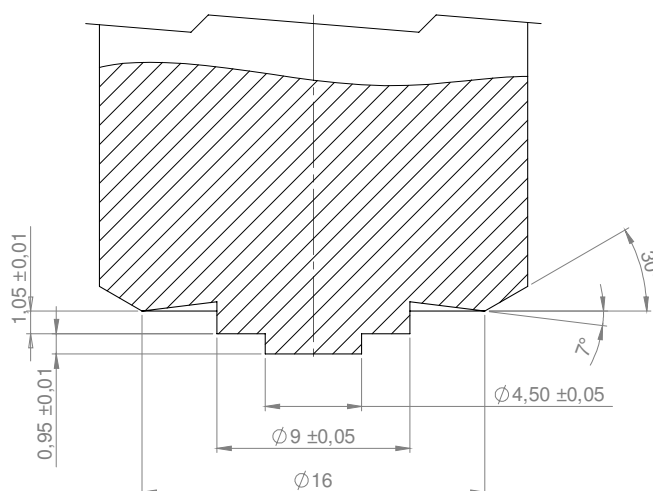


Abbildung 3.10: Optimale Werkzeuggestaltung

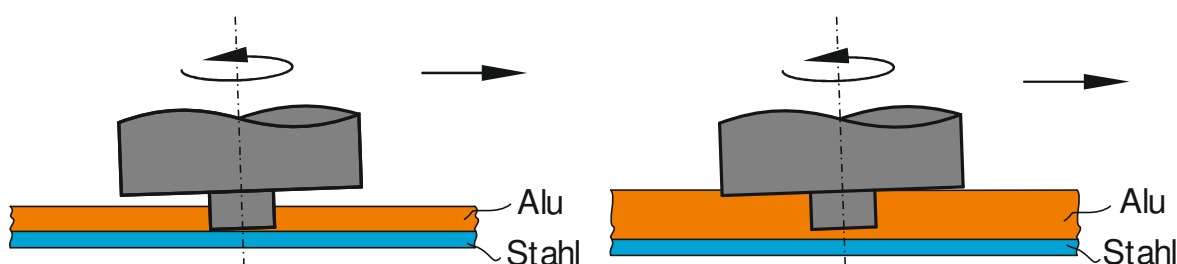


Abbildung 3.11: Falsche Pin-Längen - zu lang (links) und zu kurz (rechts)

Neben der Variation von geometrischen Parametern wurde auch der Werkstoff des Werkzeuges variiert. Standardmäßig sind die verwendeten Werkzeuge aus dem Warmarbeitsstahl X40CrMoV5-1 (Werkstoff-Nr. 1.2344) gefertigt. Wie auch bei anderen Fertigungsverfahren kommt es beim Rührreißschweißen zu einem Verschleiß des Werkzeuges. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projekts eine kleine Anzahl von keramischen Werkzeugen, die eine höhere

Verschleißfestigkeit als der Warmarbeitsstahl besitzen, gefertigt und erprobt. Hierbei wurden Werkzeuge aus zwei unterschiedlichen Keramikwerkstoffen, aus Zirkoniumoxid und aus Siliziumnitrid, verwendet. Es zeigte sich, dass die Werkzeuge aus Zirkoniumoxid in der genutzten Geometrie und mit den gewählten Schweißparametern für das Rührreibschweißen wenig geeignet sind. Die meisten Keramikwerkzeuge aus Zirkoniumoxid hielten den beim Schweißen auftretenden Kräften nicht stand und waren nach wenigen Schweißungen spröde gebrochen. Abbildung 3.12 zeigt in der Mitte ein Werkzeug, bei dem die untere Hälfte des Pins gebrochen ist, rechts ist ein Werkzeug zu sehen, bei dem der untere Teil komplett abgetrennt wurde. Auf der linken Seite ist zum Vergleich ein noch intaktes Werkzeug abgebildet.



Abbildung 3.12: Keramikwerkzeuge aus Zirkoniumoxid mit unterschiedlichen Abnutzungsgraden

Mit den Werkzeugen aus Siliziumnitrid konnten hingegen erfolgreich Rührreibschweißnähte ohne Beschädigung der Werkzeuge hergestellt werden. Dabei konnten, wie in Kapitel 3.7 dargestellt, auch pressgehärtete Stähle verschweißt werden. Da die Festigkeiten des pressgehärteten Stahls in derselben Größenordnung wie die Festigkeiten des Warmarbeitsstahls X40CrMoV5-1 liegen, ist eine Bearbeitung nur mit den Keramikwerkzeugen zielführend.

Aufgrund der niedrigeren Kosten und einfacheren Herstellbarkeit der Stahlwerkzeuge bei ausreichender Festigkeit zum Verschweißen der anderen Stahlsorten sowie Aluminium, wurden für die Mehrzahl der im Projekt durchgeführten Schweißungen Werkzeuge aus Stahl eingesetzt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Werkzeuge aus Siliziumnitrid in einer Serienanwendung durch die signifikant höhere Standzeit wirtschaftliche Vorteile aufweisen.

3.4 Parameterstudie mit Werkstoffen DX54+ZM und EN AW 6111 T4

Um den Einfluss der Schweißparameterwahl auf die Schweißergebnisse zu zeigen, sind nachfolgend exemplarisch die Ergebnisse einer Parameterstudie für die Materialkombination DX54+ZM und EN AW 6111 T4 dargestellt. Dabei wurden die Schweißparameter Drehzahl, Axialkraft, Vorschubgeschwindigkeit, Anstellwinkel und Offset gemäß Tabelle 3.5 variiert. Zusätzlich sind in Tabelle 3.5 die resultierende Oberflächenqualität und Zugfestigkeit der Schweißnähte (mit Bezug auf die Dicke des Aluminiums von 2 mm) angegeben. In Abbildung 3.13 ist die Schweißnahtoberfläche von vier ausgewählten Schweißungen abgebildet.

Wie aus Tabelle 3.5 ersichtlich ist, führt die Änderung der Schweißparameter ausgehend von Schweißung PS_1 in allen Fällen zu schlechteren Ergebnissen. Eine Erhöhung der Drehzahl (PS_2) führt zu niedrigeren Festigkeiten. Der Grund dafür ist die vermehrte Bildung von spröden, festigkeitsreduzierenden intermetallischen Phasen in der Schweißnaht durch die erhöhte Wärmeeinbringung. Auch eine Verringerung der Drehzahl (PS_3) führt zu schlechteren Festigkeiten, da keine ausreichende mechanisch-thermische Aktivierung und damit Nahtbildung mehr stattfindet. Eine Veränderung der Axialkraft führt zu einer Änderung der Werkzeugposition. Die veränderte Werkzeugposition führt analog zu den in Abbildung 3.11 skizzierten Effekten dazu, dass die Schweißnahtbildung gestört wird. Dies wird bei Schweißung PS_6 deutlich, bei der die Vorschubgeschwindigkeit von 1 m/min auf 2 m/min erhöht wurde, während die anderen Schweißparameter unverändert blieben. Durch die erhöhte Vorschubgeschwindigkeit kommt es aufgrund des Anstellwinkels zu einer höheren Reaktionskraft in axialer Richtung. Wird die zum Schweißen verwendete Axialkraft nicht angepasst, erreicht das Werkzeug nicht die vorgesehene Schweißposition und die Schulter bekommt nur unzureichenden Kontakt zum Werkstoff. Das Resultat ist eine unzureichende Schweißnahtbildung mit offener Oberfläche, wie in Abbildung 3.13 bei Schweißung PS_6 zu sehen ist. Eine Erhöhung der Axialkraft, wie bei Schweißung PS_7, führt dazu, dass das Werkzeug die vorgesehene Position zumindest zeitweise erreicht und eine Nahtbildung, siehe Abbildung 3.13, wieder möglich wird.

Tabelle 3.5: Untersuchte Schweißparameter der durchgeführten Parameterstudie an der Verbindung DX54+ZM / EN AW 6111 T4 (grau hinterlegte Felder weisen auf die zwischen den durchgeführten Versuchen variierten Prozessparameter hin)

| Schweißung | Drehzahl [1/min] | Axialkraft [N] | Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] | Anstellwinkel [°] | Offset [mm] | Oberflächenqualität | Zugfestigkeit [MPa] |
|------------|------------------|----------------|----------------------------------|-------------------|-------------|---------------------|----------------------|
| PS_1 | 1100 | 11000 | 1000 | 3,5 | 0,3 | ++ | 153 – Bruch im Stahl |
| PS_2 | 1400 | 11000 | 1000 | 3,5 | 0,3 | o | 125 |
| PS_3 | 800 | 11000 | 1000 | 3,5 | 0,3 | o | 143 |
| PS_4 | 1100 | 13000 | 1000 | 3,5 | 0,3 | + | 145 |
| PS_5 | 1100 | 9000 | 1000 | 3,5 | 0,3 | o | 140 |
| PS_6 | 1100 | 11000 | 2000 | 3,5 | 0,3 | -- | ungenügend |
| PS_7 | 1100 | 15000 | 2000 | 3,5 | 0,3 | o | 141 |
| PS_8 | 1100 | 11000 | 500 | 3,5 | 0,3 | -- | ungenügend |
| PS_9 | 1100 | 8000 | 500 | 3,5 | 0,3 | + | 119 |
| PS_10 | 1100 | 11000 | 1000 | 3,5 | 0,1 | - | 137 |
| PS_11 | 1400 | 11000 | 1000 | 3,5 | 0,1 | ++ | 104 |
| PS_12 | 1100 | 11000 | 1000 | 3,5 | 0,5 | ++ | 146 |
| PS_13 | 1400 | 11000 | 1000 | 3,5 | 0,5 | ++ | 125 |
| PS_14 | 1100 | 11000 | 1000 | 2,5 | 0,3 | + | 142 |
| PS_15 | 1100 | 11000 | 1000 | 1 | 0,3 | -- | 83 |

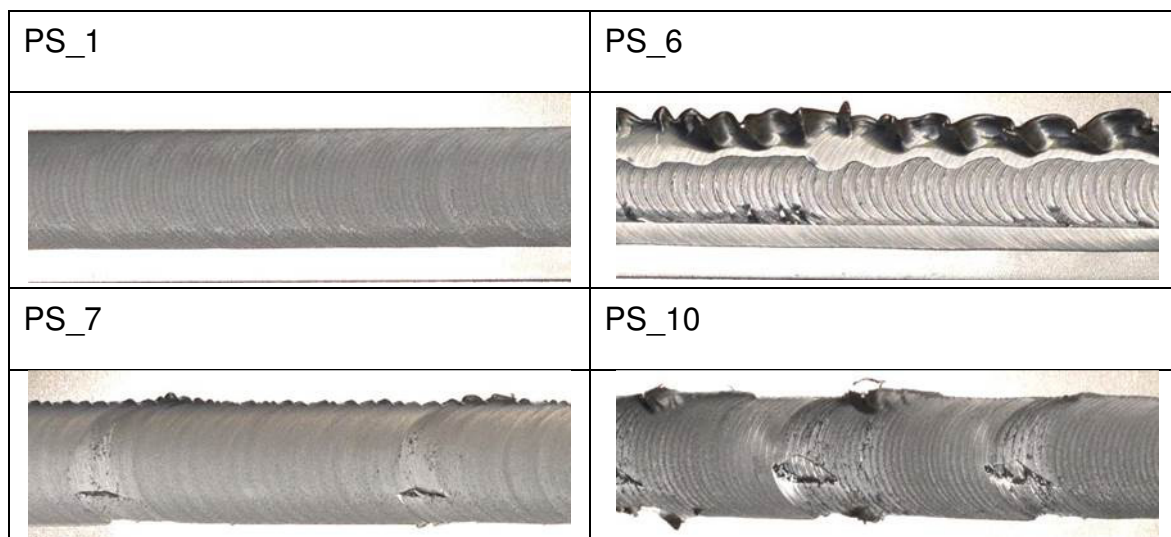


Abbildung 3.13: Ausgewählte Schweißnahtoberflächen DX54+ZM und EN AW 6111 T4

Eine Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit ohne Anpassung der Axialkraft führt analog zu einer falschen Werkzeugposition, die durch eine Verringerung der Axialkraft angepasst werden muss (PS_8 und PS_9). Eine Veränderung des Offsets, Schweißungen PS_10 bis PS_13, führt ebenfalls zu einer Reduktion der Schweißnahtfestigkeiten. Diese Erkenntnis ist speziell hinsichtlich der beim Schweißen zu beachtenden Toleranzen wichtig. Eine Verringerung des Anstellwinkels (PS_14 und PS_15) führt, ohne eine Anpassung der restlichen Schweißparameter analog zur Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit, zu einer falschen Position des Werkzeuges und resultiert somit in Schweißnähten mit ungenügenden Eigenschaften.

Abbildung 3.14 zeigt exemplarisch das Schliffbild der Schweißnaht PS_2. Links unten ist das 1 mm dicke Stahlblech zu sehen, umgeben vom 2 mm dicken Aluminiumblech. Der relative weiche Stahl wird durch den Werkzeugpin stark verformt und es entsteht ein Absatz, der die Breite des gewählten Offsets hat. Weiterhin sind im Aluminium Stahlpartikel zu sehen, die durch das Werkzeug vom Stahlblech abgetrennt und in das Aluminium eingerührt wurden. Weiterhin wird durch den Schweißvorgang ein Teil der Zinkschicht vom Stahl abgerieben und ebenfalls in das Aluminium eingerührt. Im Bereich der Nahtwurzel ist ein relativ großer Bereich zu sehen, der nicht verschweißt wurde, wo also keine Verbindung zwischen Aluminium und Stahl zustande gekommen ist. Dies ist auf eine unzureichende Pin-Länge oder ungenügend tiefe Werkzeugposition zurückzuführen.

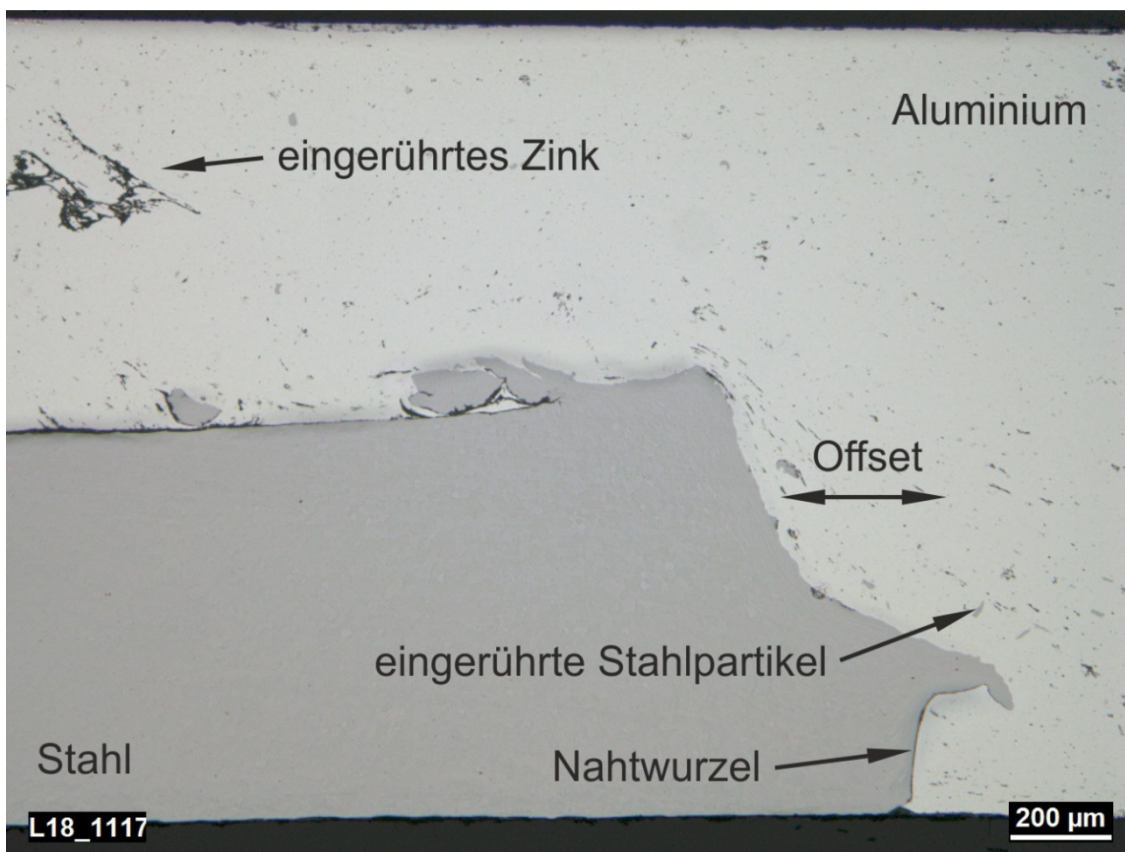


Abbildung 3.14: Schliffbild der Schweißnaht PS_2

Bei gleichartigen Rührreibschweißverbindungen, z. B. beim Verbinden von zwei Aluminiumlegierungen, kann sich unter dem Werkzeugpin eine Materialströmung ausbilden, die auch bei einer Pin-Länge, die kürzer als die Materialdicke ist, für eine komplette Durchschweißung der Nahtwurzel sorgt. Im Falle von Mischverbindungen, z. B. Aluminium und Stahl, kann sich keine solche Materialströmung ausbilden, da diese durch den festeren Werkstoff behindert wird. Für eine komplette Verbindung bei Mischverbindungen ist es somit notwendig, dass der Werkzeugpin bis zur Wurzel auch den härtesten Werkstoff ausreichend aktiviert. Eine unzureichend verschweißte Nahtwurzel ist deswegen kritisch, weil zum einen mögliche Anbindungsflächen nicht genutzt werden. Zum anderen stellt der nicht verbundene Bereich eine Kerbe dar, die die ertragbare Belastung insbesondere bei zyklischer Beanspruchung weiter herabsetzt.

3.5 Toleranzen

In diesem Kapitel werden die während des Projektes identifizierten Toleranzanforderungen sowie mögliche Lösungen zum Umgang mit diesen dargestellt.

Alle Bleche wurden vor dem Verschweißen mit Ethanol gereinigt, um möglichst gleichbleibende Versuchsbedingungen zu schaffen. Im Rahmen des Projektes

testweise durchgeführte Schweißungen mit ungereinigten Blechen zeigten schlechtere Ergebnisse als mit gereinigten Blechen. Da das Reinigen einen zusätzlichen Prozessschritt darstellt, der in industriellen Umgebungen idealerweise vermieden wird, sind weitergehende Untersuchungen sinnvoll. In diesen Untersuchungen gilt es festzustellen, welchen Einfluss verschiedene Verschmutzungsgrade auf die Prozesssicherheit des Rührreißschweißens haben. Eine dabei auftretende Problematik ist, eine gleichbleibende Verschmutzung zwischen verschiedenen Blechen und Chargen zu gewährleisten.

Auch bei demselben Werkstoff können zwischen verschiedenen Werkstoffchargen (leichte) Schwankungen der Materialeigenschaften auftreten. Wie in den vorherigen Kapiteln 3.2, 3.3 und 3.4 gezeigt wurde, sind für unterschiedliche Materialien unterschiedliche Prozessparameter notwendig. Dies bedeutet, dass bei Wechsel der Werkstoffcharge eine leichte Anpassung der Schweißparameter notwendig sein kann.

3.5.1 Position der Bleche

Wie in Kapitel 3.4 im Rahmen der Parameterstudie festgestellt wurde, spielt der Offset, d. h. die Position des Werkzeuges relativ zur Stahlblechkante, eine wichtige Rolle hinsichtlich der Schweißnahtqualität. Der Offset muss in der Größenordnung von Zehntelmillimetern eingehalten werden. Im Rahmen des Projektes wurden lineare Schweißnähte hergestellt, bei denen die Bleche zuvor mit einer Schlagschere gerade geschnitten und mithilfe von Präzisionsmessschrauben genau zum Werkzeug ausgerichtet wurden.

Im Rahmen von industriellen Anwendungen sollte jedoch auch der Fall abgedeckt werden, dass toleranzbedingt keine genaue Positionierung des Bleches stattfinden kann oder sich diese nicht wirtschaftlich realisieren lässt. Eine Möglichkeit zur Lösung dieses Problems ist die Berücksichtigung der ist-Position des Bauteils in der Bahnplanung der Schweiß-Trajektorie. Dies bedeutet allerdings, dass die Lage der Stahlkante erfasst werden muss. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von optischen Sensoren wie schematisch in Abbildung 3.15 dargestellt. Sobald das Stahlblech auf dem Maschinenbett aufgespannt ist, kann die Position der Kante erfasst und gespeichert werden. Basierend auf diesen Daten kann die Position des Werkzeuges während des Schweißens angepasst werden. Da die am IMWF/MPA vorhandene Maschine nur eine Achse besitzt und die Maschinensteuerung keine externen Datenschnittstellen zur Anbindung von Sensoren besitzt, ist diese im Rahmen dieses Projektes zum Patent angemeldete Strategie noch zu erproben.

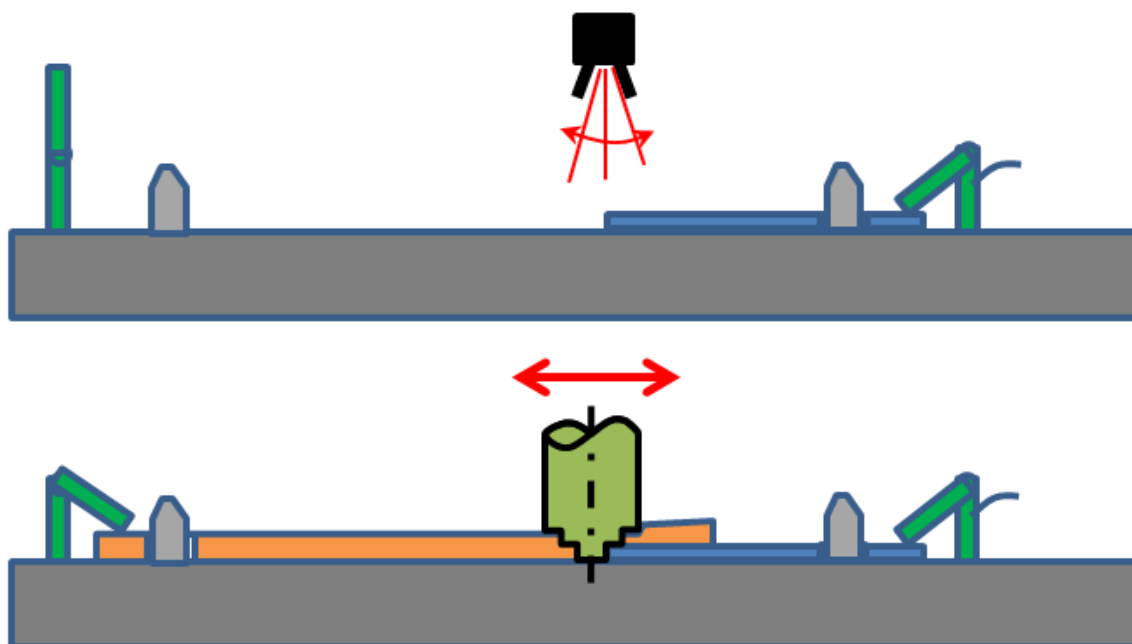


Abbildung 3.15: Kantendetektion (oben) und Werkzeugbahnkorrektur (unten)

Die Position des Aluminiumbleches ist geringeren Anforderungen unterworfen. Bei Verwendung der Verbindungskonfiguration 2b muss das Aluminiumblech lediglich, wie in Abbildung 3.3 gezeigt, einen Überstand über das Stahlblech von mindestens 10 mm aufweisen. Somit bestehen große zulässige Toleranzen im Millimeterbereich hinsichtlich der Positionierung des Aluminiumbleches. Im Fall der Verbindungskonfiguration 2a sind die Kanten von Stahl- und Aluminiumblech auf Anschlag auszurichten. Dabei muss ein Spalt zwischen Aluminium- und Stahlblech vermieden werden, da sonst aufgrund des Werkstoffmangels keine erfolgreiche Nahtbildung möglich ist. Dies bedeutet, dass die Kante des Aluminiums entsprechend der Kontur des Stahlblechs gefertigt sein muss.

3.5.2 Dickenschwankungen

Bei gewalzten Aluminiumblechen sind nach Norm EN 485-4 Dickenschwankungen von bis zu 0,1 mm bei einer Materialdicke von 2 mm und einer Bandbreite von 1000 mm erlaubt. Auch eine nicht perfekt ebene Schweißnahtunterlage kann zu Dickenschwankungen führen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass Verunreinigungen wie z. B. Späne zwischen Schweißunterlage und Bleche geraten und zu Dickenschwankungen führen. Während bei Dickenschwankungen, bedingt aus dem Herstellungsprozess, mit einem eher kontinuierlichen Wechsel der Materialdicke zu rechnen ist, ist bei den anderen erwähnten Gründen ein sprunghafter Wechsel der Dicke zu erwarten.

Zur Untersuchung des Einflusses von Dickenschwankungen wurden Schweißexperimente durchgeführt, bei denen die Bleche mit unterschiedlich dicken

Blechstreifen unterlegt wurden. Abbildung 3.16 zeigt den Verlauf der Axialkraft über der Zeit für eine Schweißung, bei denen die Bleche an drei Stellen mit Blechstreifen mit Dicken von 0,05 mm, 0,1 mm und 0,2 mm unterlegt waren.

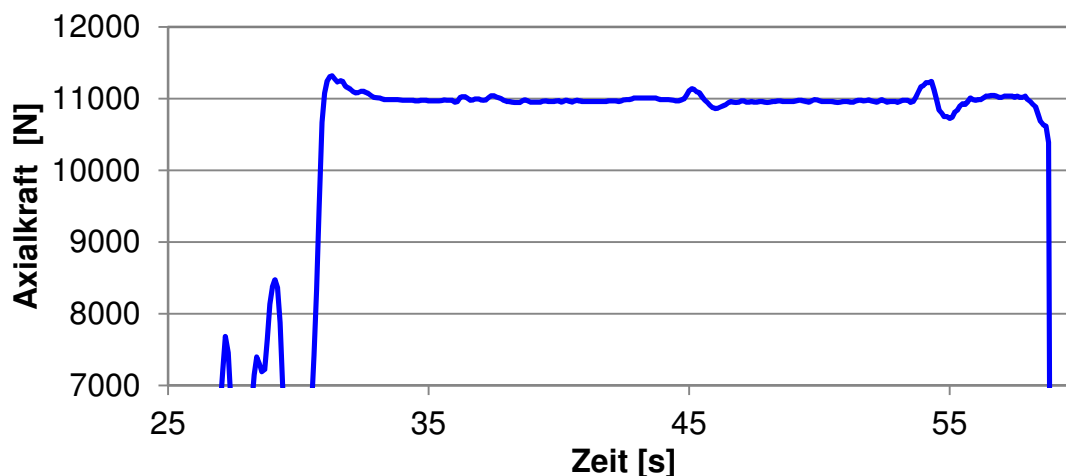


Abbildung 3.16: Axialkraftverlauf während Schweißung

Im Kraftverlauf sind an den entsprechenden Stellen bei 38 s, 45 s und 54 s Sprünge zu sehen, wenn das Werkzeug die unterlegten Stellen überfährt. Während bei einer Blechstreifendicke von 0,05 mm kaum Schwankungen in der Kraft zu sehen sind, steigt die Kraft bei einer Dicke von 0,1 mm um etwa 100 N und bei einer Dicke von 0,2 mm um etwa 200 N. Aus den zahlreichen im Rahmen des Projekts durchgeführten Schweißversuche ist bekannt, dass bei Kraftschwankungen und damit Dickenschwankungen von mehr als 100 N bzw. 0,1 mm mit Störungen in der Schweißnaht zu rechnen ist. Aufgrund der abweichenden Werkzeugposition kommt es, wie zuvor erläutert, zu Ungängen in der Schweißnaht.

Bei der Betrachtung des Kraftverlaufes in Abbildung 3.16 wird ersichtlich, dass die Kraftregelung der Schweißmaschine einen relativ langen Zeitraum braucht, um auf die Dickenschwankungen zu reagieren. Im Falle der letzten Dickenschwankung beispielsweise steigt die Kraft für 0,5 s an, bevor die Maschine auf den Kraftanstieg reagiert und auf diesen hin regelt. Die Reduktion der Kraft geschieht dann mit einem Unterschwingen von 200 N unter die eingestellte Kraft von 11000 N. Insgesamt benötigt der Regelvorgang in etwa 1 s, was bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 1000 mm/min einem Verfahrensweg von 16,67 mm entspricht, auf dem das Werkzeug nicht seine vorgesehene Schweißposition hat. Für den Einsatz in industrieller Umgebung ist es wünschenswert, dass die eingesetzte Schweißmaschine eine schnellere und genauere Regelung besitzt, da dies die Prozessführung robuster macht. Speziell wenn

Vorschubgeschwindigkeiten über 1000 mm/min gefordert sind, ist eine schnelle und präzise Regelung unerlässlich.

3.5.3 Adaptives Werkzeug

Wie in den vorherigen Kapiteln 3.4 und 3.5 erwähnt, ist es wichtig, dass die Naht bis zur Wurzel durchgeschweißt wird. Dies kann bei den gefertigten Mischverbindungen nur erreicht werden, wenn der Pin des Werkzeuges über die komplette Dicke mit den Blechen in Kontakt steht. Um dies auch im Fall von Blechdickenschwankungen oder andersartig verursachten, nicht optimalen Werkzeugpositionen zu gewährleisten, wurde ein Werkzeugkonzept für ein adaptives Werkzeug entwickelt, konstruiert und gefertigt.

Das Werkzeug besitzt, wie in Abbildung 3.17 abgebildet, einen von der Schulter getrennten Pin, der über Tellerfedern axial nachgiebig gelagert ist. Durch diese Lagerung ist die Pin-Länge dynamisch veränderbar und ein Ausgleich von Blechdickenschwankungen sowie ein Ausgleich des Einflusses von Werkstofffestigkeiten sind auf diese Weise theoretisch möglich. Die Federpakete sind austauschbar, sodass verschiedene Federkräfte realisiert werden können. Des Weiteren stehen durch den modularen Aufbau verschiedene Schulter- und Pindurchmesser zur Verfügung. Alle Komponenten sind austauschbar, während das Gehäuse (siehe Abbildung 3.17) in der Maschine eingespannt bleibt.

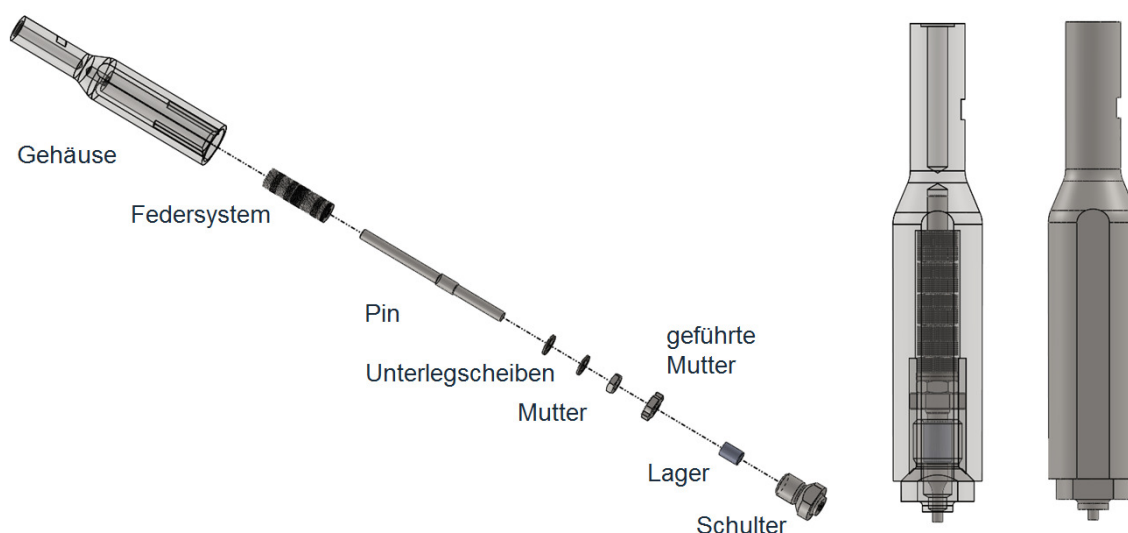


Abbildung 3.17: Adaptives Rührreibwerkzeug

Bei der Erprobung des Werkzeuges zeigte sich, dass die verwendeten Federpakete, wie in Abbildung 3.18 dargestellt, eine Hysterese in der Kraft-Weg-Kurve besitzen. Zur Ermittlung der Kurven wurde der Pin des Werkzeuges mehrfach mit einer Druckkraft be- und entlastet. Im idealen Fall würde die Federkennlinie, d. h. das dargestellte Kraft-Weg-Diagramm, einen nahezu

waagrechten Verlauf, wie in Abbildung 3.18 mit den gestrichelten Linien skizziert, aufzeigen. Dies würde bedeuten, dass bei einer gleichbleibenden Kraft der Pin des Werkzeuges einen großen Weg verfahren und somit Dickenschwankungen ausgleichen kann.

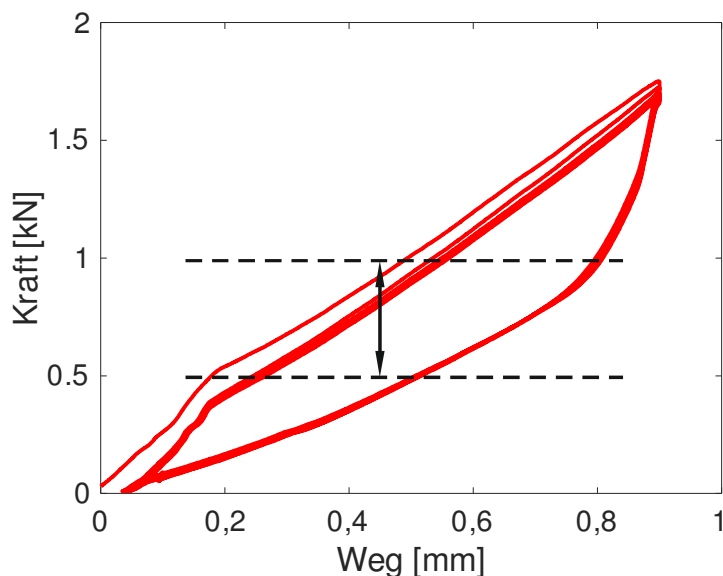


Abbildung 3.18: Kraft-Weg-Diagramm des adaptiven Werkzeugs

Die reale Federkennlinie weicht jedoch stark von diesem idealen waagrechten Verlauf ab, zudem gibt es durch die Hysterese zwei unterschiedliche Kraftniveaus bei gleichem Weg. Die bislang auftretenden Unsicherheiten in den Kraftniveaus stehen einem erfolgreichen Einsatz des Werkzeuges gegenüber. Das Werkzeugkonzept wurde aus diesem Grund in diesem Projekt nicht weiterverfolgt.

Der dargestellten mechanischen Lösung für das adaptive Werkzeug sind nach derzeitigem Kenntnisstand andere Lösungen, z. B. eine Maschine mit mehreren Achsen, Werkzeuge mit aktiven Stellgliedern, entsprechenden Sensoren und Regelalgorithmen zu bevorzugen. Eine entsprechende adaptive Regelstrategie wurde im Rahmen des Projektes entwickelt und zum Patent angemeldet, siehe Tabelle 5.1. Eine Erprobung des Ansatzes war im Rahmen des Projektes jedoch aufgrund der Einschränkungen der vorhandenen Maschinenteknik, vergleiche Kapitel 3.5.1, nicht möglich.

3.6 Hochfeste Werkstoffe: CR660Y980T und EN AW 7075 T6

Je höher die Festigkeit der eingesetzten Werkstoffe ist, desto geringer wird der benötigte Werkstoffeinsatz und somit das Gewicht von Bauteilen bei sonst gleichbleibenden Anforderungen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes zusätzlich Werkstoffe mit einer deutlich höheren Festigkeit als zuvor verschweißt, nämlich der Dualphasenstahl CR660Y980T mit der aushärtbaren

Aluminiumlegierung EN AW 7075 T6. Das Aluminium war dabei mit einer Titan-Zirkonium-Konversionsbeschichtung als Korrosionsschutz versehen, die Festigkeitseigenschaften beider Werkstoffe sind in Tabelle 3.6 zu finden. Während der Dualphasenstahl Anwendung im Automobilbau findet, wird die 7000er Legierung vor allem in der Luftfahrt eingesetzt. Ein Einsatz dieser Legierung im Automobil ist jedoch zumindest für crashrelevante Bauteile denkbar. Im Vergleich zu den vorherigen Werkstoffen war das Ziel nicht, die geschweißten Bleche im Nachhinein noch umzuformen, da schon die Grundwerkstoffe im Anlieferungszustand eine deutlich geringere Umformbarkeit besitzen. Vor allem die EN AW 7075 T6 Aluminiumlegierung ist nur in Kombination mit Wärmebehandlungen erfolgreich umformbar.

Tabelle 3.6: Festigkeitswerte CR660Y980T und EN AW 7075 T6

| Werkstoff | Streckgrenze $R_{p0,2}$ | Zugfestigkeit R_m | Dehnung bei Höchstlast A_{gt} |
|---------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------|
| CR660Y980T | 670 MPa | 1040 MPa | 8,7 % |
| EN AW 7075 T6 | 510 MPa | 580 MPa | 10 % |

In Tabelle 3.7 sind die Schweißparameter ausgewählter Versuche aufgeführt. Zudem sind Oberflächenqualität und die Festigkeit, bezogen auf die Dicke des Aluminiums, angegeben. Für alle Versuche wurde ein Anstellwinkel von $3,5^\circ$ sowie ein Offset von 0,3 mm verwendet. In Abbildung 3.19 sind zusätzlich die Oberflächen einiger Schweißnähte dargestellt. Als Startparametersatz, Schweißung 1, diente das Optimum der Werkstoffkombination DX54D+ZM und EN AW 6111 T4, siehe Tabelle 3.4. Wie anhand der Oberfläche der Schweißnaht (siehe Abbildung 3.19, Schweißung 1) zu erkennen ist, fand keine erfolgreiche Nahtbildung statt. Dies ist, wie schon erläutert, auf eine unzureichende Eintauchtiefe des Werkzeugs zurückzuführen. Dadurch bekommt die Schulter nur unzureichend Kontakt zum Werkstoff, was in einer offenen Nahtoberfläche resultiert. Eine Erhöhung der Axialkraft, Schweißung 5, resultiert in einer Naht, die im Vergleich zur vorherigen Schweißung einen kleineren Oberflächenfehler besitzt. Eine weitere Erhöhung der Axialkraft sowie zusätzlich eine Reduktion der Drehzahl (Schweißung 7 und 15) resultiert in Nähten mit kleineren Fehlern. Mit der gewählten Vorschubgeschwindigkeit von 1000 mm/min war jedoch auch bei der höchsten verfügbaren Axialkraft der Anlage von 25 kN keine Naht mit geschlossener Oberfläche zu erzielen. Erst mit einer kleineren Vorschubgeschwindigkeit von 750 mm/min waren erfolgreiche Schweißungen (17

- 20) möglich. Der beste Kompromiss aus Oberflächenqualität und Festigkeit konnte mit einer Drehzahl von 500 1/min erreicht werden.

Tabelle 3.7: Schweißparameter für hochfeste Werkstoffe

| Schweißung | Drehzahl [1/min] | Axialkraft [N] | Vorschubgeschwindigkeit [mm/min] | Oberflächenqualität | Zugfestigkeit [MPa] |
|------------|------------------|----------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 1100 | 11000 | 1000 | -- | nicht ermittelt |
| 5 | 1100 | 21000 | 1000 | -- | nicht ermittelt |
| 7 | 800 | 23000 | 1000 | - | nicht ermittelt |
| 15 | 700 | 25000 | 1000 | - | nicht ermittelt |
| 17 | 500 | 25000 | 750 | ++ | 206 |
| 18 | 700 | 25000 | 750 | + | 198 |
| 19 | 600 | 25000 | 750 | + | 226 |
| 20 | 700 | 25000 | 600 | o | 224 |

Die Ergebnisse zeigen, dass auch hochfeste Aluminium- und Stahlwerkstoffe erfolgreich mit Rührreibschweißen verbunden werden können. Die hohe Festigkeit, aber niedrige Duktilität der 7000er-Aluminiumlegierung macht höhere Axialkräfte, aber niedrigere Drehzahlen für eine erfolgreiche Verschweißung notwendig. Mit der vorhandenen Maschine war aufgrund der hohen benötigten Kraft nur eine geringere Vorschubgeschwindigkeit, im Vergleich zu den anderen Materialkombinationen, realisierbar. Die Titan-Zirkonium-Konversionsbeschichtung des Aluminiums erwies sich als unproblematisch. Die erreichten Festigkeiten sind minimal höher als die der Materialkombination HX340LAD+Z und EN AW 6016 T4. Die höheren Festigkeiten der Grundwerkstoffe können jedoch nicht vollständig ausgenutzt werden. Aufgrund der niedrigen Duktilität ist keine Umformung der Platinen nach dem Schweißen möglich, eine Umformung muss daher vor dem Fügen geschehen. Da die Schweißnaht nicht die Festigkeiten der Grundstoffe erreicht, sollten die Nähte in niedrigbelastete Bereiche des Bauteils gelegt werden.

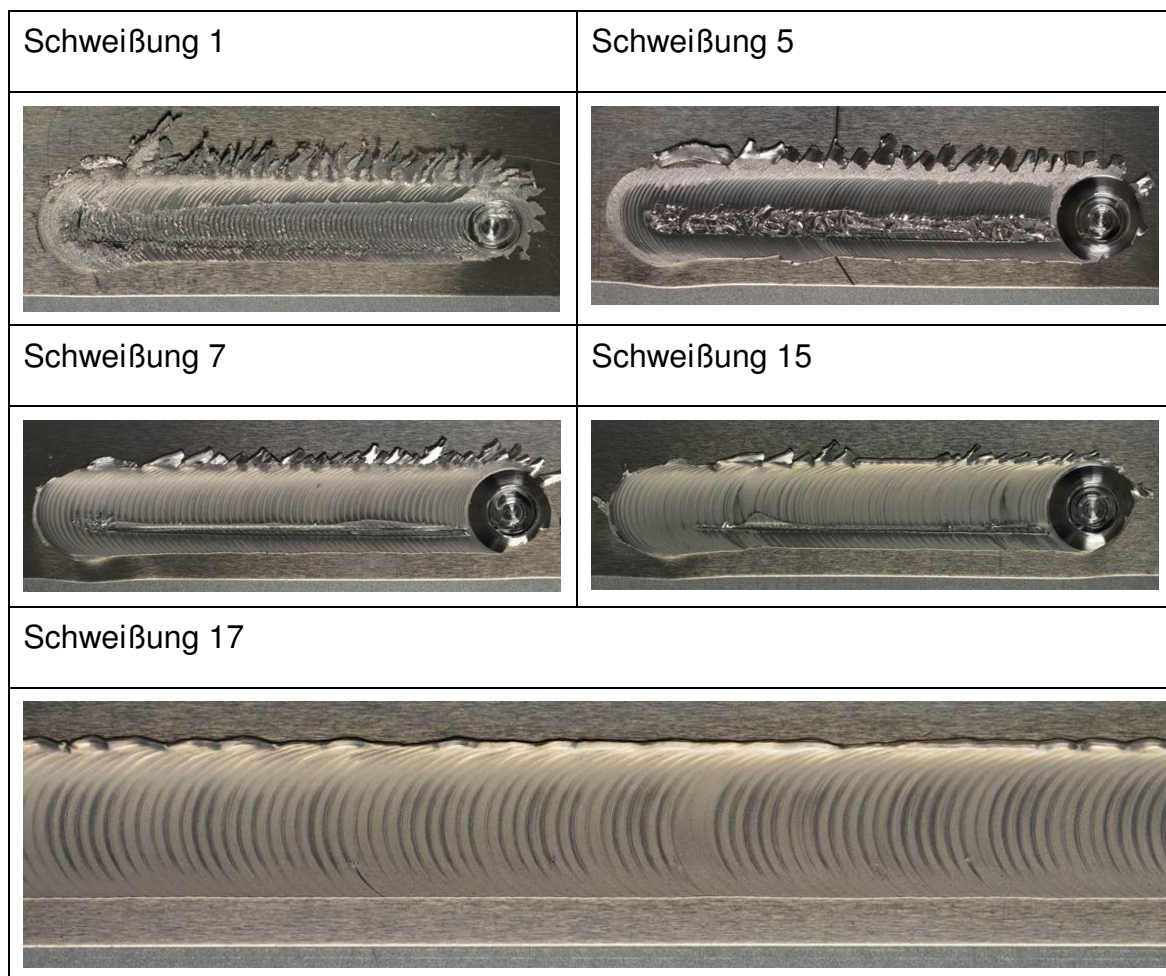


Abbildung 3.19: Ausgewählte Schweißnahtoberflächen CR660Y980T und EN AW 7075 T6

3.7 Machbarkeitsstudie: 22MnB5 und EN AW 6016 T4

Zusätzlich zu den hochfesten Werkstoffen wurde in einer Machbarkeitsstudie untersucht, ob durch Rührreibschweißen auch Stähle mit einer sehr hohen Festigkeit, wie der Mangan-Bor-Stahl 22MnB5 in gehärtetem Zustand, mit Aluminiumlegierungen verbunden werden können. Wie in Tabelle 3.8 aufgeführt ist, besitzt der Mangan-Bor-Stahl eine Zugfestigkeit, die fast 50 % höher als die des Dualphasenstahls CR660Y980T (Tabelle 3.6) ist. Zudem ist der Mangan-Bor-Stahl mit einer Aluminium-Silizium-Beschichtung versehen. Im Vergleich zu dem eingesetzten Aluminiumwerkstoff besitzt der Mangan-Bor-Stahl eine über sechsmal höhere Festigkeit. Somit besitzt die geschweißte Verbindung kein für die gemeinsame Umformung notwendiges ausgewogenes Verhältnis zwischen den Festigkeiten der einzelnen Fügepartner. Eine mögliche Anwendung könnte dennoch im Verbinden von hochfesten Automobilstrukturteilen aus pressgehartetem Stahl mit Karosserieblechen aus Aluminium im Rahmen der Rohbaumontage bestehen.

Tabelle 3.8: Festigkeitswerte 22MnB5 nach Presshärtung

| Werkstoff | Streckgrenze $R_{p0,2}$ | Zugfestigkeit R_m | Dehnung bei Höchstlast A_{gt} |
|-----------|----------------------------|---------------------|------------------------------------|
| 22MnB5 | 1100 MPa | 1500 MPa | 6,0 % |

Da der Stahlwerkstoff nicht in passenden Dicken vorlag, wurde im Vergleich zu den anderen Schweißversuchen auf eine reine Überlappkonfiguration zurückgegriffen. Aufgrund der hohen Festigkeit des Stahlwerkstoffes wurden Keramikwerkzeuge aus Siliziumnitrid eingesetzt. Abbildung 3.20 zeigt zwei Schlibfbilder der rührreibgeschweißten Verbindung.

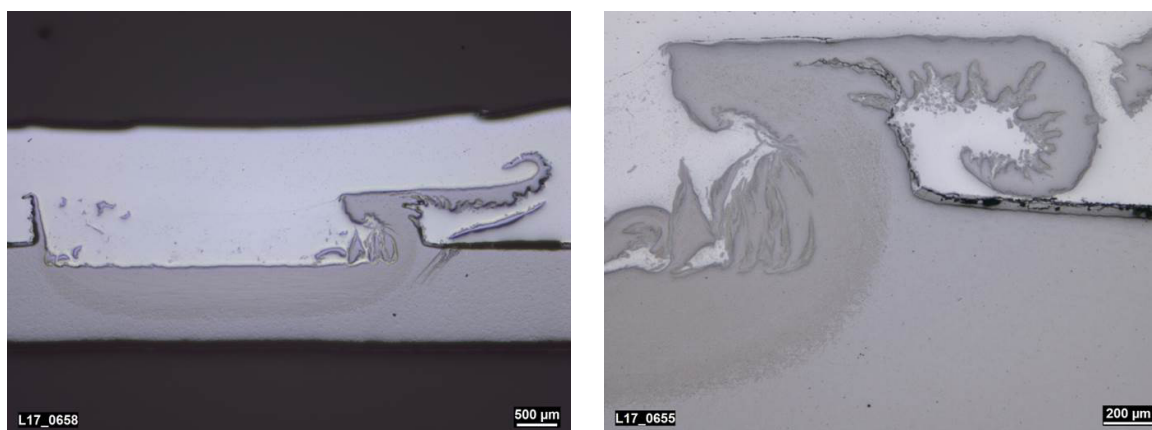


Abbildung 3.20: Schlibfbilder der Schweißung mit 22MnB5 und EN AW 6016 T4

Es ist zu erkennen, dass das Werkzeug für eine erfolgreiche Verbindung in den Stahl eindringen muss, um die vorhandene Aluminium-Silizium-Beschichtung aufzubrechen und in Form eines Grates abzuscheren. Erst dann kann der Stahl aktiviert werden und eine erfolgreiche Verbindung mit dem Aluminium stattfinden. Als problematisch könnte sich ggf. die durch den großen Grat entstehende Kerbwirkung zeigen.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei richtiger Wahl von Schweißparametern und Werkzeugen auch deutlich unterschiedliche Stahl- und Aluminiumsorten durch Rührreibschweißen verbunden werden können.

3.8 Schweißungen mit Aluminium-Druckguss

Zur Untersuchung der Übertragbarkeit der an Aluminium-Knetlegierungen entwickelten Schweißverbindungen auf Aluminiumgusswerkstoffe wurden stichprobenartig Versuche an Aluminiumdruckgussplatten durchgeführt. Als repräsentativer Werkstoff wurde für diese Untersuchung die Gusslegierung

AlSi10Mg ausgewählt, die in druckgegossenen Platten toleranzbedingt mit einer Dicke im Bereich von 1,8 bis etwa 2,0 mm vorlagen. Um in einer späteren Serienapplikation design- und leichtbaubedingt möglichst schmale Schweißnähte einsetzen zu können, wurde vom PBA angeregt, Werkzeuge mit möglichst geringem Durchmesser einzusetzen. Ausgewählte Werkzeuge und Versuchsparameter sind in Abbildung 3.21 und Abbildung 3.22 sowie Tabelle 3.9 und Tabelle 3.10 aufgelistet.

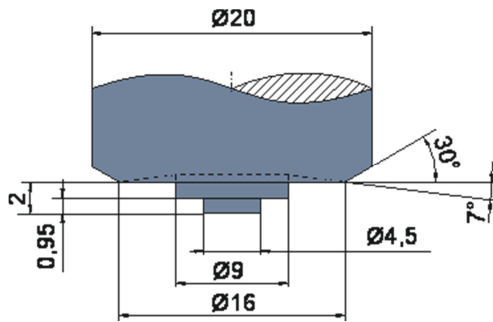


Abbildung 3.21: Breites Werkzeug für Gusslegierung

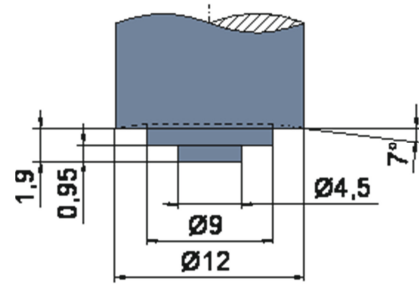


Abbildung 3.22: Schmales Werkzeug für Gusslegierung

Tabelle 3.9: Prozessparameter für breites Werkzeug

| Versuch | Drehzahl [U/min] | Vorschub [mm/min] | Axialkraft [kN] | Anstellwinkel [°] | Pin-Offset [mm] |
|---------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| A | 800 | 500 | 14 | 2,5 | -0,1 |
| B | 600 | 500 | 12 | 2,0 | -0,1 |

Tabelle 3.10: Prozessparameter für schmales Werkzeug

| Versuch | Drehzahl [U/min] | Vorschub [mm/min] | Axialkraft [kN] | Anstellwinkel [°] | Pin-Offset [mm] |
|---------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| A | 700 | 500 | 13 | 2,5 | -0,2 |
| B | 800 | 500 | 11 | 2,5 | -0,2 |

Die Schweißnahtanfänge der resultierenden Versuchsschweißungen sind in Abbildung 3.23 dargestellt. In den Versuchen zeigte sich, dass die breiteren Werkzeuge eine optisch ansprechendere, flachere und gleichmäßigere Schweißnaht, insbesondere beim Start, erzeugen, als die Werkzeuge mit geringerem Durchmesser. Hierbei kam es zu kleinen Oberflächenungängen, wie

offene Schlauchporen, Gratbildung und einem gewellten Rand im Überlappbereich.

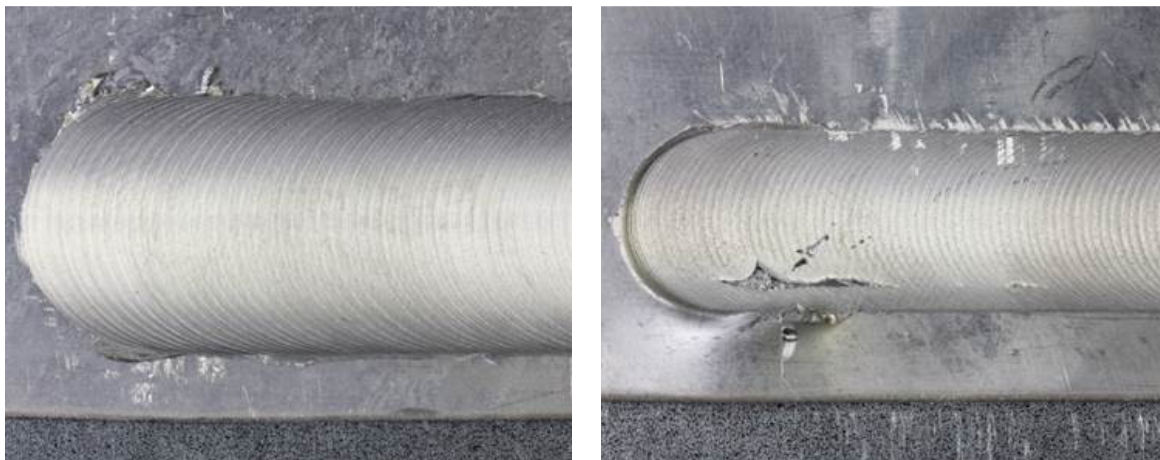


Abbildung 3.23: Schweißnahtanfang mit breitem (links) und schmalen (rechts) Werkzeug mit Prozessparametersatz B

Die Schliffbilder in Abbildung 3.24 zeigen eine vollständige Aktivierung des Stahls für die gesamte Blechdicke für das breite Werkzeug, die mit einer „Nase“ abschließt. Für die „schmalen Werkzeuge“ und die entsprechend untersuchten Schweißparameter bildet sich diese Nase geringfügig oberhalb der unteren Oberfläche aus. Die Festigkeit der untersuchten Verbindungen zeigt eine für Gusswerkstoffe übliche Streuung. Die Schweißparameter B zeigen gegenüber A für beide Werkzeuggeometrien höhere Festigkeits- und Dehnungswerte.

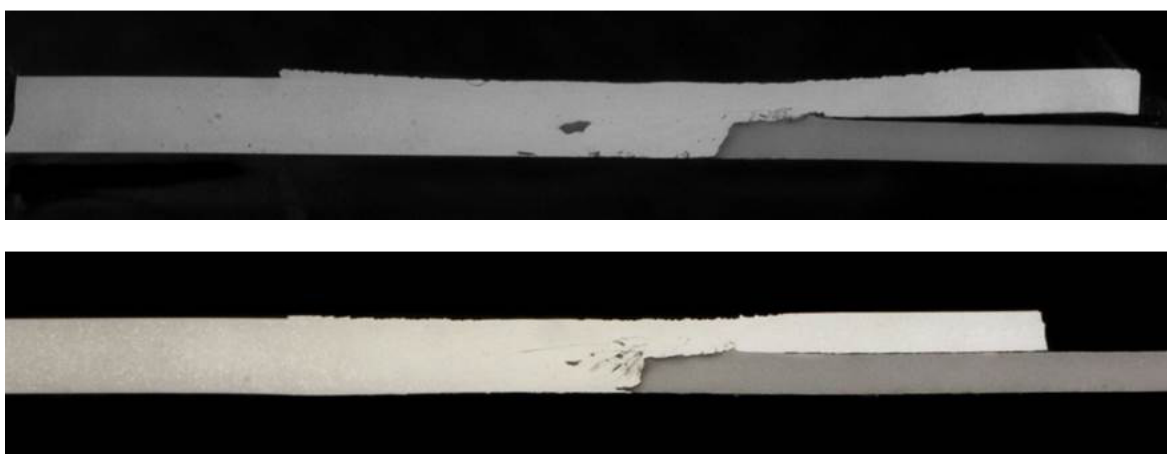


Abbildung 3.24: Schliffbild der Naht geschweißt mit breitem (oben) und schmalen (unten) Werkzeug

3.9 Korrosion

Zu einer ersten Überprüfung des Einflusses von Korrosion auf die rührreibgeschweißte Verbindung, wurden Bleche der Werkstoffkombination DX54D+ZM und EN AW 6111 T4 für 50 Stunden einer Salzsprühnebelprüfung unterzogen. Abbildung 3.25 zeigt das geschweißte Blech, bestehend aus zwei Aluminiumstreifen mit einem dazwischen eingeschweißten Stahlstreifen, nach der Salzsprühnebelprüfung. Während der verzinkte Stahl durch das Salz angegriffen wurde, sind keine Korrosionserscheinungen an den Aluminiumblechen zu sehen.

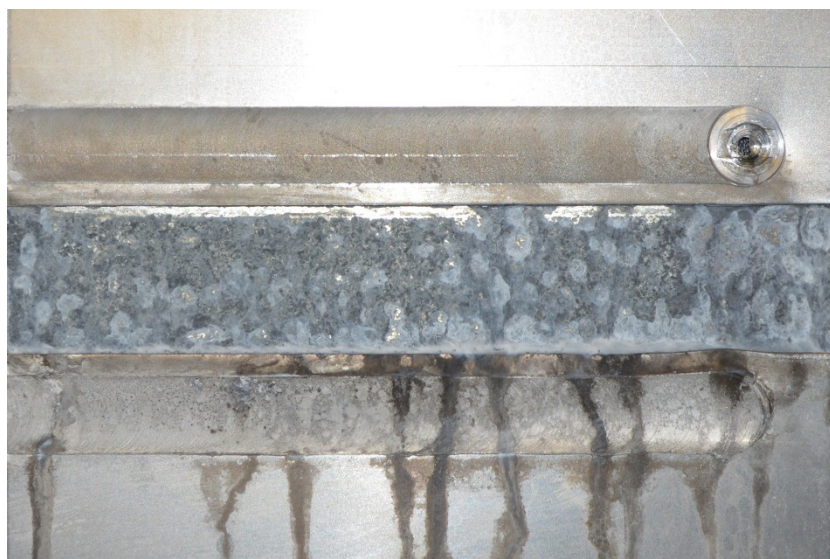


Abbildung 3.25: Rührreibgeschweißtes Aluminium-Stahl-Blech nach Salzsprühnebel-Kammer

Abbildung 3.26 zeigt das Schliffbild der Rührreibschweißnaht nach der Salzsprühnebelprüfung. Wie schon in Abbildung 3.13 sind eingerührte Stahlpartikel und eingerührtes Zink sichtbar. Ein negativer Einfluss der Salzsprühnebelprüfung ist jedoch nicht zu erkennen, im Schliffbild sind keine Korrosionserscheinungen sichtbar. Auch wenn in der ersten Analyse keine negativen Einflüsse zu erkennen waren, sind weitere, ausgiebigere Untersuchungen, z. B. mit längeren Prüfdauern und anschließenden Festigkeitsuntersuchungen, notwendig.

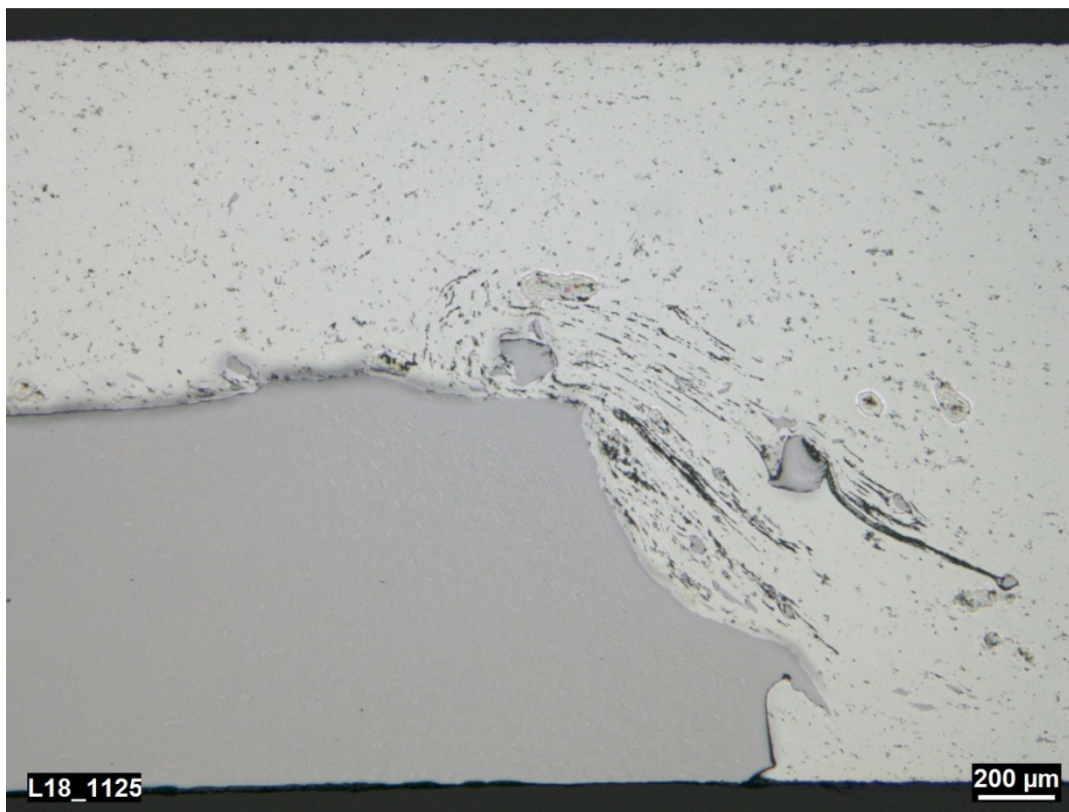


Abbildung 3.26: Schliffbild Schweißnaht nach Salzsprühnebel-Kammer

3.10 Prozess-Monitoring

Für den erfolgreichen Einsatz von Fügeverfahren im industriellen Umfeld ist eine Prozessüberwachung erforderlich. Im Folgenden wird an einem einfachen Beispiel demonstriert, wie Schweißnahtfehler für die vorliegende Nahtkonfiguration im Axialkraftverlauf erkannt werden können. Abbildung 3.27 zeigt zwei Schweißnähte mit zugehörigen Axialkraftverläufen. Bei der oberen Naht ist kein Fehler auf der Oberfläche zu erkennen. Der zugehörige Axialkraftverlauf verläuft ohne größere Schwankungen auf dem eingestellten Niveau von 11 kN. Im Vergleich dazu zeigt die untere Schweißnaht zwei Oberflächenfehler, einen kleineren am Anfang der Naht sowie einen größeren am Ende des ersten Nahtviertels. Im Axialkraftverlauf sind entsprechend dazu zwei Variationen der Axialkraft zu sehen. Entsprechend der Größe der Fehler fallen diese kleiner bzw. größer aus. Die Zusammenhänge zwischen Axialkraft und Werkzeugposition sind in Kapitel 3.5.2 erläutert. Mit einer entsprechenden Kalibrierung könnte das Über- bzw. Unterschreiten von definierten Kraftgrenzen als Indiz für Fehler in der Schweißnaht festgelegt werden. Die Höhe der Über- bzw. Unterschreitung kann mit entsprechender Kalibrierung als Maß für die Größe des Fehlers herangezogen werden.

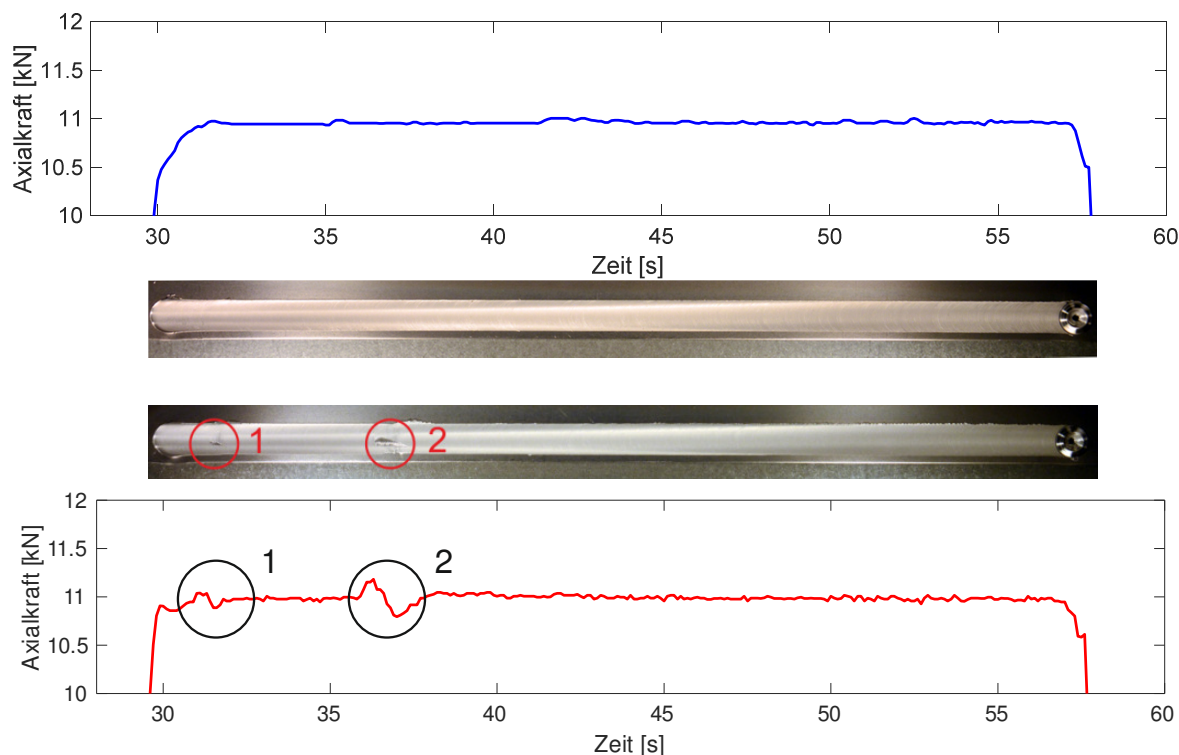


Abbildung 3.27: Vergleich von Axialkraftverlauf und Nahtoberfläche für zwei Schweißungen (blauer Kraftverlauf: fehlerfreie Nahtoberfläche; roter Kraftverlauf: fehlerhafte Nahtoberfläche)

Neben der Betrachtung der Axialkraft können generell auch andere Größen, z. B. das Drehmoment oder die Kraft in Vorschubrichtung bzw. die Kraft senkrecht dazu, herangezogen werden. Andere mögliche zu überwachende Größen bilden die Prozesstemperatur oder Beschleunigungen. Zur Erfassung dieser Größen muss die Rührreißschweißanlage jedoch mit den entsprechenden Kraftmessgliedern bzw. Sensoren ausgestattet sein. Idealerweise sollte die verwendete Anlagentechnik eine Rückführung der gemessenen Größen in die Steuerung erlauben, sodass diese als Regelgrößen verwendet werden können.

Im dargestellten Beispiel wäre z. B. eine Überwachung der Nahtoberfläche mit Kameras ebenfalls denkbar. Ein anderer, allgemeinerer Ansatz ist z. B. die Überwachung der Prozesstemperatur mit Pyrometern.

3.11 Übertragung auf industrielle Fertigung

Aus den durchgeführten Schweißversuchen und Untersuchungen können Rückschlüsse auf die Übertragung auf industrielle Fertigung getroffen und Anforderungen an benötigte Maschinenteknik definiert werden. In durchgeführten Schweißversuchen wurden für erfolgreich geschweißte Aluminium-Stahl-Verbindungen Axialkräfte in der Höhe von 11 kN (Tabelle 3.5) bis zu 25 kN (Tabelle 3.7) benötigt. Speziell für hochfeste Werkstoffe und hohe Schweiß-

geschwindigkeiten sind noch höhere Axialkräfte für eine erfolgreiche Nahtbildung notwendig. Für eine erfolgreiche Verbreitung der dargestellten Verfahrenskette ist eine Anwendung des Rührreibschweißens bei mittelständischen Unternehmen auf bereits vorhandenen Maschinen wünschenswert bzw. notwendig. In den meisten Unternehmen sind mehrachsige Fräsmaschinen vorhanden, die prinzipiell eine Ausführung des Rührreibschweißens zulassen. Problematisch ist, dass die Spindeln von Fräsmaschinen auf hohe Querkräfte, jedoch nicht auf hohe Axialkräfte ausgelegt sind. Dies bedeutet, dass entweder sehr große und damit teure Fräszentren eingesetzt oder bestehende Fräsmaschinen kostenintensiv aufgerüstet werden müssen, um die Anforderungen hinsichtlich der Axialkräfte zu erfüllen. Wie in Kapitel 3.5 gezeigt, bestehen Toleranzanforderungen hinsichtlich der Anwendung des Rührreibschweißens auf Mischverbindungen von Blechen, jedoch sind diese deutlich geringer als die beim Fräsen geforderten Genauigkeiten. Weiterhin besitzen Fräszentren abgeschlossene Arbeitsräume und Schmier- und Kühlmittelzuführungen, die zum Rührreibschweißen nicht benötigt werden.

Die ermittelten Anforderungen an Maschinen zur Herstellung von Tailor Welded Blanks durch Rührreibschweißen zeigen, dass die Entwicklung einer dedizierten Rührreibschweißmaschine sinnvoll ist. Eine neu zu entwickelnde Maschine kann auf die benötigten Kräfte und Genauigkeiten ausgelegt werden und zudem mit den benötigten Sensoren ausgestattet werden.

Als ersten Schritt in diese Richtung wurde mit der Konstruktion und Fertigung einer auf das Rührreibschweißen abgestimmten Spindel begonnen. Ziel bei der Eigenentwicklung war es, eine kostengünstige, robuste sowie kompakte Spindel für zukünftige FSW Anlagen bereitzustellen. Hierbei wird bei der Lageranordnung, der Auswahl der Antriebe sowie der Kühlmittelführung bewusst von Spindeln abgewichen, die für die Zerspanung ausgelegt wurden. Wie bereits dargelegt, ist beim Rührreibschweißprozess mit vergleichsweise hohen Axialkräften zu rechnen. Aufgrund der Vorschubkraft kommt es gleichzeitig zu einer Radialbeanspruchung der Lager bzw. zu einer Biegebeanspruchung der Welle. Anders als bei Frässpindeln wird ein geschlossener Kühlmittelkreislauf benötigt, um das Werkzeug zu kühlen. Eine Verunreinigung des Werkzeugs und der Werkstücke mit Kühlmittel ist jedoch zu unterbinden.

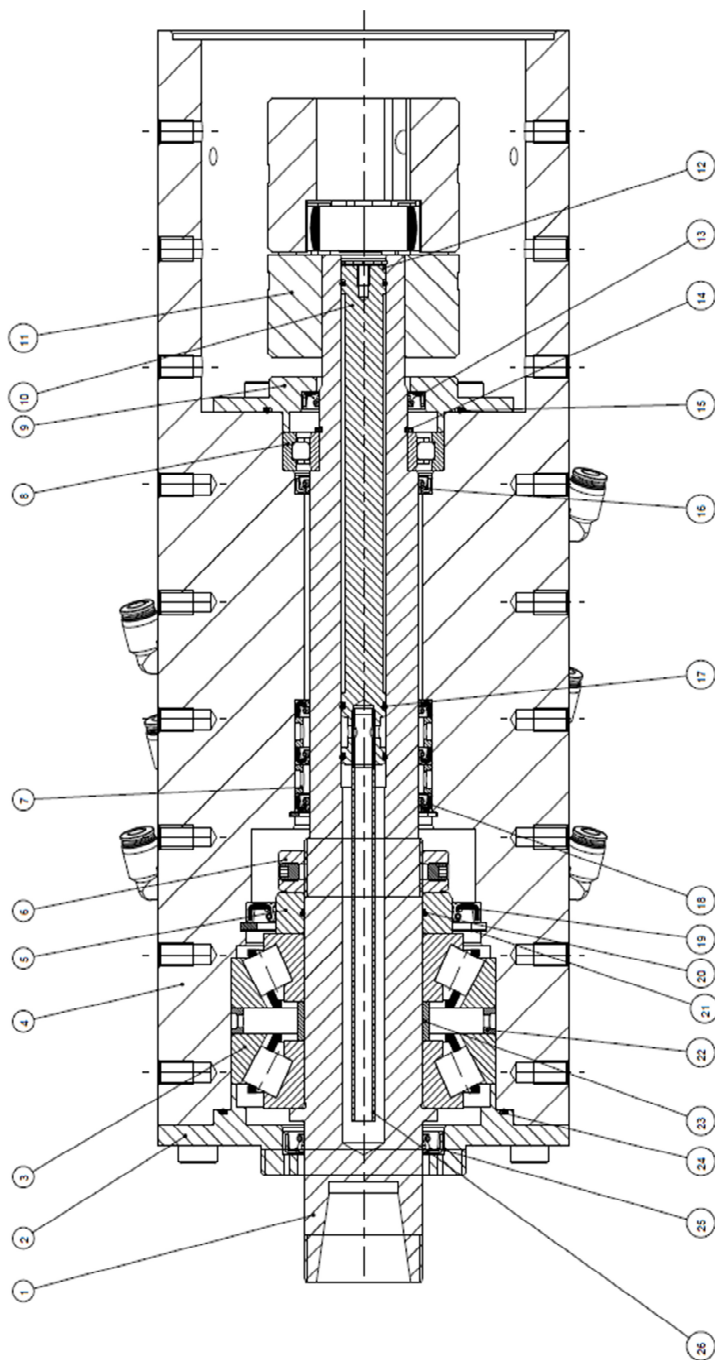


Abbildung 3.28: AN IMWF/MPA entwickelte Spindel [3]

Im Rahmen eines methodischen Konstruktionsprozesses wurde die in Abbildung 3.28 dargestellte Spindel entwickelt. Im Gegensatz zu konventionellen Spindeln kommen hierbei keine Schrägkugellager mit hoher Präzision und vergleichsweise geringen ertragbaren Axialkräften zum Einsatz, sondern werkzeugseitig Kegelrollenlager und Zylinderrollenlager. Diese erlauben hohe Axialkräfte und Radialkräfte bei moderatem Lagerspiel. Die Lagerabstände sind durch die O-Anordnung der Kegelrollenlager werkzeugseitig und die Anordnung eines Zylinderrollenlagers auf der abgewandten Seite maximiert. Dies wird dadurch ermöglicht, dass die Kühlmittelzufuhr und -abfuhr nicht axial, sondern radial

zwischen den Lagerstellen erfolgt. Zum Schutz der Lager vor ggf. in geringen Mengen leckendem Kühlmittel der dynamischen Dichtungen wurde ober- und unterhalb der Kühlmittelführung ein Sperrluftkreislauf vorgesehen. Als Antrieb wurde aufgrund der kompakten Bauform bei vergleichsweise hohem Drehmoment ein Synchronservomotor ausgewählt. Dieser wird über einen Flansch mit dem Gehäuse verbunden. Zum Ausgleich von Axial-, Radial- und Winkelversätzen zwischen den Wellen von Motor und Spindel, kommt hierbei eine Klauenkupplung zum Einsatz. Die Spindel wurde bereits an der MPA aufgebaut und wird in Verbindung mit einer ebenfalls in diesem Vorgehen patentierten Schweißzange erprobt.

3.12 Vergleich mit Laserschweißnähten

Am Beispiel des Werkstoffs EN AW 6016 T4 wurden zu Vergleichszwecken am Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart Laserschweißnähte für eine artgleiche Verbindung hergestellt und anschließend am IMWF und am MPA experimentell untersucht. Hierbei muss angemerkt werden, dass zwischen der Charakterisierung des Grundwerkstoffes und der Rührreibschweißnähte sowie der lasergeschweißten Proben mehrere Monate vergingen. In dieser Zeit ist es zur Alterung des Grundwerkstoffes und somit zu einer Steigerung der Festigkeitseigenschaften (Streckgrenze) gekommen. Abbildung 3.29 zeigt Spannungs-Dehnungs-Diagramme des Aluminiumgrundwerkstoffes EN AW 6016 T4, der Rührreibschweißverbindung sowie mehrerer Laserschweißverbindungen. Die Laserschweißverbindungen zeigen Bruchdehnungen im Bereich von 1 bis 3 %. Die Rührreibschweißnaht hingegen zeigt eine Dehnung bis ca. 18 % und liegt damit nahe am Grundwerkstoff. Die Brüche der Laserschweißnähte erfolgen vergleichsweise verformungsarm in der Schmelzzone der Naht.

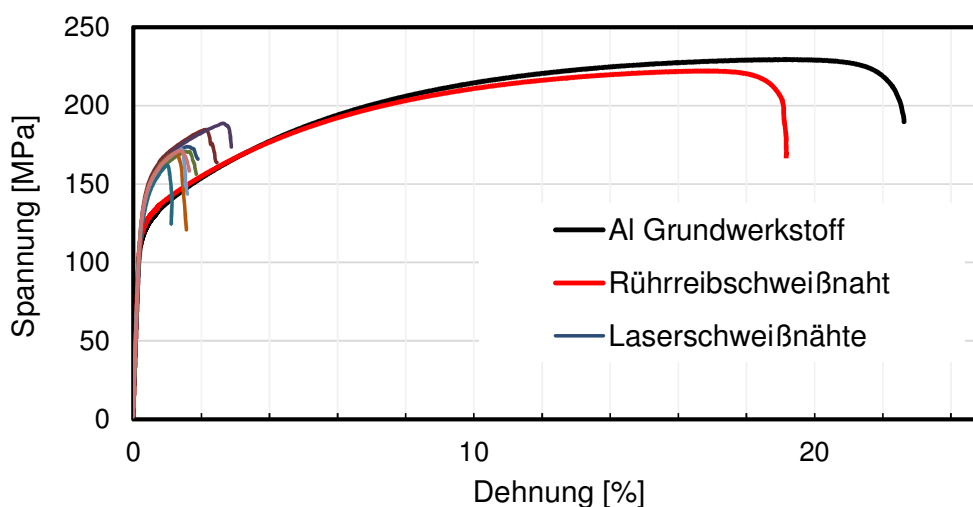


Abbildung 3.29: Spannungs-Dehnungsdiagramm von Proben, welche mittels Laser- und Rührreibschweißen gefügt wurden

Die Schwingfestigkeiten von Grundwerkstoff, Rührreißschweißnähten und Laserschweißnähten wurden in Wöhlerversuchen für den Werkstoff EN AW 6016 T4 mit einer Dicke von 2,0 mm auf einer SyncoTec Power Swingly 20kN MOT-Prüfmaschine ermittelt. Das Spannungsverhältnis R betrug bei allen Versuchen 0,1. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.30, Abbildung 3.31 und Abbildung 3.32 dargestellt.

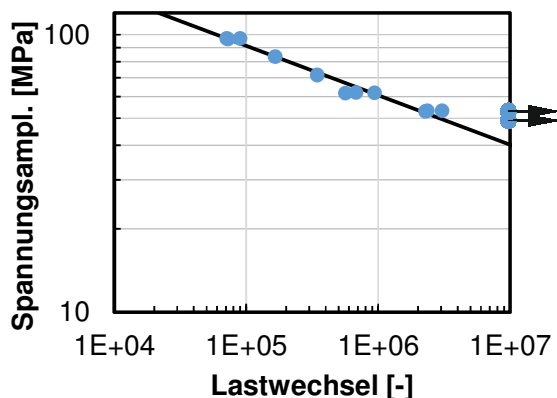


Abbildung 3.30: Wöhlerlinie Grundwerkstoff EN AW 6016 T4

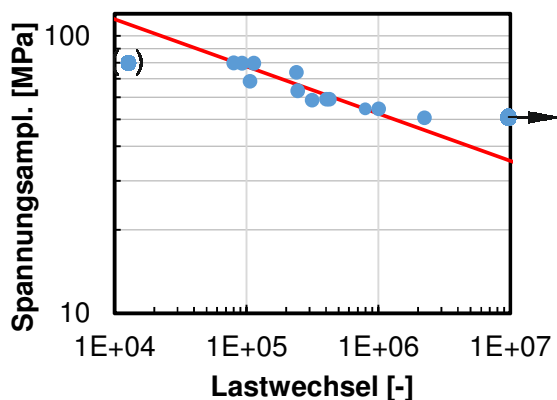


Abbildung 3.31: Wöhlerlinie Rührreißschweißnaht

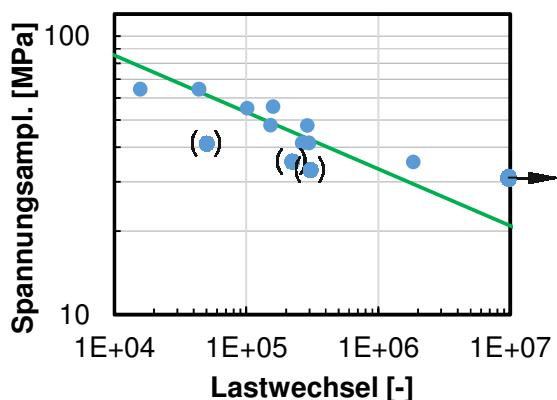


Abbildung 3.32: Wöhlerlinie Laserschweißnaht

Die Schwingfestigkeiten bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln und die in Bezug zum Grundwerkstoff ermittelten Ausnutzungsgrade sind in Tabelle 3.11 aufgelistet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Rührreibschweißnähte auch bei dynamischer Belastung eine höhere Festigkeit als die Laserschweißnähte aufweisen. Sowohl im Bereich von niedrigen als auch im Bereich von hohen Lastwechselzahlen zeigen die rührreibgeschweißten Verbindungen höhere ertragbare Spannungsamplituden. Zudem zeigt die Wöhlerlinie der Rührreibschweißnaht eine flachere Steigung als die Wöhlerlinie der Laserschweißnaht, d. h. die Laserschweißnaht zeigt prozentual gesehen einen höheren Abfall der Festigkeit mit steigender Lastwechselzahl als die Rührreibschweißnaht.

Tabelle 3.11: Ertragbare Spannungsamplituden und Ausnutzungsgrade für verschiedene Schweißnähte bzw. Werkstoffzustände für EN AW 6016

| Werkstoffzustand / Probentyp | Ertragbare Spannungsamplitude bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel | Ausnutzungsgrad |
|------------------------------|--|-----------------|
| Grundwerkstoff | 53,5 MPa | 100 % |
| Rührreibschweißnaht | 46,6 MPa | 87 % |
| Laserschweißnaht | 29,0 MPa | 54 % |

Eine Zusammenstellung der erzielbaren zyklischen Festigkeiten von rührreibgeschweißten Aluminium-Stahl-Verbindungen findet sich in denen zum Projekt gehörigen Veröffentlichungen [4], [5], [6]. Daher wird an dieser Stelle die Darstellung der Ergebnisse nicht wiederholt.

3.13 Wärmenachbehandlung

Trotz dessen, dass die Rührreibschweißverbindungen signifikant höhere Bruchdehnungen aufweisen als Laserschweißnähte, kommt es bei Umformversuchen, wie in Kapitel 3.2 dargestellt, abhängig von der Beanspruchung und der Werkstoffpaarung zur Rissbildung in der Naht.

Dieses Problem tritt insbesondere bei Hybridverbindungen zwischen Blechen mit unterschiedlichen Produkten aus Blechdicke und Festigkeit (Streckgrenze) auf. Sobald dieses Produkt beim Stahlwerkstoff deutlich größer ist als das des Aluminiumbleches, lokalisieren sich die Dehnungen in der Schweißnaht. Dies führt bei entsprechend hoher Beanspruchung bzw. Umformung zum Versagen der Naht.

Dies liegt daran, dass der Schweißprozess eine lokale Wärmebehandlung des Aluminiums darstellt. In [7] wurde versucht, diesen Rückgang der Festigkeit durch ein Lösungsglühen der Verbindung mit anschließendem Abschrecken zu beheben. Allerdings bilden sich bei typischen Zeit-Temperatur-Kollektiven zum Lösungsglühen zwischen Aluminium und Stahl spröde intermetallische Phasen (IMCs), die die Festigkeit der Verbindung limitieren. Demnach kann die Umformbarkeit der Verbindung durch die im Stand der Technik bekannten Wärmebehandlungsmethoden nicht wesentlich verbessert werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurde aus diesem Grund eine Methode entwickelt, bei der der Schweißprozess selbst als lokaler Lösungsglühprozess verwendet wird. Auf Basis des sogenannten Zwischenauslagerungseffekts führen kurze Zeiten zwischen Schweißvorgang und Warmauslagerung bei der Warmauslagerung zu einer signifikanten Festigkeitssteigerung in der Schweißnaht, während der bereits kaltausgelagerte Grundwerkstoff nahezu keine Festigkeitssteigerung erfährt.

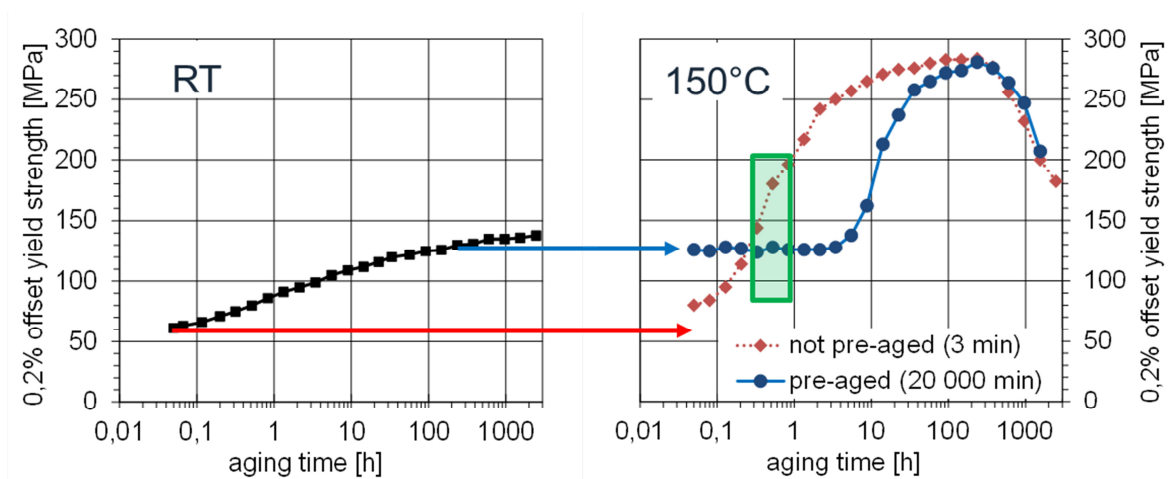


Abbildung 3.33: Darstellung des Prinzips anhand von Messwerten am Werkstoff EN AW 6016

Abbildung 3.33 zeigt das Prinzip der neuen Wärmebehandlung anhand von Messwerten am Werkstoff EN AW 6016. Wird der Werkstoff lösungsgeglüht, kommt es nach dem Abschrecken bei Raumtemperatur durch Kaltauslagerung zu einer Festigkeitssteigerung des Werkstoffs (links). Der Lösungsglühprozess wird in der Regel beim Werkstoffhersteller durchgeführt, sodass der Werkstoff bis zum Einsatz beim Kunden eine erhebliche Festigkeitssteigerung durch Kaltauslagerung erfahren hat – entsprechend der Auslagerungsdauer. Wird nun der Werkstoff beim Schweißprozess lokal in der Schweißnaht lösungsgeglüht, folgt die Kaltauslagerung ebenfalls nach diesem Muster. Wird hingegen eine Warmauslagerung des gesamten Bauteils (Schweißnaht und Grundwerkstoff) bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen und Zeitdauern durchgeführt (rechts), so

kommt es im nicht-zwischenausgelagerten Werkstoff bzw. der Schweißnaht zu einer signifikanten Festigkeitssteigerung. Diese übertrifft den kaltausgelagerten Werkstoff, der zunächst im Bereich des Plateaus keine Festigkeitssteigerung erfährt. Der Bereich nach dem Schnittpunkt der beiden Festigkeitsverläufe von Grundwerkstoff (kaltausgelagert) und Schweißnaht (nicht kaltausgelagert) definiert das mögliche Prozessfenster. Hierdurch lässt sich zum einen der Anwendungsbereich der Tailor Welded Blank Technologie enorm erweitern, zum anderen können Werkstoffe deutlich besser ausgenutzt werden. Alleine durch die Wärmebehandlung kann der Ausnutzungsgrad der Aluminiumwerkstoffe durch Steigerung der Schweißnahtfestigkeit um ca. 15 % verbessert werden. Das Konzept wurde unter dem Aktenzeichen EP 17 191 949.1 zum Patent angemeldet. Dem Patentantrag sind weitere Einzelheiten zum Verfahren zu entnehmen.

Abbildung 3.34 zeigt zwei Zugproben einer Rührreibschweißnaht mit identischen Schweißparametern. Während die linke Schweißnaht lediglich kaltausgelagert wurde, wurde bei der rechten Schweißnaht die erfindungsgemäße Wärmebehandlung angewendet. Dies führt dazu, dass die linke Schweißnaht in der Schweißnaht versagt, während bei der rechten Schweißnaht der Bruch im Grundwerkstoff auftritt. Dies bedeutet, dass nicht mehr die Schweißnaht die Umformbarkeit von TWBs limitiert, sondern die Grundwerkstoffe selbst.

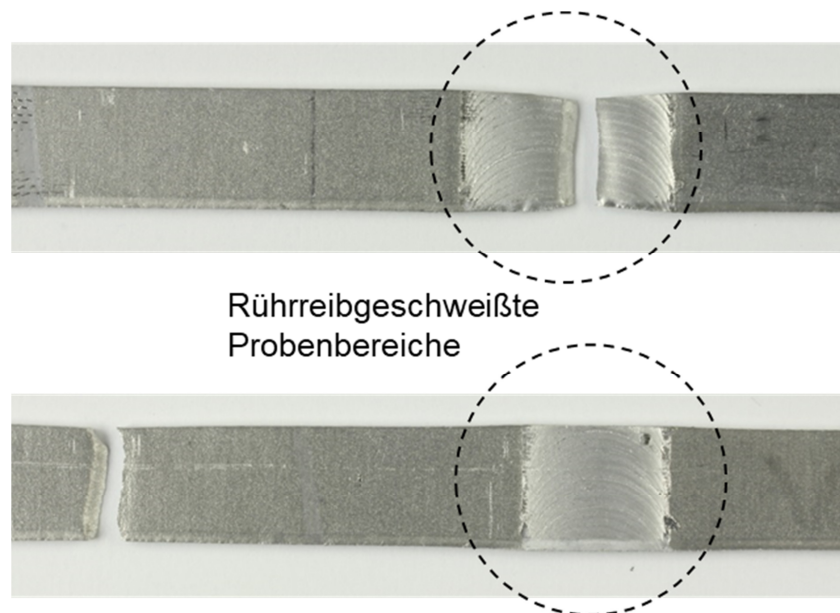


Abbildung 3.34: Geprüfte Zugproben, oben: ohne Wärmenachbehandlung, unten: mit neuartiger Wärmenachbehandlung

Die für den neuartigen Wärmebehandlungsprozess notwendigen Temperaturen und Zeiten sind – verglichen mit anderen Warmauslagerungen – sehr energiesparend, sodass der Prozess kein wirtschaftliches Hindernis darstellen sollte.

4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse: IFU

4.1 Umformtechnische Werkstoffcharakterisierung

Während der Umformung von Blechbauteilen liegen geometrieabhängig unterschiedliche Belastungszustände vor (z. B.: reine Zug- bzw. Druckbelastung (Streckziehen bzw. Stauchen), Zug-Druck-Belastung (Tiefziehen), Biegebelastung etc.) [8].

Die unterschiedlichen Belastungsarten können mithilfe unterschiedlicher Werkstoffcharakterisierungsversuche nachgestellt werden. Hierfür werden Zugversuche, Nakajima-Versuche und Biegeversuche durchgeführt. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Zug- und Nakajima-Proben wurden entsprechend Abbildung 4.1 in die Versuchsaufbauten nach EN ISO 12004-2 und DIN EN ISO 6892-1 eingelegt. Durch die Verwendung von Ausgleichsblechen konnten dabei die Dickenunterschiede kompensiert und somit unerwünschte Vorspannungen der Proben vermieden werden.

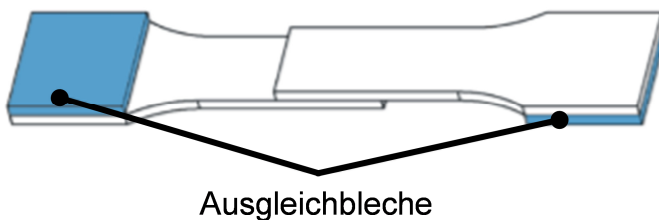


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung einer überlappgeschweißten Zugprobe mit Ausgleichsblechen [9]

In Kapitel 4.1.1 und Kapitel 4.1.3 wird die Werkstoffpaarung HX340LAD+Z110MB (1mm) / EN AW 6016 (2mm) mit entsprechenden Versuchsergebnissen vorgestellt. In Kapitel 4.1.2 werden zudem Informationen bzgl. ihrer mechanischen Eigenschaften optimierten Werkstoffpaarung DX54D+ZM (1mm) / AC-600 (2mm) gegeben.

4.1.1 Zugversuche mit unterschiedlichen Nahtorientierungen

In Ergänzung zu den Zugversuchen aus Kapitel 3.2 und 3.3 wurde der Einfluss der Nahtorientierung relativ zur Belastungsrichtung der Proben (0° und 90°) für die Werkstoffkombination HX340LAD+Z110MB / EN AW 6016 untersucht. In Abbildung 4.2 sind die im Rahmen der Zugversuche ermittelten Fließkurven dargestellt. Die Fließspannung der Verbundproben wurde dabei in Bezug zum Querschnitt des jeweils dickeren Materialpartners berechnet.

Im dargestellten Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist zu erkennen, dass die Bruchdehnungen beider Verbundproben deutlich unter denen der verwendeten reinen Grundwerkstoffe liegen bzw. kleiner gleich denen einer höchstfesten Stahllegierung DP1000 sind (Referenzmessung). Die Fließkurven der Verbundproben verlaufen bis zum Bruch ähnlich wie die Fließkurve der verwendeten Aluminiumlegierung. Proben mit einer Schweißnahtorientierung 90° zur Belastungsrichtung (Bezeichnung 2 in Abbildung 4.2) zeigen eine um ca. 5 % geringere Bruchdehnung als Proben mit einer Schweißnahtorientierung 0° zur Belastungsrichtung (Bezeichnung 1 in Abbildung 4.2).

Weiterhin wurde bei den durchgeführten Untersuchungen festgestellt, dass Proben mit 90° -Orientierung grundsätzlich in der Naht versagen. Somit stellt die Schweißnaht bei diesen Verbundproben eindeutig eine metallurgische Schwachstelle dar. Proben mit 0° -Orientierung weisen im Vergleich dazu eine höhere Bruchdehnung auf, da die kritische intermetallische Zone hier nicht senkrecht, sondern parallel zur Zugkrafttrichtung verläuft.

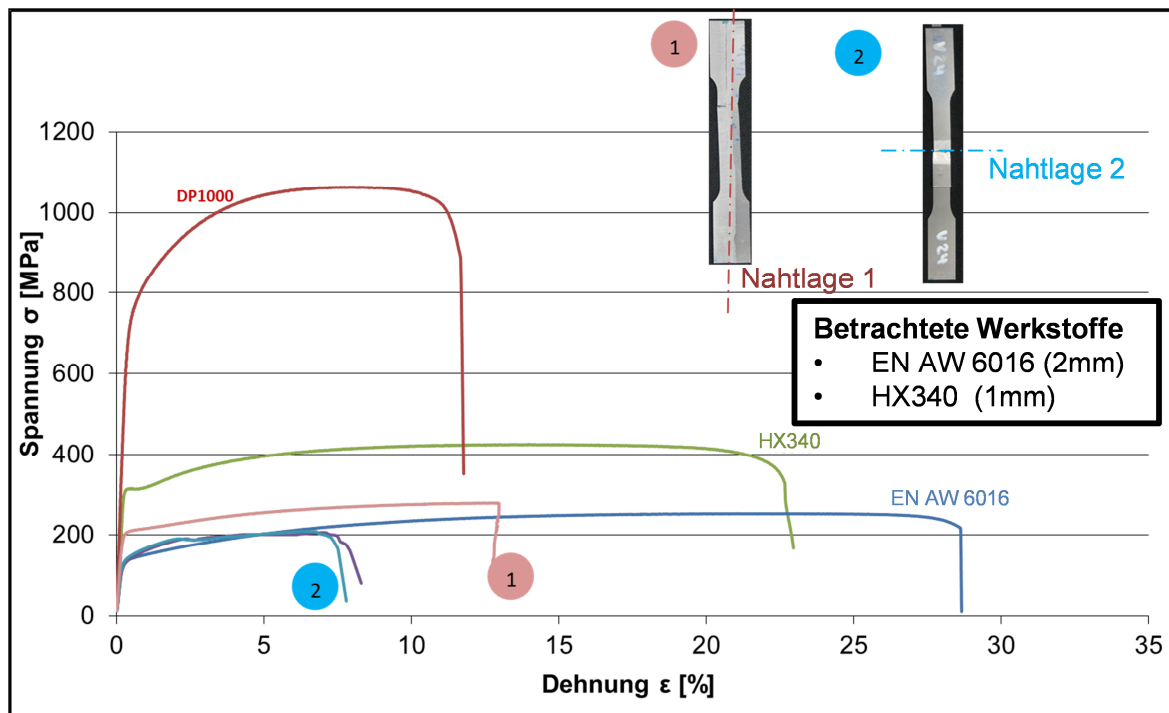


Abbildung 4.2: Geschweißte Zugproben und deren im Zugversuch ermittelten Fließkurven in Abhängigkeit von der Nahtorientierung

4.1.2 Nakajima-Versuche

Zur Ermittlung der Grenzformänderungskurven wurden Nakajima-Versuche in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 12004-2 durchgeführt. Bei diesen Versuchen werden Proben mit unterschiedlicher Taillierung durch einen halbkugelförmigen

Stempel bis zum Materialversagen umgeformt und die Haupt- und Nebenformänderungen unmittelbar vor dem Werkstoffversagen ermittelt. Versuchsaufbau und Probengeometrien sind in Abbildung 4.3 dargestellt.

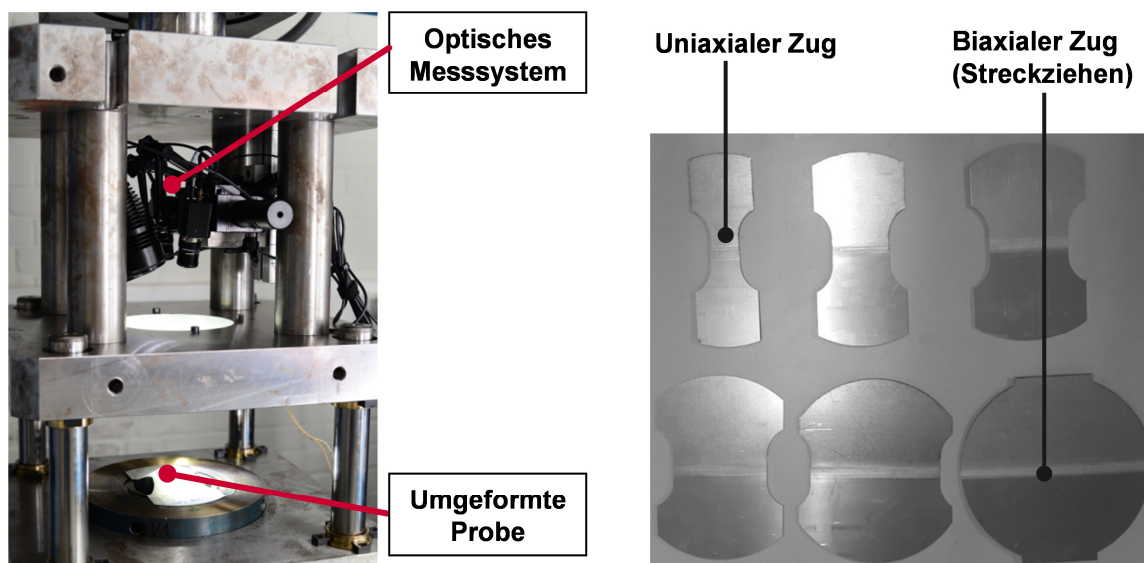


Abbildung 4.3: Versuchsaufbau für Nakajima-Versuch (links) und verwendete Probengeometrien zur Bestimmung der GFÄ-Diagramms von Feinblechen (rechts)

In Abbildung 4.4 sind die mittels dieser Versuche ermittelten Grenzformänderungsdiagramms (engl.: Forming Limit Curve, Abk.: FLC) der beiden Grundwerkstoffe und des TWB-Verbundes dargestellt. In diesem Grenzformänderungsdiagramm ist zu erkennen, dass die Stahllegierung (DX54) die größten Formänderungen bis zum Beginn der lokalen Einschnürung aufweist. Im Vergleich dazu besitzt die Aluminiumlegierung (AC-600) mit kritischen Hauptformänderungen im Bereich zwischen 0,28 und 0,45 ein deutlich geringeres Umformvermögen. Bei den Versuchen mit den rührreibgeschweißten Verbundproben traten die maximalen Formänderungen auf der Seite des Stahlwerkstoffes auf, sodass dieser in diesem Fall den schwächeren Fügepartner darstellte (siehe Abbildung 4.5). In Abbildung 4.4 ist zu erkennen, dass die maximale Hauptformänderung der TWB-Probe im Vergleich zum Stahlgrundwerkstoff etwa 20 % geringer und im Vergleich zum Aluminiumgrundwerkstoff 32 % höher ist. Weiterhin besitzt die TWB-Verbindung, im Vergleich zu den anderen beiden Verläufen, einen deutlich stärkeren Anstieg bzw. Abfall. Im Tief- und Streckziehbereich liegt die TWB-Verbindung zwischen der Stahl- und der Aluminiumlegierung, im Bereich der ebenen Dehnung (Nebenformänderung ≈ 0) liegt die maximal von der TWB ertragbare Formänderung jedoch deutlich unter den Werten der beiden Grundwerkstoffe.

Die Ermittlung einer TWB-FLC mithilfe des Versuchsaufbaus gemäß DIN EN ISO 12004-2 erscheint unter Berücksichtigung der in Abbildung 4.4 dargestellten Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die Hauptformänderung im Bereich der ebenen Dehnung, problematisch. Durch die Schweißnaht, den auftretenden Platinenverzug bzw. der auftretenden Platinenkrümmungen und den Blechdickenunterschied kann kein gleichmäßiges Anliegen des Bleches an den halbkugelförmigen Prüfstempel gewährleistet werden. Dadurch kann keine homogene, annähernd reibungsfreie Kontaktfläche zwischen Platine und Stempel sichergestellt werden, was allerdings eine Grundvoraussetzung für diesen Test darstellt. Ebenfalls fließt der Platinenverbund immer aus dem „schwächeren“ Werkstoffpartner, was dazu führt, dass kein mittiges Probenversagen (nach Norm gefordert) auftritt. Aus diesem Grund kann mittels der durch diesen Test ermittelten Grenzformänderungskurve keine verlässliche Versagenscharakterisierung für FEM-Simulationen erstellt werden. Dennoch kann die ermittelte TWB-FLC als Vergleichsgröße für weitere TWB-FLCs verwendet werden.

Für simulative Untersuchungen mittels FEM-Umformsimulation erscheint es daher zielführender, die jeweiligen FLCs der Grundwerkstoffe einzeln zu betrachten und idealerweise für das Umformverhalten der Schweißnaht eine zusätzliche dritte Versagenskurve zu erzeugen.

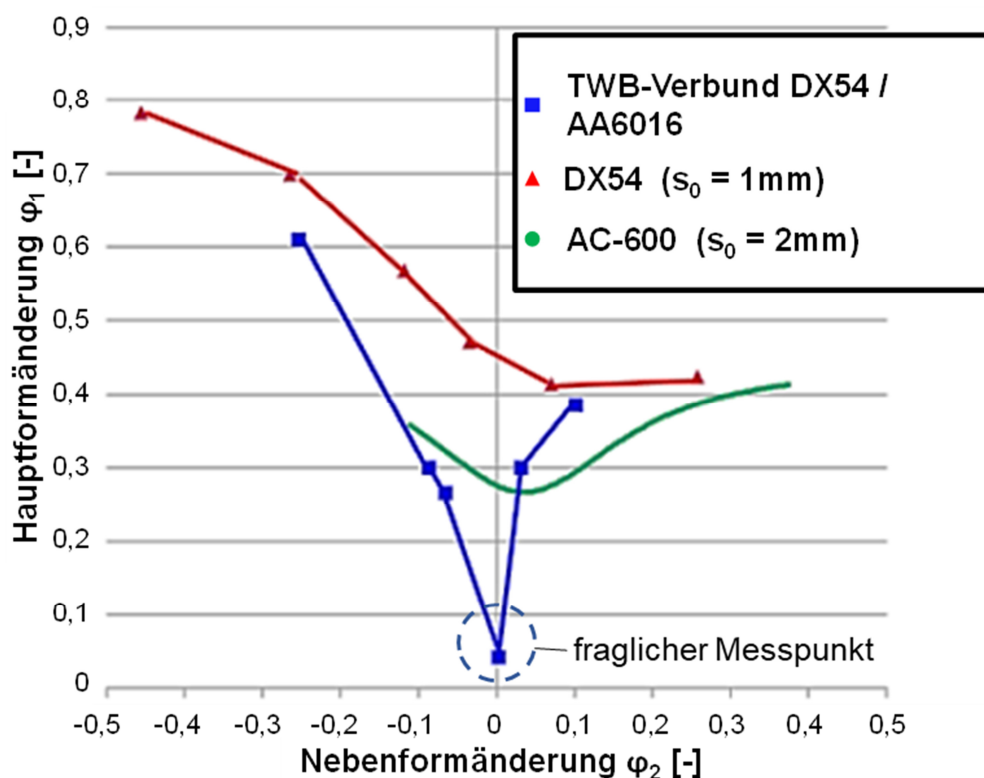


Abbildung 4.4: Resultierende FLC der Grundmaterialien und des TWB-Verbundes

In Abbildung 4.5 sind links die gemessenen Hauptformänderungen einer TWB-Verbundprobe und rechts die gemessenen Hauptformänderungen einer Probe aus der Aluminiumlegierung AC-600 dargestellt. Die Messung erfolgte im Projekt mit dem optischen Messsystem GOM Aramis. Da die beiden Grundwerkstoffe des TWB-Verbundes ähnliche mechanische Eigenschaften aufweisen ($R_{m,AC-600} = 260 \text{ MPa}$; $R_{m,DX54} = 280 \text{ MPa}$), fließt das Material deutlich stärker aus dem dünneren DX54-Blech. Diese inhomogene Formänderung führt zu einer deutlichen Schweißnahtwanderung in Richtung der Aluminiumlegierung. Bei monolithischen Werkstoffen liegt die Hauptumformzone ideal im mittleren Bereich des Stempels.

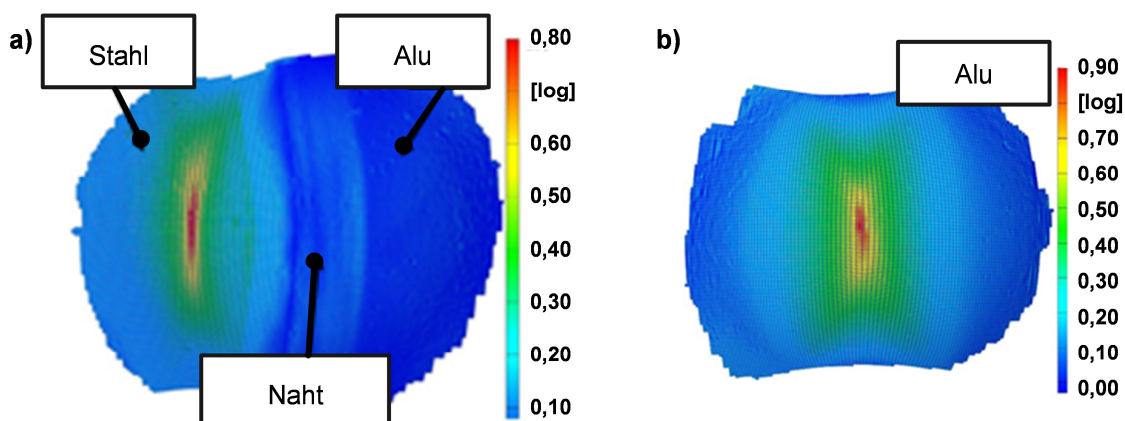


Abbildung 4.5: Gemessene Formänderungsverteilung einer a) TWB-Verbundprobe und b) einer Probe aus AC-600

Im Rahmen einer ergänzenden experimentellen Untersuchung wurde eine FLC für eine laserstrahlgeschweißte TWB-Verbindung (ebenfalls DX54D+ZM / AC-600) ermittelt und, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, mit der reibrührgeschweißten TWB-FLC verglichen. Hier ist eindeutig erkennbar, dass die rührreibgeschweißten Verbundproben größere Formänderungsvermögen als die lasergeschweißten Proben aufwiesen. Grund hierfür ist, dass beim Laserschweißprozess eine größere Wärmeeinbringung erfolgt, die die Bildung intermetallischer Phasen begünstigt. Diese führen wiederum zu einer ausgeprägteren Versprödung der Schweißnaht und damit zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Bruchdehnung.

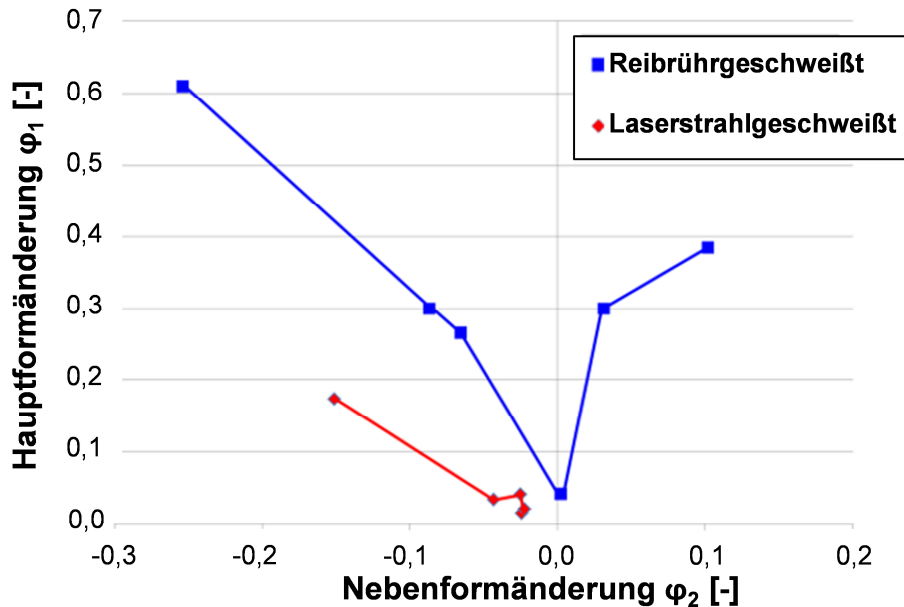


Abbildung 4.6: FLC des rührreibgeschweißten und laserstrahlgeschweißten TWB-Verbundes (DX54D+ZM / AC-600)

4.1.3 Biegeverfahren

Die Biegefestigkeit des TWB-Verbundes aus der Werkstoffpaarung HX340LAD + Z110MB / EN AW 6016 wurde mittels des 3-Punkt-Biegeversuchs überprüft. Hierfür wurde das Biegegesenk (Gesenkwinkel $\alpha = 90^\circ$) aus Abbildung 4.7 (links) verwendet.

Im Rahmen dieser Versuche wurden sowohl Nahtverläufe senkrecht zur Biegekante des Biegegesenks als auch entlang der Biegekante untersucht. Verbundproben, die entlang der Schweißnaht gebogen wurden, zeigten ein frühzeitiges Versagen, wohingegen bei Proben mit senkrecht ausgerichtetem Schweißnahtverlauf eine max. Biegung von 90° ohne Versagen erzielt werden konnte. Der Grund hierfür ist, dass bei den Nahtverläufen entlang der Biegelinie die kritische Zone (intermetallische Phase bzw. die geometrische Verrührung der Partner) im Querschnitt der höchsten Biegebelastung liegt.

In Abbildung 4.7 rechts sind die ermittelten Kraft-Weg-Verläufe für monolithische Proben aus den beiden Grundwerkstoffen HX340LAD+Z110MB / EN AW 6016 sowie für zwei TWB-Verbundproben (senkrechter Nahtverlauf) mit unterschiedlichen Flächenanteilen der Werkstoffpartner dargestellt. Der Kraftverlauf der Aluminiumlegierung liegt im Bereich des Freibiegens in etwa doppelt so hoch wie derjenige der Stahllegierung. Die Fließspannung des Stahls ist bei dieser Werkstoffpaarung zwar annähernd doppelt so hoch wie die der Aluminiumlegierung (vgl. Zugversuche aus Abbildung 4.2), jedoch verfügt die Blechdicke über einen

quadratischen Einfluss auf die Stempelkraft beim Freibiegen [10]. Da das Aluminiumblech über eine doppelt so hohe Dicke (2mm zu 1mm) wie das Stahlblech verfügt, erklärt sich der in etwa doppelt so hohe Kraftverlauf beim Freibiegen im Gesenk.

Die TWB-Probe mit höherem Stahlanteil zeigt einen leicht niedrigeren Kraftverlauf als die Verbundprobe mit ausgeglichenem Flächenverhältnis der Werkstoffpartner.

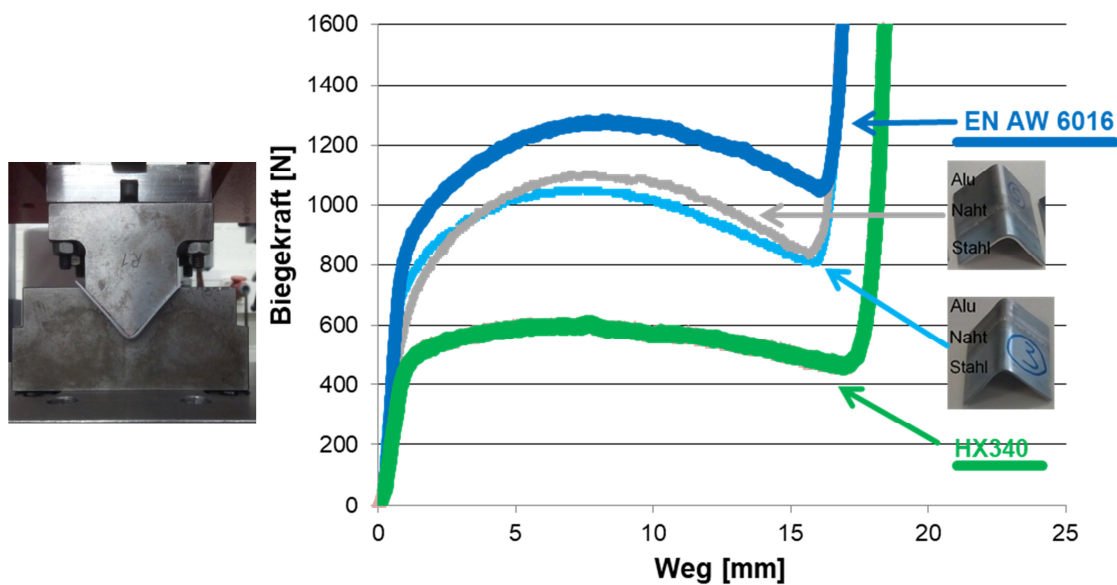


Abbildung 4.7: Kraft-Weg-Verläufe der Biegeproben

4.2 Umformtechnische Untersuchungen

Bevor die umformtechnische Untersuchung zur Nahtwanderung beim Tiefziehen von TWB anhand von Demonstratorbauteilen durchgeführt werden konnte, mussten zunächst hierfür geeignete Prozesse bzw. Werkzeugkonzepte festgelegt werden.

4.2.1 Werkzeug- und Prozessentwicklung

Für die Festlegung des Werkzeug- bzw. Versuchsaufbaus wurde zunächst der Ziehprozess eines Rundnapfes mit 100 mm Durchmesser bei einer Ziehtiefe von 10 mm betrachtet. Die Blechhalterkraft der hierbei verwendeten Presse betrug 200 kN. Untersucht wurde die TWB-Verbindung DX54D+ZM / AC-600, als Schmierstoff wurde – wie bei allen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Versuchen – M100 (1,5g/m²) verwendet. Es wurden drei Lösungsansätze ausgearbeitet und untersucht, die nun im Folgenden näher erläutert werden.

In Ansatz 1 wurde ein gestufter Blechhalter mit einer Nut entlang der Schweißnaht untersucht. Die Nut diente dazu, ein Blockieren der im Vergleich zur Restplatte leicht dickeren und raueren Schweißnaht im Werkzeug zu vermeiden. Durch diese konstruktive Maßnahme wurde versucht, ein homogenes Nachfließen der TWB während der Umformung zu gewährleisten. Das Umformergebnis zeigte jedoch, dass sich im Bereich der Nut – und damit im Nahtbereich – aufgrund der fehlenden Normalkraft durch den Stempel Falten 1. Art ausbildeten (vgl. Abbildung 4.8).

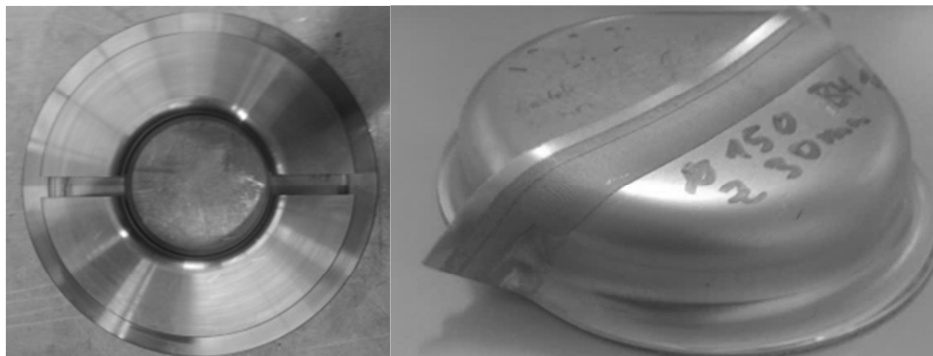


Abbildung 4.8: Ansatz 1: Gestufter Blechhalter mit Nut (links) und tiefgezogener Napf (rechts)

In Ansatz 2 wurde daher die Nut am Nahtbereich mit Polyurethan ausgefüllt (vgl. Abbildung 4.9 (links)), um auch in diesem Bereich zumindest eine geringe Blechhalterkraft aufbringen zu können. Ziel war es, so wenig Kraft wie möglich aufzubringen, um ein Verkleben des Überlappungsbereichs zu vermeiden, aber doch so viel Kraft wie nötig zu verwenden, um eine Faltenbildung zu unterdrücken. Das Ziehergebnis zeigte im Vergleich zum Napf nach Ansatz 1, dass die Faltenbildung zwar reduziert, aber doch nicht vollständig vermieden werden konnte (vgl. Abbildung 4.9 (rechts)).

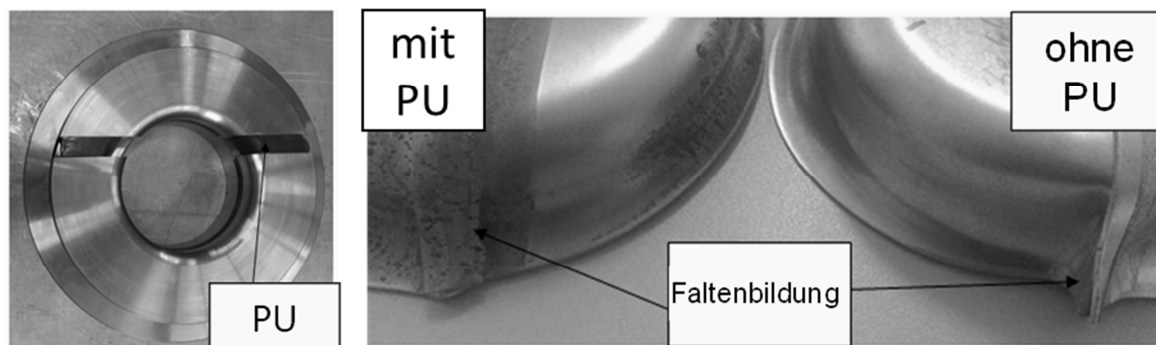


Abbildung 4.9: Ansatz 2: Gestufter Blechhalter mit PU gefüllter Nut (links) und tiefgezogenem Napf (rechts)

In Ansatz 3 wurde ein konventioneller, nicht gestufter Blechhalter verwendet. Der Dickenausgleich wurde durch die Verwendung eines Dickenausgleichsblechs (Aluminiumlegierung AA6016, 1 mm) gewährleistet, welches bei diesem Lösungsansatz als „Opferblech“ diente. Mithilfe dieses Ansatzes konnte die Faltenbildung sehr gut unterdrückt und auch die Nahtwanderung merklich eingeschränkt werden (vgl. Abbildung 4.10).

Da dieser Ansatz die besten Ziehergebnisse lieferte und keine zusätzliche Modifikation des Ziehwerkzeuges erforderlich machte, wurde dieser für die in Kapitel 4.2.2 und 4.2.3 beschriebenen weiterführenden Untersuchungen verwendet.

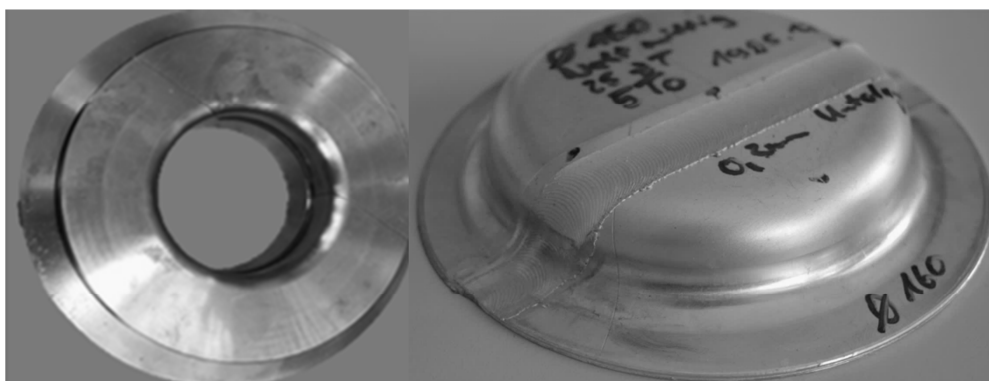


Abbildung 4.10: Ansatz 3: Verwendung eines konventionellen, nicht-gestuften Blechhalters (links) und tiefgezogenem Napf (rechts) unter Verwendung eines „Opferblechs“

4.2.2 Umformtechnische Untersuchungen anhand eines offenen U-Kanals

Für die tiefergehenden Untersuchungen zur Belastbarkeit von TWB unter Zug- und Biegebelastungen an einem praxisnahen Demonstratorbauteil wurde das Ziehen eines U-Kanals als repräsentativer Umformprozess ausgewählt. Im Rahmen der hierbei durchgeführten Versuche wurden drei Nahtorientierungen im Ziehwerkzeug (0° , 45° , 90° , vgl. Abbildung 4.11) untersucht.

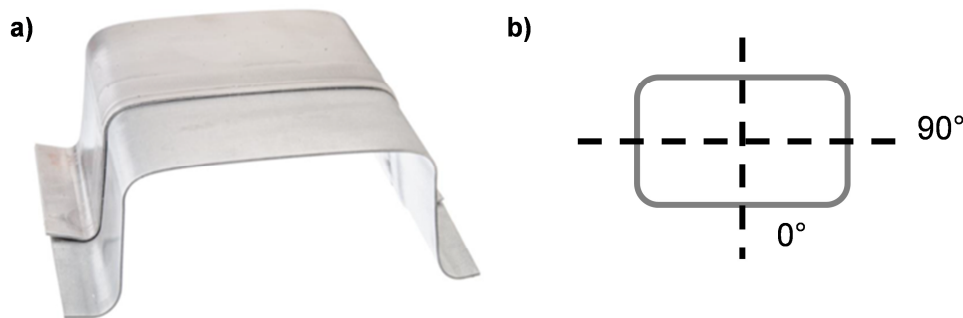


Abbildung 4.11: Bauteil mit 0°-Nahtorientierung und schematische Skizze der Nahtorientierung im Ziehwerkzeug

Bei allen Versuchen wurden die Nähte bzw. die Blechstufen und die „Opferbleche“ zur Matrize hin orientiert, sodass die jeweils untersuchten TWB-Proben stets flächig auf dem Stempel des Umformwerkzeugs auflagen. Der Kanal wies eine Breite von 100 mm auf. Die Blechhalterkraft wurde während der Umformung auf 100 kN eingestellt.

Die maximale Ziehtiefe wurde bei den mit dem U-Kanal-Werkzeug durchgeführten Versuchen durch die verfügbare Platinenabmessung definiert und betrug bei allen Orientierungen ca. 70 mm. Für die TWB, die mit 0°- und 45°-Nahtorientierung relativ zur Werkzeuglängsachse eingelegt wurden, konnte bei den Umformversuchen ein annähernd homogener Platineneinzug beobachtet werden. Da bei den TWB mit 90°-Orientierung relativ zum Werkzeug der Werkstückflansch auf einer Seite aus der Aluminiumlegierung und auf der anderen Seite aus der Stahllegierung bestand, trat hierbei ein leicht inhomogener Einzug und daher eine Nahtbewegung in Richtung der Aluminiumlegierung auf. In Abbildung 4.12 ist für jede der drei unterschiedlichen Nahtorientierungen jeweils eines der hergestellten Hutprofile dargestellt.

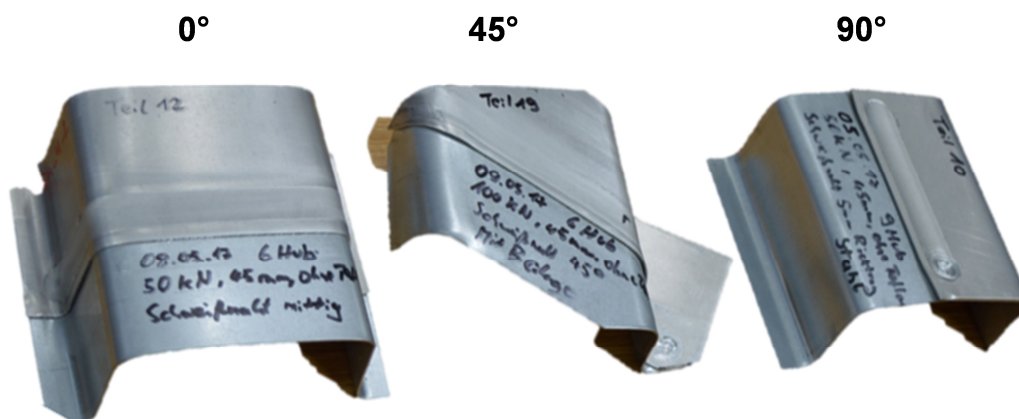


Abbildung 4.12: Tiefgezogener U-Kanal bei a) 0°-, b) 45°- und c) 90°- Nahtorientierung

4.2.3 Umformtechnische Untersuchungen beim Tiefziehen mit auftretender Tangentialspannung

4.2.3.1 Rundnäpfe

Im Rahmen der umformtechnischen Untersuchungen zum Tiefziehen von TWB mit auftretender Tangentialspannung wurden Rundnäpfe aus TWB und den beiden Grundblechwerkstoffen mithilfe des in Kap. 4.2.1 beschriebenen dritten Ansatzes bis zur maximalen Tiefe (Versagen: Bodenreißer) gezogen. Rundnäpfe aus TWB und aus der Aluminiumlegierung AC-600 wiesen hierbei eine maximal erreichbare Ziehtiefe von 30 mm auf. Die Rundnäpfe aus der Stahllegierung wiesen eine maximal erreichbare Ziehtiefe von 32 mm auf (vgl. Tabelle 4.1). Die Untersuchungen zeigten damit, dass die Schweißnähte der TWB mit Blick auf die Umformung von Rundnäpfen über ausreichend hohe Festigkeiten verfügten, da die Verbundnäpfe am Stempelradius im Bereich der Aluminiumlegierung und nicht entlang der Naht versagten.

Tabelle 4.1: Erreichte Ziehtiefen der Napfziehversuche (Rund)

| | DX54D+ZM | AC-600 | DX54D+ZM / AC-600 |
|-----------------|-----------------|---------------|--------------------------|
| Ziehtiefen [mm] | 32 | 30 | 30 |

4.2.3.2 Rechtecknäpfe

Weitere Untersuchungen zum Tiefziehen von TWB mit auftretender Tangentialspannung wurden mit einem Werkzeug zur Herstellung von Rechtecknäpfen durchgeführt. Der Werkzeugstempel wies eine Länge von 150 mm und eine Breite von 100 mm auf. Die Stempelradien betragen im Bodenbereich 10 mm und in den Napfecken 20 mm. Weiterhin wurden die Umformversuche mit einer Blechhalterkraft von 250 kN durchgeführt.

Halboffener Rechtecknapf

Mithilfe eines halboffenen Profils (vgl. Abbildung 4.13) wurden Rechtecknäpfe mit unterschiedlichen Nahtverläufen tiefgezogen und damit der Einfluss der Nahtorientierung auf die maximal erreichbare Ziehtiefe untersucht. Ähnlich den Untersuchungen aus Kap. 4.1.3, wurde der Nahtverlauf zum einen entlang des Stempelradius und zum anderen senkrecht zum Stempelradius eingelegt.

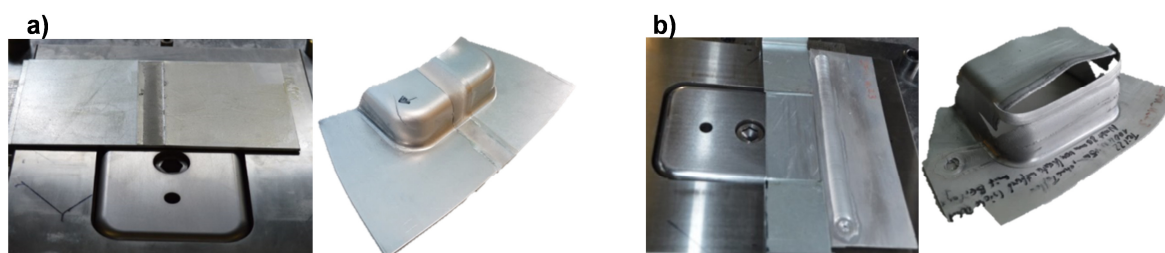


Abbildung 4.13: Platinenposition und tiefgezogene halboffene Rechtecknäpfe mit a) Nahtorientierung senkrecht zum Stempelradius und b) mit Nahtorientierung entlang des Stempelradius (Reißer)

Die Biegung des TWB entlang des Nahtverlaufes führte zum Aufreißen der Probe (vgl. Abbildung 4.13 b)). Im Gegensatz dazu wiesen die TWB bei der Biegung senkrecht zum Nahtverlauf, wie bei den in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Untersuchungen, eine relativ gute Umformbarkeit auf (Abbildung 4.13 a)).

Geschlossener Rechtecknapf

Bei den Versuchen mit geschlossener Bauteilgeometrie wurde zudem ein zweiteiliger Platinenverbund aus DX54D+ZM und EN AW 6111 und ein dreiteiliger Verbund aus EN AW 6111, DX54D+ZM und EN AW 6111 verwendet. Dabei wies der mittlere Bereich der dreiteiligen TWB eine Breite von 50 mm auf. Während der Umformversuche konnte für die derart geschweißten dreiteiligen TWB ein symmetrisches Einlaufen der Platine festgestellt werden. Dabei wurden sowohl Nahtorientierungen von 0° als auch von 90° zum Stempel betrachtet (vgl. Abbildung 4.11 b)). In Abbildung 4.14 sind Näpfe aus dreiteiligen Platinenverbunden mit beiden Nahtorientierungen dargestellt. Die bei den Umformversuchen erzielten maximalen Ziehtiefen sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

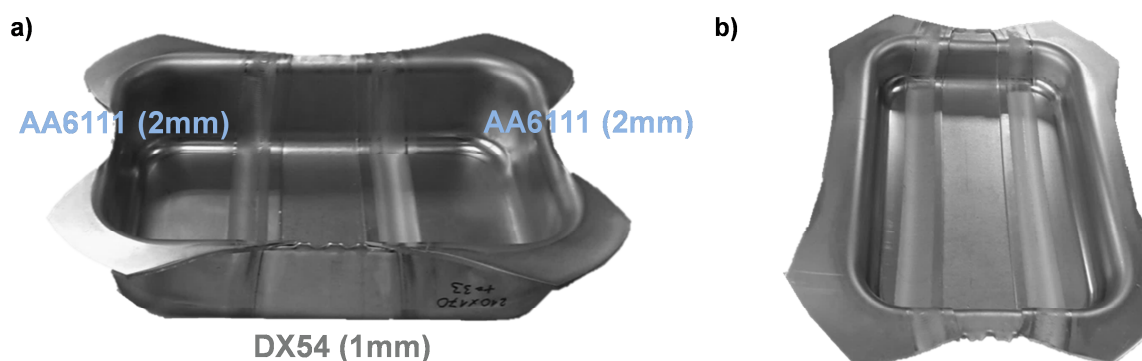


Abbildung 4.14: Tiefgezogene Rechtecknäpfe mit a) 0° -Nahtorientierung zur Werkzeuglängsachse und b) 90° -Nahtorientierung

Im Rahmen der durchgeführten Umformversuche konnte bei der Nahtorientierung von 0° kein Unterschied zwischen den zweiteiligen und den dreiteiligen Platinenverbunden im Hinblick auf deren Umformbarkeit festgestellt werden. Bei der 90°-Orientierung wies der zweiteilige Platinenverbund eine geringfügig höhere Ziehtiefe als der dreiteilige Verbund auf. Grundsätzlich zeigten sich die erreichbaren Ziehtiefen der TWB mit 90°-Nahtorientierung mit 22 bzw. 23 mm deutlich kleiner als jene der TWB mit 0°-Nahtorientierung. Ein Einfluss der Richtungsorientierung der Blechdickenstufe/„Opferblech“ zum Stempel wurde hingegen nicht festgestellt. Prinzipiell ist anzunehmen, dass mit der 0°-Nahtorientierung zum Werkzeug höhere Ziehtiefen als 33 mm unter Verwendung größerer Ausgangsplatinen gezogen werden können. Aufgrund der durch den Schweißprozess beschränkten Abmessungen der Ausgangs-TWB konnten diesbezüglich jedoch keine größeren Platinenabmessungen untersucht werden. Die Ziehtiefen der TWB mit 90°-Nahtorientierung waren mit 22 bzw. 23 mm hingegen deutlich kleiner und führten zum Versagen durch das Aufreißen der Naht. Der Riss wurde dabei immer im Flansch initialisiert und setzte sich während des Umformvorgangs in den Stempelboden fort.

Tabelle 4.2: Erreichte Ziehtiefen der Napfziehversuche (Rechteck) in Abhängigkeit des Verbundes und der Nahtorientierung

| | AA6111 / DX54 / AA6111 | | DX54 / AA6111 | |
|--------------------------|-------------------------------|-----|----------------------|-----|
| Naht-orientierung | 0° | 90° | 0° | 90° |
| Ziehtiefen [mm] | > 33 | 22 | > 33 | 23 |

In Abbildung 4.15 sind die Nähte im Zargenbereich bei maximal erreichter Ziehtiefe dargestellt. Es ist erkennbar, dass bei der Platinenorientierung von 90° eine deutlich höhere laterale Verschiebung der Naht über der Napfhöhe auftrat als bei einer anfänglichen Platinenorientierung von 0° zum Werkzeug. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Nähte im kürzeren Seitenbereich des Napfes (100 mm) näher an den verrundeten Eckbereichen liegen als im längeren Seitenbereich (140 mm) und damit eine höhere Tangentialspannung bzw. Stauchung des Materials auftritt. Da die laterale Verschiebung der Schweißnaht mit zunehmender Ziehtiefe weiter fortschreitet, bildet sich eine Schubspannung entlang der Naht aus, die oberhalb der maximalen Ziehtiefe zu einem Versagen führt.

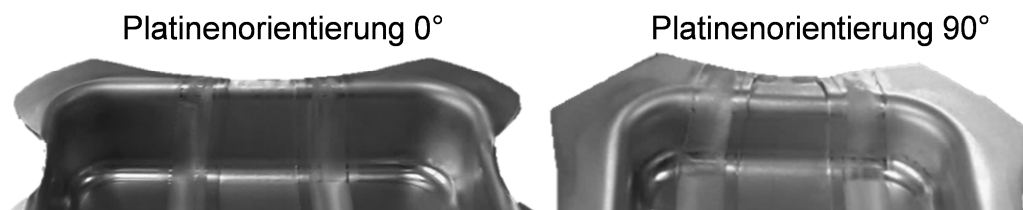


Abbildung 4.15: Tiefgezogene Rechteckknöpfe (vgl. Abbildung 4.14) mit maximal erreichter Ziehtiefe bei einer Nahtorientierung von 0° (links) und 90° (rechts)

4.2.3.3 IFU-Schulungsgeometrie

In Erweiterung zu den in Kap. 4.2.3.2 beschriebenen Umformversuchen mit dem Rechtecknapfwerkzeug wurden zusätzlich Untersuchungen mit einem Werkzeug mit einer komplexeren Stempelkontur im Kopfbereich (konvex-konkaver Verlauf) durchgeführt (vgl. Abbildung 4.16). Für diese Untersuchungen wurde ein dreiteiliger Platinenverbund (EN AW 6111 / DX54 / EN AW 6111) mit einer Platinenorientierung von 0° und 90° verwendet. Die in der Mitte des TWB-Bauteils liegenden DX54-Bereiche wiesen stets eine Breite von 80 mm auf. Die Blechhalterkraft betrug bei diesen Versuchen stets konstant 250 kN.

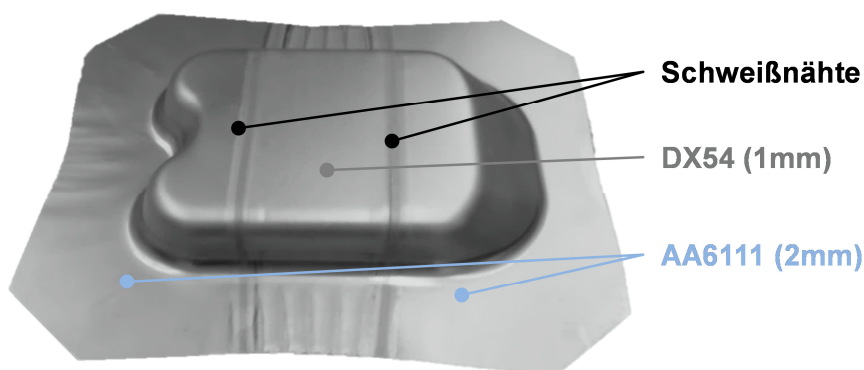


Abbildung 4.16: Gezogenes Bauteil der Geometrie „IFU-Schulungsgeometrie“

Während der mit diesem Werkzeug durchgeführten Umformversuche stellte sich heraus, dass bei einer 90°-Orientierung der TWB bereits bei sehr geringen Ziehtiefen ($h < 5 \text{ mm}$) Reißen an den Schweißnähten auftraten. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Nähte in diesem Fall frühzeitig einem mehrachsigen Spannungszustand ausgesetzt wurden. Im Gegensatz dazu befanden sich die Nähte bei der 0°-Orientierung senkrecht zur längeren, geraden Stempelseite, sodass diese nur auf Zug und Biegung belastet wurden. Für diese Konfiguration konnte eine Ziehtiefe von bis zu 44 mm erreicht werden, jedoch variierte die Nahtqualität deutlich.

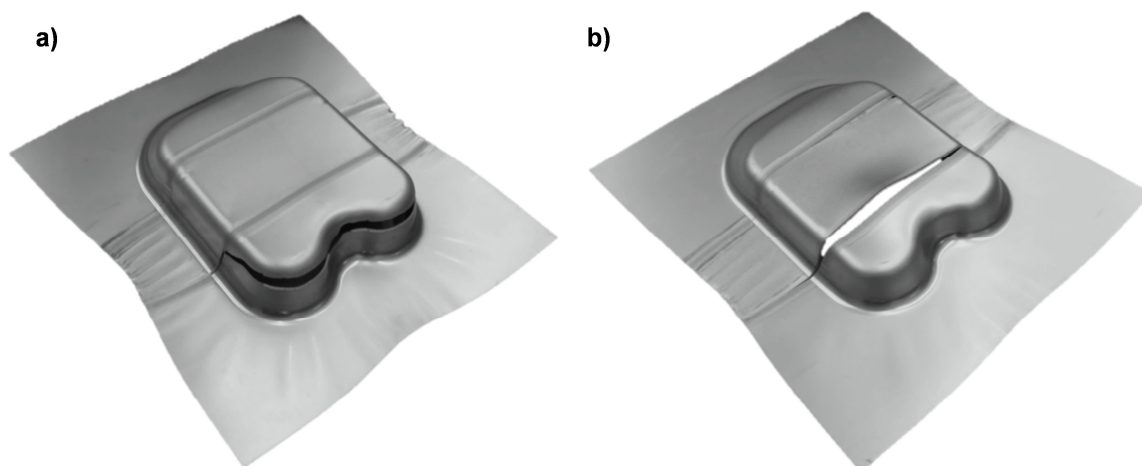


Abbildung 4.17: Gezogene Näpfe mit Versagen a) am Stempelradius (hohe Nahtqualität) und b) in der Naht (nicht ausreichende Qualität)

So rissen Bauteile in manchen Fällen bei einer Ziehtiefe von 44 mm am Stempelradius im Aluminiumbereich (d. h. die Naht verfügte über eine hohe Festigkeit (vgl. Abbildung 4.17 a)), jedoch in anderen Fällen bei Ziehtiefen zwischen 25 – 32 mm entlang der Naht (vgl. Abbildung 4.17 b)). Diese Ergebnisse zeigen, dass bei einer höheren Reproduzierbarkeit der Schweißverbindungsqualität und einem optimierten Platinenbeschnitt (Größe der Abmessung und Beschnitt der Eckbereiche) prinzipiell höhere Ziehtiefen erzielt werden könnten.

4.2.3.4 Tür-Innenblech für einen EN AW 6016 / EN AW 6016 Verbund

Abschließende Untersuchungen zum Tiefziehen von reibrührverschweißten Platinen wurden anhand einer industrienahen Bauteilgeometrie durchgeführt. Es handelte sich hierbei um das Türinnenblechwerkzeug, welches am IFU bereits im Rahmen des BMBF-Forschungsprojektes SMiLE (System-integrativer Multi-Material-Leichtbau für die Elektromobilität) hergestellt wurde (siehe Abbildung 4.18 a).

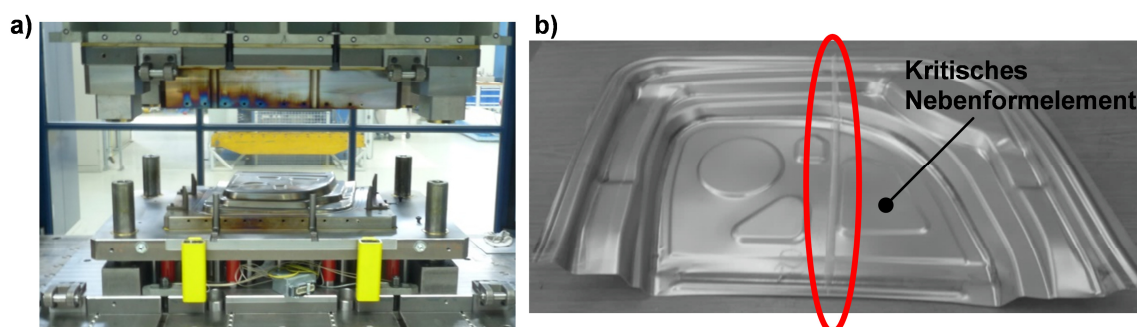


Abbildung 4.18: SMiLE-Ziehwerkzeug und gezogene Innentür mit Markierung des betrachteten Schweißnahtbereichs

Da es sich hierbei um ein vorhandenes Werkzeug mit einem Ziehspalt von 1,2 mm handelte, konnte der Platinenverbund DX54D+ZM / EN AW 6111 mit einem Materialsprung von 1 mm auf 2 mm nicht verwendet werden. Aus diesem Grund wurden zwei EN AW 6016 (je 1 mm Blechdicke, Abmessung: 600 x 1000 mm) mittels Reibrührschweißen verbunden, um somit zumindest das Umformverhalten der Schweißverbindung beim Umformen einer solchen komplexen Bauteilgeometrie untersuchen zu können. Die Herausforderung beim Umformen dieses Bauteils liegt einerseits in den teilweise nicht linearen Verläufen der Stempelaußenkontur und andererseits in den Verprägungen in der Türmitte, in welcher die Konturen der Funktionselemente (z. B. Lautsprecher) durch Prägen eingebracht werden.

Die untersuchten Platinen wurden derart miteinander verschweißt, dass die Nähte möglichst in dem in Abbildung 4.18 b) markierten Bereich verliefen. In diesem Bereich wurden die Nähte primär auf Zug und Biegung belastet und nicht an den Verprägungen entlang des Nahtverlaufes gebogen (vgl. Kapitel 4.2.3.2, Abbildung 4.13 b)). In diesen Fällen konnten die Bauteile ohne Versagen erzeugt werden (siehe Abbildung 4.19 a)). Wurden die TWB beim Einlegen verschoben, sodass die jeweilige Naht in dem kritischen Bereich des rechten Nebenformelements (vgl. Abbildung 4.18 b)) positioniert wurde, versagten die Platinen an der Nahtstelle beim Nachformen dieser Nebenformelemente (siehe Abbildung 4.19 b)).

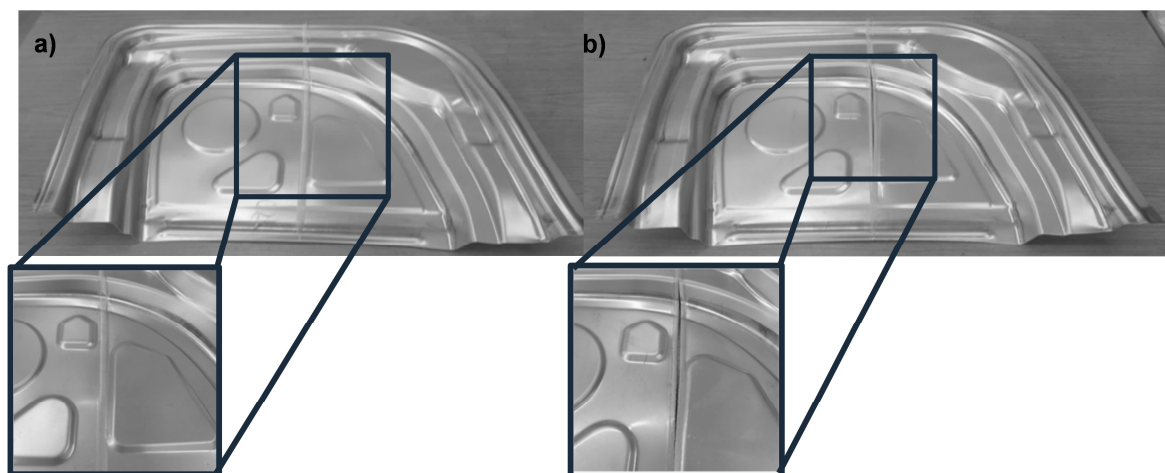


Abbildung 4.19: Türinnenblech mit a) angepasstem Nahtverlauf und b) kritischem Nahtverlauf mit Reißen (Detailansicht)

5 Projektbezogene Veröffentlichungen

In diesem Kapitel sind die im Rahmen des Projektes entstandenen Veröffentlichungen, gehaltenen Vorträge und Science Slams sowie Patente aufgelistet.

5.1 Veröffentlichungen und Vorträge:

- Wissenschaftliche Erkenntnisse hinsichtlich der entwickelten kombinierten Überlapp- und Stumpfstößverbindung [4], [6], [5]
- Artikel über das Projekt in anwendungsorientiertem blechnet-Magazin: [11]
- Analyse der beim Rührreibschweißen auftretenden Prozesskräfte: [12], [13], [14]
- Wärmenachbehandlung für Tailor Welded Blanks: [6], [15]
- Materialmodell für die Simulation des Rührreibschweißens: [16]

5.2 Science Slams

Science Slams sind wissenschaftliche Turniere, in denen komplexe Forschungsfragen von den Forschern unterhaltsam einem interessierten Laienpublikum nähergebracht werden. Das Publikum wählt anhand von wissenschaftlichem Inhalt, Verständlichkeit und Unterhaltungswert durch Abstimmung den Sieger der jeweiligen Veranstaltung.

Um das Thema „Rührreibschweißen“ einem breiteren Publikum zugänglich zu machen, wurden die beiden Beiträge „Rührreibschweißen in der Küche“ und „Aluminium Tailor Welded Blanks – aber bitte mit Sahne“ auf ca. 20 Science Slams vorgetragen. Hierbei lag der Fokus auf Baden-Württemberg, es wurden jedoch auch einige Slams im weiteren Bundesgebiet dargeboten. Mit dem Beitrag „Rührreibschweißen in der Küche“ wurde von Martin Werz die Deutsche Meisterschaft 2017 gewonnen. Mit Besucherzahlen zwischen etwa 300 und 1600 pro Veranstaltung konnten insgesamt mehrere tausend Interessierte erreicht werden. Videos von ausgewählten Veranstaltungen stehen Interessierten z. B. auf YouTube uneingeschränkt zur Verfügung.

5.3 Patente

Im Zusammenhang mit dem Projekt konnten fünf wesentliche Prozessverbesserungen und Analysemethoden zum Patent angemeldet werden, siehe Tabelle 5.1.

Die Erfindungen haben gemein, dass die Ressourceneffizienz durch Verbesserung der Werkstoffausnutzungsgrade gesteigert werden kann. Dies erfolgt hierbei durch unterschiedliche Ansätze, wie z. B. Verbesserung der Querschnittsfläche, Steigerung der lokalen Festigkeit durch Wärmenachbehandlung, Verwendung neuer Gegenhalterkonzepte sowie durch sicherere Auslegungsmethoden.

Aufgrund des Umfangs wird an dieser Stelle auf die einzelnen Patentanträge bzw. Patente verwiesen.

Tabelle 5.1: Auflistung von Patentanmeldungen im Zusammenhang mit dem Projekt

| Schutzrechts-Az. | Anmelde-datum | Titel | Erfinder |
|---|--|--|--|
| DE 10 2018 113 638.3 | 07.06.2018 | Verfahren zum Verschweißen eines ersten Materialstücks mit einem zweiten Materialstück sowie Rührreibschweiß-einrichtung | Florian Panzer M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe, Dipl.-Ing. M.Sc. Martin Werz |
| DE 10 2018 208 376.2 | 28.05.2018 | Verfahren zum Ermitteln von mindestens einem Kennwert zur Beurteilung der Beanspruchbarkeit von mindestens einem Schweißnahtanfang und/oder mindestens einem Schweißnahtende | Martin Folkert B.Sc., Dipl.-Ing. Xaver Franz Schuler, Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe, Dipl.- Ing. M.Sc. Martin Wertz |
| DE 10 2018 111 496.6 | 14.05.2018 | Gegenhalter, Vorrichtung und Verfahren zum Rührreibschweißen | Florian Panzer M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe, Dipl.-Ing. M.Sc. Martin Werz |
| EP 17 191 949.1 | 19.09.2017 | Verfahren zur Herstellung von Tailor Welded Blanks (TWBs) | Lisa Ehemann, Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe, Dipl.-Ing. M.Sc. Martin Wertz |
| DE 10 2015 112 416.5 EP 16 745 460.2 US 15/748,560 | 29.07.2015 29.07.2016 29.07.2016 | Verfahren zum Rührreibverschweißen sowie rührreibverschweißtes Werkstück Method for friction stir welding and friction stir welded workpiece | Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe, Dipl.-Ing. M.Sc. Martin Werz |

Weitere wesentliche Erfindungen zur weiteren Steigerung der Ressourceneffizienz liegen der Universität Stuttgart und dem Technologie-Lizenz-Büro zur Bewertung vor und können daher an dieser Stelle noch nicht genannt werden.

6 Fazit und Ausblick

6.1 Rührreibschweißen

In Tabelle 6.1 sind die im Rahmen des Projektes rührreibgeschweißten Aluminium- und Stahllegierungen zusammengefasst. Hinsichtlich der Schweißbarkeit bestehen kaum Einschränkungen bezüglich der eingesetzten Aluminium- und Stahllegierungen. Auch wurden mit allen eingesetzten Materialkombinationen gute Festigkeitswerte der Schweißnaht erreicht. Eine gute Umformbarkeit konnte mit dem relativ weichen Stahl DX54D+ZM erreicht werden. Im Rahmen der Optimierung der Verbindungen wurde die Geometrie der Rührreibschweißwerkzeuge optimiert, verschiedene Werkstoffe für Werkzeuge erprobt, sowie der Einfluss der Schweißparameter analysiert.

Die Untersuchung der zum Schweißen notwendigen Toleranzen zeigte, dass eine richtige Positionierung des Rührreibwerkzeuges für eine erfolgreiche Nahtbildung wichtig ist. Dabei zeigte sich auch, dass die Regelung der eingesetzten Maschine nicht optimal für die geschweißten Blechdicken ist. Zum Umgang mit Dickentoleranzen wurde ein adaptives Werkzeug konstruiert, gefertigt und erprobt.

Im Rahmen einer einfachen Untersuchung, die während dieses Projektes ergänzend durchgeführt wurde, konnte keine besondere Korrosionsanfälligkeit der Aluminium-Stahl-Verbindungen festgestellt werden.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Schweißversuche wurden Anforderungen an die Anlagentechnik zum Einsatz des Rührreibschweißens, speziell für Aluminium-Stahl-Mischverbindungen, in industriellen Umgebungen identifiziert. Dabei zeigte sich, dass kommerzielle Fräszentren nicht die optimale Anlagentechnik zur Herstellung von Tailor-Welded-Blanks darstellen. In nachfolgenden Projekten sollten daher die Anforderungen erarbeitet und entsprechende Anlagenkonzepte entwickelt und experimentell erprobt werden.

Darüber hinaus wurde die Festigkeit der Rührreibschweißnähte mit Laserschweißnähten verglichen. Hierbei zeigte sich, dass die rührreibgeschweißten Nähte sowohl bei statischer als auch bei dynamischer Belastung bessere Festigkeiten aufweisen. Durch die höhere Festigkeit lassen sich mit Bezug zur Schwingfestigkeit in der Größenordnung von bis zu 38% Werkstoff durch Rührreibschweißen im Vergleich zum Laserschweißen einsparen.

Zur weiteren Verbesserung der Festigkeit der rührreibgeschweißten Nähte wurde zudem ein Wärmebehandlungskonzept entwickelt, mit dem die Festigkeit der Schweißnähte über die des Grundwerkstoffes gebracht werden kann.

Tabelle 6.1: Im Projekt rührreibgeschweißte Legierungskombinationen

| Stahl | Aluminium | Schweißbar? | Fazit |
|-----------------|-------------------------|-------------|---|
| HX340LAD+Z110MB | EN AW 6016 T4 | Ja | Gute Festigkeit, jedoch begrenzte Umformbarkeit |
| HX340LAD+Z110MB | EN AW 6111 T4 | Ja | Gute Festigkeit, jedoch begrenzte Umformbarkeit |
| DX54D+ZM | AC-600 T4 | Ja | Gute Umformbarkeit |
| DX54D+ZM | EN AW 6111 T4 | Ja | Gute Umformbarkeit |
| CR660Y980T | EN AW 7075 T6 | Ja | Höchste Festigkeit, jedoch nicht umformbar |
| 22MnB5 | EN AW 6016 T4 | Ja | Machbarkeitsstudie |
| HX340LAD+Z110MB | AlSi10Mg (Druckguss) | Ja | Machbarkeitsstudie |

6.2 Umformtechnische Betrachtungen

Im Zuge des Projektes wurde ein optimierter reibrührgeschweißter TWB-Verbund bzgl. seiner umformtechnischen Eigenschaften mittels genormter Verfahren charakterisiert und in einem zweiten Schritt in experimentellen Untersuchungen hinsichtlich dessen Umformbarkeit untersucht.

Die Ergebnisse der durchgeführten Nakajima-Versuche zeigten, dass eine Charakterisierung des Umformverhaltens von TWB mithilfe der Grenzformänderungskurve nicht repräsentativ ist. Zug- und Biegeversuche führten dagegen zu Ergebnissen, die Rückschlüsse auf das prinzipielle Umformvermögen zulassen. Diese Versuche lieferten somit Kennwerte, die grundsätzlich in Umformsimulationen zur Berechnung des Werkstoffverhaltens während der Umformung verwendet werden können. Für eine entsprechende FE-Modellierung fehlen jedoch bis heute grundlegende Ansätze, wie eine solche Mischschweißverbindung modelliert werden könnte. So bildet die Naht eine dritte Zone (neben den beiden Grundmaterialien) aus, die über deutlich andere bzw. sprödere Festigkeits-

eigenschaften verfügt. Die Fließeigenschaften bzw. deren Schädigung zu charakterisieren stellt eine Aufgabe für zukünftige Forschungstätigkeiten dar.

In den experimentellen Arbeiten zur Umformbarkeit der betrachteten TWB lag der Fokus auf den Herausforderungen, die sich durch die Blechdickenunterschiede und die Nahtwanderung während der Umformung von TWB ergeben. Diesbezüglich stellte die Verwendung von „Opferblechen“ einen vielversprechenden Ansatz dar, bei dem der Blechdickenunterschied mithilfe eines zusätzlichen zwischengelegten Blechs im Ziehwerkzeug kompensiert wurde. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz auch für die Untersuchungen zur Herstellung unterschiedlicher Bauteilgeometrien aus TWB verwendet.

Diese umformtechnischen Untersuchungen zeigten in einer späteren Projektphase, dass hauptsächlich die Lage der Naht im Werkzeug bzw. im betrachteten Bauteil die daraus resultierenden Spannungs- bzw. Belastungszustände in der Naht die Herstellbarkeit der Bauteile wesentlich beeinflusst. So besitzen Nähte, die sich im Bereich einer Zug- und/oder einer senkrechten Biegebelastung befinden, ein relativ hohes Umformvermögen. Nähte, die entlang ihres Querverlaufes auf Biegung belastet werden, sowie eine inhomogene Nahtverschiebung und daraus resultierende Schubspannungen, führen dagegen zu einem vergleichsweise frühen Versagen der TWB. Durch FE-Simulationen, mit welchen die Belastung und Verschiebung der TWB-Nähte im Prozess vorhergesagt werden können, würden dementsprechend die Auslegung der Platine (Verlauf der Schweißnaht) und des Werkzeuges deutlich verbessern.

6.3 Ausblick

Im Rahmen des Projektes wurde gezeigt, dass Tailor Welded Blanks in Aluminium-Stahl-Mischbauweise durch Rührreibschweißen und anschließendes Umformen gefertigt werden können. Es zeigte sich auch, dass hinsichtlich einer Serienfertigung noch weitere Schritte bezüglich Regelungstechnik und Anlagentechnik für das Kaltfügen der Platinen zu gehen sind. Einen ersten Schritt stellt die Entwicklung der auf das Rührreibschweißen abgestimmten Spindel, wie in Kapitel 3.11 dargestellt, dar. Die nächsten Schritte umfassen die Inbetriebnahme und Erprobung der Spindel sowie des dazugehörigen Gegenhalters. Auch im Bereich der Umformtechnik sind noch Lösungen für die Serienfertigung zu entwickeln. Ein vielversprechender Ansatz hierzu stellt ein im Nachgang des Projektes entwickeltes, patentiertes Konzept dar.

Es ist davon auszugehen, dass mit konsequenter Weiterentwicklung der in diesem Projekt vorgestellten Lösungen und Steigerung des Technologiereifegrades das

Gewicht heutiger Karosseriebauteile ökologisch und ökonomisch um bis zu 30% verringert werden kann. Voraussetzung hierzu ist die erfolgreiche Verknüpfung der Einzellösungen auf Labormaßstab zu einer durchgängigen Technologieprozesskette zur Herstellung seriennaher Demonstratoren.

7 Literaturverzeichnis

- [1] W. Thomas, E. Nicholas, J. Needham, M. Murch, P. Templesmith und C. Dawes. Great Britain Patent G.B. Patent Application No. 9125978.8, December 1991.
- [2] C. Dawes und W. Thomas, „Friction stir joining of aluminium alloys,“ TWI Bulletin 6, Great Britain, December 1995.
- [3] D. Walz, „Konstruktive Ausarbeitung einer neuartigen Rührreißschweißzange und partielle Erprobung des dazugehörigen Prozesses,“ *Studienarbeit, IMWF Universität Stuttgart*, 2018.
- [4] M. Werz und M. Seidenfuß, „High-Strength Friction Stir Welds for Joining Aluminum and Steel with Dissimilar Sheet Thicknesses,“ *11th International Symposium on Friction Stir Welding, Cambridge*, 2016.
- [5] M. Werz, „Höchstfeste Rührreißschweißverbindungen zum Fügen von Aluminium- und Stahlblechen,“ *DVS Congress, Düsseldorf*, 2017.
- [6] M. Werz, „High-strength aluminum-steel friction stir welds in particular for hybrid tailor welded blank applications,“ *Fügen im Karosseriebau, Bad Nauheim*, 2018.
- [7] A. Naumov, C. Mertin, F. Korte, G. Hirt und U. Reisgen, „On the growth of intermetallic phases by heat treatment of friction stir welded aluminum steel joints,“ *Prod. Eng. Res. Devel.*, Bd. 11, 2017.
- [8] S. P. Keeler, „Automotive Sheet Metal Formability,“ *Automotive Applications Committee, American Iron and Steel Institute*, 1989.
- [9] L. G. Kleih, „Theoretische und experimentelle Analyse des Bauteilverhaltens rührreibgeschweißter Überlappverbindungen,“ *Dissertation, Universität Stuttgart*, 2013.
- [10] K. L. (Hrsg.), *Umformtechnik – Band 3: Blechbearbeitung*, Heidelberg - Berlin - New York: Springer Verlag, 1990.
- [11] M. Werz, P. Schmid, F. Panzer und P. L. Nguyen, „Höchstfeste Tailor-

- Welded-Blanks für die Aluminium-Stahl-Mischbauweise,“ blechnet, <http://www.blechnet.com/hoechstfeste-tailor-welded-blanks-fuer-die-aluminium-stahl-mischbauweise-a-540410/>, 2016.
- [12] F. Panzer, M. Werz und S. Weihe, „Experimental investigation of the friction stir welding dynamics of 6000 series aluminum alloys,“ *Production Engineering*, Bd. 12, Nr. 5, 2018.
- [13] F. Panzer und M. W. S. Werz, „Analysis of the oscillating process forces of friction stir welding using finite elements,“ *12th International Symposium on Friction Stir Welding, Chicoutimi, Kanada*, 2018.
- [14] F. Panzer, M. Werz und S. Weihe, „Development of a model to investigate the interaction between process and machine tool and the resulting dynamics of friction stir welding,“ *12th International Seminar "Numerical Analysis of Weldability", Seggau, Österreich*, 2018.
- [15] M. Werz, „A new heat treatment sequence for friction stir welded hybrid tailor welded blanks,“ *12th International Symposium on Friction Stir Welding, Chicoutimi, Kanada*, 2018.
- [16] M. Werz, „Development of a new material model for the continuum mechanical simulation of the friction stir welding process,“ *12th International Symposium on Friction Stir Welding, Chicoutimi, Kanada*, 2018.