Schlussbericht gemäß Nr. 8.2 NKBF 98

”Anwendung und Optimierung des Rührreib-, Reibpunkt- und Reibauftragschweißens"

im Rahmen des Verbundvorhabens

”AVaiL-DE: Automotive Verfahren und autonome Prozesse für metallische Luftfahrtbauteile"

Förderkennzeichen: 20W1906E
Kennwort: AVaiL-DE
Laufzeit: 01.08.2020 bis 30.04.2024

Verbundpartner:
Helmholtz-Zentrum Hereon, Institut für Material- und Prozessdesign
Max-Planck-Straße 1
D-21502 Geesthacht

Autoren:
Marius Hoffmann, Sebastian Felix Grassel, Dr.-Ing. Arne Roos
Prof. Dr.-Ing. Benjamin Klusemann

Ansprechpartner:
Prof. Dr.-Ing. Benjamin Klusemann
Tel.: +49.4152.87-2552
Mail: benjamin.klusemann@hereon.de

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima unter dem Förderkennzeichen 20W1906E gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

I. Kurze Darstellung 2

I.1 Aufgabenstellung 2

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 3

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 6

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 13

II. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse 14

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 14

II.1.1 AP3.1 - rFSSW 14

II.1.2 AP3.1 - FSW und SSFSW 27

II.1.3 AP3.3 - FS 37

II.2.4 AP6.2 - Validatoren 54

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 59

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten 60

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 63

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 63

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse 64

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des übergeordneten Verbundvorhabens AVaiL-DE (Automotive Verfahren und autonome Prozesse für metallische Luftfahrtbauteile) sollen für den in Zukunft erwarteten Anstieg der Produktion an Single Aisle (SA) Flugzeugen (z.B. A321XLR) im Rahmen der Flexibilisierung von Flugverbindungen und damit als Ergänzung oder Ersatz von großen, meist vierstrahligen Langstreckenflugzeugen neue Produktionstechnologien entwickelt werden. Um am Markt wettbewerbsfähig zu sein, soll über einen disruptiven Ansatz das in der Automobilindustrie bestehende Fachwissen um hochratenfähige Fertigungs- und Produktionstechnologien für metallische Flugzeugstrukturen für die Luftfahrzeugindustrie nutzbar gemacht werden, um kosteneffizient zukünftige Produktionsraten von bis zu 100 Luftfahrzeugen und mehr pro Monat erreichen zu können, um so die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie zu steigern.

In das oben beschriebene AVaiL-DE Verbundvorhaben war die Helmholtz Zentrum hereon GmbH (Hereon) mit dem Teilvorhaben „Anwendung und Optimierung des Rührreib-, Reibpunkt- und Reibauftragschweißens“ (FWZ: 20W1906E) in den Hauptarbeitspaketen (HAP) 3 (Fügeprozesse) und 6 (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung & Validierung) eingebunden. Es wurde in Arbeitspaket (AP) 3.1 „Stoffschlüssige Verfahren“, AP3.3 „Sekundärprozesse“ sowie AP6.2 „Bauteilselektion und Bauteilvalidatoren“ an der Weiterentwicklung und Optimierung von drei Festphase-Fügeprozessen, namentlich dem Rührreibschweißen (Friction Stir Welding, FSW) bzw. Festschulter-Rührreibschweißen (Stationary Shoulder FSW, SSFSW), dem Reibpunktschweißen (refill Friction Stir Spot Welding, rFSSW) und dem Reibauftragschweißen (Friction Surfacing, FS) gearbeitet. Ziel der Fügeprozessoptimierung und Verfahrensentwicklung war eine zukünftig kostengünstige und effiziente Fertigung von integralen Bauteilen und Baugruppen in Luftfahrzeugen. Daher sollten die optimierten Fügeverfahren in der Endphase des übergeordneten Verbundprojektes zur Herstellung repräsentativer Validatoren eingesetzt werden.

Während der Projektlaufzeit war das Hereon u.a. auch an folgenden Aufgaben im AVaiL-Projekt beteiligt:

(1) Unterstützung der Projektpartner bei der Auswahl geeigneter Werkstoffkombinationen, Charakterisierungsverfahren und repräsentativer Probengeometrien für die zu untersuchenden Fügeprozesse.

(2) Unterstützung der Projektpartner bei der Bewertung und Interpretation mittels FSW, SSFSW, rFSSW und FS hergestellter Proben und Strukturen.

(3) Unterstützung mit Kenn- und Erfahrungswerten für eine mögliche spätere Einführung von FS-basierter Technologie.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Helmholtz-Zentrum Hereon greift auf eine jahrzehntelange Forschungserfahrung im Bereich der Festphase-Fügetechnologieentwicklung zurück. Die Abteilung „Festphase-Werkstoff-Processing“ im Institut für Material- und Prozessdesign am Hereon ist mit ihrer Forschungsarbeit u.a. in den Bereichen Automobil- sowie Luftfahrzeugindustrie in Projekten involviert, welche darauf abzielen, bestehende Fertigungsprozesse durch die Substitution von Standard- hin zu Festphase-Fügeprozessen zu optimieren. Gestützt durch eigene Kompetenzen in der Prozessmodellierung befasst sich das Hereon zudem intensiv mit der Entwicklung von Material- und Prozessmodellen für diese innovativen Füge- und Modifikationsverfahren. Das übergeordnete Ziel besteht in der Erfassung des Gesamtsystems "Prozess-Struktur-Eigenschaft". In diesem Kontext erfolgt eine Betrachtung des Gesamtsystems sowohl aus experimenteller als auch aus Simulationsperspektive. Innerhalb zahlreicher EU-Forschungsvorhaben sowie bilateraler Projekte in verschiedensten Industriebereichen erfolgt neben innovativen Neuentwicklungen auch eine stetige Weiterentwicklung der untersuchten Fügeprozesse.

Die im Hereon möglichen Synergieeffekte zwischen Instituten und Abteilungen werden dabei effizient genutzt. Zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der Verbindungseigenschaften setzt das Hereon seine Expertise unter anderem in der klein- und großskaligen mechanischen, metallographischen und mikrostrukturellen Charakterisierung der erzielten Fügeverbindungen in den oben beschriebenen Werkstoffpaarungen ein.

Im Rahmen dessen erfolgt eine gezielte Untersuchung von Prozessparametern und Umgebungsbedingungen auf die genannten Festphase-Fügeprozesse, d.h. FSW, SSFSW, rFSSW sowie FS, in gleichartigen und ungleichartigen Werkstoffpaarungen, beispielsweise Aluminium/Aluminium sowie Aluminium/Titan.

Mechanische Charakterisierungen, beispielsweise durch quasistatische Untersuchungsmethoden, wie Härte- und Eindringmessungen sowie Scherzug-, Querflachzug- und Mikroflachzug-Tests, kann im weiteren Verlauf, soweit anwendungstechnisch relevant, durch Ermüdungsuntersuchungen erweitert werden, um dadurch die Zeitstandfestigkeit der Verbindungen zu ermitteln und die erfassten Daten statistisch abzusichern.

Notwendige metallographische Untersuchungen, von z.B. makrographische Übersichten bis hin zu Mikrostrukturuntersuchungen mit Hilfe der Elektronenrückstreubeugung (engl. electron backscatter diffraction, EBSD), können durch weitere Untersuchungen zur Bestimmung von Eigenspannungen und volumetrischer Defekte, z.B. durch high-energy X-ray diffraction (XRD) respektive Mikrocomputertomographie (micro-CT, µ-CT), oder, durch die Nähe zum Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY), durch in-situ Beobachtungen von Phasentransformationen ergänzt werden.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen der Verbundbeschreibung wurde ein Projektstrukturplan erstellt. Dieser gliedert das Vorhaben in sechs Hauptarbeitspakete (HAP), die insgesamt in 18 Arbeitspakete (AP) untergliedert sind. Abbildung 1 zeigt den Projektstrukturplan. Rot markiert sind die AP mit direkter Beteiligung des Hereon.

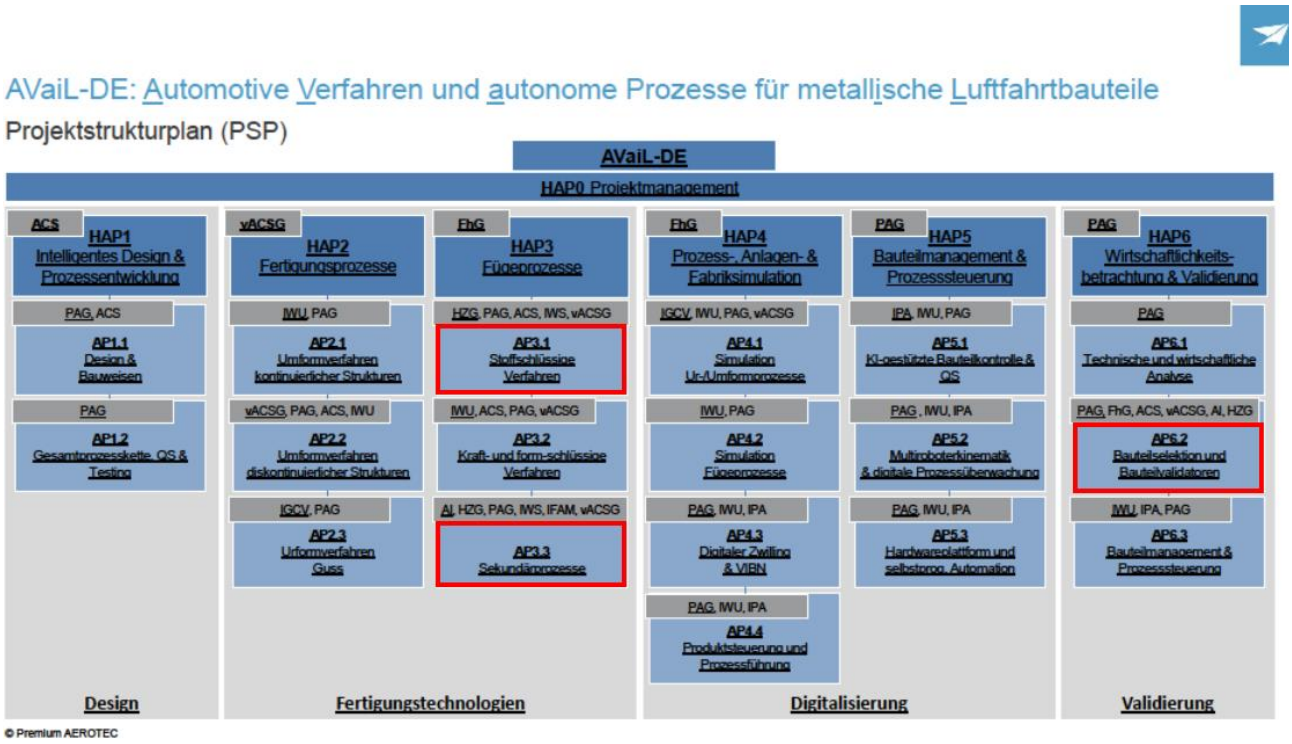


Abbildung 1: Projektstrukturplan mit AP-Beteiligungen des Hereon (vormals HZG) in rot markiert.

Im Hinblick auf die wissenschaftlichen und technologischen Arbeitsziele des Vorhabens wurden im Rahmen der o.g. Inhalte und Zielsetzungen des Verbundprojekts AVaiL die folgenden inhaltlichen Aufgaben durch Hereon bearbeitet bzw. mitbearbeitet:

Im AP3.1 „Stoffschlüssige Verfahren“ wurde die Vorbereitung der zu schweißenden Oberflächen von gleichartigen Aluminium/Aluminium sowie ungleichartigen Aluminium/Titanverbindungen als Voraussetzung für eine erfolgreiche rFSSW-Prozessentwicklung untersucht und optimiert. Die darauffolgende rFSSW-Prozessentwicklung wurde im Hinblick auf die Anforderungen der eingesetzten Materialkombinationen in Verbindung mit den Verbindungsgeometrien der anvisierten Use-Cases durchgeführt.

Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Verschleißuntersuchungen und damit einhergehenden Werkzeugoptimierungen führten zu einer Erhöhung der Werkzeugstandzeiten, welche hinsichtlich einer Auswahl der gleichartigen Aluminium-rFSSW-Validatoren als zusätzliches Argument für die zugrundeliegenden Use-Cases hinsichtlich eines effizienten, produktiven Ersatzprozesses für den derzeit eingesetzten Nietprozess diente.

Im selben Arbeitspaket wurden für den Bereich des FSW sowie SSFSW die Oberflächenbehandlungen der Schweißbereiche als Voraussetzung für die Prozessentwicklung, hier vor allem im Hinblick auf die ungleichartige Materialkombination Aluminium/Titan untersucht. Weiterhin wurden Untersuchungen hinsichtlich der Kantengeometrie-Ausgestaltung für die Fertigung der Rippe-Blech-Strukturen durchgeführt.

Nach erfolgreicher FSW und SSFSW Prozessentwicklung wurden die jeweiligen Verfahrensentwicklungen für die angedachten Use-Cases angestoßen und erfolgreich durchgeführt.

Im AP3.3 „Sekundärprozesse“ wurde hinsichtlich angedachter Use-Cases das FS von gleich- und ungleichartigen Materialkombinationen sowie ein möglicher Transfer des FS-Prozesses auf einen Schweißroboter untersucht. Auch hier wurden die erarbeiteten Ergebnisse erfolgreich in Verfahren für die ausgewählten Use-Cases weiterentwickelt.

Für das HAP6 (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung & Validierung), AP6.2 „Bauteilselektion und Bauteilvalidatoren“, wurden in Kooperation mit den Projektpartnern ASA und PAG verschiedene Use-Cases auf ihre potentielle Eignung für den Einsatz der in AP3.1 und AP3.3 untersuchten Fügeprozesse und deren Transfer in hochratenfähige Fügeverfahren untersucht.

Nach Festlegen der Use-Cases wurden die erarbeiteten Ergebnisse der Verfahrensentwicklungen aus AP3.1 sowie AP3.3 zur Fertigung der in enger Kooperation von ASA, PAG und Hereon ausgewählten Validatoren eingesetzt.

Neben Kick-Off und Abschlusstreffen wurden während der Projektlaufzeit in regelmäßigen Zeitabständen AP-Besprechungen, Verbundtreffen sowie punktuell Arbeitsbesuche durchgeführt.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Festphase-Fügeprozesse, als eine wichtige Klasse von Fügetechnologien haben, neben vielen anderen Vorteilen, wie z.B. der geringen Energieeinbringung in den Fügebereich, den Vorteil Materialien mit physikalisch stark voneinander abweichenden Eigenschaften, wie z.B. deren Wärmeleit- und -ausdehnungskoeffizienten, Schmelzpunkte und Festigkeiten metallisch verbinden zu können [1, 2].

Aufgrund des Fügens in der festen Phase tritt bei Festphase-Fügeprozessen zudem kein fest-flüssig-fest Phasenübergang mit all seinen Herausforderungen wie z.B. dem Bilden von spröden intermetallischen Phasen, sowie der Bildung von Poren, Heißrissen auf [3]. Aus den angeführten Gründen können ferner Legierungen, die als mit Schmelzschweißprozessen nicht oder schwer schweißbar gelten, z.B. Aluminium-Lithium-Legierungen, durch Festphase-Fügeprozesse gefügt werden [4].

Nachfolgend werden die im Rahmen des Vorhabens untersuchten und weiterentwickelten Festphase-Fügeprozesse sowie deren spezielle Charakteristika kurz beschrieben.

Rührreibschweißen

Seit seiner Patentierung in 1991 durch The Welding Institute (TWI) ist das Rührreibschweißen (engl. Friction Stir Welding, FSW) zum stoffschlüssigen Verbinden von gleichartigen und ungleichartigen Legierungen weiterentwickelt worden [5, 6]. Wie in Abbildung 2 beschrieben sieht das FSW-Prinzip ein sich nicht verbrauchendes, zylindrisches Werkzeug vor, welches stirnseitig eine Reibfläche (Schulter) aufweist, und aus der konzentrisch ein Stift herausragt. Dieses Werkzeug wird über dem zu fügenden Materialverbund positioniert und in Rotation versetzt (Abbildung 2a)). Das rotierende Werkzeug dringt dann mit axialer Kraft in den Materialverbund ein. Durch die entstehende Reibwärme zwischen Materialverbund und Schulter sowie die plastische Verformung des vom Stift umgeformten Materials im Materialverbund geht das zu fügende Material in einen plastischen Zustand über (Abbildung 2b)). Wird nun eine translatorische Bewegung des Werkzeugs entlang, z.B. des Fügespalts, überlagert, wird das plastische Material über diesen Fügespalt hinweg verrührt. Hinter dem Werkzeug kühlt das verrührte Material ab und konsolidiert (Abbildung 2c)). Am Ende des Schweißprozesses wird das rotierende Werkzeug aus dem Fügespalt herausgefahren (Abbildung 2d)), wobei ein Endloch (engl. exit hole) mit dem Volumen das vom Stift verdrängten Materials zurückbleibt [7, 8]. Formgebung und Dimensionen von Schulter und Stift variieren je nach Schweißnahtgeometrie und zu fügenden Materialkombinationen [9, 10].

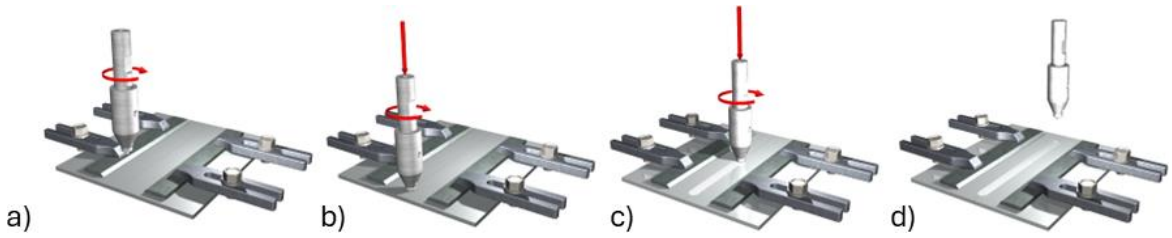


Abbildung 2: Schematische Ansicht des FSW-Prozesses mit den verschiedenen Prozessschritten.

Rührreibschweißen mit stationärer Schulter

Ein weiterer Prozess, der in AP3.1 des Vorhabens untersucht und weiterentwickelt wurde, ist die FSW-Variante mit stationärer Schulter (engl. stationary shoulder FSW, SSFSW). Beim Schweißen mit der Standard-FSW-

Werkzeugschulter liefert diese bei dünnen Blechen neben einem Teil des Werkstofftransports den größten Teil der Prozesswärme durch Reibung zwischen der Schulterstirnfläche und der zu fügenden Blechoberfläche im Vergleich zu der durch den Stift eingebrachten Energie [11, 12]. Die hohe Prozesswärmegenerierung der Standard-FSW-Schulter erweist sich z.B. beim Schweißen von Werkstoffen mit geringer Wärmeleitfähigkeit bzw. von dünnen Blechen als nachteilig. In diesen Fällen ist eine geringere und homogen verteilte Prozesswärme über die Blechdicke hinweg vorteilhaft, um eine fehlerfrei ausgeführte Verbindung zu erzielen.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurde das sogenannte SSFSW entwickelt, bei dem, wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt, die Rotationen des Stifts und der Schulter voneinander entkoppelt werden können. Hierfür wird, wie in Abbildung 3a) gezeigt, ein Stift in der Einspannung der Reibschweißspindel befestigt und durch eine konzentrische Öffnung der stationären Schulter geführt. Der Stift dringt analog zum Standard-FSW in den Fügebereich ein, bis die stationäre Schulter aufsitzt. Danach wird, wie beim Standard-FSW, eine Translationsbewegung entlang z.B. des Fügespalts eingeleitet. Durch Scherkräfte am Stift wird das zu verbindende Material plastifiziert. Durch Materialfluss zwischen den Fügepartnern wird eine Verbindung hergestellt, die bei Abkühlen hinter dem Werkzeug konsolidiert. Bei Erreichen der Endposition wird das rotierende Werkzeug aus dem Fügebereich herausgezogen, wobei dort wie beim Standard-FSW ein nicht verfülltes Endloch mit dem Volumen des eingetauchten Stiftes zurückbleibt. Ein zusätzlicher Vorteil des SSFSW ist die Möglichkeit, die Geometrie der stationären Schulter an die Geometrie von, durch das Standard-FSW nicht schweißbaren Fügegeometrien anzupassen. Als Beispiel ist in Abbildung 3b) eine Kehlnaht für das einseitige SSFSW von Stringern in die Außenhaut von Flugzeugrümpfen gezeigt. Der Ablauf des Schweissprozesses ist zum beschriebenem SSFSW von z.B. Stumpf- und Überlappstößen identisch, außer dass das Eindringen und Zurückziehen des Werkzeugs beim Kehlnahtschweißen in einem entsprechenden Winkel erfolgt.

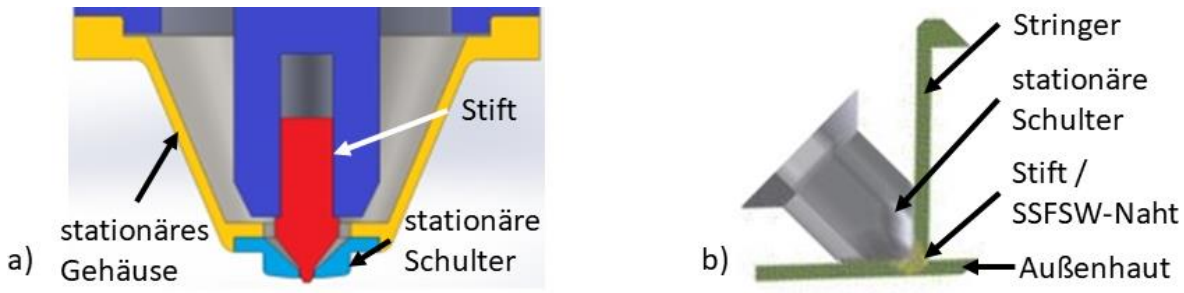


Abbildung 3: Schematische Ansichten von SSFSW-Werkzeugen für a) Stumpf- und Überlappnähte sowie b) Kehlnähte mit Benennung der wichtigsten Werkzeugkomponenten, rotierender Stift und stationäre Schulter.

Wie in Abbildung 4 für das ungleichartige FSW und SSFSW von Stumpfstöße aus EN AW 2024 und EN AW 7050 gezeigt, lassen sich beim SSFSW von Aluminiumlegierungen ähnliche Mikrostrukturzonen beobachten, wie sie auch beim Standard-FSW auftreten. Es lassen sich dennoch wesentliche geometrische Unterschiede feststellen. Primär ist zu beobachten, dass, aufgrund des nicht mehr dominanten Schultereinflusses in der Prozesswärmegenerierung, die Ausdehnung der thermomechanisch beeinflussten Zone (engl. thermo mechanical affected zone, TMAZ), der Wärmeeinflusszone (engl. heat affected zone, HAZ) und der Rührzone (engl. stir zone, SZ) für die SSFSW-Naht insgesamt schmaler sind und einen I- anstelle V-förmigen Querschnitt aufweist. Zudem zeigt sich, aufgrund der stärker lokalisierten Wärmegenerierung des Stifts in der SSFSW-Naht eine höhere Trennschärfe von Grundwerkstoff und Naht sowohl an der Gleichlauf- (engl. advancing side, AS), als auch der Gegenlaufseite (engl. retreating side, RS) des Prozesses.

Abbildung 4: Makrographische Übersicht einer a) Standard-FSW Naht im Vergleich zu einer b) SSFSW-Naht.

Für das SSFSW sind zudem ein reduzierter vertikaler Materialtransport zu nennen, um z.B. die vom Standard-FSW bekannten Grenzflächenverschiebungen, sogenannte “hooks” zu reduzieren, sowie als weiteres interessantes Merkmal des SSFSW das durch die feststehende Schulter mit hoher Axialkraft durchgeführte Glätten der Oberfläche im Fügebereich. Das Fehlen der FSW-Schultermarken auf der Schweißnahtoberfläche resultiert in einer signifikant geringeren Rauigkeit im Vergleich zum FSW. Die mechanischen Eigenschaften der SSFSW-Verbindungen zeigen im Allgemeinen eine Tendenz zu einer verbesserten Streckgrenze, Festigkeit und Dehnung im Vergleich zu FSW-Verbindungen [13, 14]. Dies lässt sich auf das stärker konzentrierte Wärmefeld in SSFSWs zurückführen, welches sowohl zu einer Verringerung der Zugeigenspannungen in der SZ als auch zu einer Verkleinerung der Wirkungsbereiche dieser Spannungen führt [15].

Reibpunktschweißen

Das Reibpunktschweißen (engl. refill Friction Stir Spot Welding, rFSSW) stellt einen Festphasen-Fügeprozess dar, der am Hereon entwickelt und patentiert wurde [16, 17]. Der Prozess eignet sich zur stoffschlüssigen Verbindung zweier oder mehrerer Werkstoffe in Überlappkonfiguration. Das sich nicht verbrauchende Werkzeug besteht aus zwei rotierenden Teilen – einem Stift/Probe und einer Hülse/Sleeve – sowie einem stationären Spannring/Clamping ring. Abbildung 5 zeigt den schematischen Ablauf des rFSSW-Prozesses bei der “sleeve plunge”-Variante.

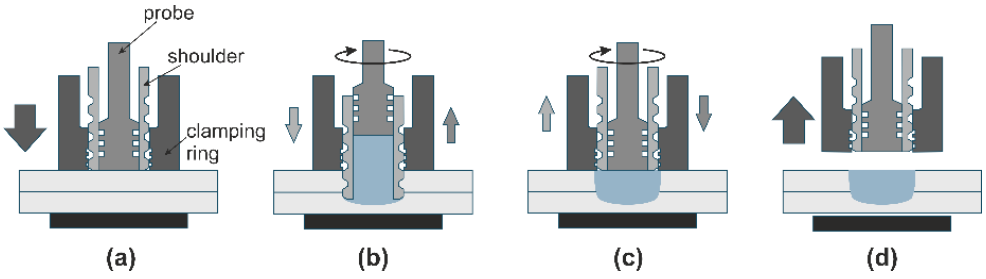


Abbildung 5: Schematische Darstellung des rFSSW-Prozesses. Gezeigt ist die häufigste Variante mit initialem Eindringen der Hülse (engl. sleeve plunge).

In Abhängigkeit von dem in das Werkstück eindringenden Teil des Werkzeugs können zwei Prozessvarianten unterschieden werden, nämlich das "Eindringen der Hülse" (engl. sleeve plunge) und das "Eindringen des Stifts" (engl. probe plunge). Beim Eindringen der Hülse (siehe Abbildung 5), der am häufigsten verwendeten Variante des Verfahrens, erfolgt zunächst eine Fixierung der Fügepartner durch den Spannring, während sich Stift und Hülse im gleichen Richtungssinn drehen (siehe Abbildung 5a). Im Anschluss werden der rotierende Stift und die Hülse axial in entgegengesetzte Richtungen zueinander bewegt. Die rotierende Hülse erzeugt Wärme durch Reibung und plastische Verformung, wodurch die Werkstoffe im Fügebereich plastifiziert werden. Im Anschluss dringt die Hülse ein und drückt das plastische Material in den durch den zurückgezogenen Stift geschaffenen Hohlraum (siehe Abbildung 5b). Nach Erreichen der voreingestellten Eindringtiefe zieht sich die Hülse auf die Oberfläche des Überlappungsstoßes zurück, sodass der Stift zeitgleich das verdrängte Material in den Fügebereich zurückpressen kann (siehe Abbildung 5c). Im Anschluss wird das

rotierende Werkzeug vom Werkstück abgehoben (siehe Abbildung 5d). Die grundlegende Verwendung des rFSSW-Verfahrens ist in der ISO 18785, Teil 1–5 geregelt [18].

Anders als bei anderen reibbasierten Punktschweißverfahren verbleibt beim rFSSW nach dem Fügevorgang keinerlei Hohlraum (i.e. Schlüsselloch, engl. Keyhole bzw. exit hole) zurück. Wie schon weiter oben für das FSW beschrieben, umgeht der rFSSW-Prozess die meisten Einschränkungen, die bei etablierten Punktschweißtechnologien für Aluminiumlegierungen zu beobachten sind, und erlaubt zudem das erneute Schweißen, bzw. die Reparatur fehlerhaft geschweißter Stellen in der Produktion durch Wiederholen des Schweißvorgangs ohne mechanische Performance-Einbußen der Verbindung. Widerstandspunktschweiß- und Laserpunktschweißprozesse von Aluminiumlegierungen und aluminiumbasierten artungleichen Verbindungen neigen aufgrund von metallurgischen Vorgängen, die während des Schmelzens und Erstarrens auftreten, zu Porosität und Erstarrungsrissen. Des Weiteren sind mit diesen Prozessen aufgrund des hohen Energieverbrauchs sowie der damit verbundenen Infrastruktur, Verbrauchsmaterialien (i.e. Zusatzwerkstoffe und Schutzgase) und notwendigen Vorbereitungstechniken hohe Betriebskosten verbunden. rFSSW stellt eine Fügtechnologie dar, welche die zuvor genannten Prozesse ersetzen kann und die genannten Nachteile vermeidet. Im Vergleich zu anderen mechanischen Verbindungs- und Befestigungstechniken wie das formschlüssige Clinchen, Nieten und Stanznieten weisen diese Verfahren ein höheres Gewicht der Verbindung auf und erfordern zudem den Einsatz kostenintensiver Verbrauchsmaterialien.

Die Herstellung metallischer Überlappverbindungen ist mit einer Reihe von Herausforderungen verbunden. Ein wesentliches Problem stellt dabei das Eindringen von Feuchtigkeit bzw. Elektrolyten sowie die mögliche Korrosion im Überlappspalt dar, die es zu verhindern gilt. In der Praxis werden zwei Ansätze verfolgt, um die zuvor genannten Herausforderungen zu bewältigen. Der erste Ansatz umfasst den Einsatz von Beschichtungen, wie beispielsweise anodisierter oder mit Reinaluminium beschichteter (engl. cladded) Bleche. Diese dienen dazu, das Korrosionsrisiko zu minimieren, falls Feuchtigkeit in den Überlappspalt eindringt. Der zweite Ansatz beinhaltet, evtl. nach erfolgter Grundierung der Blechoberflächen, die Verwendung von Dichtmitteln, um das Eindringen von Feuchtigkeit in den Spalt zu verhindern.

Diese Beschichtungen und Dichtmittel haben für die eingesetzten Fügeprozesse den Nachteil, dass sie, z.B. aufgrund deren Eintrags in den Fügebereich zu undefinierten Fügebedingungen führen und dadurch die Robustheit der Fügeprozesse und somit der Ergebnisse verringern, wie von Homola et al. für das rFSSW von AA7050 und AA2024 beschrieben [19].

Im Rahmen des Vorhabens ist daher für zwei Dichtmittel, eines mit und eines ohne Lösungsmittel, erfolgreich eine rFSSW-Prozessvariante entwickelt worden, die während des Einspannvorgangs Dichtmittel aus dem zu fügenden Bereich verdrängt, siehe „II.1.1 AP3.1 – rFSSW, Zusammenfassung abgeschlossener Arbeiten AP3.1 – rFSSW“. Dies führte schlussendlich zu einem robusten rFSSW-Verfahren, das Ergebnissen mit für Airbus ausreichend hohen Scherzugfestigkeiten und geringen Standardabweichungen liefert.

Das Fügen ungleicher Werkstoffe mit stark unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften stellt eine weitere Herausforderung dar, die für das rFSSW-Verfahren noch nicht hinreichend erforscht ist, jedoch eine interessante Alternative zu den oben beschriebenen etablierten Fügeverfahren darstellt [20]. Im Rahmen des Vorhabens wurde daher initial der Fokus auf die Realisierung einer hybriden Aluminium-Titan Sitzschiene mittels des rFSSW-Prozesses gelegt. Die wenigen bisher in der Literatur veröffentlichten Untersuchungen, wie z.B. von Lacki et al. [21] beschrieben, deuteten mit ihren Ergebnissen der mechanischen Charakterisierung darauf hin, dass die geforderten Linienlasten für diesen Anwendungsfall offenbar nur sehr schwer zu erreichen sein werden.

Reibauftragschweißen

Das Reibauftragschweißen (RAS; engl. Friction Surfacing, FS) ist ein Festphase-Fügeprozess, der auf der Plastifizierung metallischer Zusatzwerkstoffe basiert und komplexe Umwandlungsvorgänge umfasst, bei denen das Prinzip der Warmumformung mit dem des Fügens kombiniert wird [22, 23]. Das Reibauftragschweißen wurde erstmals von Klopstock und Neelands patentiert [24]. In den folgenden Jahrzehnten wurden Anwendungen zur Reparatur von Schäden und zum Aufbringen von Korrosions-, Hitze- oder Verschleißschutzschichten untersucht [23].

Der prinzipielle Ablauf des FS-Prozesses ist in Abbildung 6 dargestellt. Zunächst wird der Bolzen über dem Substrat positioniert und mit einer definierten Rotationsgeschwindigkeit und Axialkraft beaufschlagt, siehe Abbildung 6a). Beim Aufsetzen der rotierenden Bolzenstirnseite normal auf das Substrat wird durch die entstehende Reibungswärme die Spitze des Bolzens plastifiziert (sogenannter Plastifizierungsvorgang). Material am äußeren Durchmesser des Bolzens wird nach außen gedrückt und plastisch verformt, wodurch der sogenannte Wulst (engl. flash) entsteht, siehe Abbildung 6b). Dieser Wulst beeinflusst den FS-Prozess, trägt aber nicht zum Schichtauftrag selbst bei. Die Hauptquelle der Wärmeerzeugung ändert sich mit der Plastifizierung von initialer Festkörperreibung zu viskoplastischer Scherung an der Grenzfläche zwischen dem Bolzen und dem während des Plastifizierungsvorgangs abgeschiedenen Material.

Sobald dieser Zustand erreicht ist, ermöglicht eine dann überlagerte Translationsbewegung den Auftrag des Bolzenmaterials entlang einer programmierten Bahn, siehe Abbildung 6c). Der FS-Prozess endet mit dem Erreichen des Bahnendpunkts oder mit dem Verbrauch des Bolzens. In diesem Fall wird der rotierende Bolzen vom Substrat abgehoben, Abbildung 6d). Für einen weiteren Schichtauftrag muss ein neuer Bolzen in die Maschine eingerüstet werden.

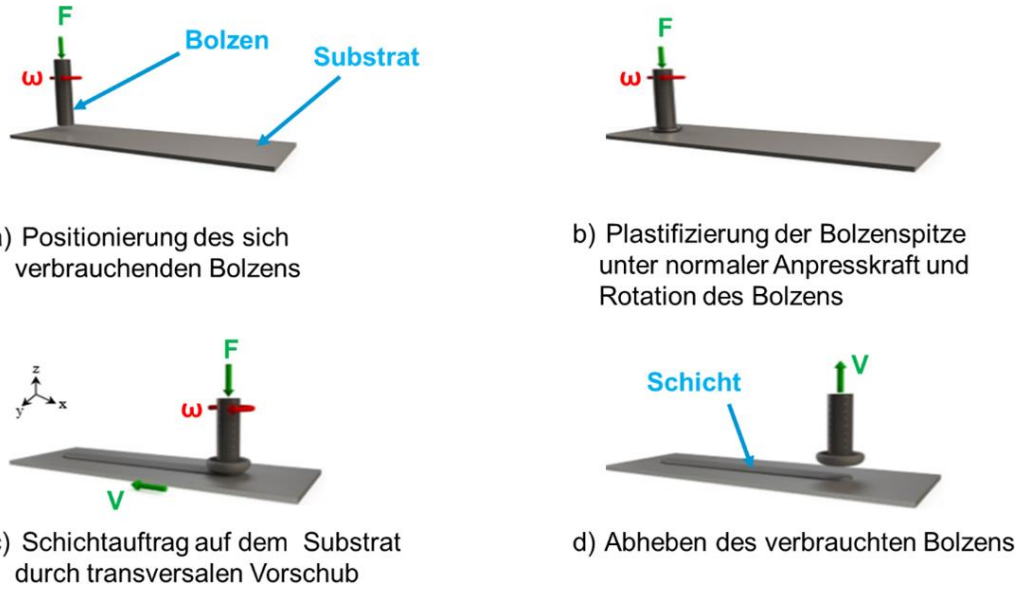


Abbildung 6: Schematische Ansicht des FS-Prozesses mit den Benennungen der wichtigsten Prozessbezeichnungen [25].

Zu den Vorteilen von FS zählt die niedrige Prozesstemperatur, welche zu einer geringen Wärmeeinflusszone und einem minimalen induzierten Verzug führt. Die schon für FSW und rFSSW beschriebene, den Festphase-Fügeprozessen inhärente Fähigkeit, die meisten gleich- sowie ungleichartigen metallischen Werkstoffe zu verarbeiten und nicht schmelzschweißbare Legierungen zu verbinden, überwiegt in vielen Fällen die Nachteile, z.B. des diskontinuierlichen FS-Prozesses. Des weiteren ermöglicht die mittels Festphase-Fügeprozessen durch

dynamische Rekristallisation erzielbare Feinkornstruktur in zahlreichen Fällen die Realisierung sehr vorteilhafter Materialeigenschaften, wie hohe Duktilität und Festigkeiten der Verbindung. Der FS-Prozess selbst zeigt eine geringe Abhängigkeit von äußeren Einflüssen, sodass er häufig ohne Schutzgas, unter Wasser sowie in Umgebungen, in denen keine Dämpfe, Staub, Funken oder Späne vorhanden sein dürfen, eingesetzt werden kann (vgl. [26, 27, 28]).

Die oben genannten Vorteile der beschriebenen Festphase-Fügeprozesse wurden im vorliegenden Projekt AVaiL für das Fügen von Strukturbauteilen aus ungleichartigen Aluminium-Titan-Halbzeugen sowie den Schichtaufbau bzw. das metallische Verbinden von mit u.a. temperatursensitiven Dichtmitteln beschichteten Aluminiumlegierungen untersucht.

Referenzen

[1] Murr, L.E. A Review of FSW Research on Dissimilar Metal and Alloy Systems. J. of Materi Eng and Perform 19, 1071–1089 (2010). https://doi.org/10.1007/s11665-010-9598-0.

[2] H. Kasai, Y. Morisada, H. Fujii, Dissimilar FSW of immiscible materials: Steel/magnesium, Materials Science and Engineering: A, Volume 624, 2015, pp 250-255, https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.060.

[3] M. Mazar Atabaki, J. Ma, W. Liu, R. Kovacevic, Pore formation and its mitigation during hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel, Materials & Design, Volume 67, 2015, pp 509-521, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.072.

[4] G. Madhusudhan Reddy, Amol A. Gokhale, Chapter 9 - Welding Aspects of Aluminum–Lithium Alloys, Editor(s): N. Eswara Prasad, Amol A. Gokhale, R.J.H. Wanhill, Aluminum-lithium Alloys, Butterworth-Heinemann, 2014, pp 259-302, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401698-9.00009-4.

[5] E.D.N. W.M. Thomas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith, C.J. Dawes, Improvements to Friction Welding, in: TWI (Ed.) GB Patent, UK, 1991.

[6] J.T. M. Pacchione, CHALLENGES OF THE METALLIC FUSELAGE, ICAS 2006, Hamburg, 2006

[7] R.S.M. M. Mahoney, T. Nelson, J. Flintoff, R. Islamgaliev, Y. Hovansky, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S., S.L.S. Mishra, in: TMS (Ed.) Friction Stir Welding and Processing, Warrendale, PA, USA, 2001, p. 183.

[8] D. Lohwasser Z. Chen (Editors): Friction Stir Welding From Basics to Applications, Woodhead Publishing, 1st Edition, December 2009, ISBN: 9781845694500.

[9] D.G. Hattingh, C. Blignault, T.I. van Niekerk, M.N. James, Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool, Journal of Materials Processing Technology, Volume 203, Issues 1–3, 2008, pp 46-57, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.028.

[10] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, Volume 53, Issue 6, 2008, pp 980-1023, https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001.

[11] M.Z.H. Khandkar, J.A. Khan, A.P. Reynolds, Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model, Science and Technology of Welding and Joining 8(3) (2003) 165-174.

[12] T. Sun, A.P. Reynolds, M.J. Roy, P.J. Withers, P.B. Prangnell, The Effect of Shoulder Coupling on the Residual Stress and Hardness Distribution in AA7050 Friction Stir Butt Welds, Materials Science and Engineering: A (2017).

[13] M.M.Z. Ahmed, B.P. Wynne, W.M. Rainforth, P.L. Threadgill, Through-thickness crystallographic texture of stationary shoulder friction stir welded aluminium, Scripta Materialia 64(1) (2011) 45-48. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.08.060.

[14] A. Barbini, J. Carstensen, J.F. dos Santos, Influence of a non-rotating shoulder on heat generation, microstructure and mechanical properties of dissimilar AA2024/AA7050 FSW joints, Journal of Materials Science & Technology, Volume 34, Issue 1, 2018, pp 119-127, https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.10.017.

[15] H. Wu, Y.-C. Chen, D. Strong, P. Prangnell, Stationary shoulder FSW for joining high strength aluminum alloys, Journal of Materials Processing Technology, Volume 221, 2015, pp 187-196, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.015.

[16] C. Schilling and J. F. dos Santos: Method and device for linking at least two adjoining work pieces by friction welding. EU Patent 1 230 062 B1, November 2000.

[17] C. Schilling and J. F. dos Santos: Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding. US Patent US00000006722556B2, April 2004.

[18] ISO 18785: Friction stir spot welding – Aluminium: Part 1 to Part 5 (2018)

[19] Homola P., Růžek R., McAndrew A.R., De Backer J. Effect of primer and sealant in refill friction stir spot welded joints on strength and fatigue behaviour of aluminium alloys, International Journal of Fatigue, 168, 2023, 107455, https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107455.

[20] Vacchi G.S., Silva R., Plaine A.H., Suhuddin U.F.H., Alcântara N.G., Sordi V.L., Rovere C.A.D. Refill friction stir spot welded AA5754-H22/Ti-6Al-4V joints: Microstructural characterization and electrochemical corrosion behavior of aluminum surfaces, Materials Today Communications, 22, 2020, 100759, https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100759.

[21] Lacki P., Derlatka A. Strength evaluation of beam made of the aluminum 6061-T6 and titanium grade 5 alloys sheets joined by RFSSW and RSW, Composite Structures, Volume 159, 2017, 491-497, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.003.

[22] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, E. R. Watts and D. G. Staines, “Friction based welding technology for aluminium,” Materials Science Forum, Vols. 396-402, no. 7, pp. 1543-1548, 2002.

[23] J. Gandra, H. Krohn, R. M. Miranda, P. Vilaça, L. Quintino and J. F. dos Santos, "Friction surfacing - A review," Journal of Materials Processing Technology, vol. 214, pp. 1062-1093, 2014.

[24] H. Klopstock and A. R. Neelands, “An improved method of joining or welding metals”. UK Patent GB572789, 1941.

[25] M. Beyer, A. Resende and J. F. dos Santos, Fiction surfacing for multi-sectorial applications - FRICSURF, Institute for Materials Research, GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH (Technical Report), 2003.

[26] V. I. Vitanov, I. I. Voutchkov and G. M. Bedford, “Decision support system to optimise the Frictec (friction surfacing) process,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 107, no. 1-3, pp. 236-242, 2000.

[27] V. Fitseva, Friction Surfacing of Titanium Grade 1 and Ti-6Al-4V (Ph.D. thesis), Technische Universität Hamburg Harburg, 2016.

[28] D. Gibson, Friction surfacing for multi-sectorial applications (fricsurf) (Technical Report), Aberdeen: Circle Technical Services Ltd., 2003.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für das Hereon-Einzelvorhaben „Anwendung und Optimierung des Rührreib-,Reibpunkt- und Reibauftragschweißens für die Funktionalisierungund Montage von Bauteilen und –gruppen“ waren keine Unteraufträge geplant. Während der Projektlaufzeit ergab sich auch nicht die Notwendigkeit außerplanmäßig in das Einzelvorhaben einzubinden. Des Weiteren bestanden keine Verknüpfungen mit anderen LuFo-Verbünden, EU-, BMBF- oder DFG-Programmen über das Verbundprojekt AVaiL-DE hinaus. Es gab auch keine assoziierten Partner.

Der rechtliche Rahmen der Zusammenarbeit mit der Airbus Aerostructures GmbH (ASA), vormals Teil der Premium AEROTEC GmbH (PAG), der Automotive Center Südwestfalen GmbH, der Airbus Operations GmbH, Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. und der voestalpine Automotive Components Schwäbisch Gmünd GmbH & Co. KG wurde in einem Konsortialvertrag geregelt.

Während der gesamten Projektlaufzeit bestand eine direkte Zusammenarbeit mit allen Verbundpartnern. Die Kollaborationen mit den Verbundpartnern gehen aus dem in Abbildung 1 gezeigten Projektstrukturplan hervor und werden im Folgenden an geeigneter Stelle nochmals erwähnt. Die intensivste Zusammenarbeit in diesem Teilvorhaben fand mit der Airbus Aerostructures GmbH statt.

II. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

Das Gesamtziel des Teilvorhabens „Anwendung und Optimierung des Rührreib-, Reibpunkt- und Reibauftragschweißens“ betrifft die Weiterentwicklung und Optimierung der drei Festphase-Fügeprozesse FSW, rFSSW und FS zur Erreichung einer effizienten und kostengünstigen Herstellung von Bauteilen und Baugruppen bei gleichzeitig erhöhter struktureller Sicherheit durch ein verbessertes Schadenstoleranzverhalten. Im Hinblick darauf wurden im übergeordneten Verbundvorhaben AVaiL-DE im Rahmen HAP3 in den AP3.1 und AP3.3 sowie in HAP6 in AP6.2 die nachfolgend beschriebenen wissenschaftlich-technologischen Ergebnisse erzielt.

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die nachfolgende Beschreibung bezieht sich für das Teilvorhaben auf die Bezeichnungen aus dem übergeordneten Verbundprojekt AVaiL-DE für AP3.1, AP3.3 sowie AP6.2 mit den Schwerpunkten Prozess- und Verfahrensentwicklung sowie dem Transfer der Ergebnisse in die jeweiligen Technologie-Validatoren. Die Entwicklungsarbeiten wurden für verschiedene Materialkombinationen und Oberflächenvorbereitungs-varianten durchgeführt. Der zugrunde liegende Entwicklungsansatz basiert in allen Fällen auf der Idee, die den Festphase-Fügeprozessen inhärenten Vorteile (z.B. keine mit beim fest-flüssig-fest Phasenübergang beim Fügen entstehenden Schweißfehler, keine oder kaum bzw. gut kontrollierbare Bildung von spröden intermetallischen Phasen beim Fügen von ungleichartigen Metallen) für den Aufbau von integralen Strukturbauteilen in Luftfahrzeugen zu nutzen.

II.1.1 AP3.1- rFSSW

Im AP3.1 rFSSW sollten als wissenschaftliches Ziel die Verschleißmechanismen an den rFSSW-Werkzeugen beschrieben werden. Technologisch war die Entwicklung von rFSSW-Werkzeugen mit verlängerter Lebensdauer bzw. höherer Standzeit vorgesehen.

Hierfür wurden initial Schweißwerkzeugbeschichtungen verglichen, wobei keine signifikante Verbesserung der Werkzeugstandzeit gegenüber den unbeschichteten Werkzeugen festgestellt werden konnte. Daraufhin wurde das Design des Spannrings untersucht und dahingehend modifiziert, dass Öffnungen eingebracht wurden, die sowohl eine bessere Kühlung, als auch einen Abfluss von in den Werkzeugspalt zwischen Hülse und Spannring eingedrungenen Schweißmaterials (Aluminium) ermöglichten. Mit der bisherigen Ausführung des Schweißwerkzeugs können maximal 58 Schweißpunkte durchgeführt werden, bevor der Schweißprozess zur Reinigung des Werkzeugs unterbrochen werden muss. Durch das modifizierte Werkzeugdesign kann nun die maximale Anzahl der Schweißpunkte, bei intensiveren Schweißbedingungen, ohne Unterbrechung des Schweißprozesses auf über 300 erhöht werden. Die maximale Werkzeugtemperatur des optimierten Werkzeugdesigns gemessen im Spannring ist zudem um ca. 30 % niedriger als zuvor.

Somit wurde mit den optimierten rFSSW-Werkzeugen das technologische Ziel vollumfänglich erreicht. U.a. wurden zum Ende des übergeordneten Verbundprojekts alle Reibpunktschweißungen der sechs gefertigten Aluminium/Aluminium-rFSSW-Validatoren, größtenteils sogar mit Dichtmittel (sealant) versehen, mittels eines einzigen, auf Verschleißminderung optimierten rFSSW-Werkzeugs geschweißt, ohne dass dieses zwischendurch gereinigt werden musste.

Zusammenfassung abgeschlossener Arbeiten AP3.1 - rFSSW

Die Entwicklungsarbeit im Bereich der artgleichen Aluminium rFSSW-Verbindungen wurde an mit Reinaluminium beschichteten AA2024 Blechen (Alclad 2024) mit, dem Anwendungsfall entsprechenden 1,4 mm dicken Blechen auf 1,6 mm dicken Blechen durchgeführt. Durch eine systematischen Prozessoptimierung wurden schlussendlich die in Tabelle 1 gezeigten maximalen Scherzugkräfte erreicht.

Tabelle 1: Durch Prozessoptimierung erarbeitete rFSSW Parameterkombination für artgleiche AA2024 Überlappverbindungen mit den gemessenen maximalen Scherzugkräften (lap shear strength, LSS).

Rotationsgeschwindigkeit [min^{-1}]	Eindringtiefe [mm]	Eindringgeschwindigkeit [mm s^{-1}]	Max. Scherzugkräfte [kN]
2000	1,7	1,0	9,3 ±0,5

Für die Entwicklungsarbeit an ungleichartigen Aluminium/Titan Verbindungen wurden die Al-Legierung 7050-T6 mit einer Dicke von 2 mm und die Ti-Legierung Ti6Al4V mit einer Dicke von 3 mm als Grundwerkstoffe (base materials, BM) eingesetzt. Für die zweilagigen Überlapp-rFSSW-Versuche wurde in der RPS 100-Schweißmaschine eine Unterlage aus Stahl verwendet.

Eine im Vorfeld durchgeführte vergleichende rFSSW Studie mit verschiedenen Oberflächenbehandlungsmethoden, darunter manuelles Schleifen, Sandstrahlen und chemische Reinigung zeigte auf, dass die chemische Reinigung vor dem Schweißen die bevorzugte Technik darstellt. Aus diesem Grund erfolgte die Vorbereitung der Probenoberflächen für das rFSSW der Aluminium/Aluminium sowie Aluminium/Titan Überlappverbindungen nach Absprache mit ASA im Hinblick auf den entsprechenden Use Case auf chemischem Wege. Das von ASA gewünschte Oberflächenreinigungssystem wurde, wie in Abbildung 7 dargestellt, im Labor bei Hereon erfolgreich nachgebildet und sowohl für die Aluminium-, als auch die Titan-Proben erfolgreich durchgeführt, wobei das Ätzen der Probenoberflächen mit Oakite 160 nur für die Aluminium-Proben notwendig war.

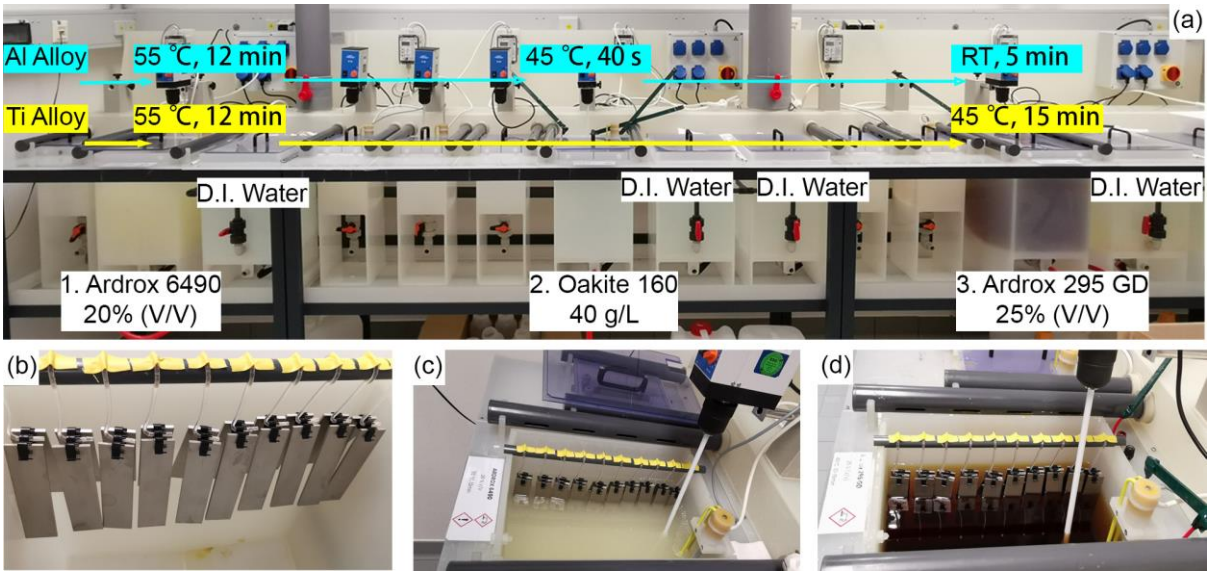


Abbildung 7: Chemisches Oberflächenreinigungssystem nach ASA-Standard für die Vorbereitung der rFSSW Al- und Ti-Probenbleche bei Hereon

Im Rahmen der Fertigung der gleichartigen Aluminium/Aluminium rFSSW-Proben wurde im Hinblick auf den typischen Airbus A330 Blechspant-Validator das von ASA vorgeschlagene Dichtmittel MC-780 der Klasse C untersucht. Da dieses ca. 6 % Xylol mit einem Siedepunkt von etwa 140 °C enthält, die Prozesstemperatur beim rFSSW von Aluminium jedoch ~500 °C erreichen können, wäre ein Verdampfen des Lösungsmittels mit Nachteilen sowohl für die Integrität des Dichtmittels, als auch für die Umwelt, und hier vor allem im Hinblick auf den Großindustriellen Einsatz, behaftet. Da die betrachteten Lösungsmittelfreien Varianten der MC-780 Klasse C aufgrund ihrer niedrigeren Viskosität zu Kompromissen bei den mechanischen Eigenschaften der Verbindungen geführt hätten, wurde für die weitere Prozessentwicklung in AVaiL nach Absprache mit ASA das Dichtmittel MC-238 ausgewählt und eingesetzt. Da ein Dichtmitteleintrag in den Schweißbereich zu einer Verschmutzung des rFSSW-Werkzeugs und Verringerung der erzielbaren Scherzugkräfte der Verbindung führen können, wurden sowohl Einspann- als auch Schweißstrategien zur Verringerung bzw. Verhinderung des Dichtmitteleintrags untersucht. Wie in der Abbildung 8 beispielhaft zu sehen, wurde durch verschiedene Einspannstrategien für die beiden untersuchten Dichtmittel unterschiedliche Ergebnisse erzielt, wobei die Strategie „Clamping+Sleeve+Pin closed“ für die untersuchten Dichtmittel das robusteste Ergebnis zeigte.

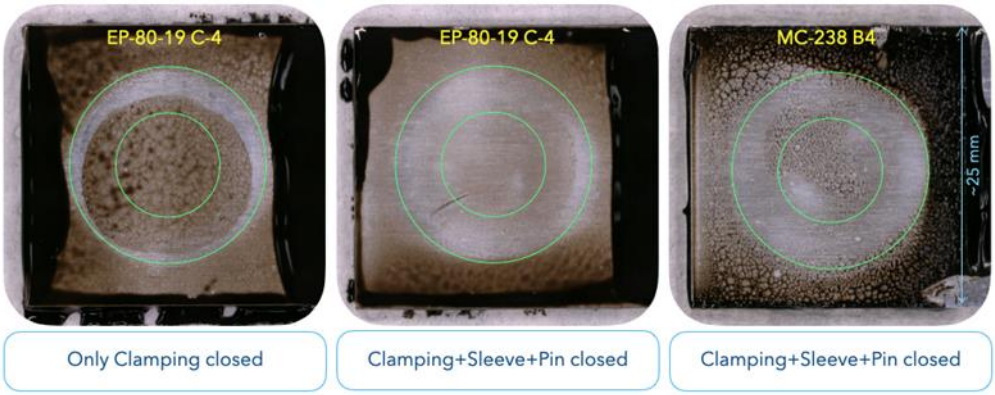


Abbildung 8: Exemplarische Ergebnisse der rFSSW Ein- bzw. Vorspannstrategien mit verschiedenen Dichtungsmitteln vor dem Schweißen. Die grünen Ringe zeigen die Projektion der Hülse (kleiner Durchmesser) und des Niederhalters (großer Durchmesser) an.

Obwohl die artungleiche Verbindung von 7XXX-Al-Legierungen mit Ti-Legierungen eine große Herausforderung darstellte, haben die am Hereon durchgeführten Experimente zur Durchführbarkeit des rFSSW gezeigt, dass es möglich ist, diese ungleichartigen Verbindungen mit für den angestrebten Anwendungsfall ausreichend hoher mechanischer Anbindungsfestigkeit durch eine Kombinationsstrategie herzustellen, die sowohl eine chemische Vorbehandlung der Ti-Oberfläche als auch eine Parameteroptimierung des Fügeprozesses umfasst. Hierzu wurden sowohl der Ablauf der chemischen Behandlung als auch die optimierten rFSSW-Parameter bestimmt. Hierbei wurden einfache EN AW 7050/Ti6Al4V rFSSW-Überlappverbindungen mit einer Überlappscherfestigkeit (lap shear strength, LSS) von 6,7 ±0,4 kN hergestellt.

Für den geplanten Demonstrator, d.h. die Al/Ti-Hybride Sitzschiene, konnte das rFSSW-Schweißsystem RPS 100 aufgrund der begrenzten maximalen Abmessungen des Probenraums von 380 mm x 300 mm x 100 mm (Länge x Breite x Höhe) nicht verwendet werden. Aus diesem Grund wurde die Portal-rFSSW-Maschine RPS 200 eingesetzt. Die vorläufigen Ergebnisse zeigten, dass die direkte Übertragung der rFSSW-Parameter und somit der mit der RPS 100 erzielten Ergebnisse nicht möglich war. Bei Anwendung der gleichen Parameterkombinationen versagten beispielsweise die mit der RPS 100 hergestellten rFSSW-Verbindungen mit

einer LSS von 6,7 kN, während die LSS der mit der RPS 200 gefertigten rFSSW-Verbindungen nur 1,5 kN betrug. Die anschließende Untersuchung an der RPS 200 ergab, dass die Unterlage, die als Gegenlager für den Al/Ti-Blechverbund verwendet wird, eine hohe Steifigkeit aufweisen sollte. Ein Vergleich von Unterlagen aus Al, Stahl und Ti zeigte, dass durch den Austausch der Al-Unterlage durch Stahl oder Ti die LSS der zweilagigen Überlappverbindungen an der RPS 200 von 1,5 kN auf 4,1 kN erhöht werden konnte.

AA7xxx/Ti6Al4V rFSSW-Strategien

In diesem Abschnitt werden detaillierte Informationen zu den Schweißstrategien für das Schweißen von AA7xxx Al/Ti6Al4V Hybrid-Sitzschienen bzw. der dafür entwickelten Validator-Blechpakete gegeben.

Parameterfenster für das RPS 200-System

Die zu einer rFSSW-Verbindung führenden Schweißparameter wie Rotationsgeschwindigkeit (rotational speed, RS) wurden von 1200 bis 2000 U/min, die Eindringtiefe (plunge depth, PD) im Bereich von 1,7 mm bis 1,9 mm variiert. Die Eintauchzeit (plunge time, PT), die gleich der Rückzugszeit (retracting time, RT) ist, wurde von 1,5 s bis 2 s, die Spannkraft (clamping force, CF) von 10 kN bis 18 kN variiert. Die Verweilzeit (dwell time, DT) wurde generell bei 0 s gehalten. Die ausgewählten Parameterkombinationen und die entsprechenden Scherzugkräften (lap shear strength, LSS) sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Ausgewählte rFSSW Parameterkombinationen des RPS 200-Schweißsystems mit den entsprechenden, gemessenen Scherzugkräften (lap shear strength, LSS). Parameter mit maximaler LSS grün markiert.

Proben	Parameter				LSS (kN)
	CF (kN)	RS (rpm)	PD (mm)	PT/RT (s)	
ATR15	18,0	2100	1,8	1,5	keine Verbindung
ATR16	18,0	1600	1,9	1,5	3,0
ATR17	18,0	1600	1,9	1,5	3,1
ATR18	18,0	1200	1,9	1,5	2,4
ATR19	13,5	1600	1,9	1,5	4,1
ATR20	13,5	1200	1,9	2,0	3,7
ATR21	12,5	2000	1,9	2,0	3,7
ATR22	10,0	1600	1,9	1,5	3,8
ATR23	13,5	1600	1,9	1,5	2,7

Es wurden keine spezifischen Korrelationen zwischen CF und LSS ermittelt. Zur Vermeidung des Ausknöpffehlers in der Rührzone (stir zone, SZ) sollten RS und PT/RT unter 2100 U/min bzw. über 1,5 s liegen. Wenn die PD unter 1,8 mm liegt, d. h. ~0,2 mm von der Al/Ti-Grenzfläche entfernt, werden keine Verbindungen erzielt.

Obwohl das rFSSW-Parameterfenster für die RPS 200-Maschine mit dem gleichen Vorgehen wie bei der RPS 100-Maschine systematisch bestimmt wurde, betrug die maximal erzielte LSS nur 4,1 kN, was im Vergleich zu den mit der RPS 100-Maschine hergestellten Verbindungen um ~39 % niedriger war. Um die den Ergebnissen zugrundeliegenden Unterschiede zwischen den Systemen RPS 100 und RPS 200 zu untersuchen, wurden die

Bruchflächen der Al- und Ti-Seiten der mit den beiden Maschinen hergestellten Verbindungen mittels Topographieuntersuchungen verglichen (siehe Abbildung 9).

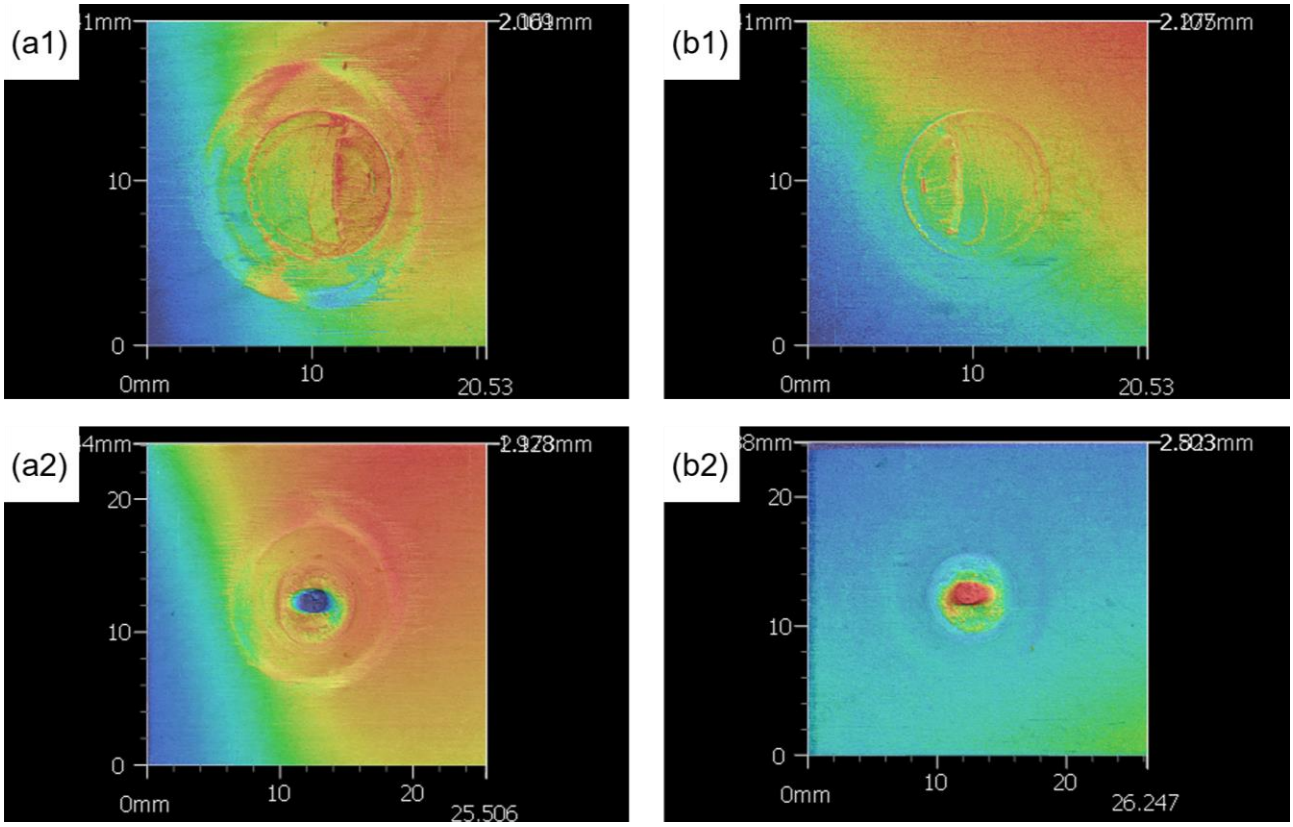


Abbildung 9: Topographieansichten mit (a1, b1) Unteransicht des oberen Al-Blechs, (a2, b2) Oberansicht des unteren Ti-Blechs, der mit den Maschinen RPS 200 (a1, a2) und RPS 100 (b1, b2) hergestellten Verbindungen.

Es ist zu sehen, dass die durch die Schulter verfüllten, großflächigeren Bereiche der mit der RPS 200 hergestellten Verbindungen zur Festigkeit beitragen müssen, da in den durch die Stifte verfüllten Bereiche keine nennenswerten Verbindungen zu erkennen sind (siehe Abbildung 9(a1) und (a2)), während dahingegen bei den mit der RPS 100 hergestellten Verbindungen primär der mit dem Stift verfüllte Bereich verbunden ist. Dieser Effekt kann mit den unterschiedlichen Einspannmethoden und damit Steifigkeiten der beiden Systeme zusammenhängen. Bei der RPS 200 werden die Proben durch Absenken des oberen Schweißkopfes über eine mechanische Klammerung fixiert, während bei der RPS 100 die CF durch pneumatisches Anheben des unteren Probenauflagers aufgebracht wird.

Hybrides Stift-Schulter-Eindring-rFSSW

Angeregt durch die Unterschiede in den Bruchflächen zwischen RPS 100 und RPS 200 wurde eine neue rFSSW-Variante untersucht, das hybride Stift-Schulter-Eindring-rFSSW (hPSP-rFSSW). Wie in Abbildung 9 anhand der Bruchflächenuntersuchung dargestellt, wurden zwei Varianten für den rFSSW-Prozess untersucht, nämlich Schulter-Eindring- und Stift-Eindring-Variante. Die Schulter-Eindring-Variante wird im Allgemeinen verwendet, um einen breiteren Verbindungsbereich und eine daraus resultierende höhere Festigkeit zu erzielen, während die Stift-Eindring-Variante i.a. zu einer stärkeren plastischen Verformung der Grenzfläche innerhalb des Stift-Nachfüllbereichs führt, wodurch eine stärkere Verzahnung zwischen Al und Ti erreicht werden kann. Bei der

hybriden Eindringmethode wird daher zuerst mit dem Stift eingedrungen, gefolgt von der Schulter, womit die Vorteile beider Varianten verknüpft werden sollen. Die hierfür verwendeten Parameterkombinationen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Parameterfenster für das hybride Stift-Schulter-Eindring-rFSSW; CF wurde auf 13,5 kN festgelegt.

Proben	Eindringelement	Parameter			LSS (kN)
		RS (rpm)	PD (mm)	PT/RT (s)	
ATR24	1. Stift	1600	1,9	1,5	4,6 kN
	2. Schulter	1600	1,9	1,5	
ATR25	1. Stift	1600	1,9	1,5	2,6 kN
	2. Schulter	1600	1,9	1,5	

Das Stift-Schulter-Hybrideindringen führte nicht zu Al/Ti-Verbindungen mit verbesserter LSS. Außerdem wiesen die so erzielten Festigkeiten eine hohe Standardabweichung auf. Die Bruchflächen sind in Abbildung 10 dargestellt. Teilweise wurde eine Verbindung zwischen Al und Ti im nachgefüllten Bereich des Stiftes erzielt, die jedoch nicht, wie nach den RPS 100 Ergebnissen erwartet, zu einer signifikanten Verbesserung der LSS beitrug. Darüber hinaus erschwert die erhöhte Programmierarbeit in der eingesetzte Prozessregelung den effizienten Einsatz dieser Hybrid-Eindringmethode für den rFSSW-Schweißprozess und verringert damit noch die Produktionseffizienz. Für einen effizienten Einsatz müsste daher zumindest die Prozessregelung in der Schweißmaschinensteuerung zusätzlich an diese Variante des Prozesses angepasst werden.

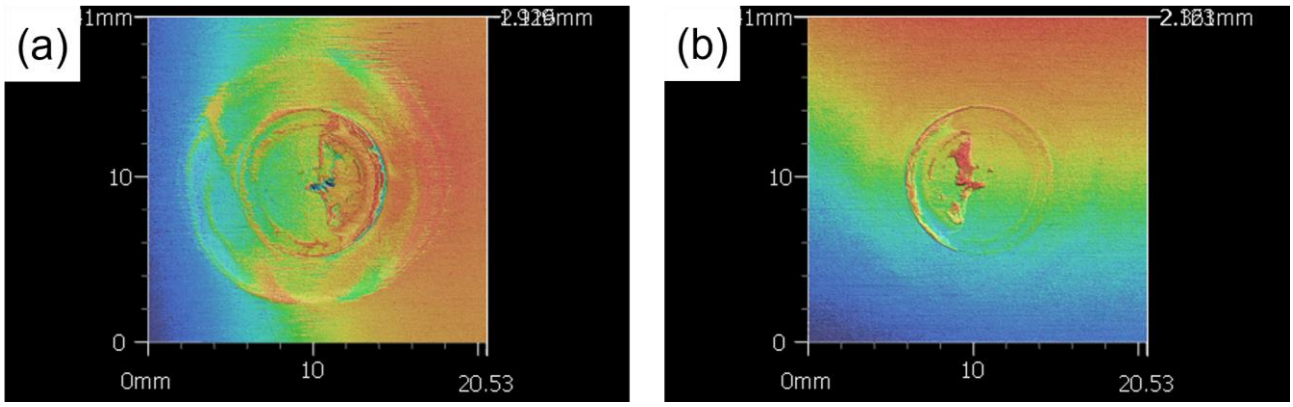


Abbildung 10: Topographieansichten der Bruchflächen mit (a) Unteransicht des oberen Al-Blechs und (b) Oberansicht des unteren Ti-Blechs für das hybride Stift-Schulter-Eindring-rFSSW.

Differential-Rotations-rFSSW

In einer früheren Studie von Hereon wurde eine neue rFSSW-Schweißvariante, das Differential-Rotations-rFSSW (DR-rFSSW), entwickelt [1]. Basierend auf dieser Methode wurde eine Schweißstrategie auf der Grundlage des DR-rFSSW vorgeschlagen, d. h. die Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit der Schulter (shoulder rotational speed, S-RS), um die Diffusion der Al/Ti-Atome im Bereich des nachgefüllten Bereichs der eindringenden Schulter zu verbessern, während die Rotationsgeschwindigkeit des Stifts (probe rotational speed, P-RS) auf einem niedrigen Wert gehalten wird, um den beobachteten, der LSS abträglichen Rührzonen-

Ausknöpffehler, zu vermeiden. Die untersuchten Parameterkombinationen mit erzielten LSS sind in Tabelle 4 aufgeführt. Im Zuge der Entwicklung wurden Verbindungen mit einer durchschnittlichen LSS von 5,5 kN hergestellt. Deren Bruchflächen sind in Abbildung 11 abgebildet. Der verbesserte LSS-Wert im Vergleich zu den Verbindungen, die mit dem konventionellen rFSSW-Verfahren und dem hybriden Eindringverfahren hergestellt wurden, hängen hier mit der verbesserten Bindung des durch die Schulter nachgefüllten Fügebereichs zusammen.

Es ist zu beachten, dass beim DR-rFSSW eine hohe S-RS von etwa 3000 U/min verwendet wird, was zu einem signifikant höherem Verschleiß der Schulter gegenüber dem konventionellen rFSSW führt. Der Einfluss des Werkzeugverschleißes auf die LSS wurde in Folge jedoch nicht weiter untersucht. Es wird jedoch angenommen, dass die Fluktuation der LSS-Werte mit dem DR-rFSSW und nicht mit dem Werkzeugverschleiß zusammenhängt.

Tabelle 4: Parameterfenster für das DR-refill FSSW-Verfahren, mit zugehörigen LSS. CF wurde auf 13,5 kN festgelegt.

Proben	Parameter				LSS (kN)
	S-RS (rpm)	P-RS (rpm)	PD (mm)	PT/RT (s)	
ATR26	3000	1600	1,9	1,0	6,6
ATR27	3000	1600	1,9	1,0	4,4
ATR28	3000	1600	1,9	1,0	5,5
ATR29	3000	1600	1,9	1,0	6,3
ATR30	3000	1600	1,9	1,0	4,7

Darüber hinaus wurden in diesem Zusammenhang zwei Konzepte für die Schultergestaltung verglichen. Das Schulterkonzept 1, das gegenwärtig bei Hereon verwendet wird, beinhaltet ein an der Spitze der Schulter befindliches Gewinde, das etwa 1 mm von der Schulterspitze entfernt ausläuft. Beim neuen Schulterkonzept 2 erreicht das Ende des Gewindes die Spitze der Schulter, was dazu führte, dass die LSS der ersten Schweißung, die mit dem neuen Schulterkonzept 2 erzeugt wurde, 6,3 kN betrug, die LSS der zweiten und dritten Schweißung jedoch auf 3,4 kN bzw. 3,7 kN sank. Als möglicher Grund wird der, in den Folgeschweißungen gegenüber dem Schulterkonzept 1 beobachtete, erhöhte initiale Verschleiß der Schulterspitze aufgrund des beim neuen Schulterkonzept 2 resultierenden dünnen, scharfkantigen Gewindeauslaufs vermutet. In der Literatur wurde z.B. durch Castro et al. [2] und Lauterbach et al. [3] der Werkzeugverschleiß auf den Bereich der Schulter und dort auf Adhäsionsverschleiß eingegrenzt. Signifikanten Einfluss auf die Werkzeuggeometrie hatte der Verschleiß in beiden Fällen aber erst nach etwa 1.000 rFSSW-Punktschweißungen. Der Grund für einen möglicherweise signifikanten Einfluss des Verschleißes der Standardwerkzeugschulter auf die Festigkeit der rFSSW-Verbindungen schon nach wenigen Reibpunktschweißungen sollte daher in zukünftigen Forschungsarbeiten systematisch untersucht werden.

rFSSW-Roboterschweißsystem

Da alle untersuchten Vorgehensweisen auf der RPS 200-Maschine nicht zu Reibpunktschweißungen mit vergleichbaren LSS wie auf der RPS 100-Maschine führten, wurde die Schweißbarkeit der Al-Ti-Materialkombination auf einem Kawasaki-Roboterschweißsystem, das den rFSSW-Prozess durch eine Axialkraftregelung betreibt, untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten, dass zur Beseitigung des Rührzonen-Ausknöpffehlers die RS bei 1800 U/min liegen sollte, bei einer Eindringkraft (PF) von 13 kN, einer

DT von 1,5 s und einer Eindringtiefe von 2,1 mm. Die untersuchten Parameterkombinationen sowie die LSS sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Parameterfenster für das Roboter-rFSSW-System mit Axialkraftregelung. Grün hinterlegt sind die robusten rFSSW-Prozessparameter mit geringer Standardabweichung. Für alle Schweißungen wurde die Eindringtiefe bei 2,1 mm konstant gehalten.

Proben	Parameter			LSS (kN)
	RS (rpm)	(PF) (kN)	DT (s)	
R1	1800	11,0	1,0	3,6
R2	1800	11,0	1,5	3,9
R3	1800	14,0	1,0	4,1
R4	1800	14,0	1,5	1,5 (SZ pull-out)
R5	1800	13,0	1,5	4,3
R6	1800	13,0	1,5	4,5
R7	1800	13,0	1,5	4,3
R8	1500	14,0	1,5	1,8

Generell zeigt die LSS mit der Parameterkombination "RS = 1800 U/min, PF = 13 kN, RF = 13 kN, DT = 1,5 s, PD = 2,1 mm" für das Roboterschweißsystem eine durchschnittliche LSS von 4,4 ±0,1 kN. Ausgewählte Bruchflächen der Verbindungen sind in Abbildung 11 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei den Verbindungen mit hohem LSS, d.h. R1, R2, R3 und R5, der Fügebereich dem der mit dem RPS 100-System gefügten Verbindungen ähnelt, siehe Abbildung 11(b2), mit Al-Anhaftungen auf der Ti-Oberfläche, welche sich hauptsächlich im Stift-verfüllten Bereich befinden. Bei der Parameterkombination R4 mit hoher PF von 14 kN und hoher DT von 1,5 s kam es während der Scherzugprüfung zu einem "SZ-Pull-out"-Fehler, der eine glatte Bruchmorphologie hinterließ, wie in Abbildung 11(d) gezeigt. Die für R8 gewählte, niedrige RS von 1500 U/min führte zu einem geringen Wärmeeintrag. Die Bindefestigkeit entlang der Al/Ti-Grenzfläche war gering und die Bruchfläche war ziemlich flach mit geringer Haftung von Al auf der Ti-Seite, siehe Abbildung 11(f), was in einer niedrigen LSS von 1,8 kN resultierte.

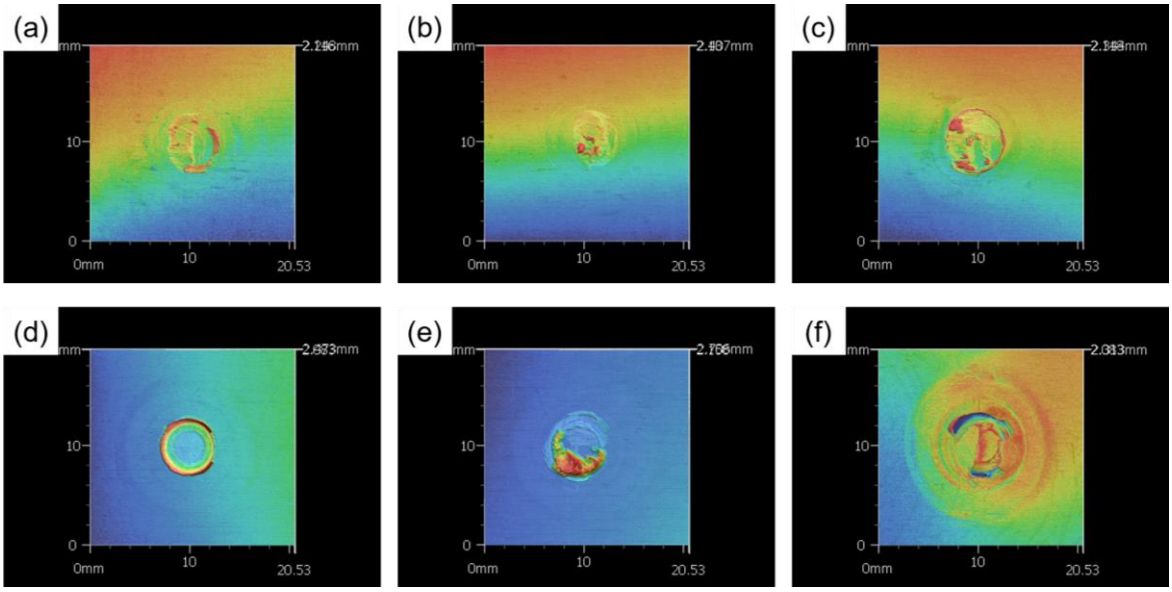


Abbildung 11: Topographieansicht von Bruchflächen der Roboterschweißsystem-rFSSW Verbindungen jeweils auf Seiten der Ti-Bleche korrespondierend zu den Parametern (a) R1, (b) R2, (c) R3, (d) R4, (e) R5 und (f) R8.

Ausblick Schweißstrategien Al/Ti-rFSSW-Hybride-Sitzschiene

Nach den Schweißstrategien, die mit der RPS 200 und dem Roboterschweißsystem untersucht wurden, konnten zwei mögliche zukünftige Schweißstrategien für die Al/Ti-Hybrid-Sitzschiene ermittelt werden:

(1) RPS 200; DR-rFSSW „RS=1800 U/min, RP=1600 U/min, DT=1,0 s, PT und RT=1,0 s, PD=1,0 mm“ kombiniert mit Schulterkonzept 1: Obwohl ein hoher durchschnittlicher LSS von 5,5 kN erreicht werden kann, zeigen die Verbindungen immer noch eine hohe Standardabweichung von ± 1,0 kN im LSS, siehe Tabelle 4.

(2) Roboterschweißsystem; Parameterkombination "RS = 1800 U/min, PF = 13 kN, DT = 1,5 s, PD = 2,1 mm": Die durchschnittliche LSS liegt bei 4,4 kN, was im Vergleich zu dem mit der RPS 200 gefügten Verbindungen zwar niedriger ist, die Standardabweichung von ± 0,1 kN ist hier jedoch deutlich geringer, siehe Tabelle 5.

Al/Ti/Al-rFSSW-Validator-Blechdesign

In diesem Abschnitt wird über die Machbarkeitsstudien dieser beiden Schweißstrategien für Al/Ti-Hybrid-Sitzschienen berichtet.

Entsprechend der vorangegangenen Diskussion mit ASA über die Belastbarkeit der Al/Ti-Hybriden-Sitzschiene wurden die Abmessungen der Validator-Bleche auf 160 mm (L) X 60 mm (B) X 2 mm oder 3 mm (T) festgelegt. Eine schematische Darstellung der geschweißten Al/Ti/Al-Bleche und der Anordnung der Schweißpunkte ist in Abbildung 12 zu sehen, wobei im Überlappbereich auf jeder Seite vier rFSSW-Punkte mit einem Durchmesser von 9 mm angeordnet wurden. Die Abstände zwischen den Punkten und vom Rand der Bleche aus betrugen 13,8 mm bzw. 4,8 mm, was den entsprechenden Abständen auf der Al/Ti-Hybriden-Sitzschiene entsprach.

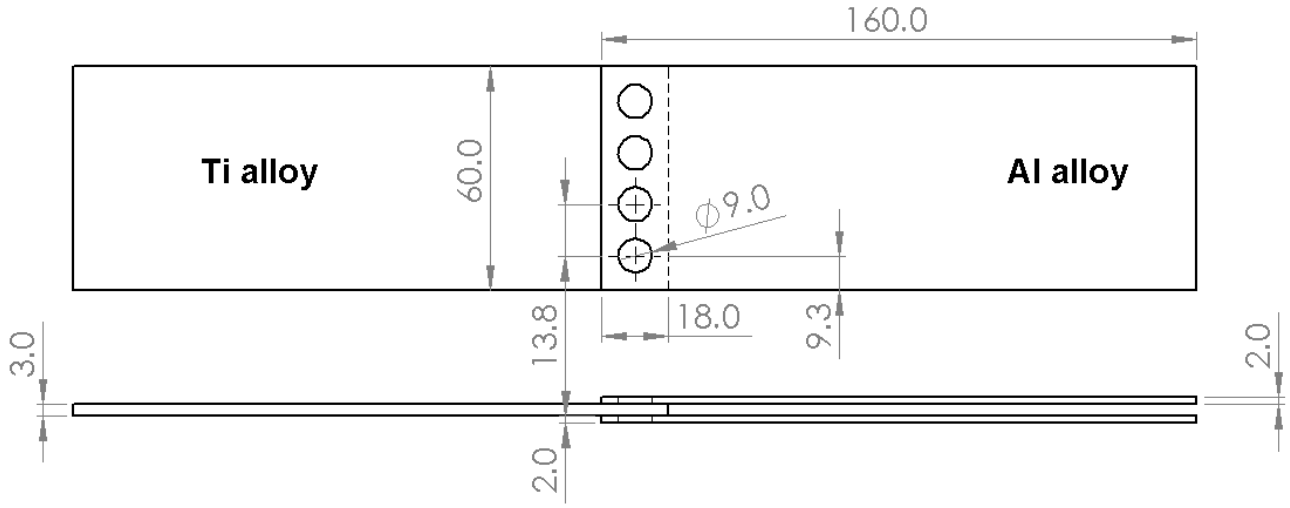


Abbildung 12: Schematische Darstellung der zusammengesetzten Bleche und der Anordnung der rFSSW-Punktverbindungen im Hinblick auf die hybride Sitzschiene

Machbarkeitsstudie RPS 200

Für die RPS 200 wurde die Schweißparameterkombination "CF = 13,5 kN, SRS = 3000 U/min, P-RS = 1600 U/min, PD = 1,9 mm, PT/RT = 1 s" gewählt. Die ersten vier Schweißpunkte am oberen Al-Blech in der gezeigten Al/Ti/Al-Verbindung konnten erfolgreich realisiert werden. Die nächsten vier Schweißpunkte am unteren Al-Blech lösten sich jedoch unmittelbar nach Fertigstellung der Schweißzyklen. Wie oben erwähnt, werden für die RPS 200 als Unterlagenmaterial Stahl oder Ti mit hoher Steifigkeit eingesetzt. Wenn eine Al-Unterlage, die sich unter Druckbelastung leichter verformt, verwendet wurde, konnten keine Reibschweißpunkte oder nur solche mit geringer Festigkeit (< 1,4 kN) hergestellt werden. In der vorliegenden Al/Ti/Al-Konfiguration fungierte beim Schweißen der zweiten Reibpunkt-Reihe prinzipbedingt das vorher verschweißte Al-Blech als Unterlage, so dass bei den letzten vier Schweißpunkten aus den oben beschriebenen Gründen zwischen dem zuletzt geschweißten Al- und Ti-Blech keine Verbindungen entstand.

Die gesamt-LSS der gefügten Konfiguration, d. h. der zuletzt gefügten oberen Al/Ti-Blechverbindung mit vier Punkten, wurde getestet und betrug 8,3 kN. Zum Vergleich: Wie in Tabelle 3 angegeben, betrug die durchschnittliche LSS der Verbindung mit einem Punkt 5,5±1,0 kN. Abbildung 13 zeigt die Bruchfläche des Al-Blechs. Demnach tragen nur die zwei nahe der Blechaußenkante befindlichen Reibschweißpunkte, Punkt 1 und 4, maßgeblich zur Festigkeit bei, während die mittig liegenden Reibschweißpunkte 2 und 3 eine untergeordnete Rolle bei der Verbindung spielen.

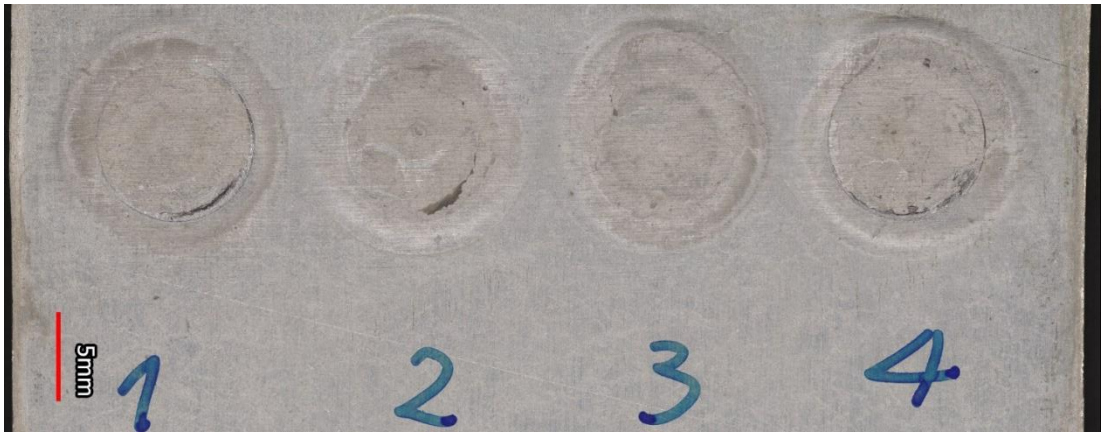


Abbildung 13: Bruchflächen der rFSSW-Reibschweißpunkte des zuletzt geschweißten, oberen Al-Blechs.

Die Al/Ti-Konfiguration mit vier rFSSW-Reibschweißpunkten zeigt eine nur geringfügig verbesserte LSS im Vergleich zu der Verbindung mit einem Punkt. Für die Anordnung der Positionen von Mehrfachpunkten, die durch das rFSSW verbunden werden, ist gemäß der von Hereon [4] durchgeführten Studie zur Vermeidung des Einflusses benachbarter Punkte und Blechkanten auf die Festigkeit des einzelnen Punktes der Punktdurchmesser d (9 mm in der vorliegenden Studie), der Mindestpunktabstand 3,5d (hier: 31,5 mm) und der Mindestkantenabstand 3d (hier: 27 mm) erarbeitet worden. In der vorliegenden Validator-Blechstruktur, die den Fall des Schweißens der Al/Ti/Al-Hybrid-Sitzschiene simuliert, betragen der angewandte Punktabstand und der Kantenabstand aufgrund der begrenzten Abmessungen nur 13,8 mm bzw. 9 mm (siehe Abbildung 12), was deutlich unter den durch die Hereon Studie erarbeiteten Abständen liegt. Einerseits führt der geringe Punktabstand zu Spannungen zwischen den Punkten, wodurch die Haftfestigkeit an der Al/Ti-Grenzfläche sinkt, andererseits führen die engen Randabstände zu Verformungen des Blechs (siehe Abbildung 14), was die Festigkeit und Dimensionen der Struktur zusätzlich beeinträchtigt.

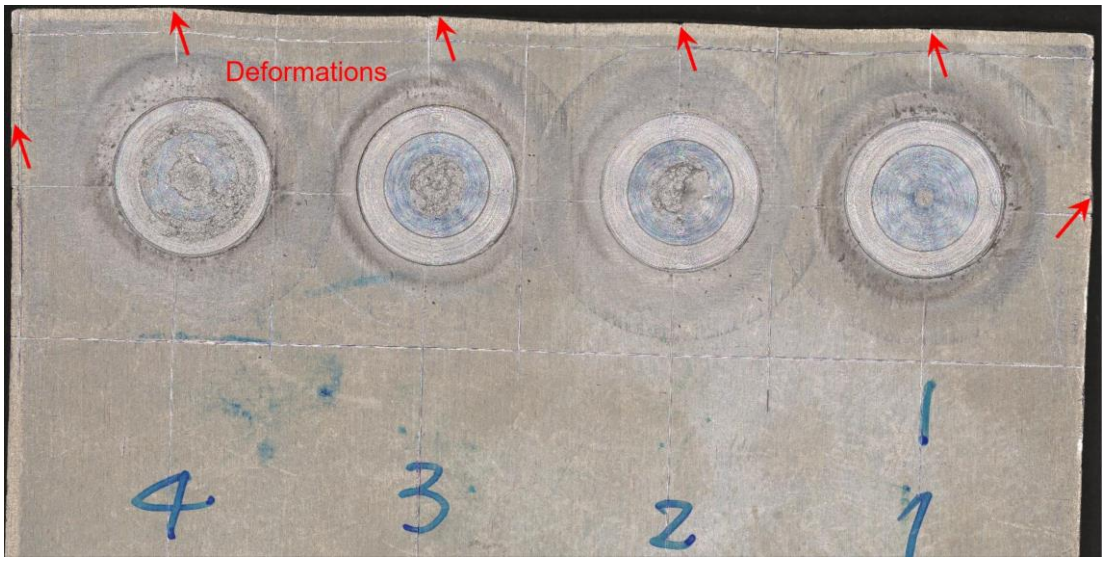


Abbildung 14: Verformungen der Blechkanten aufgrund des geringen rFSSW-Reibschweißpunkt-Rand-Abstands.

Machbarkeitsstudie rFSSW-Roboterschweißsystem

Für das Roboterschweißsystem wurde die Parameterkombination "RS = 1800 U/min, PF = 14 kN, RF = 13 kN, DT = 1,5 s, PD = 2,1 mm" verwendet. Es wurde häufig der Fehler des "SZ-Ausknöpfens" festgestellt, wie in Abbildung 15(a) zu sehen ist. Um eine Verbindung mit akzeptabler LSS für die ungleichartige Al/Ti-Kombination zu erzeugen, sollten, wie in Abschnitt 3.4 angegeben, eine hohe PF von 13 kN verwendet werden. Die höheren PF, die für die Al/Ti-Verbindungen verwendet wurden, führten zu einer starken Abnutzung des Werkzeugs vor dem Schweißen der simulierten Al/Ti/Al-Hybridkonfiguration, sodass die Antihaftbeschichtung auf der Oberfläche des Werkzeugs nicht mehr vorhanden war und die SZ aufgrund der Adhäsion des Aluminiums an der Stiftspitze teilweise aus dem Schweißbereich entfernt wurde, siehe Abbildung 15(b). Aufgrund von Materialanhaftung brach die Schulter in der Eintauchphase der dritten Schweißung, und der gebrochene Teil wurde mit dem äußeren Spannring (engl. clamping ring, CR) verbunden, wie in Abbildung 15(c) gezeigt. Um das Roboterschweißsystem für das Schweißen von Al/Ti/Al-ähnlichen Strukturen einsetzen zu können, sind in Zukunft weitere systematische Untersuchungen hinsichtlich Werkzeuggeometrie, -material sowie rFSSW-Prozessregelung notwendig.

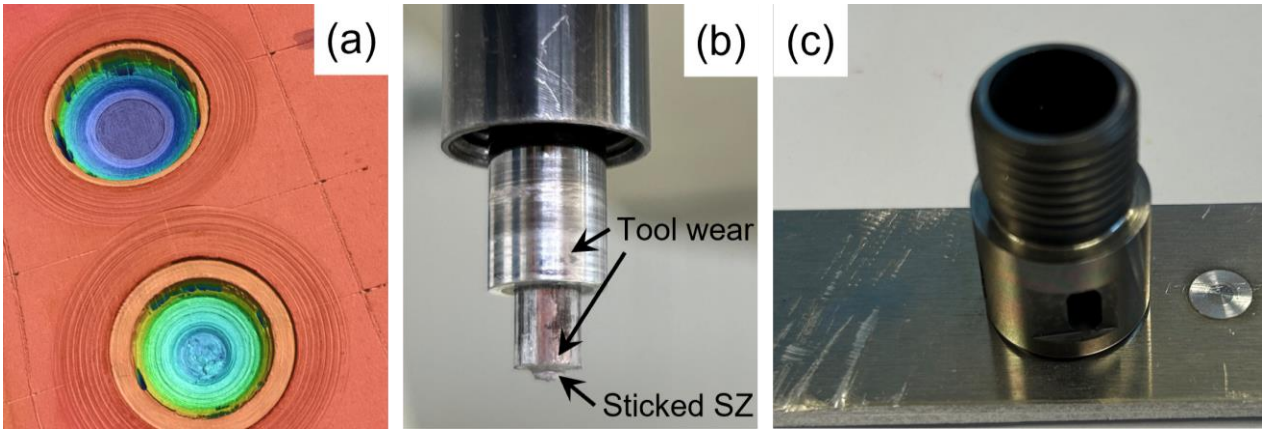


Abbildung 15: Mit rFSSW-Schweißroboter gefügte Al/Ti/Al-Konfiguration, (a) Rührzonen-Ausknöpffehler, (b) verklebtes Material der Rührzone am rFSSW-Stift und (c) gebrochene rFSSW-Werkzeugschulter in dem auf dem Substrat anhaftenden äußeren Spannring.

Machbarkeitsstudie RPS 100

Ein Übertragen der an der RPS 100 erarbeiteten Prozessparameter sowohl auf die RPS 200 als auch das Roboterschweißsystem für das rFSSW der Al/Ti/Al-Hybridstruktur war leider nicht erfolgreich. Da jedoch die RPS 100 eine Reibpunktverbindung mit einer hohen LSS von 6,7 kN herstellen kann, siehe zu Beginn des rFSSW-Kapitels, ist dies ein weiteres Indiz dafür, dass die Übertragbarkeit der Parameter primär der Einspannmethode des Widerlagers bzw. der Steifigkeit der Unterlage für die Al/Ti/Al-Konfiguration geschuldet ist. Diese Hypothese wurde im Folgenden weiter untersucht. Die vorgeschlagenen Kombinationen sind: 1) Al/Ti, geschweißt auf dem oberen Al-Blech; 2) Al/Ti/Ti, geschweißt auf dem oberen Al-Blech; 3) Al/Ti/Al, geschweißt auf dem oberen Al-Blech; 4) Al/Ti/Al, geschweißt auf dem oberen und unteren Al-Blech. Das Widerlager unter den Blechpaketen war jeweils in Stahl ausgeführt. Die entsprechenden LSS sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Vorgeschlagene Konfigurationen für die RPS 100 (ältere Version) und die LSS der hergestellten Verbindungen.

Nr.	Konfiguration	Anordnung rFSSW-Punkte	LSS (kN)
1	Al/Ti	Einer auf oberem Al	5.7
2	Al/Ti/Ti	Einer auf oberem Al	6.1
3	Al/Ti/Al	Einer auf oberem Al	2.2
4	Al/Ti/Al	je einer pro Al-Seite	0.8

Anhand der in Tabelle 6 gezeigten voneinander abweichenden LSS-Ergebnisse ist zu erkennen, dass bei einer Unterlage mit hoher Steifigkeit, d. h. Stahl bzw., wie im vorliegenden Fall, Titan (siehe Konfigurationen 1 und 2), rFSSW-Verbindungen mit hohen LSS erzielt werden können. Ähnlich wie bei den Ergebnissen mit der RPS 200 sank jedoch die LSS von über 5,5 kN (Konfigurationen 1 und 2) auf 2,2 kN (Konfiguration 3), wenn das unterliegende Material Al ist. Darüber hinaus verringerte ein zweiter rFSSW-Punkt auf der Oberfläche die LSS der danach gefügten Verbindung auf der gegenüberliegenden Seite nochmals.

Aus den Ergebnissen der Machbarkeitsstudien betreffend die RPS 200, das Roboterschweißsystem und die RPS 100 lässt sich schlussfolgern, dass die Herstellung von Al/Ti/Al-Hybridkonfigurationen mit hoher LSS noch eine wissenschaftliche und technische Herausforderung darstellt, da Al-Bleche auf beiden Seiten des vorliegenden Blechpakets keine ausreichend steifen Unterlagen für das rFSSW-Verfahren darstellen. Es sind daher in Zukunft sowohl weitere prozesstechnische als auch tiefergehende wissenschaftliche Untersuchungen erforderlich.

Schlussfolgerungen

(1) Für die Al/Ti-rFSSW-Einpunktverbindung kann durch Einsatz des DR-rFSSW mit dem RPS 200-System eine Al/Ti-Verbindung mit einer LSS von 5,5 ±1 kN hergestellt werden, während für eine gleich konfigurierte Verbindung die LSS mit dem Roboterschweißsystem 4,4 ±0,1 kN betrug.

(2) Bei der durch entsprechend angeordnete Blechpakete simulierten Al/Ti/Al-Hybridstruktur scheiterten alle Maschinen bei der Herstellung von Verbindungen mit hohen mechanischen Festigkeiten, da auf beiden Seiten Al-Bleche vorhanden waren, die in axialer Richtung augenscheinlich keine ausreichend steife Unterlage für den rFSSW-Prozess bieten können. Darüber hinaus verringerten die zu engen Punkt- und Kantenabstände, die durch die Abmessungen der vorgeschlagenen Al/Ti-Hybriden-Sitzschiene begrenzt sind, und die auf beiden Seiten des Blechpakets angeordneten Schweißnähte mit ihren resultierenden Deformationen der Blechoberflächen in den Schweißebenen die erzielbare LSS zusätzlich.

Referenzen

[1] B. Fu, J. Shen, U.F.H.R. Suhuddin, et al., Improved mechanical properties of cast Mg alloy welds via texture weakening by differential rotation refill friction stir spot welding, Scr. Mater. 203 (2021) 114113, https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114113.

[2] Camila C. de Castro, Junjun Shen, Athos H. Plaine, Uceu F.H. Suhuddin, Nelson Guedes de Alcântara, Jorge F. dos Santos, Benjamin Klusemann, Tool wear mechanisms and effects on refill friction stir spot welding of AA2198-T8 sheets, Journal of Materials Research and Technology, Volume 20, 2022, pp. 857-866, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.092.

[3] Lauterbach D, Keil D, Harms A, Leupold C, Dilger K. Tool wear behaviour and the influence of wear-resistant coatings during refill friction stir spot welding of aluminium alloys. Weld World 2021; 65:243e50. https://doi.org/10.1007/s40194-020-01021-y.

[4] R.C. Brzostek, Damage tolerance of refill friction stir spot weld application for the aircraft industry, Dissertation, Technische Universität Hamburg, (2019). http://hdl.handle.net/11420/2807.

II.1.2 AP3.1- FSW und SSFSW

Im AP3.1 FSW und SSFSW waren als wissenschaftliche Ziele das Verständnis des Entfestigungsvorgangs vor dem Werkzeug und des Materialtransports während des Schweißvorganges beim Hochgeschwindigkeits-SSFSW sowie die Klärung der Mikrostrukturentwicklung an der Grenzfläche zwischen Al und Ti definiert.

Technologisch sollten das Hochgeschwindigkeits-SSFSW untersucht sowie artungleiche Al/Al und Al/Ti SSFSW-Verbindungen erzielt werden. Das Al/Al- Hochgeschwindigkeits-SSFSW konnte erfolgreich untersucht werden, während sich das Al/Ti-Hochgeschwindigkeits-SSFSW aufgrund erhöhtem Verschleiß der SSFSW-Werkzeuge und einer notwendigen signifikanten Reduktion der Schweißgeschwindigkeit nicht bewährt hat und daher nicht weiterverfolgt wurde.

Gemäß Projektplan wurden daher im übergeordneten Verbundprojekt im Bereich des Rührreibschweißens drei Untersuchungsschwerpunkte definiert:

- Aluminium-Titan-Mischverbindungen (Anwendungsfall: Hybride Sitzschiene)
- Aluminium-Rippe-Blech-Strukturen (Anwendungsfall: Beulsteife auf Blechbaugruppe aus Airbus A320 Hecksektion)
- Aluminium-Blech-Guss-Strukturen (was jedoch nach Projektstart seitens Projektkoordinator verworfen wurde)

In diesen Themengebieten waren zu untersuchen:

- Werkzeugentwicklung bzw. -anpassung für die vorgesehenen Verbindungsgeometrien
- Prozessoptimierung mittels statistischer Methoden (Box-Behnken) zu höheren Schweißgeschwindigkeiten
- Bestimmung der quasi-statischen und zyklischen Eigenschaften der Verbindungen;
- Optimierte SSFSW-Werkzeug- und Prozessparameter für das Hochgeschwindigkeitsfügen (≥ 2 m/min) von Konfigurationen aus Al-Guss/Al-Blech und Al-Blech/Al-Blech.
- Optimierte (SS)FSW-Werkzeug- und Prozessparameter für das Hybridfügen von Titanlegierungen/Al-Blech.
- Eigenschaftskatalog der in diesem AP realisierten (SS)FSW-Verbindungen
- Datenbankerstellung von Prozessparametern, Prozeduren und Ergebnissen der in diesem AP erzeugten Schweißnähte.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Folgenden kurz dargestellt.

Aluminium-Titan (Ti6Al4V) -Mischverbindungen

Basierend auf der mit dem Projektpartner ASA ausgewählten Verbindungskonfiguration (erweitertes Kronenprofil, Abbildung 16) erfolgten Rührreibschweißversuche an Blechproben in Überlappkonfiguration, siehe Abbildung 18, um Erkenntnisse über die parameterabhängigen Anbindungsmechanismen sowie prozessbestimmende Einflussgrößen zu gewinnen.

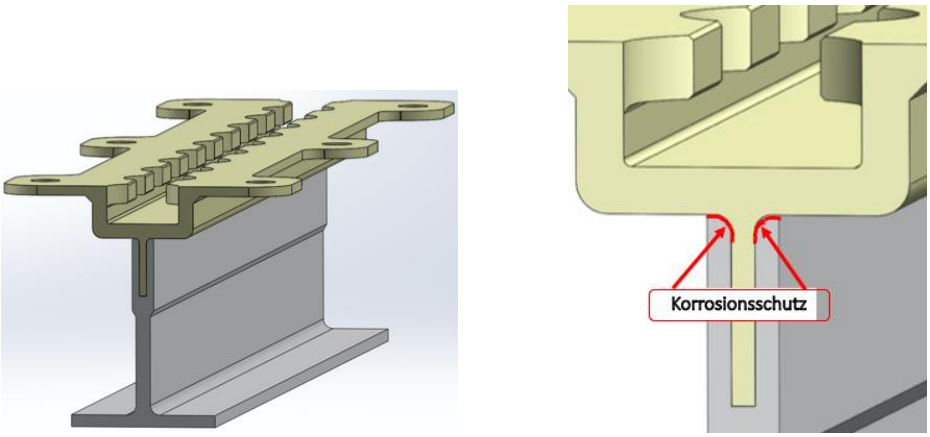


Abbildung 16: Schema für erweitertes Ti-Kronenprofil des Al/Ti-hybride Sitzschienenkonzepts mit Titansteg eingeschoben in Aluminiumblech

Die Kräfte und Werkzeugbewegungen während des Fügevorgangs wurden aufgezeichnet, sowie je drei Proben zur mechanischen und mirostrukturellen Charakterisierung entnommen (siehe Abbildung 18). Für den Aluminiumteil der Verbindung wurde seitens ASA die hochfeste Legierung EN AW 7050 in 2 mm Stärke ausgewählt. Der in das Aluminiumblech eingreifende Titansteg der Sitzschiene ist zur Materialreduzierung möglichst klein zu halten; er wurde mit einer Breite von 12 mm angenommen. Bei einem Schulter-Stift-Durchmesserverhältnis des Werkzeuges von 2,5 wurde daher ein Werkzeug-Stiftdurchmesser von 6 mm ausgewählt, um für das Werkzeug eine ausreichende Zugänglichkeit der Fügezone am Demonstrator sicherzustellen, siehe Abbildung 17.

Abbildung 17: Darstellung hinsichtlich der notwendigen, ausreichenden Zugänglichkeit des FSW-Werkzeugs in der Fügezone am Al/Ti-hybride Sitzschiene-Validator bei einem Schulter-Stift-Durchmesserverhältnis des Werkzeuges von 2,5.

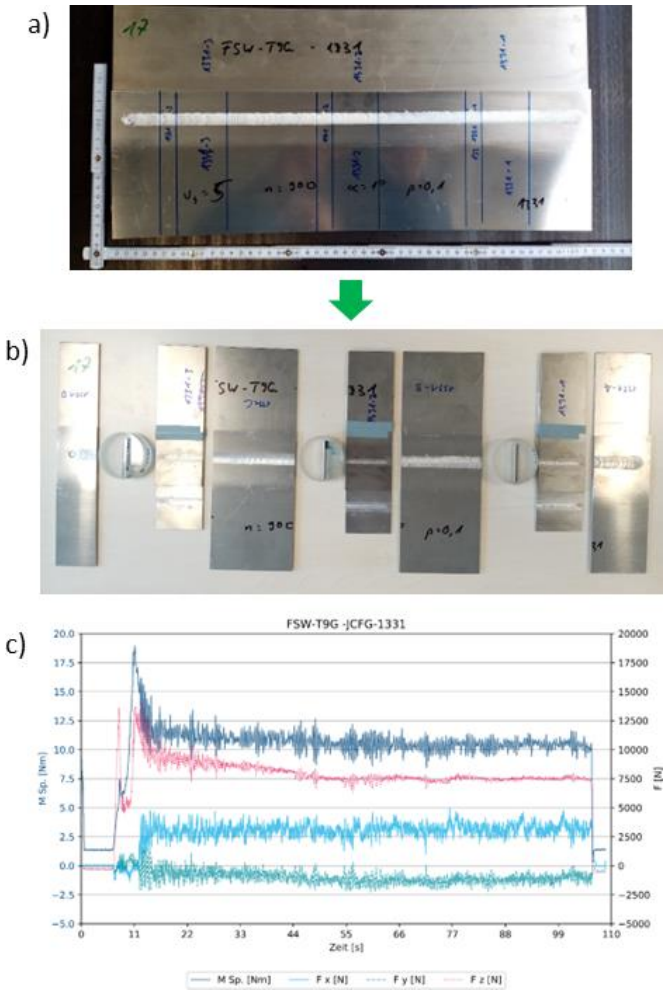
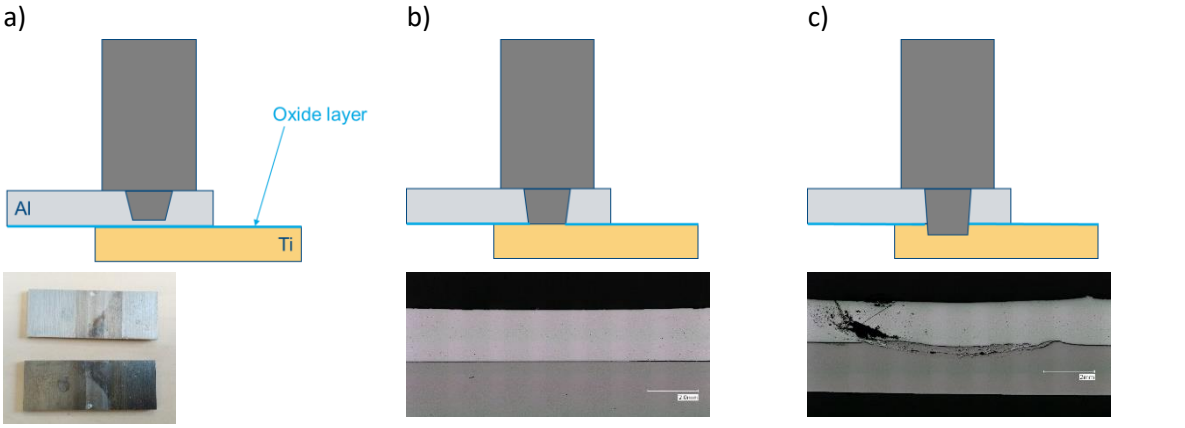


Abbildung 18: Draufsicht Blechversuch FSW Überlappstoß a) mit Übersicht der Probenentnahme zur mechanischen und mikrostrukturellen Charakterisierung b), sowie zugehörige Prozessdatenaufzeichnung des Spindelmoments und der Prozesskräfte c).

Als wesentliche Einflussgrößen konnten bei den Versuchen der Abstand der Werkzeugspitze zur Grenzfläche sowie die Oberflächenvorbereitung des Titans identifiziert werden. Beste Ergebnisse konnten mit einer direkt auf der Titanoberfläche reibenden Werkzeugspitze (siehe Abbildung 19, Konfiguration b) erzielt werden, da hierdurch ein direkter Energieeintrag in der Fügezone erfolgt. Ein Eintauchen des Werkzeuges in das Titan führt dagegen zu einer Überhitzung des Aluminiumwerkstoffs und somit zu volumetrischen Defekten in der Naht (Abbildung 19, Konfiguration c).

Es folgten umfassende Untersuchungen verschiedener Prozessparameter, deren Ergebnisse sich wie folgt zusammenfassen lassen:

- Die Festigkeit der Verbindung verhält sich in etwa proportional zur Drehzahl des Werkzeuges, somit zur maximalen Prozesstemperatur. Oberhalb einer spezifischen Drehzahl kommt es zu einem abrupten Einbruch der Festigkeit, der auf ein partielles Aufschmelzen des Aluminiums und sich daraus ergebende Erstarrungsrisse und Porosität zurückgeführt werden kann.
- Die Schweißgeschwindigkeit nimmt nur geringen, antiproportionalen Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung. Sie wird nach unten durch wirtschaftliche Gesichtspunkte sowie nach oben durch steigende Prozesskräfte beschränkt.



Ungenügende Anbindung bei Abstand zwischen Werkzeug und Titanoberfläche

Defektfreie Fügezone bei Aufliegen der Werkzeugspitze auf der Titanoberfläche

Fügezone bei Eindringen der Werkzeugspitze in das Titan

Abbildung 19: Schematische Prozessstrategien und resultierende Fügebereiche bei a) zu großem Abstand, b) korrektem Abstand und c) zu geringem Abstand von Werkzeugspitze und Titanoberfläche.

- Die axiale Prozesskraft sollte so gewählt sein, dass eine signifikante Reibung der Werkzeugspitze auf der Titanoberfläche erfolgt. Eine übermäßige Steigerung dieser Reibung führt jedoch zur Überhitzung der Fügezone.
- Eine von Walzrückständen und Oxidschichten gereinigte Titan-Oberfläche ist essenzielle Voraussetzung für eine erfolgreiche Schweißung. Die Oberfläche sollte dabei eine möglichst große Ebenheit aufweisen, um flächigen Kontakt mit dem Werkzeug zu erlauben. Das Einbringen von Strukturen zur mechanischen Verklammerung verringerte die Anbindung deutlich.

Aus den betrieblichen Belastungsanforderungen an die Sitzschiene ergeben sich nach Berechnungen von ASA resultierende Lasten in der Fügezone von 430 N/mm. Eine hierfür ausreichende und reproduzierbare Nahtfestigkeit konnte leider nicht erzielt werden. Die gewonnenen Ergebnisse legen den Schluss nah, dass die maximale Prozesstemperatur (bestimmt durch die Solidustemperatur der Aluminiumlegierung (490°C)) die Anbindungsfestigkeit erheblich bestimmt.

Zur Überprüfung dieser These erfolgten eine detaillierte Analyse der Grenzfläche sowie Vergleichsschweißungen unter Verwendung anderer Aluminiumlegierungen. Dabei konnten für EN AW 7050 keine intermetallischen Phasen nachgewiesen werden, welche laut Literatur die Festigkeit der Verbindung negativ beeinflussen können. Die Vergleichsschweißungen (siehe Abbildung 20) ergaben jedoch, dass eine Grenzflächentemperatur über 500°C für eine stabile Anbindung (Versagen der Verbindung im Aluminium-Werkstoff) erforderlich ist (siehe Abbildung 21). Diese Annahme deckt sich mit dem beim Diffusionsschweißen von Aluminium und Titan bekannten Verhalten. Für den Anwendungsfall „hybride Sitzschiene“ wurde daher die Einbringung einer Zwischenschicht aus einer höherschmelzenden Al-Legierung (beispielsweise EN AW 6xxx) zwischen EN AW 7050 und Ti6Al4V empfohlen (Abbildung 22).

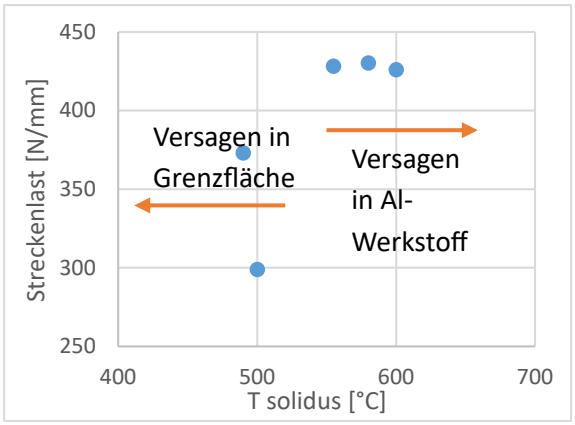


Abbildung 20: Spezifische Festigkeit der Al-Ti-Verbindung in Abhängigkeit von der Solidustemperatur verschiedener Al-Legierungen

Abbildung 21: Bruchverhalten einer EN AW 6056 (Ts = 555 °C) / Ti6Al4V-Probe (oben) und EN AW 7050 (Ts = 490 °C) / Ti6Al4V-Probe (unten) bei gleichen FSW-Schweißparametern

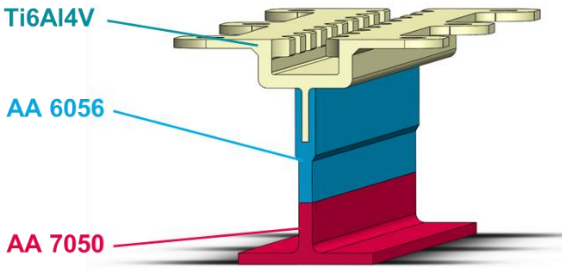


Abbildung 22: Vorschlag einer hybriden Sitzschiene mit Zwischenlage aus höherschmelzender Aluminiumlegierung AA6056

Daher wurde vereinbart, die Fertigung weiterer Prüfkörper unter Substitution der Legierung EN AW 7050 durchzuführen. Aus Gründen der Materialverfügbarkeit wurde hierzu die Legierung EN AW 6013 ausgewählt und das nötige Profil über eine T-Stoß-Schweißung erzeugt. Vorversuche (Abbildung 23) zeigten, dass die erforderliche Linienlast von 430 N/mm mit 930 N/mm (Steg) bzw. 900 N/mm (Hybrid-Verbindung) sicher erreicht wurde, sodass der Fertigung der Demonstratoren (Abbildung 24) seitens ASA zugestimmt wurde.

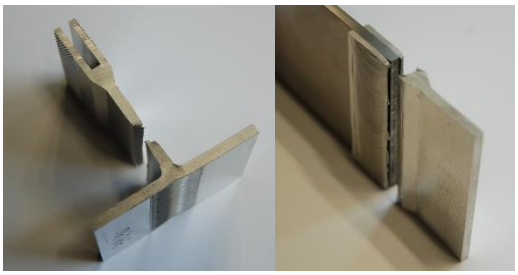


Abbildung 23: Vorversuche zur Fertigung der Sitzschiene mit EN AW 6013: Versagen der Prüfkörper im Grundwerkstoff

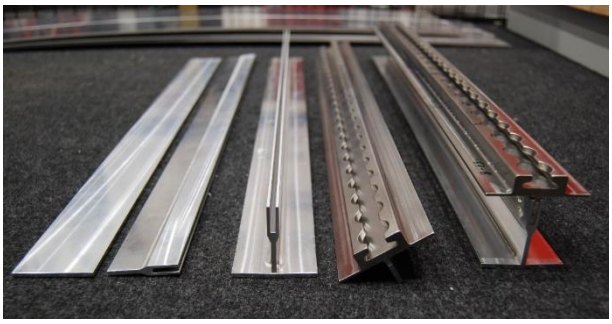


Abbildung 24: Schrittweise Fertigung des Demonstrators "Hybride Sitzschiene 2.0"

Die Ergebnisse der quasistatischen Tests (Auszugs- und Dreipunkt-Biegeversuch) durch ASA zeigten, dass die Anforderungen an das Crashlastverhalten erfüllt werden. Alternativ wurde, basierend auf der Verbindung EN AW 7050 mit Ti6Al4V, ein Verfahren zur Einbringung zusätzlicher mechanischer Verankerungspunkte (siehe

Abbildung 25 und Abbildung 26) in Form von Aluminium-Zylindern entwickelt und erfolgreich umgesetzt. Die Zylinder mit einem Durchmesser von 5 mm erhöhten dabei die Festigkeit um jeweils ca. 8 kN und wurden in einem Abstand von 20 mm eingebracht, sodass die geforderte Festigkeit von mindestens 430 N/mm im Zusammenspiel mit der Anbindung zwischen Aluminium und Titan sicher erreicht werden sollte.

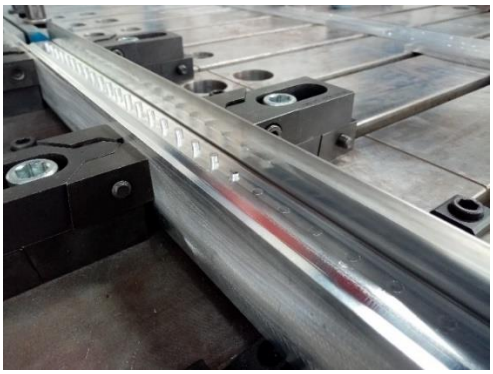


Abbildung 25: Einbringung von Al-Zylindern zur Erhöhung der Scherfestigkeit in der FSW-Verbindung EN AW 7050/Ti6Al4V

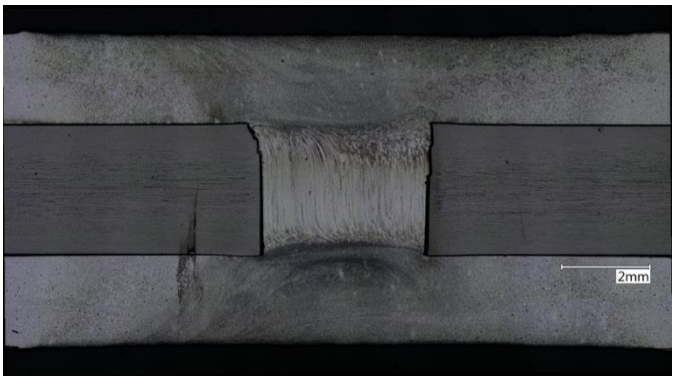


Abbildung 26: Querschliff (geätzt) einer FSW-Doppel-Überlapp-Verbindung aus EN AW 7050/Ti6Al4V/EN AW 7050 mit zusätzlich eingebrachter mechanischer Verankerung

So gefertigte EN AW 7050/Ti6Al4V Prüfkörper wurden ASA zur mechanischen Charakterisierung (siehe Abbildung 27) übersandt und erreichten im mechanischen Test eine Festigkeit von 300 N/mm, welche hinter den Erwartungen zurückblieb. Als Grund hierfür können die geänderten thermischen Bedingungen während des Fügens des Demonstrators (geringere Wärmeableitung) angenommen werden, die durch Adaption der Prozessparameter nicht vollständig auszugleichen waren. Die geforderte Crash-Last von 26,3 kN konnte jedoch sicher abgefangen werden, das Versagen trat erst bei einer Belastung von 40 kN ein.

Demgegenüber erfüllten die aus der Kombination EN AW 6013/Ti6Al4V gefertigten Prüfkörper die gestellten Erwartungen hinsichtlich der Festigkeit an die hybride Verbindung. Bei einer Belastung von 790 N/mm versagte der Aluminium-Untergurt im Bereich der Einspannung (siehe Abbildung 28), ohne dass eine Beschädigung der Aluminium-Titan-Verbindung erkennbar war.

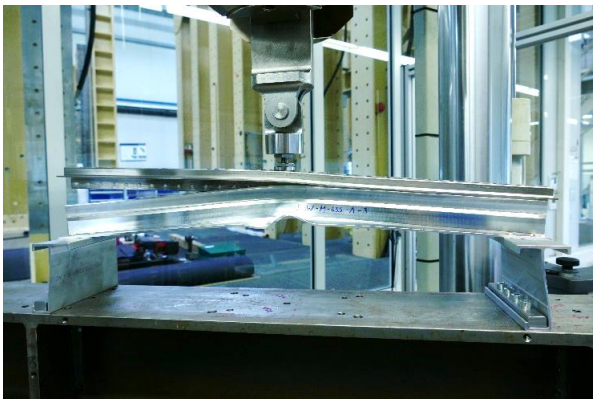


Abbildung 27: EN AW 7050/Ti6Al4V-Sitzschiene im Dreipunkt-Biegeversuch – Versagen der Al-Ti-Verbindung [Airbus Aerostructures]

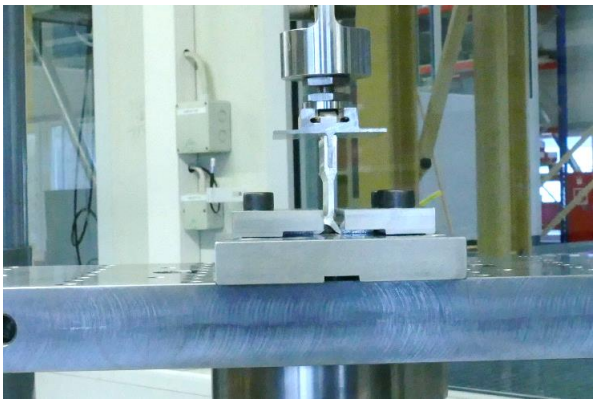


Abbildung 28: EN AW 6013/Ti6Al4V-Sitzschiene im Zugversuch – Versagen im Aluminium-Werkstoff [Airbus Aerostructures]

Eine Untersuchung der zyklischen Eigenschaften der Verbindung erfolgte aus Zeitgründen nicht mehr, zumal bis zum Projektende nicht absehbar war, ob bei Nichtverwendung der hochfesten Legierung EN AW 7050 ein wirtschaftliches Interesse an dieser hybriden Verbindung bestehen kann.

Rippe-Blech-Strukturen

Im Hinblick auf eine möglichst zeitnahe Einführung in die Serienproduktion wurde das Aufbringen von Beulsteifen auf eine Blechbaugruppe aus einer Airbus A320 Hecksektion (Abbildung 29) als Demonstrator-Bauteil ausgewählt. Diese Beulsteifen werden derzeit als Strangpressprofile hergestellt und aufgenietet. Ein Ersatz durch geschweißte Blechsteifen kann sowohl zu einer Gewichts- als auch Kosteneinsparung beitragen. Entsprechend der vorgesehenen Materialstärken wurden seitens Hereon daher Werkstückeinspannungen und Werkzeuge angepasst bzw. neu angefertigt (Abbildung 30).

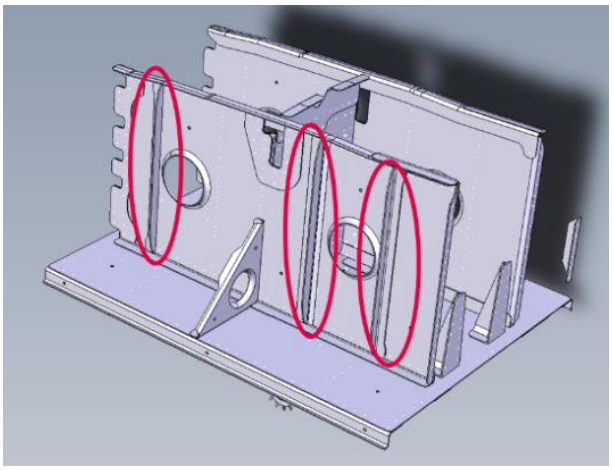


Abbildung 29: Demonstrator Blechbaugruppe aus Airbus A320 Hecksektion mit Beulsteifen (rot markiert)

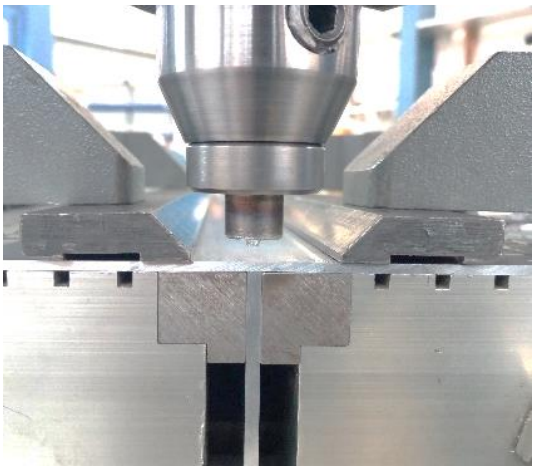


Abbildung 30: Realisierung des Blech-Rippe-Fügeprozesses (T-Stoß)

Es erfolgte eine systematische Parameteruntersuchung in der zuvor definierten Fügekonfiguration (2 mm Hautblech auf 2,5 mm Steife) mittels konventionellem FSW-Prozess. Der Einfluss der Prozessparameter Vorschub, Drehzahl und Axialkraft wurde dabei für EN AW 2024 sowohl in blanker als auch in mit Reinaluminium plattierter Form untersucht. Dabei konnten für denselben Parameterrahmen deutliche Abweichungen im Einfluss der Prozessgrößen beobachtet werden. Während für das plattierte Material ein Optimum der Festigkeit hinsichtlich Drehzahl und Vorschub im untersuchten Bereich (siehe Abbildung 32) festzustellen ist, ist für das blanke Material ein nahezu linearer Einfluss der Prozessparameter auf die Nahteigenschaften erkennbar (Abbildung 31).

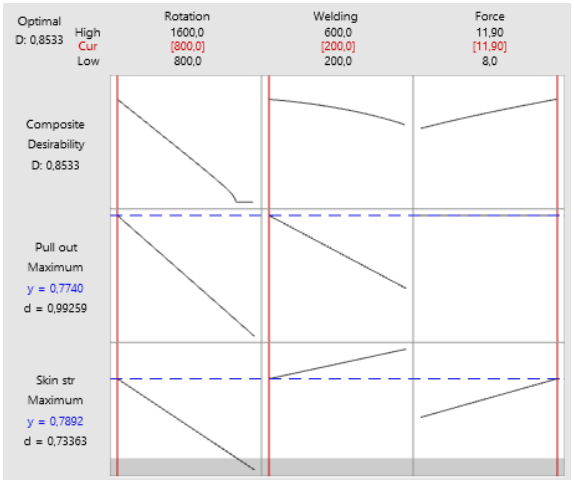


Abbildung 31: Einfluss von (v.l.n.r.) Drehzahl, Vorschub und Axialkraft auf Festigkeit von Haut (unten), Steife (Mitte) und Haut+Steife (oben) für blankes Material

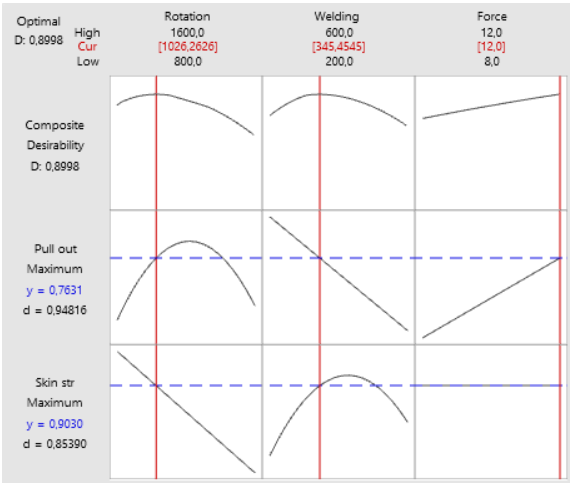


Abbildung 32: Einfluss von (v.l.n.r.) Drehzahl, Vorschub und Axialkraft auf Festigkeit von Haut (unten), Steife (Mitte) und Haut+Steife (oben) für plattiertes Material

Eine Verringerung des Energieeintrags hat dabei für beide Materialien tendenziell einen positiven Effekt auf die Festigkeit des Hautbleches. Dieser wird jedoch durch eine unvollständige Auflösung der Plattierschicht nach unten begrenzt. Hinsichtlich der Anbindung der Steife wirkt sich zusätzlich eine geringe Vorschubgeschwindigkeit positiv aus. Gleichzeitig verursacht die unvollständige Auflösung der Plattierschicht (siehe Abbildung 33) eine Verringerung der Festigkeit im niedrigen Drehzahlbereich.

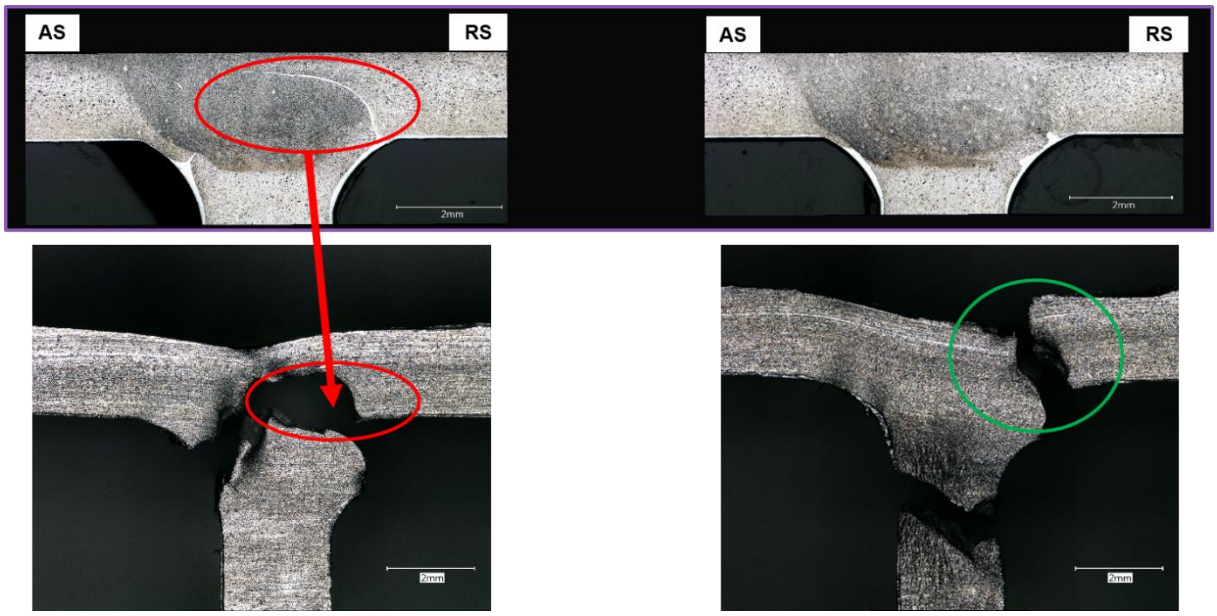


Abbildung 33: Einfluss der Prozessparameter auf die Dispersion der Plattierschicht und das daraus resultierendes Versagensverhalten: Links geringer Energieeintrag (hohe Schweißgeschwindigkeit) und Versagen entlang der deformierten ursprünglichen Grenzfläche (rot markiert), rechts Versagen in der Wärmeeinflusszone (grün markiert) bei nahezu vollständiger Gefügeneubildung

Hinsichtlich einer späteren Anwendung in der Serienfertigung (blankes Material) erscheint eine weitere Verringerung des Vorschubs nicht sinnvoll. Die Verringerung der Werkzeugdrehzahl wurde bis an die prozesstechnischen Grenzen (Abscheren des Werkzeugs) untersucht und zeigte weiterhin steigende Festigkeitswerte. Allen Schweißproben war jedoch gemein, dass sie, wie bereits in früheren Studien

festgestellt, ein unvollständige Durchschweißung auf der Gleichlaufseite (Advancing Side) aufweisen, welche durch Erhöhung des Energieeintrags verringert, jedoch nicht eliminiert werden kann (siehe Abbildung 34). Zur Steigerung der Nahtfestigkeit und Vermeidung dieses Defekts wurde daher das Verfahren der zweimaligen, entgegengesetzten Schweißung (Doppel-Pass-Schweißung) angewandt (siehe Abbildung 35), welches Festigkeitswerte von 88 % des Grundwerkstoffes in Haut- und 94 % in Steifenrichtung (gegenüber 78 bzw. 77 % bei einmaliger Schweißung) ermöglicht.

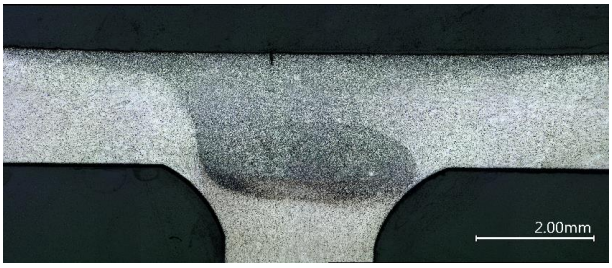


Abbildung 34: Querschliff einer mit einmaliger Schweißung hergestellten Verbindung, unvollständige Anbindung auf der linken Nahtseite

Abbildung 35: Querschliff der T-Stoß-Verbindung (zweimalige, entgegengesetzte Schweißung) mit optimierten Parametern und vollständiger Anbindung des Querschnittes

Mittels der so definierten Prozessparameter wurden im Folgenden FSW-Prüfkörper (Schubproben, siehe Abbildung 36) hergestellt, deren Verhalten durch ASA mit genieteten sowie monolithischen Prüfkörpern verglichen wurde.

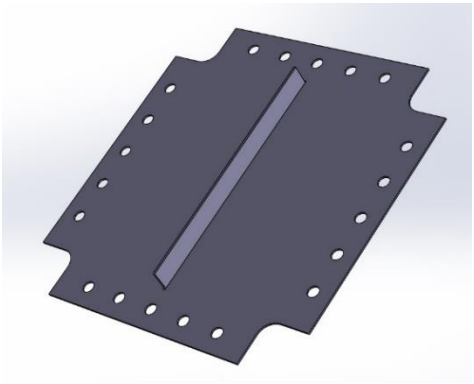
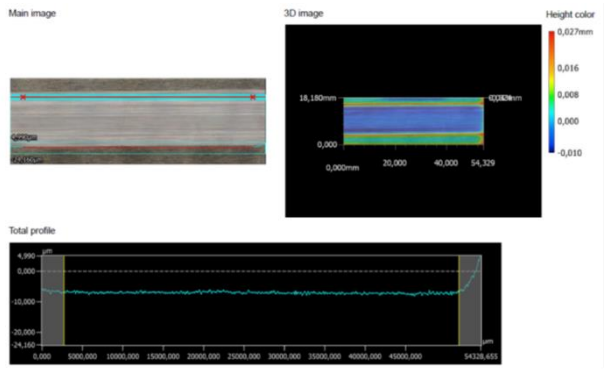


Abbildung 36: Schematische Darstellung Prüfkörper "Schubprobe"

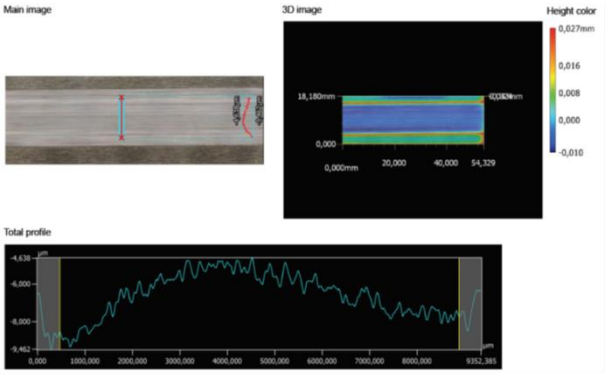
Die FSW-Schubproben zeigten dabei ein der genieteten bzw. monolithischen Struktur ähnliches Versagensverhalten. Ggf. positiv zu bewerten sind hierbei die durch das Schweißen eingebrachten Zugeigenspannungen in der Wurzel der Steife, welche ein Beulen in Richtung der Steife begünstigen. Hierdurch wird die Steife auf Zug beansprucht und einem Knick-Versagen entgegengewirkt. Nach erfolgreicher Fertigung der Prüfkörper (Schubproben) inklusive Einbringung einer Kehlenverrundung von 2 mm im FSW-Prozess ergab sich hinsichtlich Effizienzsteigerung in der Fertigung die Frage, ob auch die Nahtoberseite bereits mit einer den Anforderungen der Anwendung entsprechenden Oberflächengüte hergestellt werden kann. Hinsichtlich der dynamischen Festigkeit werden seitens Airbus für Oberflächen Rauheitswerte von Ra ≤ 6,3 µm bzw. ≤ 3,2 µm gefordert. Es wurden daher Versuche mit einem Festschulter-Werkzeug durchgeführt und, wie in Abbildung 37

und Abbildung 38 dargestellt, die sich ergebenden Rauheitswerte in Nahtlängs- und Querrichtung ermittelt. Die dabei gemessenen Werte von Ra = 1,0 µm bzw. 1,1 µm erfüllen die genannten Anforderungen.



No.	Measurement name	Ave.	Max.	Min.	Std. DV	Unit
1	Ra	0,498	1,043	0,304	0,219	µm
2	Rz	3,124	5,418	2,169	0,892	µm

Abbildung 37: Oberflächenprofil der Festschulter-Schweißnaht in Längsrichtung



No.	Measurement name	Ave.	Max.	Min.	Std. DV	Unit
1	Ra	1,011	1,095	0,965	0,038	µm
2	Rz	4,833	5,377	4,537	0,271	µm

Abbildung 38: Oberflächenprofil der Festschulter-Schweißnaht in Querrichtung

Eine Ermittlung der zyklischen Eigenschaft dieser Verbindung im Projektzeitraum konnte nicht mehr erfolgen, was aktuell auch nicht relevant erscheint, da bei der Auslegung des konkreten Bauteils von einer statischen Last ausgegangen wird. Diese statische Last wurde bei ASA mittels einer speziellen Prüfvorrichtung in die jeweiligen Schubproben eingebracht, siehe beispielhaft an einer FSW-Schubprobe in Abbildung 39 und Abbildung 40.

Abbildung 39: FSW-Schubprobe nach Test von Seite der Beulsteife gesehen mit Anriss im unteren Bereich nahe der per FSW aufgebrachten Beulsteife (rot markiert); diagonales Beulen des Bleches [Airbus Aerostructures].

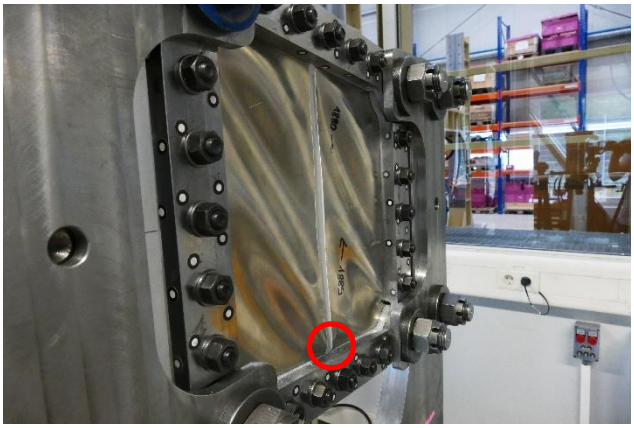


Abbildung 40: FSW-Schubprobe nach Test von der Rückseite gesehen mit Anriss im unteren Bereich nahe der FSW-Naht (rot markiert); diagonales Beulen des Bleches [Airbus Aerostructures].

II.1.3 AP3.3- FS

Im Rahmen des AP3.3 FS wurde als wissenschaftliches Ziel die Beschreibung der Bindungsmechanismen in Al/Ti-Schichten definiert. Hierzu sollten mittels Reibauftragschweißen (friction surfacing, FS) Al-Schichten auf Ti-Substratmaterial aufgetragen werden. Zudem sollte die Implementierung von Robotik-FS für dreidimensionale Aufbauten untersucht werden.

Hinsichtlich ungleichartiger Al/Ti-FS Schichten wurde initial die Bestimmung eines Prozessparameterfensters durchgeführt. Da die erzielten Al/Ti-Schichtdicken im erarbeiteten stabilen, sehr kleinen Prozessfenster eine Charakterisierung und vor allem Quantifizierung der mechanischen Eigenschaften der Anbindung nicht zuließ, wurde ein Mehrschichtaufbau (multi layer friction surfacing, MLFS) bestehend aus zehn Schichten aufgebaut, mit dem durch den Einsatz von Mikroflachzugproben u.a. die mechanischen Eigenschaften der Al/Ti-Grenzfläche bestimmt werden konnte. Um die Bindungsmechanismen bestimmen zu können, wurden neben dem MLFS mit nachgeschalteten Wärmebehandlungen (post weld heat treatment, PWHT) auch Al/Ti-Grenzflächenuntersuchungen durchgeführt. MLFS-Proben zeigten nach PWHT stellenweise eine signifikante Erhöhung der Zugfestigkeit im Vergleich zum nicht wärmebehandelten Zustand. Die Al/Ti-Grenzflächenuntersuchungen mittels REM und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS) zeigten einen Einfluss von Prozessposition sowie PWHT auf eine per REM zu erkennende diffuse Grenzschicht und daraus resultierender mechanischer Eigenschaften.

Ein Transfer der initial ermittelten Al/Al FS-Prozessparameter auf die Hereon Robotik-Schweißanlage wurde durchgeführt. Für diese Übertragbarkeitsuntersuchung wurden die zuvor ermittelten Parameter für einzelne Schichten sowie einen Mehrschichtaufbau an einem Loxin T9000-Roboter getestet. Aufgrund der im Vergleich zur FS-Forschungsanlage geringeren Steifigkeit dieses Systems kam es, vermutlich durch die vom FS-Prozess erzwungenen Anregungsfrequenzen nahe der Eigenfrequenz des Robotik-Systems, zu starken Vibrationen, die u.a. in einer dickeren Schicht resultierten. Diese Vibrationen ließen aufgrund potentieller Schädigung des Robotik-Schweißsystems eine weitere tiefergehende systematische Untersuchung in Hinblick auf das Robotik-FS nicht zu. Diese ersten Versuche zeigten jedoch, dass eine Übertragung der FS-Parameter mit deren Anpassung an die geänderten Randbedingungen z.B. aufgrund der geringeren Steifigkeit des Robotik-Schweißsystems im Verhältnis zur, für die sonstige Prozessentwicklung eingesetzte FS-Forschungsanlage möglich ist. Aus diesem Grund wurde zwar von einer vollumfänglichen Implementierung des FS-Prozesses auf dem Hereon Robotik-Schweißsystem abgesehen, jedoch konnten alle geplanten Untersuchungen an einer steiferen Maschine durchgeführt werden.

Gemäß Projektplan wurden daher im übergeordneten Verbundprojekt im Bereich des Reibauftragschweißens die folgenden Untersuchungsschwerpunkte definiert und bearbeitet:

AP3.3.1 – Artgleiche und Artungleiche FS-Aufbauten aus Al-Legierungen

Artgleiche FS-Aufbauten aus Al-Legierungen

Für das artgleiche Reibauftragschweißen von Al-Legierungen wurde die Legierung EN AW 2024 ausgewählt. Das Bolzenmaterial wurde durch Hereon beschafft, das Material für die Substratplatten von ASA bereitgestellt. Das Substratmaterial besitzt eine Dicke von 4 mm, die verwendeten FS-Bolzen einen Durchmesser von 20 mm sowie eine Länge von 125 mm. Im Rahmen der Untersuchung wurden die Prozessparameter Axialkraft, Drehzahl und Vorschub variiert. Die aufgetragenen Schichten wurden anschließend getrennt, eingebettet, geschliffen sowie poliert und lichtmikroskopisch hinsichtlich der Schichtgeometrie (angebundene Schichtbreite

und Schichtdicke) untersucht. Zusätzlich wurden die Proben einer Härte- sowie Eindringprüfung unterzogen, um den Einfluss der Prozessparameter auf die mechanischen Schichteigenschaften zu überprüfen. Es wurde daher ein statistischer Versuchsplan in Minitab aufgestellt. Die Faktoren des Versuchsplans (Prozessparameter) sowie deren Werte sind in Tabelle 7 dargestellt. Es wurden im Rahmen des Versuchsplans 14 unterschiedliche Parameterkombinationen untersucht.

Tabelle 7: Faktoren des statistischen Versuchsplans für gleichartige sowie ungleichartige Al-FS-Schichten.

	-1	0	1
Axialkraft [kN]	8,5	13,75	19
Drehzahl [1/min]	500	1100	1700
Vorschub [mm/s]	5	7,5	10

Mittels Minitab ist es möglich, eine Optimierung hinsichtlich der untersuchten Größen durchzuführen. Die Lösung der Optimierung (Prozessparameter und erwartete Zielgröße als 95%iges Konfidenzintervall (KI)) ist in Tabelle 8 dargestellt. Die Größe „Beschichtungseffizienz“ gibt an, wie viel Volumen des verbrauchten Bolzenmaterials in der fehlerfreien Hauptanbindungszone auf dem Substratmaterial angebunden ist und kann daher als Kenngröße zur wirtschaftlichen Bewertung eines Auftrags dienen. Mittels (1) lässt sich die Beschichtungseffizienz berechnen:

$$\eta_{dep} = \frac{w_b \cdot t \cdot v}{\pi \cdot r^2 \cdot v_z} \cdot 100\%. \qquad (1)$$

Die Formel setzt sich aus den Größen angebundene Schichtbreite w_b, Schichtdicke t, Vorschub v, Bolzenradius r und dem axialen Bolzenvorschub v_z zusammen.

Zur Auswahl eines geeigneten Parameters für das Testprogramm, wurde eine Optimierung hinsichtlich aller Zielgrößen bei gleicher Gewichtung durchgeführt (Tabelle 9). Lösung 3 wird zunächst als Parameter für die weiteren Untersuchungen ausgewählt, da die prognostizierten Eigenschaften auf Basis der Einzelschicht mit Ausnahme der Schichtdicke am höchsten sind. Mit diesem Parameter wurden anschließend drei MLFS-Stapel (siehe Abbildung 41) aufgebaut. Die ersten beiden MLFS wurden auf einem 4 mm dicken Substratblech, zur Entnahme von Zug- und Ermüdungsproben, aufgetragen. Der dritte Aufbau (25 mm Substrat) dient der Charakterisierung der Anbindungsfestigkeit zwischen Schicht und Substrat. Die Probenmitten sollen der Schicht-Substrat-Grenzfläche entsprechen. Zunächst fand eine Zerspanung der Randbereiche statt, in denen keine Anbindung zwischen MLFS und Substrat vorhanden ist. Dann wurden die Proben zu PAG/ASA versandt, um im Werk in Augsburg eine Ultraschallprüfung durchzuführen. Ziel dieser war es, mögliche Defekte in den Aufbauten effizient zu erkennen und zu quantifizieren, um diese durch eine Anpassung der Prozessparameter im weiteren Projektverlauf zu minimieren/verhindern.

Tabelle 8: Ergebnisse der FS-Parameteroptimierung hinsichtlich einzelner Zielgrößen.

Zielgröße	Axialkraft [kN]	Drehzahl [1/min]	Vorschub [mm/s]	Zielwert (95%-KI)
Maximal angebundene Schichtbreite	19	500	10	17,52; 22,15 [mm]
Schichtdicke	19	500	5	2,34; 2,67 [mm]
Beschichtungseffizienz	19	500	10	31,34; 54,02 [%]
Härte	19	1700	10	138,97; 146,46 [HV 0.2]
Festigkeit	19	1700	5	386,3; 446,3 [MPa]

Tabelle 9: Ergebnisse der Parameteroptimierung hinsichtlich aller Zielgrößen bei gleicher Gewichtung.

Lösung	Axial-kraft [kN]	Dreh-zahl [1/min]	Vorschub [mm/s]	Festigkeit [MPa]	Härte [HV0.2]	Beschichtungs-effizienz [%]	Schicht-dicke [mm]	Schicht-breite [mm]
1	19	742	5	391,7	132,3	27,7	2,3	16,8
2	19	631	5	388,4	131,4	31,1	2,4	16,8
3	8,5	500	10	402,4	136,1	37,0	1,1	17,8

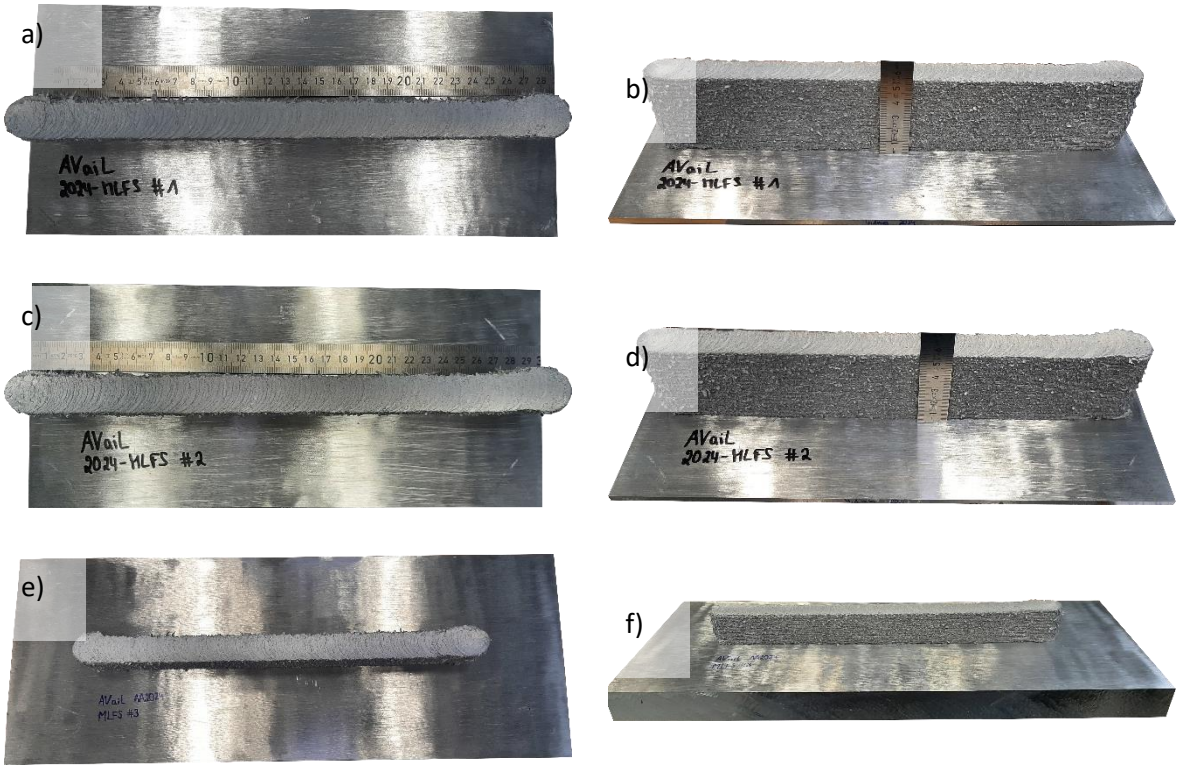
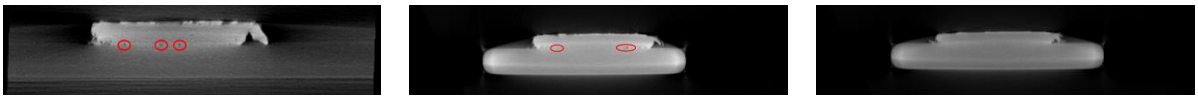


Abbildung 41: MLFS 1, 2, und 3 auf 4 mm a) bis d), respektive 25 mm dickem Substrat, e) und f).

Bei der Ultraschalluntersuchung der MLFS-Stapel wurden Defekte erkannt, die an den Grenzflächen zwischen Substrat und Schicht sowie zwischen Schicht und Schicht außerhalb der dem Reibauftragschweißen inhärenten nicht angebundenen Randbereiche, d.h. in der Hauptanbindungszone, liegen. Aus diesem Grund wurde von einer Entnahme von Proben des mechanischen Testprogramms aus den untersuchten MLFS abgesehen. Der Fokus hingegen wurde zunächst auf die Optimierung der Prozessparameter hinsichtlich der Erzielung defektfreier Aufträge gelegt. Mittels µCT wurden zunächst die Randparameter des Parameterfensters untersucht, wobei sich zeigte, dass eine Erhöhung der Parameter „Drehzahl“ und „Axialkraft“ Defekte in der Anbindungsfläche reduziert, wobei der Parameter „Drehzahl“ den größten Einfluss auf Defekte besitzt. Aus diesem Grund wurde die untere Drehzahlgrenze des Parameterfensters von 500 1/min auf 650 1/min angehoben, um im gesamten Parameterfenster defektfreie Aufträge zu ermöglichen (Abbildung 42).



(a) (b) (c)

Abbildung 42: Querschnitte der µCT-Scans zur Bestimmung der unteren Drehzahlgrenze des FS-Prozessparameterfensters bei konstanter Axialkraft (8,5 kN) und konstantem Vorschub (5 mm/s) für die Drehzahlen 500 1/min (a), 600 1/min (b) und 700 1/min (c). Defekte in der Grenzfläche sind rot umrandet.

In diesem angepassten Parameterfenster wurden zur Bestimmung des Einflusses der Prozessparameter auf die Prozesstemperatur, die Mikrostruktur (Korngröße) sowie die mechanischen (quasi-statischen) Eigenschaften der Aufträge MLFS aufgebaut. Für eine Übersicht der dafür verwendeten Parameter siehe Tabelle 10. Als Charakterisierungsmethoden wurden EBSD sowie Härte- und Zugprüfungen ausgewählt. Die MLFS-Stapel des mechanischen Testprogramms (quasi-statische und dynamische Charakterisierung) wurden in Absprache mit ASA zur Erzielung der maximalen Beschichtungseffizienz mit den folgenden Parametern gefertigt: 19 kN, 650 1/min, 10 mm/s.

Tabelle 10: MLFS-Prozessparameter für Untersuchung mechanischer Eigenschaften.

MLFS-#	Axialkraft [kN]	Drehzahl [1/min]	Vorschub [mm/s]
1	8,5	650	5
2	8,5	1700	5
3	8,5	650	10
4	19	650	5
5	19	1700	10

Die Ergebnisse der Temperaturmessung im Substrat, während der Auftragsprozesse der ersten Schichten, sowie die Korngrößen, gemessen in der Mitte der zweiten Schicht, sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die höchste Temperatur wird durch die Erhöhung der Drehzahl erreicht, wohingegen die geringste Prozesstemperatur für die höchste Vorschubgeschwindigkeit gemessen wurde. Die Korngröße zeigt die gleiche Tendenz, d.h. die höchste Prozesstemperatur resultiert in den größten Körnern, die geringste Temperatur in den kleinsten Korngrößen.

Tabelle 11: Gemessene Temperaturen und Korngrößen der fünf MLFS-Stapel.

MLFS-#	Temperatur [°C]	Korngröße [µm]
1	382,0	1,5 ±0,6
2	450,1	2,5 ±1,2
3	380,6	1,2 ±0,5
4	407,8	2,0 ±0,9
5	441,8	2,3 ±1,1

Die gemessenen Härteverläufe (HV0.1) sind in Abbildung 43 dargestellt. Alle fünf Verläufe sind durch einen deutlichen Abfall der Härte im Bereich des Interfaces, Härtewerte im Bereich von 100-120 HV0.1 in den unteren 80 % Aufbauhöhe der MLFS-Stapel sowie einen erhöhten Härtewert von über 150 HV0.1 in den oberen Bereichen der Stapel charakterisiert. Darüber hinaus ist ein periodischer Verlauf von Härte-Zu- und -Abnahme zu erkennen, der mit den geringeren Korngrößen in den Schicht-Schicht-Interfaces korreliert. Im Substrat sind durch die Härteabnahme im Vergleich zum Grundmaterial (140…150 HV0.1) je nach Wahl des Prozessparameters unterschiedlich tiefe Wärmeeinflusszonen (WEZ) zu erkennen. Die tiefste WEZ existiert für MLFS-2. Für die entsprechende Parameterkombination wurde die höchste Prozesstemperatur gemessen, was zu einer Überalterung der Ausscheidungen in der Mikrostruktur in tieferen Regionen des Substrats führt. Die geringste WEZ-Tiefe weist MLFS-2 auf, wo auch die geringste Prozesstemperatur gemessen wurde.

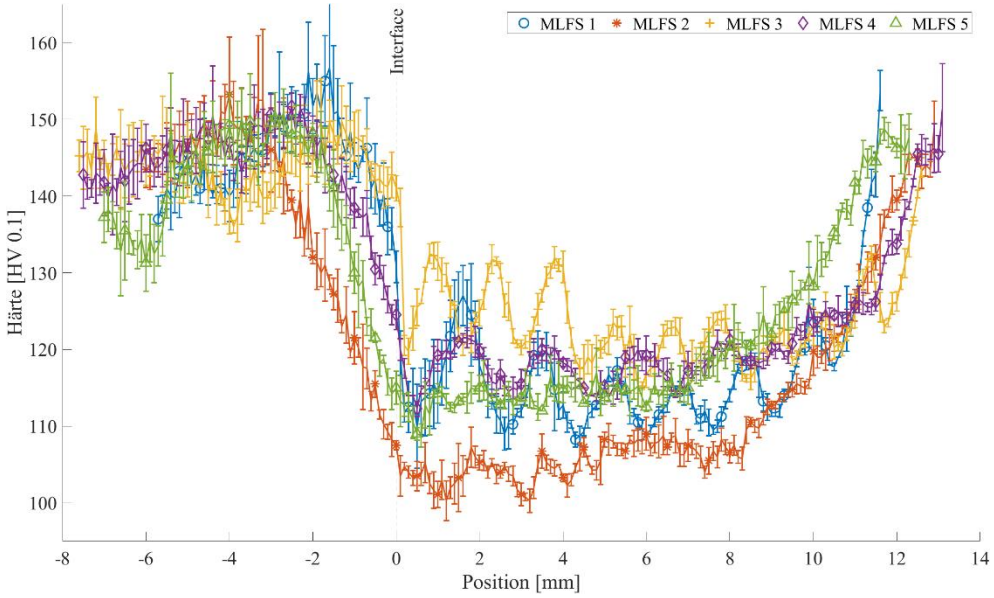


Abbildung 43: Härteverläufe der fünf MLFS von Unterkante des Substrats bis zur Oberkante der MLFS-Stapel.

Die Zugprüfung wurde mittels sogenannter Mikroflachzugproben durchgeführt. Die Geometrie sowie die Entnahmeposition und -orientierung sind in Abbildung 44, die erzielten Festigkeiten in Abbildung 45 dargestellt.

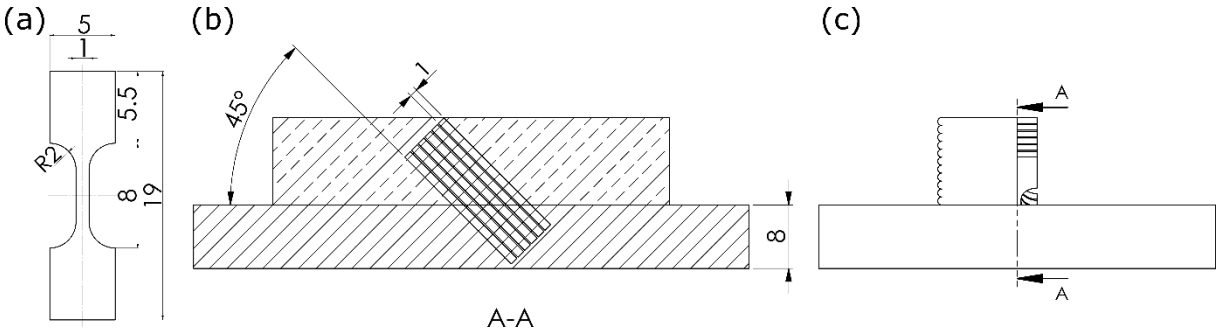


Abbildung 44: Mikroflachzugproben-Geometrie (a) und -Entnahmeposition und -orientierung (b, c).

Durch die 45°-Orientierung der Proben sowie die unterschiedlichen Entnahmehöhen war eine gleichzeitige Charakterisierung der Substrat-Schicht-Interfaces sowie der MLFS-Stapel möglich. Die Tests zeigten, dass im Bereich der Grenzfläche sowohl Festigkeit als auch Dehnung stark abnehmen, was impliziert, dass die Interfaces für die Anwendung des RAS-Prozesses eine Schwachstelle darstellen, die weiterer Untersuchung bedarf. Darüber hinaus zeigte die Variation der Prozessparameter, dass durch eine Erhöhung von Axialkraft und Vorschub höhere Festigkeitswerte erzielt werden können. Die Festigkeiten der Proben, die nur aus dem MLFS-Stapelmaterial bestehen, liegen zwischen 90 und 100 % der Bolzenfestigkeit, wohingegen die Proben, die im Bereich des Substrat-Schicht-Interfaces entnommen wurden, nur zwischen 70 und 93 % liegen.

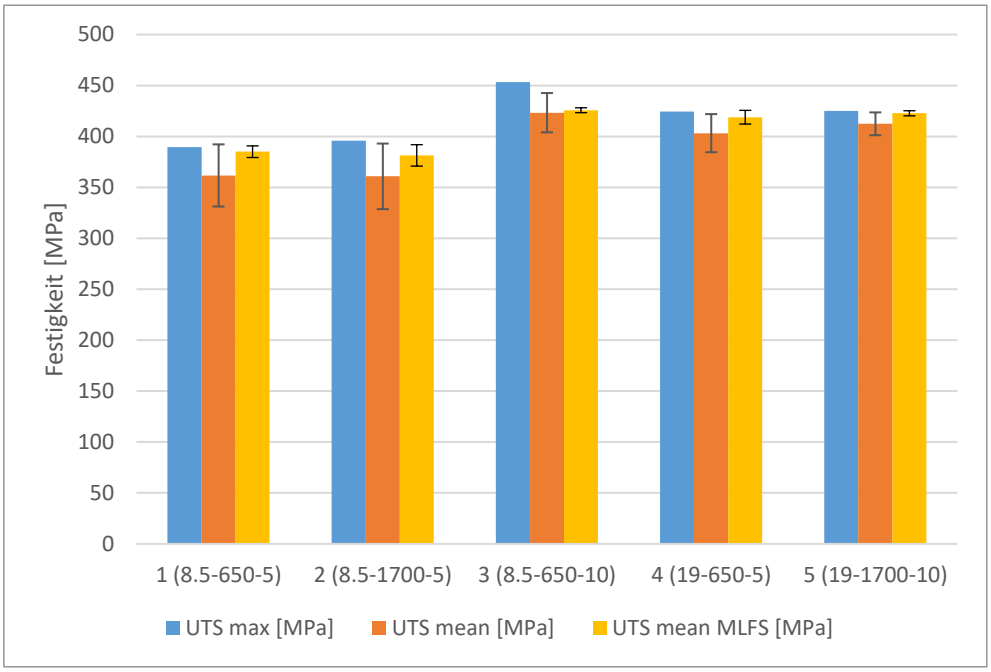


Abbildung 45: Erzielte Festigkeiten der artgleichen Al/Al -MLFS-Stapel.

Aus den MLFS-Stapeln für das mechanische Testprogramm wurden Zugproben aus drei unterschiedlichen Orientierungen zur Untersuchung der Anisotropie und Ermüdungsproben für die Bestimmung der mechanischen Performance entnommen. Die Entnahmepositionen sowie die Probengeometrien können Abbildung 46 bzw. Abbildung 47 entnommen werden.

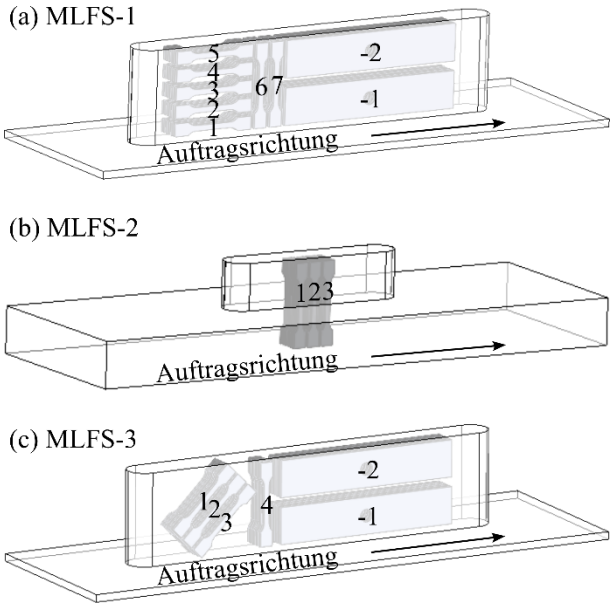


Abbildung 46: Entnahmepositionen der MLFS Zug- (1, 2, 3, 4 und 5) und Ermüdungsproben (-1, -2).

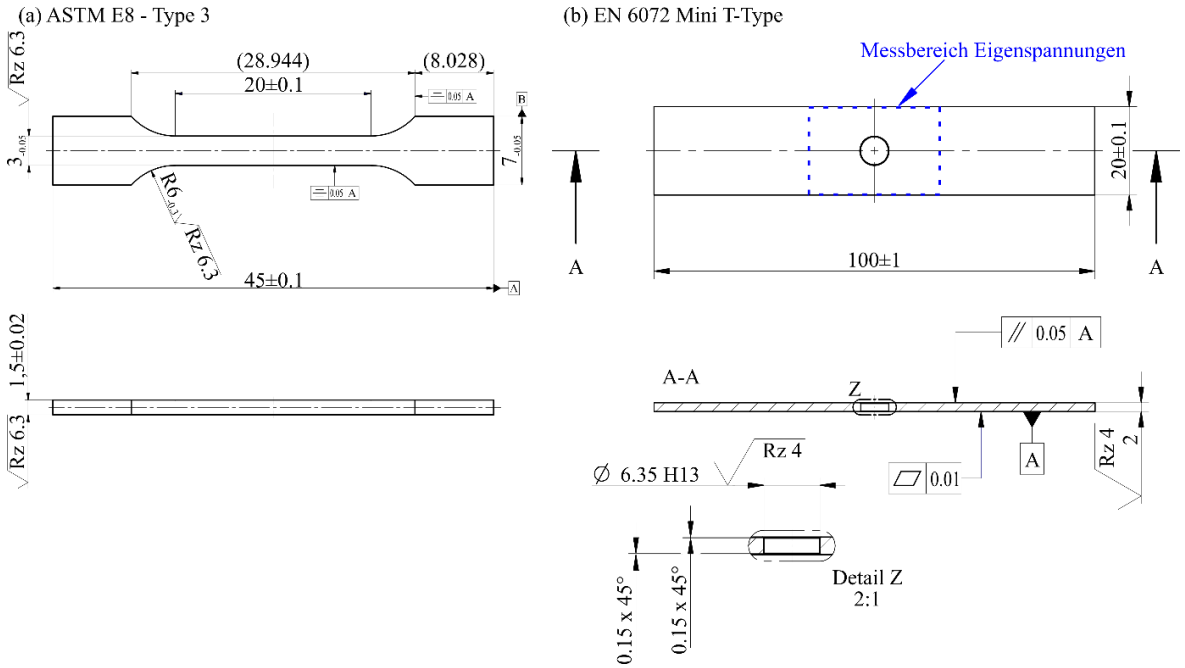


Abbildung 47: Probengeometrien der Zugproben (a) sowie der Ermüdungsproben (b). Zusätzlich ist in (b) der Messbereich der Eigenspannungsmessung eingezeichnet. Alle Angaben sind in mm.

Die Ergebnisse der Anisotropieuntersuchung sind in Form von Boxplots in der nachfolgenden Abbildung 48 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften eine Anisotropie vorliegt. Proben, die aus einer horizontalen Orientierung entnommen wurden, d.h. Proben 1 bis 7 in MLFS-1, weisen höhere Festigkeiten (94-99 % Bolzenfestigkeit) und Bruchdehnungen auf. Für alle anderen Orientierungen sind die Festigkeiten und Dehnungen geringer.

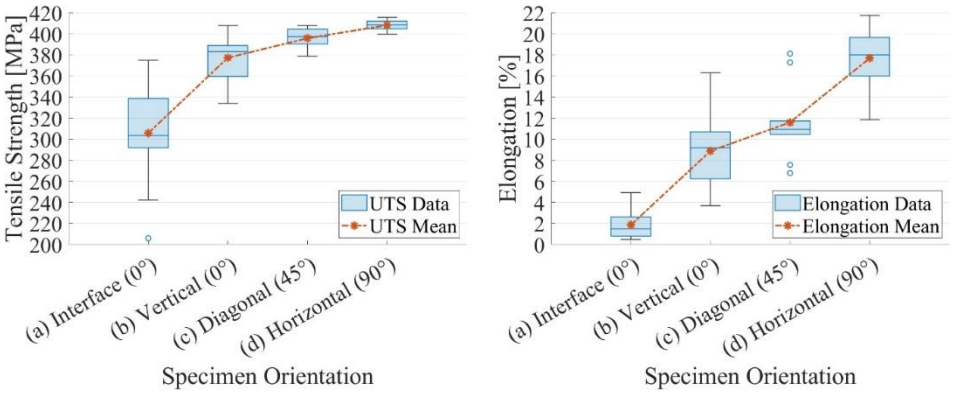


Abbildung 48: Boxplots der Zugfestigkeiten (links) und Bruchdehnungen (rechts) in allen untersuchten Orientierungen.

Begleitend zu den Ermüdungsversuchen wurden stellvertretend für alle Proben die Proben 1-3-1 sowie 1-3-2 auf Eigenspannungen mittels high-energy X-ray diffraction (XRD) untersucht. Die Ergebnisse der Messung sind in Abbildung 49 dargestellt. Der obere Bereich der Proben weist Zugeigenspannungen mit einem Maximum von ~20 MPa in horizontaler Richtung auf, wohingegen im unteren Bereich Druckeigenspannungen des gleichen Betrags vorliegen. Unterschiede zwischen den beiden Entnahmepositionen, d.h. im unteren (-1) und oberen Bereich (-2) des MLFS-Stapels existieren nicht.

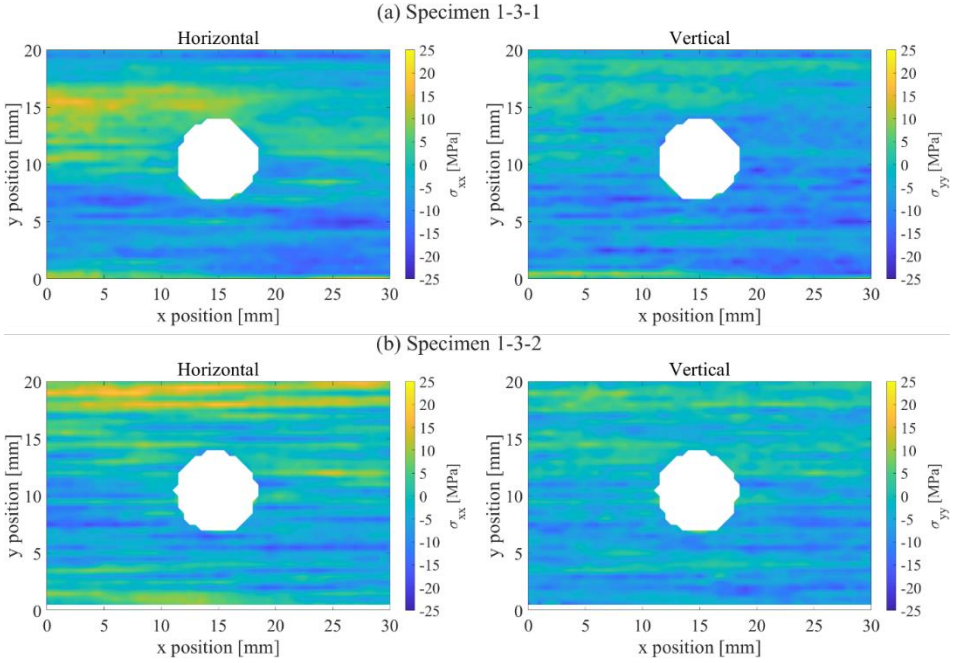


Abbildung 49: Ergebnisse der Eigenspannungsmessung mittels high-energy XRD.

Die Wöhlerkurve der Ermüdungsuntersuchung zeigt, dass im Vergleich zu EN AW 2024-Blechmaterial eine Abnahme der maximal tolerierbaren Spannungen notwendig ist, um die gleiche Lastwechselzahl zu erreichen (Abbildung 50 (a)). Die Überalterung der Mikrostruktur durch die nachfolgenden Prozesse des Schichtaufbaus führen zu dieser Abnahme. Ein ähnliches Ergebnis lässt sich auch für das Rührreibschweißen (FSW) beobachten. Ein Vergleich der Entnahmepositionen -1 und -2 in Abbildung 50 (b) zeigt, dass die Proben aus dem oberen Bereich, aufgrund der geringeren Überalterung, eine bessere mechanische Performance aufweisen.

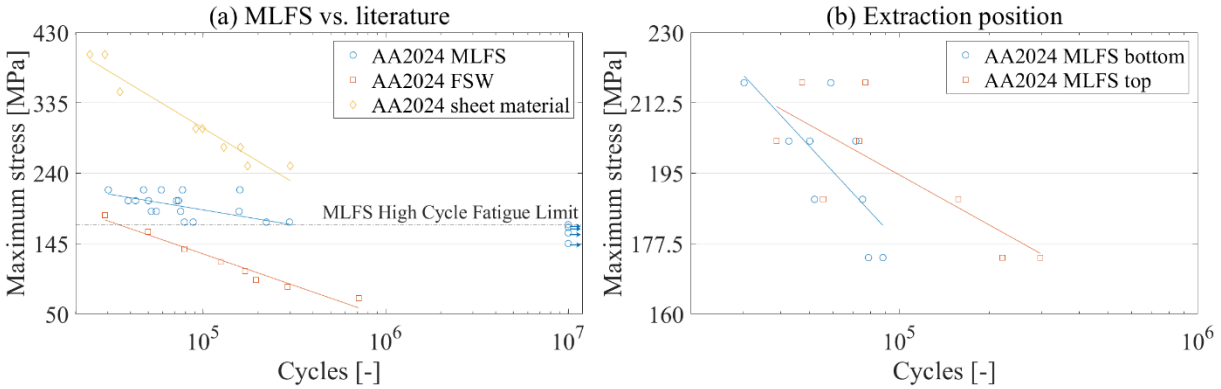


Abbildung 50: Wöhlerkurve der Reibauftragschweißproben im Vergleich mit Literaturwerten (a). (b) zeigt den Vergleich der mechanischen Performance in Abhängigkeit der Entnahmeposition.

Artungleiche FS-Aufbauten aus Al-Legierungen

Für das artungleiche Reibauftragschweißen von Al-Legierungen wurde die Legierung EN AW 2024 als Bolzenmaterial ausgewählt. Das Bolzenmaterial wurde, wie bei den artgleichen Schichten, durch Hereon beschafft. Als Substratplatten wurden durch ASA EN AW 7050-T651-Bleche der Dicke 5 mm bereitgestellt, womit die Parameteruntersuchung durchgeführt wurde. Das Vorgehen in diesem Arbeitsschritt ist analog zu dem der artgleichen FS-Aufbauten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 12: Ergebnisse der artungleichen FS-Parameteroptimierung hinsichtlich einzelner Zielgrößen.

Zielgröße	Axialkraft [kN]	Drehzahl [1/min]	Vorschub [mm/s]	Zielwert (95%-KI)
Defektfreie Anbindungsbreite	19	1700	5	16,34; 25,29 [mm]
Schichtdicke	19	500	5	1,96; 3,27 [mm]
Beschichtungseffizienz	9,9	500	10	23,60; 54,78 [%]
Härte	15,5	1700	9,5	144,84; 151,45 [HV 0.2]
Festigkeit	11,2	1700	10	435,5; 489,0 [MPa]

Tabelle 13: Ergebnisse der artungleichen FS-Parameteroptimierung hinsichtlich aller Zielgrößen bei gleicher Gewichtung.

Lösung	Axial-kraft [kN]	Dreh-zahl [1/min]	Vorschub [mm/s]	Festigkeit [MPa]	Härte [HV 0.2]	Beschichtungs-effizienz [%]	Schicht-dicke [mm]	Schicht-breite [mm]
1	15,2	1300	8,3	421,6	140,7	25,7	1,4	16,8
2	15,3	1380	7,5	421,1	141,4	24,3	1,4	17,1
3	15,4	1170	8,8	418,7	138,4	27,0	1,4	16,8

Während der Defektanalyse der artgleichen FS-Aufbauten wurde die weitere Versuchsdurchführung für die artungleichen Aufbauten pausiert. Im Anschluss daran wurde mit dem Aufbau von AA2024-AA7050-MLFS-Stapel, Parameterauswahl analog zu den artgleichen Aufbauten (Tabelle 10), begonnen. Wie aus Abbildung 51 ersichtlich, wurden die Entnahmeorientierungen und -positionen angepasst, um genauer den Einfluss der Interfaces (a) sowie der Entnahmehöhe (b) untersuchen zu können.

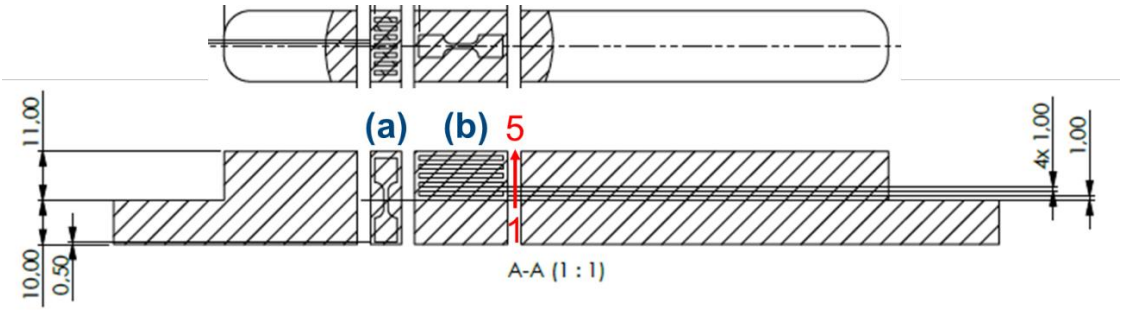


Abbildung 51: Entnahmeposition und -orientierung der Mikroflachzugproben für artungleiche MLFS-Stapel.

Ähnlich wie bei den artgleichen Aufträgen liefern die Interface-Tests durchschnittlich geringere Festigkeiten als die Proben, die aus dem MLFS-Stapel entnommen wurden, Abbildung 52. Es zeigt sich der Trend, dass ein höherer Energieeintrag, z.B. durch höhere Axialkraft oder Drehzahl, zu einer besseren Substrat-Schicht-Interface-Anbindung auf Werte von bis zu 88 % der Bolzenwerkstofffestigkeit (425 MPa) führt. Der Bruch der Proben in dieser Orientierung erfolgte dabei immer im Interface. Die erzielten Festigkeiten für die Proben, die aus den MLFS-Stapeln entnommen wurden, liegen im gleichen Bereich, wie die der artgleichen Untersuchung, sind jedoch etwas höher (94-99 % Bolzenwerkstoff). Dies könnte mit der höheren Wärmeleitfähigkeit des AA7050-Substrats zusammenhängen, welches in einer besseren Wärmeableitung und sowie geringerer Prozesstemperatur resultiert und dadurch einer Überalterung der Mikrostruktur vorbeugt. Die Festigkeiten sind über die Proben 1 bis 4 konstant, was einer Stapelhöhe von ca. 80 % entspricht. Für alle MLFS-Stapel lässt sich ein leichter Anstieg der Festigkeiten für Probe 5 auf Werte um 100 % der Bolzenwerkstofffestigkeit erkennen, Abbildung 53, was dem Verhalten des Härteverlaufs aus Abbildung 43 entspricht.

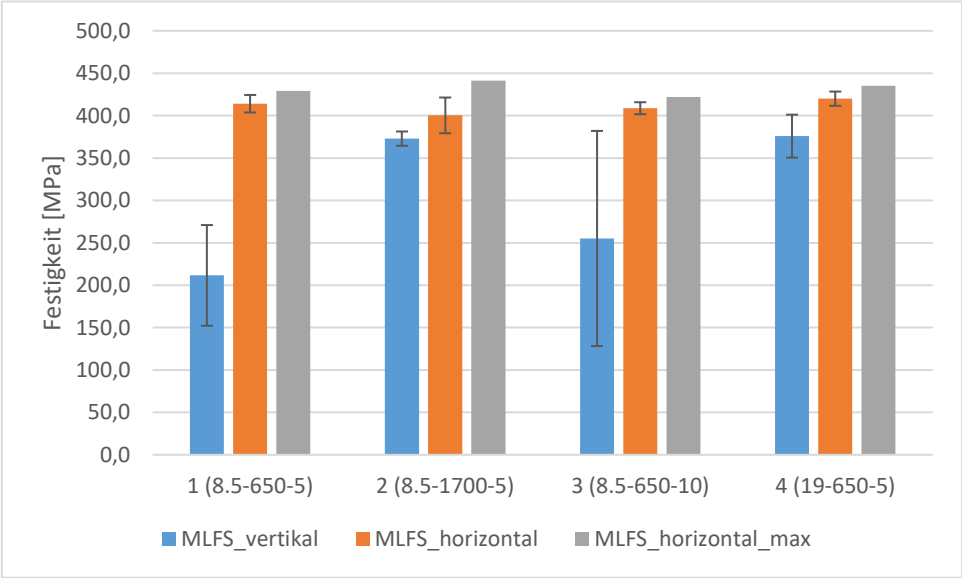


Abbildung 52: Erzielte Festigkeiten der artungleichen MLFS-Stapel.

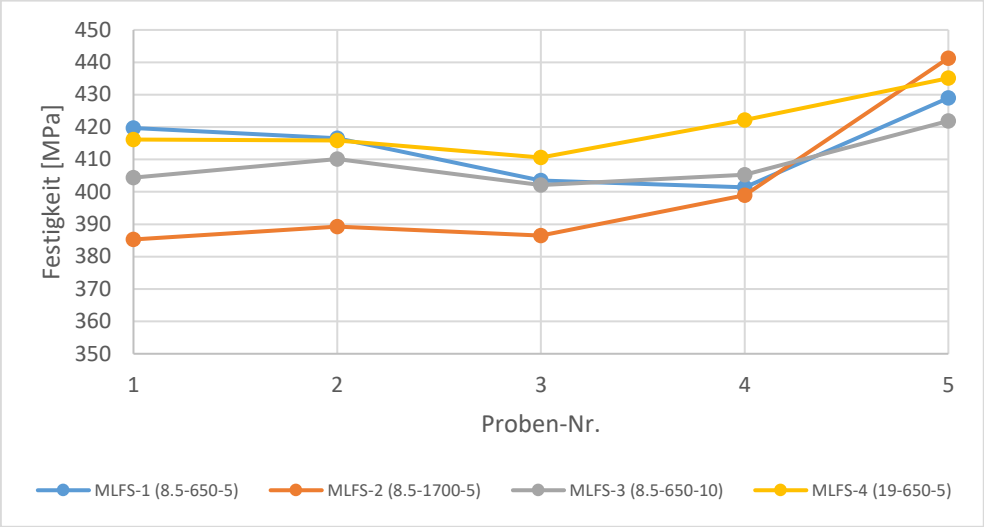


Abbildung 53: Verlauf der Festigkeiten über die Stapelhöhe (Probe 1: niedrigste Position, Probe 5: höchste Position).

AP3.3.2 – Entwicklung von Al-Ti-FS-Aufbauten

Für das artungleiche Reibauftragschweißen von Al- auf Ti-Legierungen wurde die Legierung EN AW 7050 als Bolzenmaterial ausgewählt. Das Bolzenmaterial wurde, wie bei den Al-FS-Schichten, durch Hereon beschafft. Als Substratplatten wurden durch ASA Ti-6Al-4V-Bleche der Dicke 3 mm bereitgestellt.

Wie bereits für die artgleichen FS-Schichten, war auch hier initial die experimentelle Bestimmung eines Prozessfensters, in dem sich FS-Schichtaufträge realisieren lassen. Dabei wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt:

a) hoher Energieeintrag, kurze Prozesszeit:

Bei diesem Ansatz wurden hohe Axialkräfte (8-10 kN) und Drehzahlen (2000-5000 1/min) gewählt, um in kurzer Zeit eine möglichst hohe Prozessenergie zu erzielen. Aufgrund der gewählten Kraft-Drehzahl-Kombination wurde in wenigen Sekunden ein Großteil des Bolzenmaterials verbraucht. Deshalb mussten für den Vorschub Werte größer 6 mm/s gewählt werden, um Auftragsschichten länger als 100 mm zu erzielen. Die Draufsicht einer Schicht ist in Abbildung 54 a) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Breite der Schicht deutliche schwankt und sich Teile der Schicht vom Substrat delaminiert haben. Des Weiteren lassen sich im Querschnitt Bereiche identifizieren, in denen keine vollständige Anbindung zwischen Schicht und Substrat gegeben ist (Abbildung 54 b)). Es ist anzunehmen, dass die Prozesszeit an der entsprechenden Stelle des Substrats (hier: 2 s) nicht genügt, um eine ausreichende (Diffusions)-Anbindung zwischen den beiden Fügepartnern zu ermöglichen.

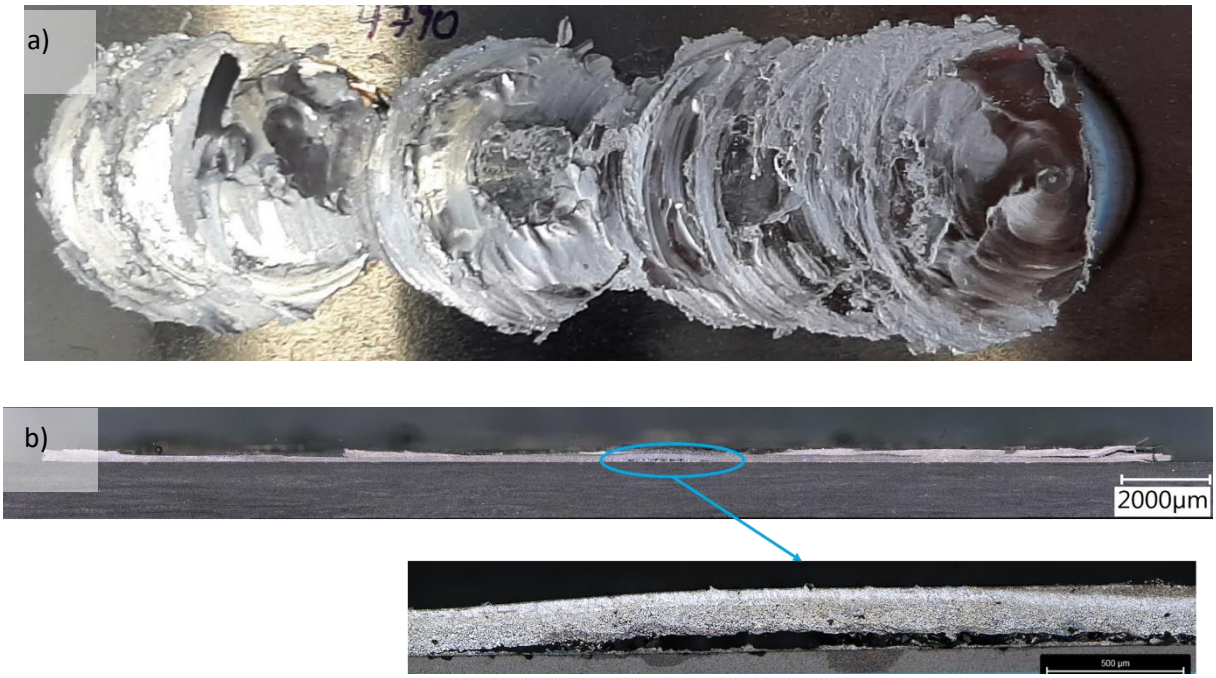


Abbildung 54: Al-Ti-FS-Schicht mit den Parametern 10 kN - 4000 1/min - 10 mm/s: a) Draufsicht, b) Querschnitt mit defektbehafteter Anbindung, i.e. Delamination zwischen Schichtauftrag und Substrat in Schichtmitte.

b) geringerer Energieeintrag, längere Prozesszeit

Der zweite Ansatz verfolgte das Ziel, die Prozesszeit zu erhöhen. Aus diesem Grund werden geringere Vorschübe im Bereich zwischen 1,5 und 2,1 mm/s untersucht. Axialkraft und Drehzahl wurden zwischen 3 und 3,3 kN bzw. 1300 und 1600 1/min variiert. Das Auftragsergebnis einer Schicht ist in Abbildung 55 dargestellt. Es ist eine durchgängige Schicht zu erkennen, die, im Gegensatz zum Schichtauftrag in Abbildung 54 eine relativ homogene Oberfläche sowie gleichmäßige Breite über die gesamte Auftragslänge besitzt.

Abbildung 55: Al-Ti-FS-Schicht mit den Parametern 3,3 kN – 1300 1/min – 1,8 mm/s.

Im weiteren Projektverlauf wird, aufgrund der initialen Bewertung der Schichtqualität, der zweite Ansatz mit geringerem Energieeintrag und längere Prozesszeit weiterverfolgt. Da die mechanische Charakterisierung der Grenzflächenanbindung zwischen dem Ti-Substrat und einer Al-Einzelschicht aufgrund der geringen Schichtdicke (~0,2 mm) nicht trivial ist, wurde alternativ ein Al-Ti-MLFS-Stapel, bestehend aus zehn Aluminiumschichten auf einem Titansubstrat, aufgebaut. Die Höhe des Aluminium-MLFS-Stapelbereichs beträgt ~2,5 mm. Zur Charakterisierung wurden sogenannte Mikro-Tensile (µT)-Proben mit einer maximalen Länge von 5 mm ausgewählt, siehe Abbildung 56. Diese wurden aus dem Interface-Bereich der in Abbildung 57 grün markierten Abschnitte erodiert. Da zwischen Al und Ti die Diffusion einen signifikanten Einfluss auf die Anbindung hat, wurden vier Abschnitte bei zwei Temperaturen (425°C, d.h. Prozesstemperatur, und 455°C) sowie jeweils bei zwei Haltedauern (24 h und 48 h) wärmebehandelt. Die Wärmebehandlung sollte einen

weiteren bzw. längeren Diffusionsprozess simulieren. Die in Abbildung 58 dargestellten Festigkeiten zeigen, dass die Anbindung im Plastifizierungsbereich mit einer minimalen Festigkeit von 150 MPa sowie einer maximalen Festigkeit von 440 MPa am höchsten ist, aber auch die höchste Streuung aufweist. Die Proben, die im as-built-Zustand entnommen wurden, brachen bereits während des Erodierprozesses auseinander, was die geringe initiale Anbindung zwischen Al und Ti nach dem FS-Prozess aufgrund unzureichender Diffusion verdeutlicht. Die wärmebehandelten Proben zeigen, dass eine Festigkeitssteigerung im Vergleich zum as-built-Zustand durch insbesondere längere Zeiten bei Temperaturen im Bereich der Prozesstemperatur möglich ist.

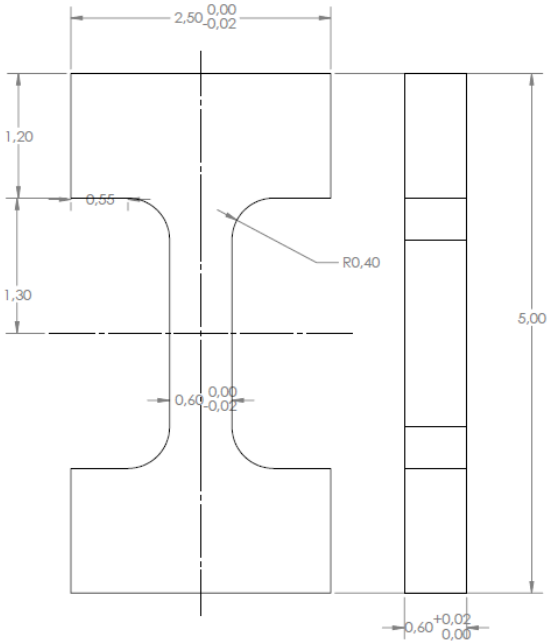


Abbildung 56: µ-Tensile (µT)-Probengeometrie.

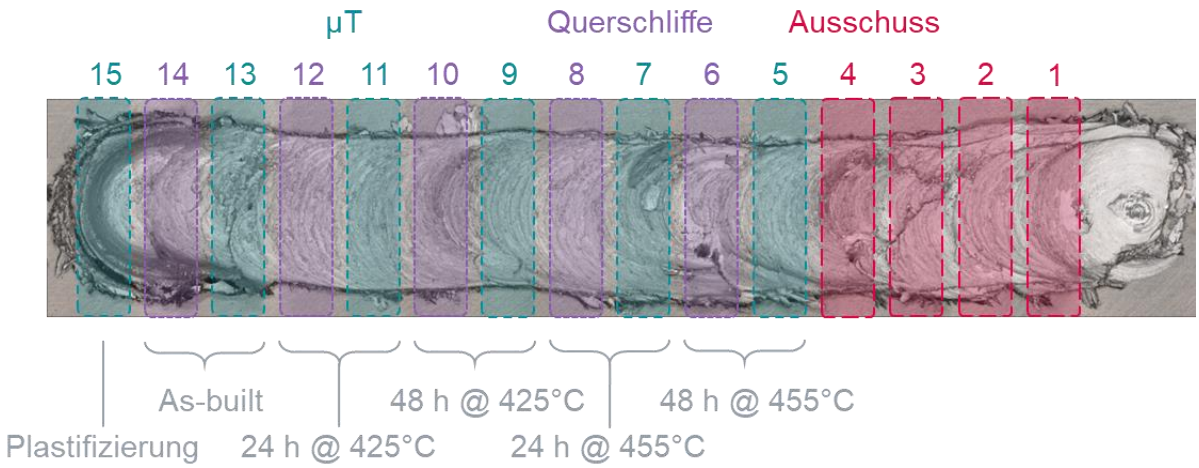


Abbildung 57: Aufteilung der Al-Ti-MLFS-Abschnitte.

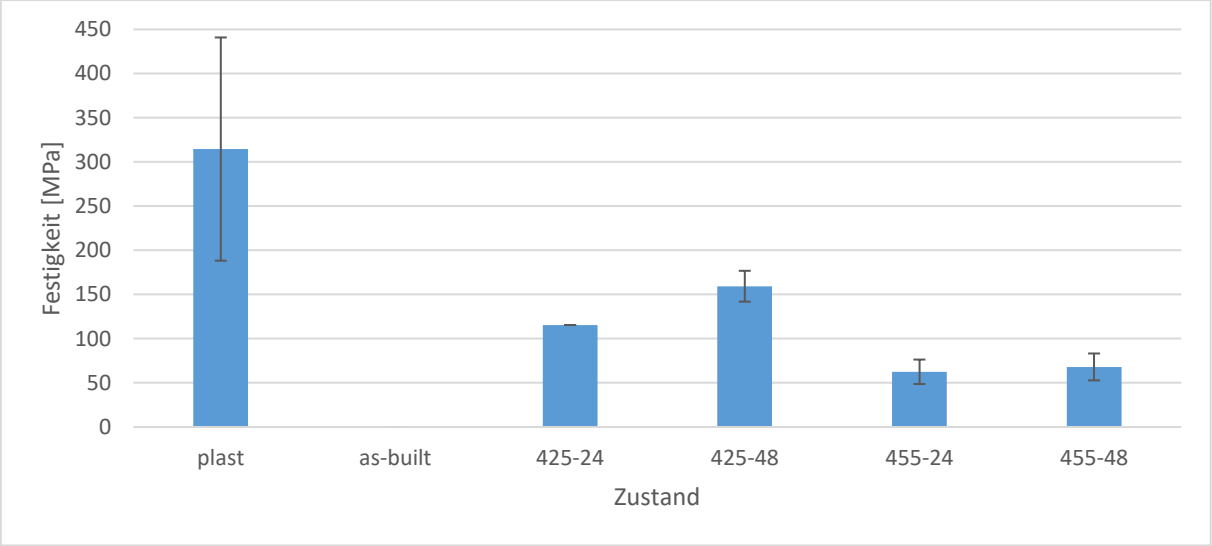


Abbildung 58: Erzielte Festigkeiten der Al-Ti-MLFS-Abschnitte für den Plastifizierungsbereich (plast), wie geschweißt (as-built) sowie bei den Wärmebehandlungstemperaturen und entsprechenden -zeiten, i.e. 425 °C sowie 455 °C über jeweils 24 Minuten und 48 Minuten.

Al / Ti Grenzflächenuntersuchung

Zusätzlich zu den Zugversuchen mittels Mikroflachzug-Proben wurden die Al/Ti-Grenzflächenuntersuchungen mittels REM untersucht. Die Aufnahmen und EDS-Scans sind in Abbildung 59 bis Abbildung 63 dargestellt. Der Vergleich von Abbildung 59 (Probe aus Plastifizierungsbereich) und Abbildung 60 (Probe im as-built Zustand) zeigt, dass in beiden Querschliffen mittels REM keine intermetallischen Phasen (intermetallic compound, IMC) mit einem diffusen hell-dunkel Übergang als Indikator für eine Diffusionsschicht zu erkennen sind. Stattdessen ist ein direkter Übergang vom Ti-Substrat (hell) zur Al-Schicht (dunkel) zu sehen.

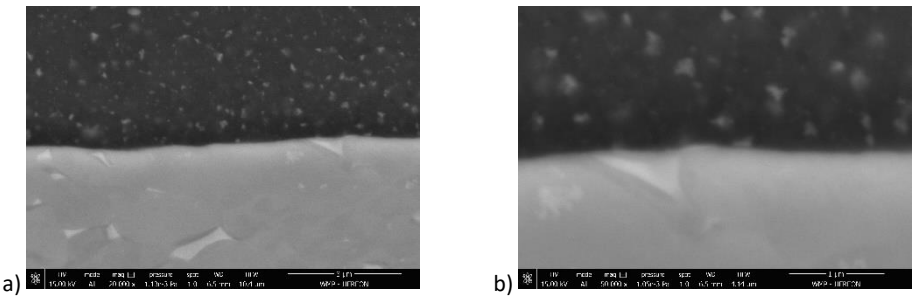


Abbildung 59: Al/Ti-Grenzfläche von Probe entnommen aus dem Plastifizierungsbereich des MLFS-Stapels, bei einer Vergrößerung von 20.000, a) und 50.000, b).

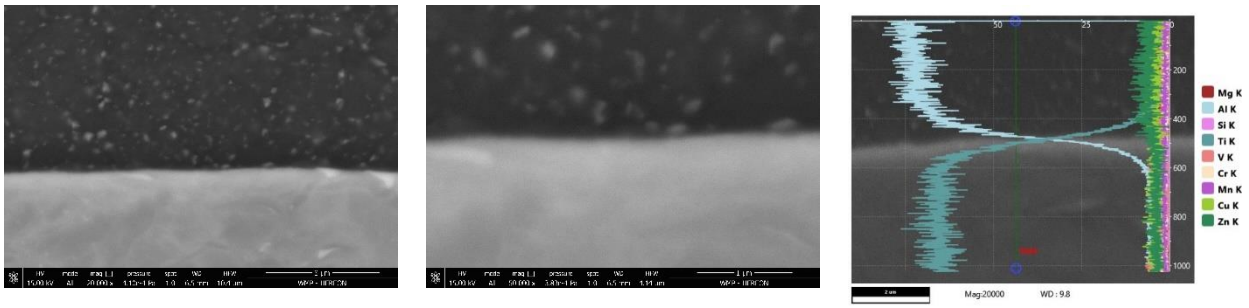


Abbildung 60: Al/Ti-Grenzfläche von Probe 14 (as-built) des MLFS-Stapels, bei einer Vergrößerung von 20.000 (links) und 50.000 (mittig) sowie das Ergebnis eines EDS-Linienscans (rechts).

Aufgrund der in den Zugversuchen erzielten Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass die höhere Prozesszeit im Plastifizierungsbereich im Vergleich zum Schichtauftragsbereich zu einem Diffusionsbereich und damit zu einer metallischen Anbindung geführt hat. Da jedoch der Nachweis einer Diffusion mittels REM nicht geführt werden kann, lässt sich dieses für beide Fälle nicht nachweisen. Für eine finale Aussage benötigt es höherauflösende Analysemethoden, wie beispielsweise die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM). Erst für längere Prozesszeiten, die durch die Wärmebehandlungen bei 425°C und 455°C für 24 bzw. 48 h simuliert wurden, lassen sich unterschiedlich dicke, diffuse Übergänge und somit möglicherweise Diffusionsschichten an der Grenzfläche auch mittels REM nachweisen (siehe Abbildung 61 bis Abbildung 63). Demnach sind die dicksten Schichten für die wärmebehandelten Proben bei 455°C zu erkennen. Durch Vergleich der diffusen Grenzflächendicken mit den Zugversuch-Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass die Zugproben, die keine (Proben im as-built Zustand) oder eine vergleichsweise dicke diffuse Schicht (455°C Proben) aufweisen, geringere Festigkeiten haben als Proben, bei denen die diffusen Schichten eine mittlere Dicke aufweisen (425°C Proben).

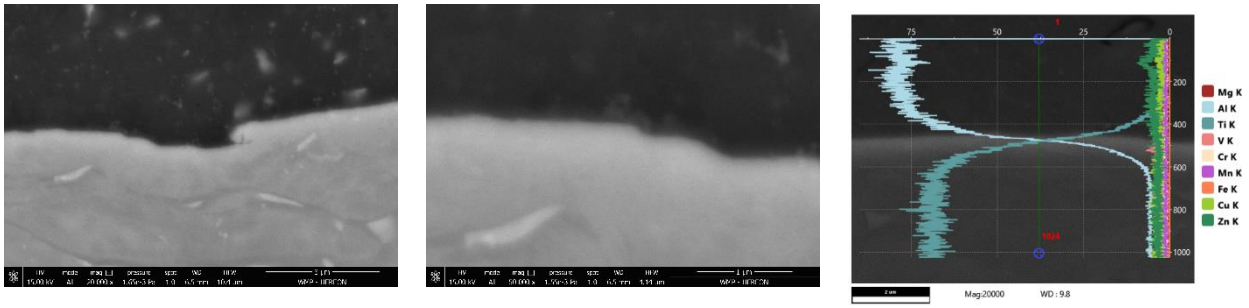


Abbildung 61: Al/Ti-Grenzfläche von Probe 12 (24 h @ 425°C) des MLFS-Stapels, bei einer Vergrößerung von 20.000 (links) und 50.000 (mittig) sowie das Ergebnis eines EDS-Linienscans (rechts).

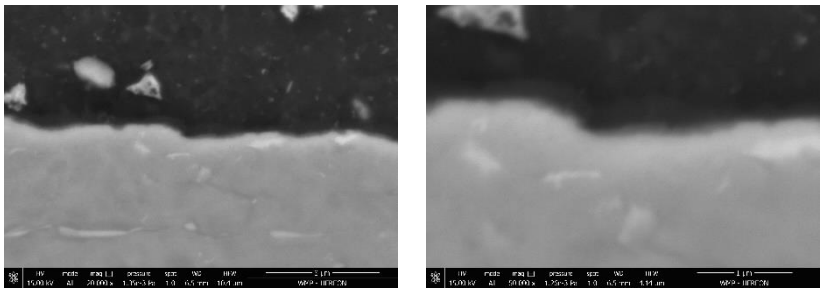


Abbildung 62: Al/Ti-Grenzfläche von Probe 10 (48 h @ 425°C) des MLFS-Stapels, bei einer Vergrößerung von 20.000 (links) und 50.000 (rechts).

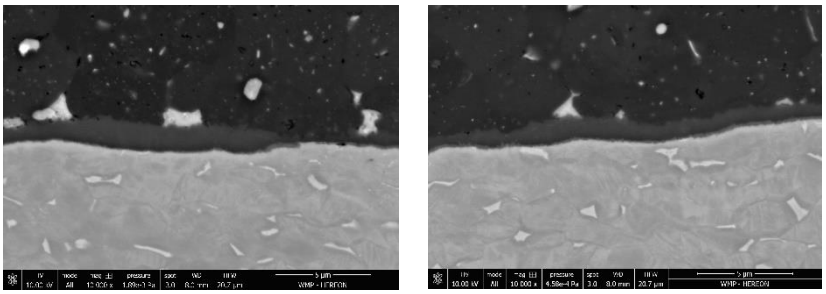


Abbildung 63: Al/Ti-Grenzflächen von Probe 8 (24 h @ 455°C; links) und Probe 6 (48 h @ 455°C; rechts) bei einer Vergrößerung von 10.000.

Die vorliegenden Ergebnisse stimmen mit denen in der Literatur überein, bei denen z.B. von Fuji et al. [1] und Kim et al. [2] nachgewiesen wurde, dass es für unterschiedliche Materialkombinationen ideale Dickenbereiche von IMC gibt, bei denen die mechanischen Festigkeiten maximal sind, wohingegen geringere oder größere IMC-Dicken zu niedrigeren Festigkeiten führen.

AP3.3.3 – Robotik-FS

Für das Robotik-FS wurden Übertragbarkeitsversuche zwischen der FS-Forschungsanlage und einem Robotik-System durchgeführt. Als Parameter wurde 8,5 kN Axialkraft, 1500 1/min und 1100 1/min Drehzahl während Plastifizierung bzw. dem Schichtauftrag mit einem Vorschub von 5 mm/s ausgewählt. Die Querschliffe der aufgetragenen Schichten sind in Abbildung 64 dargestellt. In beiden Fällen beträgt die Schichtbreite 19,8 mm, jedoch ist die Schicht, die auf der Forschungsanlage aufgetragen wurde, nur 0,9 mm dick. Die mit dem Robotik-System aufgetragene Schicht ist 1,3 mm dick. Dies liegt an der geringen Steifigkeit des Robotik Systems und der trägeren Kraftregelung, wodurch es, neben den schon beschriebenen Axialschwingungen zu Kraftschwankungen in horizontaler Richtung kommt, die in Pendelbewegungen des Bolzens resultieren. Der Einsatz anderer FS-Prozessparameter führte nicht zu einer Abnahme der Kraftschwankungen, so dass die Thematik Robotik-FS nicht weiterverfolgt wurde.

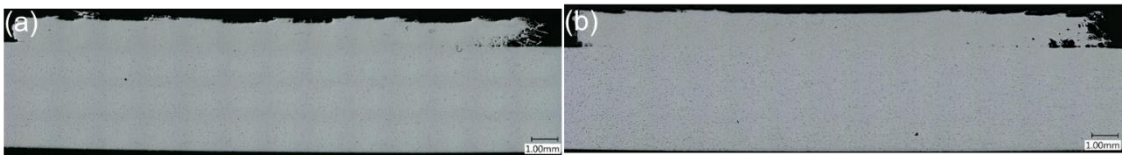


Abbildung 64: Querschliffe der Schichten aufgetragen mit gleichen FS-Parametern resultiert in dünner Schicht (t = 0,9 mm) an der FS-Forschungsanlage (a) sowie dickerer Schicht (t = 1,3 mm) am Robotik-System (b).

Referenzen

[1] Fuji, A., Ameyama, K. & North, T.H. Influence of silicon in aluminium on the mechanical properties of titanium/aluminium friction joints. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 30, 5185–5191 (1995). https://doi.org/10.1007/BF00356068.

[2] Kim Y-C, Fuji A. Factors dominating joint characteristics in Ti – Al friction welds. Science and Technology of Welding and Joining. 2002;7(3):149-154. doi:10.1179/136217102225004185.

II.2.4 AP6.2- Validatoren

Wie weiter oben in AP3.1 und AP3.3 beschrieben, sollten im Rahmen von AP6.2 als technologisches Ziel mit den entwickelten FSW/SSFSW-, rFSSW- sowie FS-Verfahren Demonstratoren (Validatoren) hergestellt werden.

Bei den mit den FSW/SSFSW-Verfahren hergestellten Validatoren handelte es sich im Bereich der Al/Ti-Mischverbindungen um eine Variante einer hybriden Sitzschiene, die mittels anderer Fügeverfahren schon seit einigen Jahrzehnten im Fokus der Luftfahrtzeughersteller steht, jedoch bis heute technisch nicht realisiert werden kann.

Im AVaiL-DE Projekt konnte durch den gewählten Ansatz über die Festphase-Fügeprozesse FSW/SSFSW zum ersten Mal ein solches Strukturbauteile erzeugt werden, siehe Abbildung 65, welches den mechanischen Anforderungen des Anwendungsfalles nicht nur genügte, sondern diese übertraf.

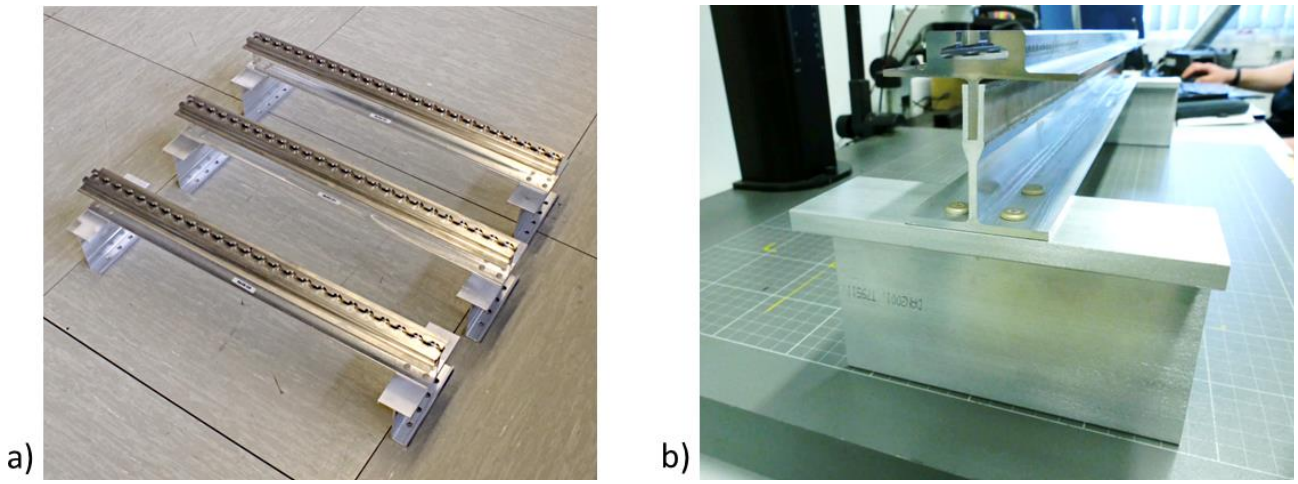


Abbildung 65: a) Drei der 635 mm langen Al/Ti FSW hybride Sitzschiene-Validatoren auf Einspannträgern montiert und b) einer der hybriden Sitzschiene-Validatoren während der mechanischen Charakterisierung bei ASA [Airbus Aerostructures].

Im Hinblick auf eine möglichst zeitnahe Einführung in eine Serienproduktion wurde im Bereich Al/Al FSW-Verbindungen das Aufbringen von Beulsteifen auf eine Blechbaugruppe aus der Airbus A320 Hecksektion als Validator gewählt. Ein Vergleich der mechanischen Eigenschaften von monolithischer, genieteter sowie SSFSW-geschweißter Struktur zeigte ähnlich hohe Festigkeiten und ähnliche Versagensverhalten. Die mechanische Charakterisierung wurde an entsprechenden Schubblechproben, siehe Abbildung 66, die diesen Anwendungsfall gut repräsentieren, durchgeführt.

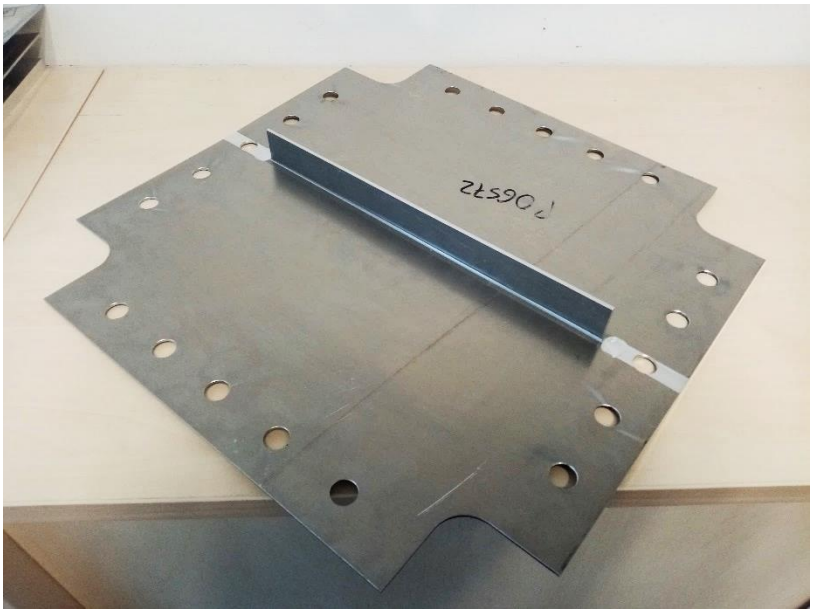


Abbildung 66: Aluminium FSW-Schubblechprobe für den Anwendungsfall des Aufbringens von Beulsteifen auf eine Blechbaugruppe aus einer Airbus A320 Hecksektion.

Wie zu Beginn des rFSSW-Kapitels beschrieben, wurde für das rFSSW-Verfahren als potentieller Use-Case ein typischer Blechspant aus einem Airbus A330 ausgewählt. Eine Anzahl dieser Frames wurde mit der Verschleißoptimierten rFSSW-Werkzeugkonfiguration bei Hereon geschweißt, wobei ein Werkzeug erfolgreich für alle Reibpunktschweißungen eingesetzt wurde. Die Schweißungen wurden, entsprechend den Anforderungen des Use-Cases, siehe Abbildung 67, größtenteils mit Dichtmittel gefügt, ohne einen negativen Einfluss auf die Standzeit des Werkzeuges zu haben.

Abbildung 67: Detail eines der mit optimiertem rFSSW-Werkzeug geschweißtem Aluminium/Aluminium rFSSW-Validatoren (typischer Blechspant aus einem Airbus A330), mit Dichtmittel (sealant) gefügt.

Die Entwicklung des FS-Verfahrens resultierte in der Herstellung von Validatoren in den Bereichen A330 Cargo Floor Cross Beam (struktureller Querträger) sowie einem typischen Blechspant aus einem Airbus A330. Hierfür wurden mittels FS auf einer Anzahl Cross Beams sogenannte Pad-Ups (Abstandhalter bzw. Auflager), siehe Abbildung 68 und Abbildung 69 sowie auf den Blechspanten lokale Verstärkungen, siehe Abbildung 70 und Abbildung 71, zum Einleiten erhöhter Kräfte in die Struktur, aufgebracht. Für beide Validatoren wurden sowohl die Schichtaufträge, als auch die spanende Nachbearbeitung auf Endkontur am Hereon durchgeführt.

Die Festigkeitsberechnungen und resultierenden notwendigen Dimensionen und Positionen der FS-Schichtauftragsbereiche für den typischen Blechspant wurden durch den Projektpartner ASA durchgeführt.

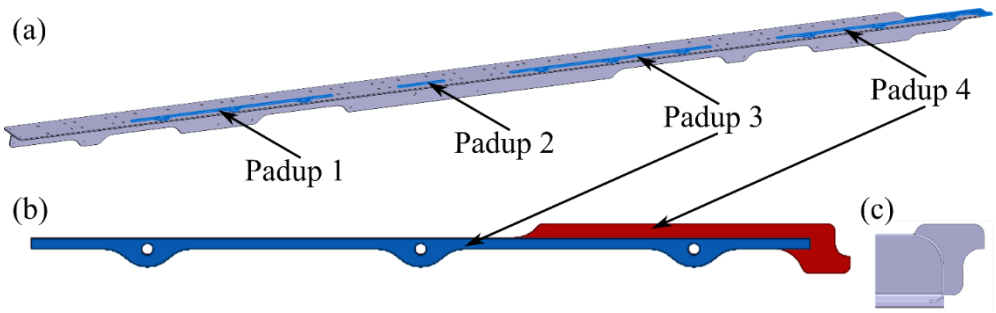


Abbildung 68 : Schematische Darstellung des Querträgers im A330 Frachtboden mit angebrachten Padups (a). Die Geometrie von Padup 4 (rot) umfasst die Geometrie von Padup 1/3 (blau) (b), sowie einen überhängenden Bereich, der in (c) von der Unterseite aus dargestellt ist.

Abbildung 69 : Fotos der A330-Querträger mit per FS aufgetragenen Padups (a) und nach der Fräsbearbeitung auf Endkontur (b).

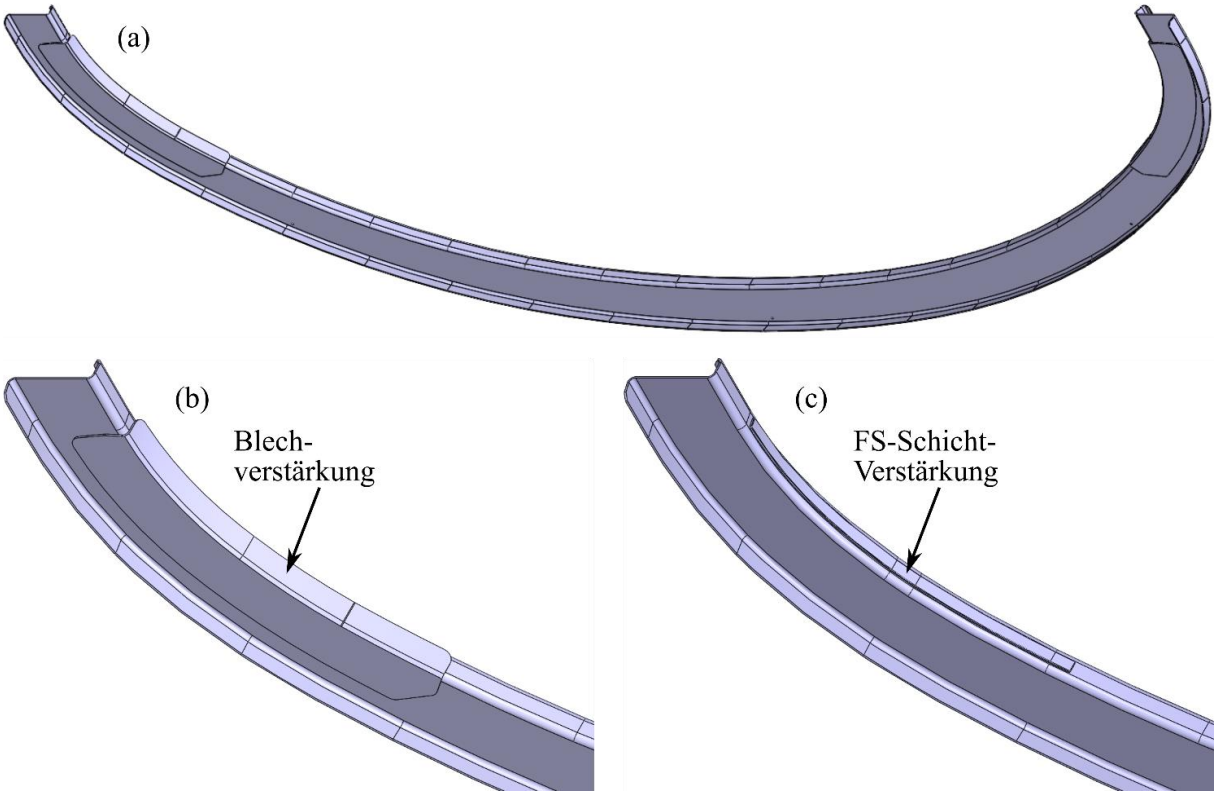


Abbildung 70 : Schematische Darstellungen eines typischen Blechspants aus Airbus A330 (a) mit lokalen Verstärkungen in der konventionellen Konfiguration mit vernietetem Blechmaterial (b) und in der FS-Konfiguration mit aufgetragener FS-Schicht (c).

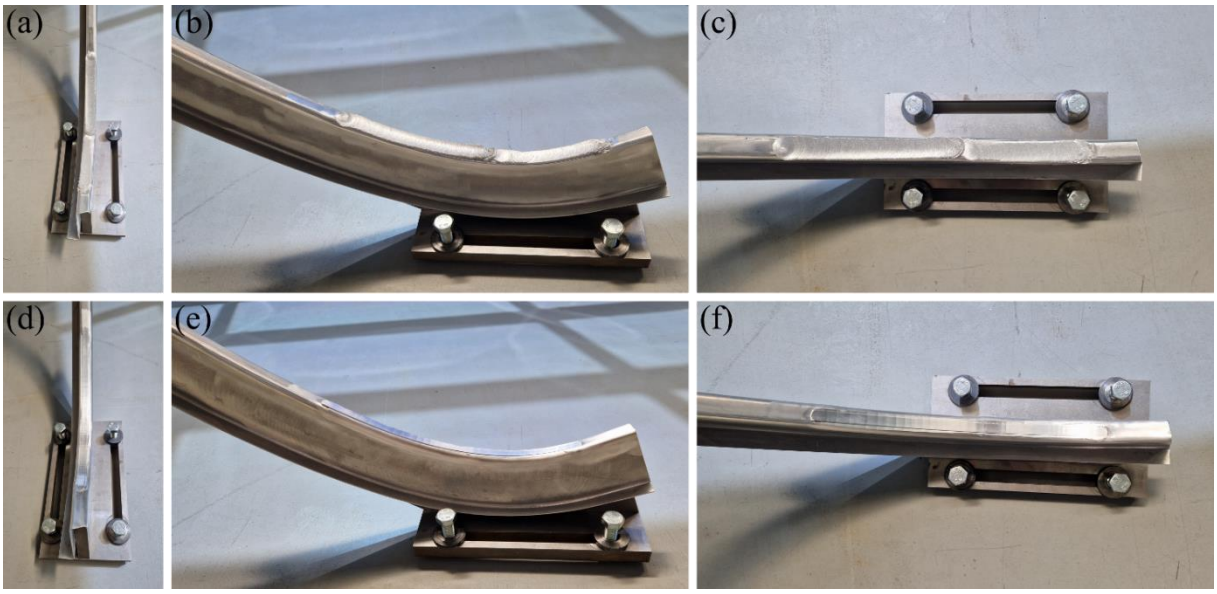


Abbildung 71 : Typischer Blechspant aus Airbus A330 mit FS-prozesstechnisch aufgetragener lokaler Verstärkung (a, b und c) und nach der Fräsbearbeitung (d, e und f) aus verschiedenen Perspektiven gezeigt.

Wie aus den oben dargestellten Ergebnissen ersichtlich, wurden für die in AP6.2 ausgewählten Use Cases die in ihrer Eignung passenden Validatoren für die jeweiligen Fügeprozesse definiert. Die in den jeweiligen AP3.1 und AP3.3 entwickelten Fügeverfahren wurden im Hinblick auf die von ASA vorgegebenen Randbedingungen sowie der angestrebten Prozessketten erfolgreich eingesetzt, um die entsprechenden Validatoren zu realisieren. Die eingesetzten Festphase-Fügeprozesse haben gezeigt, dass sie unter den gegebenen Bedingungen eine Alternative für bestehende Fügeverfahren darstellen können.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für die Durchführung des Vorhabens standen dem Helmholtz-Zentrum Hereon im Projektzeitraum vom 01.08.2020 bis zum 31.01.2024 eine Zuwendung von 450.000,- Euro zur Verfügung.

Die Kosten teilten sich in folgende Einzelpositionen auf:

- Personalkosten 429.181,99 €
- Verwaltungsgemeinkosten 39.908,92 €

Gesamtsumme: 469.090,91 €

Die das Gesamtbudget (450.000,00 €) übersteigenden Kosten in Höhe von 19.090,91 € wurden aus Eigenmitteln finanziert.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Um die erwartete Nachfrage des Marktes zu befriedigen, siehe Abbildung 72, und zukünftige Anforderungen an eine moderne, zukunftweisende Luftfahrzeugproduktion zu erfüllen, sollen mit energieeffizienten und umweltfreundlichen Fertigungstechnologien eine Verminderung der Strukturgewichte bei gleichzeitiger Erfüllung von Sicherheits- und Umweltstandards erzielt werden.

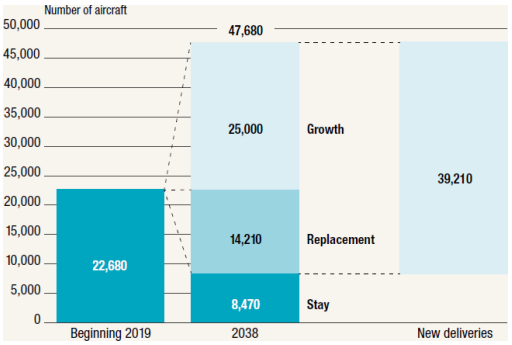


Abbildung 72 : Vorhersage betreffend die globale Nachfrage nach Passagier- und Frachtflugzeugen für den Zeitraum 2019 … 2038. Quelle: http://projects.mcrit.com/blueeconomy/images/GMF-2019-2038-Airbus-Commercial-Aircraft-book.pdf.

Unter Berücksichtigung der aktuellen Flugzeugproduktion für kleine und mittlere Passagier- und Frachtflugzeuge lässt sich daher die Notwendigkeit neuer Fertigungskonzepte ableiten, um hierfür geringere Energie-, Material- und Produktionskosten zu gewährleisten. Die Automobilindustrie z.B. setzt die intelligente Anwendung von Modularisierung und Halbzeugen in Verbindung mit automatisierten Fügetechnologien ein, um in ihrem Segment diese Ziele zu erreichen, um auch in Zukunft konkurrenzfähig zu sein.

Im Hinblick auf die vorab genannte Zielsetzung im Flugzeugbau, werden innovative Fügetechnologien hier vermutlich einen großen Beitrag leisten können. Der Ersatz von Überlappverbindungen und die hierfür notwendigen Niete sowie Dichtungsmassen durch integrale, geschweißte Stumpfstoßverbindungen z.B. führt zu einer signifikanten Verringerung des Strukturgewichts sowie der Material- und Produktionskosten. Dies vor allem unter Berücksichtigung des Einsatzes von Festphase-Fügeprozessen, mit deren inhärenten Vorteilen in den Bereichen Energieeffizienz, Umweltfreundlichkeit und Automatisierbarkeit, sowie den damit möglichen fehlerfreien, stoffschlüssigen integralen Verbindungen in artgleichen und -ungleichen Materialien mit hohen mechanischen Festigkeiten, die teilweise Grundwerkstofffestigkeiten erreichen können.

Bei den hier thematisierten Festphase-Fügeprozessen handelt es sich um solche mit geringer Streckenenergie, bei denen die Verbindung ohne Schmelzen der Fügepartner erfolgt. Infolgedessen werden typische Schweißfehler, die beim Schmelzschweißen beobachtet werden, wie z.B. Porosität, Heißrissbildung und spröde intermetallische Phasen, vermieden. Im Gegensatz zu konventionellen Schweißverfahren werden keine Verbrauchsmaterialien wie Schutzgase, Schweißzusatzwerkstoffe usw. benötigt. Zudem entstehen während des Schweißens keine Spritzer, Dämpfe oder kritischen Strahlungen. Unter den Festphasen-Fügeprozessen sind das Rührreibschweißen (engl. Friction Stir Welding, FSW), mit seiner Variante des Rührreibschweißens mit fester Schulter (engl. Stationary Shoulder Friction Stir Welding, SSFSW), das Reibpunktschweißen (engl. refill Friction Stir Spot Welding, rFSSW) und das Reibauftragschweißen (RAS, engl. Friction Surfacing, FS) für Füge- und Funktionalisierungsaufgaben in Flugzeugstrukturen besonders geeignet.

Obschon die Anwendung der o.g. Fügeprozesse auf typische Flugzeuglegierungen in der Literatur beschrieben wird, befasst sich bis jetzt keine Studie dezidiert und umfassend mit der Realisierung von Bauteilen und -gruppen in einem realistischen Herstellungsszenario für Validierungszwecke. Diese Wissenslücke sollte durch das vorliegende Projekt geschlossen werden.

Das hier bearbeitete Vorhaben hatte neben einem beträchtlichen Umfang auch eine hohe Komplexität, da jeder der erwähnten drei Festphase-Fügeprozesse durch das Hereon sowohl wissenschaftlich als auch technologisch untersucht, optimiert und hinsichtlich der potentiellen Use Cases (Validatoren) zu Fügeverfahren im Projekt weiterentwickelt wurden.

Für die Verfahrensentwicklungen der drei untersuchten Fügeprozesse wurden vergleichbare Strategien verfolgt. Im Gegensatz zum „one factor at a time“ (OFAT) Ansatz wurde zum Ermitteln einer effizienten Anzahl an Experimenten im Vorfeld mittels einer angewandten statistischen Methode, dem Design of Experiments (DoE), eine optimale Anzahl von Experimenten geplant, um ein robustes, initiales Prozessparameterfenster aufspannen zu können. Diese Experimenten-Matrix wurden im Hinblick auf das Bestimmen des Einflusses der Prozessparameter als Variablen auf die erzielbare Ergebnisqualität bzw. das angestrebte Ergebnis durchgeführt. Daraufhin folgten metallographische sowie kleinskalige mechanische Charakterisierungen (z.B. Mikrohärtemessungen), um den realen Einfluss der veränderten Prozessparameter auf das gewünschte Ergebnis mit den projektierten zu vergleichen. Nach erfolgten Prozessparameteroptimierungen erfolgten erweiterte Charakterisierungen (u.a. Mikrohärte-Mapping, Mikroflachzugtest, Ermüdungsversuche, Scherzugversuche, Dreipunkt-Biegeversuche, LOM, SEM, EBSD). Ausgesuchte Prozessparameter wurden in diesem Entwicklungsschritt parallel durch Hereon und ASA / Airbus charakterisiert. Nach dem Erreichen der gewünschten Zielgrößen wurden die bis dato verwendeten, kleinskaligen Experimente auf Validator-Niveau hochskaliert. Die bei Hereon erzeugten Validatoren wurden vollumfänglich durch ASA / Airbus charakterisiert und die Ergebnisse gemeinsam mit Hereon bewertet. Parallel zu den Verfahrensentwicklungen wurde z.B. im Bereich des rFSSW als weiteres technologisches Ergebnis eine erfolgreiche Werkzeugdesign-Optimierung durchgeführt, die eine signifikante Verschleißminderung am Werkzeug zum Ziel hatte.

Betreffend die wissenschaftlichen Zielsetzungen wurden bei Hereon durch die Ähnlichkeiten in den Bindemechanismen der Fügeprozesse durchweg Synergieeffekte genutzt, z.B., um durch vergleichende Untersuchungen im Bereich FS und FSW deren Ergebnisse zu korrelieren. Hier ist als Beispiel die ungleichartige Verbindung zwischen Aluminium und Titan zu nennen, bei der festgestellt wurde, dass u.a. die Solidustemperatur der Aluminiumlegierung einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit und das Versagensverhalten in der Al/Ti-Grenzfläche der Verbindung hat. Dies war der Schlüssel, um z.B. im AP3.1 FSW über das Einbringen einer Zwischenschicht aus einer höherschmelzenden Al-Legierung zu einer erfolgreichen technologischen Umsetzung der hybriden Sitzschiene zu gelangen.

Die oben beschriebenen, geleisteten Arbeiten entsprechen der Notwendigkeit, die in der Vorhabenbeschreibung avisierten und hier dargestellten wissenschaftlichen und technologischen Arbeitsziele zu erreichen. Zudem haben die wissenschaftlichen Untersuchungen und Entwicklungen, die in Veröffentlichungen und Konferenzbeiträgen Eingang fanden, das Helmholtz-Zentrum Hereon mit seinen Kompetenzen in den Bereichen Festphase-Fügeprozesse noch sichtbarer gemacht. Die Arbeit im Verbund mit den Industriepartnern, haben zudem allen Projektpartnern gewinnbringende Einblicke vermittelt und sie in ihren jeweiligen Bereichen besser gegenüber Mitbewerbern aufgestellt.

In diesem Hinblick waren die erzielten, positiven Projektergebnisse, nur durch die zur Verfügung gestellten Projektmittel realisierbar und wären aufgrund ihrer Komplexität in dem vorgesehenen Zeitraum allein mit Mitteln der Helmholtz-Zentrum hereon GmbH nicht zu bewältigen gewesen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Umsetzung des Hereon-Teilvorhabens ”Anwendung und Optimierung des Rührreib-,Reibpunkt- und Reibauftragschweißens" im Rahmen des Verbundvorhabens ”AVaiL-DE: Automotive Verfahren und autonome Prozesse für metallische Luftfahrtbauteile" erfolgte in einer Umgebung mit Partnern aus Forschung und Industrie, so dass die hier erzielten Arbeitsergebnisse und Ansätze als industrienah angesehen und in der Luftfahrtindustrie angewendet werden können. Die im Rahmen des Vorhabens erfolgreich erarbeiteten Festphase-Fügeprozess-Optimierungen und Verfahrensentwicklungen bieten für die Zukunft effiziente Lösungen für eine material- und energieeffiziente Produktion von metallischen Strukturbauteilen in der Luftfahrzeugindustrie. In Absprache mit den Verbundpartnern, und hier vor allem ASA und Airbus, wurden Kenngrößen, Formate und Strategien für Parameterstudien besprochen, die in zukünftigen Projekten berücksichtigt werden. Die im Verbundprojekt erarbeiteten Kompetenzen u.a. hinsichtlich der Verfahrensentwicklung sowie im Rahmen der Integration dieser Verfahren in bestehende Prozessketten können und werden auch in anderen Industriebereichen eingesetzt werden. Im Fokus liegen hier laufende und zukünftige LuFo-Projekte, sowie bilaterale Industrieprojekte z.B. mit Partnern aus der Luftfahrt-, Automobil- und Energiebranche.

Zudem wurden und werden die Ergebnisse in verschiedenen wissenschaftlichen und anwendungsbezogenen Publikationen veröffentlicht. Darüber hinaus wurden Ergebnisse auf mehreren wissenschaftlichen Tagungen und anwendungsorientierten Veranstaltungen bereits präsentiert. Zwei am Vorhaben maßgeblich beteiligte Doktoranden werden Teile der von ihnen erarbeiteten wissenschaftlichen Themenbereiche in ihre Dissertationen übernehmen können.

Von großem Nutzen sind weiterhin die im Projektverlauf gesammelten Erfahrungen in den Bereichen der Projektarbeit, wobei der intensive fachliche und inhaltliche Austausch sowie der Einblick in andere Teilprojekte und die Vernetzung mit den Partnern während des Projektverlaufs eine wichtige Rolle spielten. Die gewonnen Erkenntnisse haben Anstöße für weitere Studien gegeben. Die erarbeiteten Kompetenzen innerhalb der Abteilung Festphase-Werkstoff-Processing am Helmholtz-Zentrum Hereon werden daher Eingang in zukünftige Forschungsprojekten und die Lehre (z.B. im Rahmen von Vorlesungen und Abschlussarbeiten) finden. Durch das Projekt konnte das Helmholtz-Zentrum Hereon seine Kompetenzen und Sichtbarkeit im Bereich von Festphase-Fügeverfahren weiter erhöhen.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Literaturrecherchen in den Datenbanken wie www.scopus.com, www.sciencedirect.com, Web of Science und Google Scholar ergaben keine Hinweise darauf, dass dezidierte Festphase-Fügeprozess- bzw. -verfahrensentwicklungen im Hinblick auf die Realisierung von Bauteilen und -gruppen in den untersuchten Materialkombinationen sowie realistischen Herstellungsszenarien außerhalb des AVaiL-Verbundprojektes erfolgt sind. Zudem sind in den Bereichen rFSSW von Luftfahrzeugstrukturen sowie dem FSW von Strukturen aus ungleichartigen Materialien (i.e. hybride Al/Ti-Sitzschiene in diesem Verbundprojekt), als auch dem FS bzw. FSAM als potentieller additiver Fertigungsprozess für Luftfahrzeugstrukturen Fortschritte und Entwicklungen auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen zurzeit nicht bekannt. Aktuelle Grundlagen-Forschungsvorhaben internationaler Gruppen u.a. auf den Gebieten FSW, FS sowie der Werkzeugbehafteten FS-Variante additive friction stir deposition (AFSD) sind dem ZE bekannt. Seitens des ZE besteht auch eine Zusammenarbeit mit einigen dieser Gruppen.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurde bislang zwei Publikation vom Helmholtz-Zentrum Hereon in internationalen Zeitschriften veröffentlicht:

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

1. Marius Hoffmann, Arne Roos, Benjamin Klusemann, Investigation of microstructural and mechanical properties in AA2024-T351 multi-layer friction surfacing, Surface and Coatings Technology, Volume 480, 2024, 130610, https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130610.
2. Grassel SF, Bergmann L, Klusemann B, Friction Stir Welding of Various Aluminium Alloys to Titanium, Key Engineering Materials, Volume 966 (number 14), 2023, 49-54, https://doi.org/10.4028/p-4pgwal.

Daneben wurden die Erkenntnisse aus dem Projekt auf verschiedenen Konferenzen als Vortrag vorgestellt.

Konferenzvorträge

1. Grassel SF, Bergmann L, Klusemann B, Friction Stir Welding of Various Aluminium Alloys to Titanium. THERMEC 2023, Vienna, Austria, 2023.
2. Grassel SF, Cabral GB, Bergmann L, Klusemann B, Process Development in FSW of Skin-Stiffener-Structures for Aluminium Alloys in Aeronautical Applications, ISFSWP, Lüneburg, Germany, 2022.
3. Hoffmann M, Roos A, Dos Santos JF, Klusemann B, Experimental investigation of the mechanical properties in multi-layer friction surfacing using AA2024. Alloys for Additive Manufacturing Symposium 2022 (AAMS2022), Munich, Germany, 2022.
4. Hoffmann M, Roos A, Klusemann B, Friction surfacing of aluminium alloys on Ti6Al4V. 5th International Conference on Light Materials - Science and Technology, LightMAT 2023, Trondheim, Norway, 2023.

Zwei weitere Veröffentlichungen zum Thema Aluminium/Titan-FS sowie Aluminium/Aluminium-MLFS sind bereits zur Veröffentlichung eingereicht worden und befinden sich aktuell in Begutachtung.