



Luftfahrtforschungsprogramm  
2009-2012

# Herstellungs-optimierter metallischer Rumpf HERMET

Förderkennzeichen 20W0807B

Laufzeit 01.01.2009 – 31.12.2012

## Schlussbericht

**HERMET** ist ein Teilvorhaben im Vorhabensverbund  
**KOMET** Kostenoptimierte metallische Rumpfstruktur mit  
**PROMET** als Leitvorhaben (Federführer)

Weitere begleitende Vorhaben im Verbund  
**ASSYMET – RUAG**

Der hier vorliegende Schlussbericht zum Projekt HERMET im Verbund KOMET gibt eine Darstellung einschließlich der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Projektes HERMET detailliert wieder.

28.06.2013

i.V. Prof. Dr. Stefan Reh

## Inhalt

<b>I. Kurze Darstellung .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1 Aufgabenstellung.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2 Ausgangsbedingungen für das Vorhaben.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4 Stand von Wissenschaft und Technik vor Beginn des Vorhabens .....</b>	<b>8</b>
<b>I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....</b>	<b>9</b>
<b>II. Eingehende Darstellung .....</b>	<b>10</b>
<b>II.1 Wissenschaftliche Arbeiten und Ergebnisse .....</b>	<b>10</b>
II.1.1 TA 10 - Laserstrahlgeschweißte Stringer-Haut-Verbindungen .....	10
II.1.2 TA 10 - Qualitätssicherung .....	17
II.1.3 TA 20 - Reibrührschweißen .....	25
II.1.4 TA 30 - Fibre Metal Laminates.....	65
II.1.5 TA 50 - Sub-Assembly .....	81
<b>II.2 Zahlenmäßiger Nachweis .....</b>	<b>92</b>
<b>II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....</b>	<b>93</b>
<b>II.4 Verwertung der Ergebnisse / Fortschreibung des Verwertungsplanes ...</b>	<b>93</b>
<b>II.5 Relevante Ergebnisse Dritter .....</b>	<b>94</b>
<b>II.6 Veröffentlichungen .....</b>	<b>95</b>
<b>III. Anlage: nicht öffentlicher Erfolgskontrollbericht.....</b>	<b>98</b>
<b>III.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen.....</b>	<b>98</b>
<b>III.2 Ergebnis des Vorhabens, erreichte Nebenergebnisse, gesammelte Erfahrungen.....</b>	<b>98</b>
<b>III.3 Fortschreibung des Verwertungsplans.....</b>	<b>99</b>
<b>III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben .....</b>	<b>99</b>
<b>III.5 Präsentationsmöglichkeiten .....</b>	<b>99</b>
<b>III.6 Kosten- und Zeitplanung.....</b>	<b>99</b>

## **I. Kurze Darstellung**

### **I.1 Aufgabenstellung**

Durch das Aufkommen der CFK-Technologie steht die Aluminiumindustrie im Flugzeugbau vor einer enormen Herausforderung. Die Anwendung von CFK verspricht sowohl die Herstellungskosten, als auch das Gewicht bei Primärstrukturen deutlich zu senken. Ob die CFK-Technologie diese Versprechen auch einlösen kann, ist nachwievor offen; daraus ergibt sich jedoch der Druck auch im Bereich des Aluminiumrumpfes die Herstellungskosten und das Gewicht zu reduzieren. Zusätzlich zu den Stückkosten ist auch die Frage der Durchlaufzeit in der Herstellung wichtig, um die Herstellungskosten insgesamt zu reduzieren und gleichzeitig die in Zukunft erforderlichen Kadenzen von 40 Flugzeugen pro Monat zu ermöglichen. Um den metallischen Rumpf konkurrenzfähig zu halten, werden im Verbundvorhaben KOMET (Kosten optimierte metallische Rumpfstruktur) für die wirtschaftliche Herstellung von metallischen Rumpf- und Strukturkomponenten die folgenden Ziele verfolgt:

- Reduktion der Stückkosten der Komponenten um 20 %
- Reduktion des Gewichts der Komponenten um 15 %
- Reduktion der Durchlaufzeit entlang der gesamten Prozesskette einschließlich der Montage um bis zu 30 %
- Steigerung des Technologiereifegrads zur Erreichung der erwarteten Fertigungskadenz
- Beitrag zur Erreichung der ACARE<sup>1</sup> Ziele durch die Gewichtsreduktion

Zur Erreichung dieser Ziele wurden im Verbund KOMET die im LuFo-Projekt MERGE entwickelten metallischen Bauweisen und Konzepte mit hohem Verbesserungspotenzial aufgegriffen und weiterentwickelt bzw. umgesetzt. Wesentliche Aspekte aus dem Projekt MERGE, mit denen die oben genannten Ziele erreicht werden sollen, sind:

- die Verwendung moderner und leichter Aluminiumlegierungen wie AlMgSc und AlCuLi.
- der Übergang von genieteten Stringern hin zu integralen Stringern mit Hilfe des Laserstrahlschweißens
- der Übergang von vernieteten Hautfeldern hin zu integral verbundenen Hautfeldern mit Hilfe des Reibrührschweißens (FSW = Friction Stir Welding)

---

Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE)

Das Teilvorhaben HERMET konzentriert sich dabei auf die Herstellungsaspekte metallischer Rumpfstrukturen zur Steigerung des Technologiereifegrades der neuen Werkstoffe AlMgSc und AlCuLi. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf der Verschweißung von Stringern auf Hautfeldern mit Laser beam welding und auf der Verbindung von Hautfeldern untereinander und Stringern auf Hautfeldern mit dem Reibrührschweißen. Ein weiterer Aspekt ist das Herstellen von reibrührgeschweißten Folien um diese zu Fiber-Metal-Laminates weiterzuverarbeiten. Zusätzlich sollen neue Methoden entwickelt und angewendet werden, um die Auswirkung der herstellungsbedingten Verzüge zum einen numerisch beurteilen zu können und desweiteren auch minimieren zu können.

## **1.2 Ausgangsbedingungen für das Vorhaben**

Das DLR-Institut für Werkstoff-Forschung arbeitet seit vielen Jahren auf dem Gebiet des Schweißens metallischer Werkstoffe und in diesem Zusammenhang auch auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung der Schweißnähte. Insbesondere auf dem Gebiet des Reibrührschweißens liegen umfangreiche und über mehrere Jahre reichende Erfahrungen vor, verschiedene und auch verschiedenartige Metallbleche durch Reibrührschweißen miteinander zu verbinden. Dabei werden – wie bereits erwähnt – die Vorarbeiten im LuFo-Projekt MERGE aufgegriffen. Ferner liegen die Ergebnisse aus diversen öffentlich geförderten Projekten vor, an denen das Institut mitgearbeitet hat, und deren Ergebnisse im Rahmen des Vorhabens verwendet werden. Es folgt eine kleine Auswahl relevanter eigener Vorarbeiten.

Im EU-Projekt WelAir – Laufzeit 01/2004-06/2007 – beteiligte sich das Institut für Werkstoff-Forschung an der Entwicklung von Konzepten zum Schweißen kurzer Nähte. Dabei musste besonderes Gewicht auf die Optimierung von Nahtanfang und Nahtende gelegt werden. Die Schadenstoleranz sollte durch die Verwendung neuer schweißbarer Legierungen wie 2139 und PA765 verbessert werden. Das Projekt wurde mit der Fertigung einer für Kleinflugzeuge typischen Tonne abgeschlossen, in der als wesentliche Fügetechnik reibrührgeschweißte Überlappstöße verwendet wurden.

Von 04/2005 bis 09/2008 beteiligte sich das Institut für Werkstoff-Forschung am EU-Projekt DATON. Bei diesem Projekt lag der Fokus auf der Untersuchung und ingenieurmäßigen Modellierung des Schadenstoleranzverhaltens integral versteifter Strukturen, die durch Hochgeschwindigkeitsfräsen, Laser- und Reibrührschweißen hergestellt wurden. Dabei wurden allerdings nur die bereits etablierten Al-Legierungen 6013 und 2024 näher untersucht.

Im Rahmen der Kooperation zwischen Airbus, DLR und Onera (Frankreich) (ADO-Projekt) in der Zeit von 01/2006 bis 12/2007 hat das Institut für Werkstoff-Forschung Reparaturschweißungen untersucht und die zugehörige Charakterisierung von FSW

Nähten durchgeführt, wie sie auch Gegenstand des beantragten Vorhabens HERMET sind. Dabei wurden allerdings nur Reparaturschweißungen an etablierten Aluminium-Legierungen betrachtet.

### I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für das Vorhaben HERMET ist die Gliederung der Teilaufgaben identisch mit der des Leitvorhabens PROMET:

#### ▪ **Laserstrahlschweißen (TA10)**

##### ○ AP 10.2; Schweißtechnologie

In diesem Arbeitspaket soll die Ursache für den Abfall der Kopfzugfestigkeit nach dem Laserstrahlschweißen von Stringern aus AA2096 ermittelt werden. Dies ist erforderlich, um den Einsatz des Laserstrahlschweißens bei dieser Legierung zu ermöglichen und dadurch die damit verbundene Gewichtseinsparung zu realisieren.

##### ○ AP 10.3: Qualitätssicherung

In diesem Arbeitspaket sind die Arbeiten zur Untersuchung eines online-fähigen Prüfverfahrens zur Qualitätssicherung von Laserstrahlgeschweißten Stringern zusammengefasst. Die Ermittlung geeigneter online-fähiger Prüfverfahren ist erforderlich, um die Durchlaufzeit bei der Herstellung von Rumpfschalen deutlich zu reduzieren, wobei das bisher etablierte Ultraschallprüfverfahren zu einem zeitaufwendigen Engpass geworden ist.

#### ▪ **Reibrührschweißen (TA20)**

##### ○ AP 20.1; Nahtgeometrie

Das Arbeitspaket fasst einerseits alle Arbeiten zusammen, um die optimalen Schweißparameter für das Reibrührschweißen (engl. Friction Stir Welding, FSW) von Stumpfnähten bei Blechen aus den Aluminium-Legierungen AlMgSc und AlCuLi zu ermitteln. Zudem wird in diesem Arbeitspaket untersucht, wie sensitiv die Qualität der FSW-Naht bei diesen Legierungen auf einen Spalt zwischen den beiden zu verschweißenden Blechen reagiert. Beide Aspekte sind erforderlich, um den Technologiereifegrad des FSW bei diesen Legierungen zu steigern, und somit durch den zukünftigen Einsatz des Reibrührschweißens in der Serienfertigung den angestrebten Gewichtsvorteil integraler Strukturen für Hautfelder realisieren zu können.

#### AP 20.2; Tailored Welded Blanks

Als Tailored Welded Blanks (TWB) werden im vorliegenden Fall Blechstrukturen bezeichnet, die aus Blechen unterschiedlicher Dicke mit Hilfe eines Schweißverfahrens zusammengesetzt werden. In diesem Arbeitspaket sollen die optimalen Schweißparameter für das Reibrührschweißen von Tailored Welded Blanks ermittelt werden. Hierdurch soll der Technologiereifegrad reibrührgeschweißter Tailored Welded Blanks gesteigert werden, wodurch sich Prozessschritte wie beispielsweise das elektro-chemische Fräsen zum Herstellen von Blechstrukturen mit lokal unterschiedlicher Dicke zukünftig einsparen lassen.

#### ▪ Faserverstärkte Metall laminate (TA30)

##### AP 30.1; Neue Werkstoffe

In diesem Arbeitspaket entwickelt das DLR Lösungen für Fibre Metal Laminates (FML) auf der Basis reibrührgeschweißter Folien aus den Aluminium-Legierungen AlMgSc und AlCuLi mit einer Dicke von 0,4 mm. Solche Folien lassen sich prozesstechnisch bedingt nur in einer begrenzten Breite durch Walzen herstellen. Die benötigten breiteren Metalllagen in den FML können nur durch Überlappungen der Metallfolien (sog. Splices) erreicht werden, was zusätzliches Gewicht bedeutet. Durch reibrührgeschweißte Folien lassen sich solche Überlappungen vermeiden, wodurch sich ein signifikanter Beitrag zum Ziel der Gewichtsreduktion ergibt.

#### ▪ Metallkleben (TA40)

Das DLR beteiligt sich nicht mit eigenen Arbeiten an diesem Arbeitspaket.

#### ▪ Sub-Assembly (TA50)

##### AP 50.1; Distorsion Engineering

In diesem Arbeitspaket entwickelt das DLR neue Methoden, um diejenigen Prozessschritte und Herstellungsparameter, die sich am stärksten auf den Gesamtverzug von Baugruppen (Schalen, Tonnen) auswirken, zu identifizieren, um deren Auswirkungen zukünftig minimieren zu können.

#### ▪ Component-Assembly (TA60)

Das DLR beteiligt sich nicht mit eigenen Arbeiten an diesem Arbeitspaket.

## I.4 Stand von Wissenschaft und Technik vor Beginn des Vorhabens

Bislang werden im Flugzeugbau die Hautfelder miteinander und die Stringer mit der Haut überwiegend vernietet. Stringer werden teilweise auch mit der Haut verklebt. Hierzu sind entsprechende Überlappungen der Haut vorgesehen bzw. die Stringer benötigen einen dafür vorgesehenen Fuß. Neben dieser Materialüberlappung selbst tragen natürlich auch die verwendeten Niete und das benötigte Dichtmittel sowie ggf. der Kleber zu Gewichtssteigerungen bei, die somit ausschließlich aus der Wahl des Fügeverfahrens resultieren. Die Verwendung von Schweißnähten anstelle von Nietverbindungen ermöglicht durch den Wegfall von Nieten, Überlappungen und Dichtmittel sowie das hohe Automatisierungspotential eine gleichzeitige Reduzierung von Herstellungskosten und Strukturgewicht. Airbus hat diesen Schritt z.B. durch den Einsatz des Laserschweißens in Teilbereichen des A380 bereits vollzogen. Die Optimierung in Hinsicht auf Prozessgeschwindigkeit und Struktureigenschaften ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Mit der Entscheidung, die Haut des A350 aus CFK-Werkstoffen zu fertigen, wurde die ursprünglich für dieses Flugzeug geplante Umsetzung des Reibrührschweißens in die Praxis gestoppt. Für dieses Verfahren sind deshalb bei Stumpfstößen insbesondere produktionstechnische Belange noch nicht ausreichend untersucht. Daneben sind bei nachfolgender Umformung durch die optimale Gestaltung der Prozesskette weitere Kosteneinsparungen möglich. Anwendungen des FSW in Richtung Tailored Welded Blanks sind bisher nur in Ansätzen betrachtet worden.

Im Rumpf ziviler Flugzeuge sind AA2024 und direkte Nachfolger wie z.B. AA2524 nach wie vor die am weitesten verbreiteten Legierungen, allerdings sind sie nicht schmelzschweißbar. Für lasergeschweißte Strukturen wurde deshalb von Airbus die Legierung AA6013 eingeführt. Neuere Klassen von Aluminiumlegierungen versprechen gegenüber diesen beiden Legierungen deutliche Vorteile. Schweißbare AlCuLi-Legierungen bieten eine zu AA2024 vergleichbare Schadenstoleranz, aber eine höhere Steifigkeit und geringere Dichte als diese Standardlegierung. Mit dem möglichen Kriechziehen bei AlMgSc-Legierungen eröffnet sich die Möglichkeit der aufwandsarmen Fertigung versteifter sphärischer Schalen. Die Einbindung dieser neuen Legierungen in die Fertigungskette erfordert allerdings noch eine Vielzahl von technologischen und insbesondere bei AlMgSc auch noch grundlagenorientierten Untersuchungen.



## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Neben der von Projektbeginn an engen Zusammenarbeit mit den direkten Projektpartnern PAG und RUAG hat sich im TA50 auch eine direkte Zusammenarbeit mit der Fa. CASIM GmbH in Kassel ergeben. Die Fa. CASIM GmbH wurde im Rahmen des TA50.1 „Distorsion Engineering“ von PAG beauftragt eine Toleranzkettenanalyse für das Hautfeld 10 der Sektionen 17 und 18 eines Airbus 320 durchzuführen. Im Zuge der Arbeiten des DLR wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem aus den Daten, die im Rahmen einer solchen Toleranzanalyse ermittelt werden, auch die Sensitivitäten der Zusammenbautoleranzen als Funktion der Herstellungstoleranzen der einzelnen Bauteile bestimmt werden können. Neben den benötigten Informationen zu den verwendeten Datenformaten stellte CASIM auch einen umfangreichen Datensatz mit der Toleranzanalyse des Hautfeldes 10 bereit, der zusätzlich zu den Simulationsergebnissen auch alle zugehörigen Eingangsdaten der Analysen enthielt. Dieser Datensatz wurde abschließend beim DLR mit dem neuen Verfahren hinsichtlich der zugrunde liegenden Sensitivitäten untersucht.

## **II. *Eingehende Darstellung***

### **II.1 Wissenschaftliche Arbeiten und Ergebnisse**

#### **II.1.1 TA 10 - Laserstrahlgeschweißte Stringer-Haut-Verbindungen**

##### **Ausgangssituation**

Im Flugzeugbau ist das Laserstrahlschweißen von AA6013 beim Fügen von Stringern und Hautfeldern mittlerweile Stand der Technik. Um hier weitere Gewichts- und Kostenersparnisse erzielen zu können, sollen neue, leichtere Aluminium-Legierungen, wie z. B. AlCuLi, zum Einsatz kommen.

##### **Ziele und Herausforderungen**

Die Herausforderung in diesem Arbeitspaket besteht im Laserstrahlschweißen von neuen Aluminium-Legierungen wie z.B. AlCuLi seitens Premium Aerotec. Die Aufgabe des DLR liegt darin, diese geschweißten Haut-Stringer-Verbindungen zu untersuchen.

##### **Vorgehensweise**

Zu diesem Zweck wurden vom Projektpartner PAG einige Probenreihen mit einer AlCuLi-Legierung lasergeschweißt. Von diesen geschweißten Blechen wurden dem Institut für Werkstoff-Forschung des DLR Querschliffe der Schweißnaht sowie Bruchflächen von Kopfzugversuchen zur Verfügung gestellt. An den Querschliffen wurden Härteverläufe gemessen, die Bruchflächen rasterelektronenmikroskopisch untersucht.

##### **Ergebnisse**

An ausgewählten Querschliffen wurden Härteverläufe gemäß Airbus-Spezifikation AITM4-0002 erstellt. Die beiden folgenden Abbildungen (Abbildung 1, Abbildung 2) wurden dieser AITM entnommen und zeigen das Prinzip, wie die Härteverläufe zu messen sind.

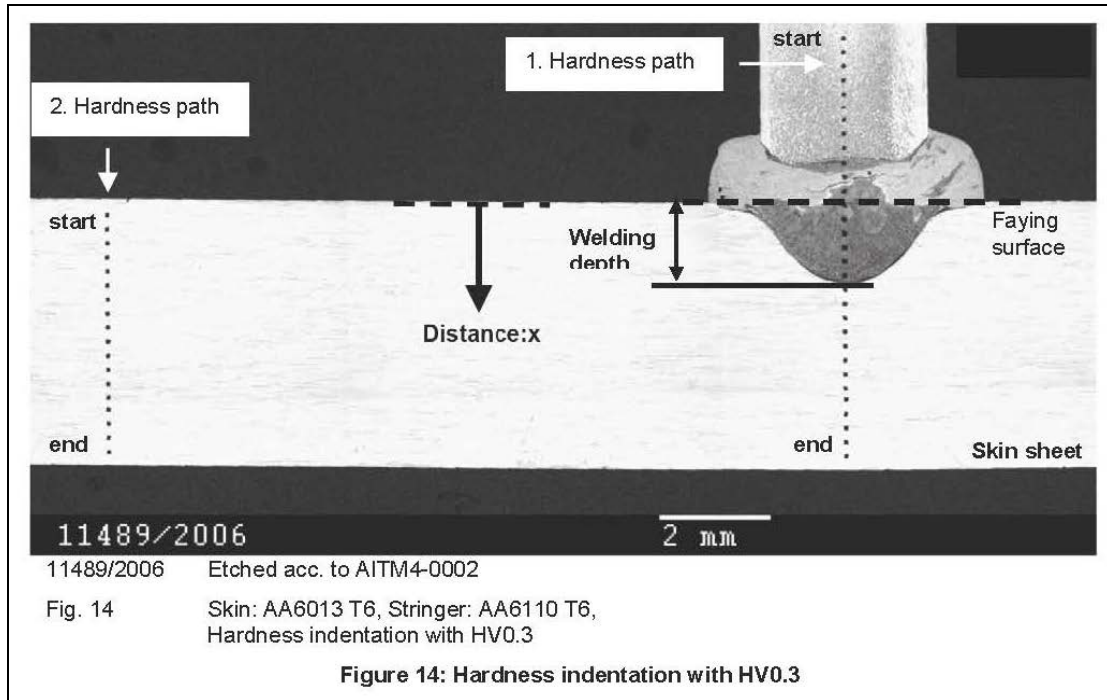


Abbildung 1: Prinzip der Härtemessung an lasergeschweißten T-Nähten (Quelle: AITM4-0002)

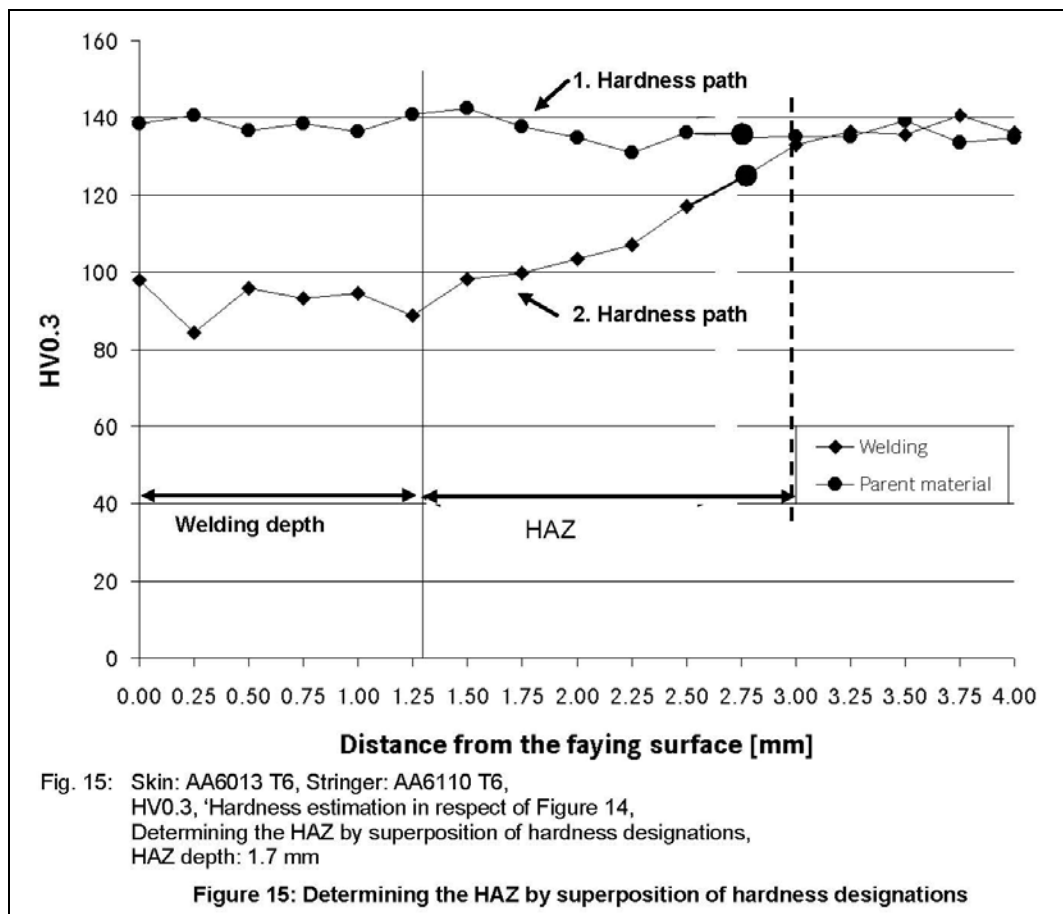
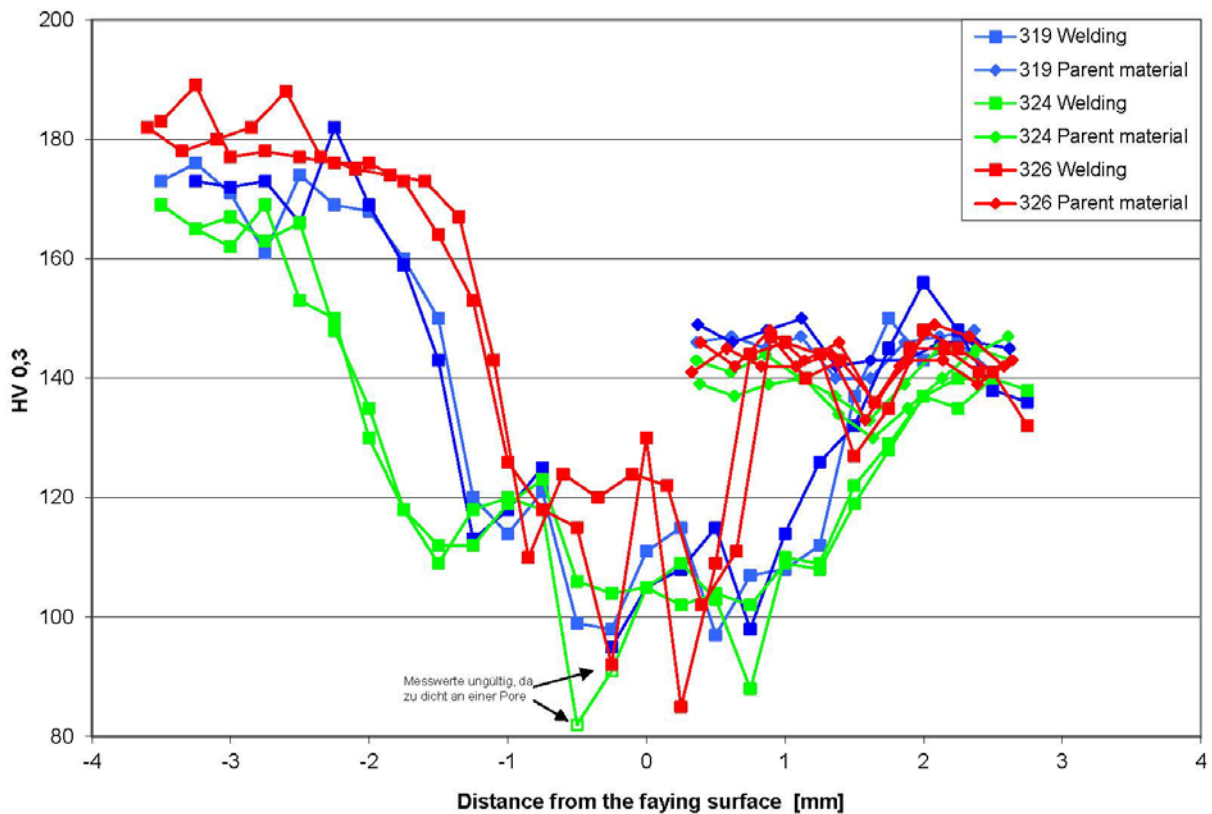


Abbildung 2: Prinzipielle Härteverläufe vom Schweißbereich sowie Grundmaterial (Quelle: AITM4-0002)

Von drei Schweißnähten aus unterschiedlichen Probenreihen wurde an jeweils zwei Querschliffen der Härteverlauf erstellt (Abbildung 3). Abweichend von Abbildung 2 wurden hier auch die Härtewerte kleiner 0 auf der x-Achse, d.h. die Härtemessungen im Stringer, als zusätzliche Information dargestellt. Die geringste Schweißtiefe (vgl. Welding depth in Abbildung 1) und kleinste Wärmeeinflusszone zeigen sich bei Probe 326 (Probenreihe 3), etwas größer bei Probe 319 (Probenreihe 1) und am größten bei Probe 324 (Probenreihe 2). Analog dazu verhält sich die zuvor beim Schweißen eingebrachte Streckenenergie: Sie beträgt 158 J/cm, 260 J/cm und 316 J/cm. Probe 326 weist die höchste Kopfzugfestigkeit auf, wohingegen die Kopfzugfestigkeiten der Proben 319 und 324 recht ähnlich ausfallen, wobei -nicht passend zur Wärmeeinflusszone- Probe 324 etwas größere Werte zeigt als Probe 319.



**Abbildung 3: Härteverläufe aus drei verschiedenen Probenreihen**

Bei den Härteverläufen fällt auf, dass Probe 324 zwar die größte Wärmeeinflusszone aufweist, die Messwerte der beiden Kurven aber weitestgehend aufeinander liegen, abgesehen von drei Datenpunkten, von denen allerdings zwei nicht zu werten sind, da sie zu dicht an einer Pore liegen und somit eigentlich ungültig sind. Die Messwerte der Probe 319 weichen etwas deutlicher voneinander ab, und bei Probe 326 zeigen sich vergleichsweise ausgeprägte Schwankungen innerhalb einer Kurve und der Kurven zueinander. Gegebenenfalls könnten diese größeren Schwankungen

ein Hinweis auf nicht optimale Stabilität des Prozesses bzw. geringere Reproduzierbarkeit der Schweißnaht-Qualität sein.

Es wurden sieben Bruchflächen aus drei Probenreihen untersucht. Alle Bruchflächen weisen eine hohe Porosität auf bzw. eine hohe Anzahl an Hohlräumen. Ob es sich hier um Gasporen oder um Hohlräume, welche durch Einschlüsse verursacht wurden, handelt, konnte nicht abschließend festgestellt werden. Zwar zeigen alle Proben eine hohe Anzahl an Poren/Hohlräumen, jedoch sind diese bei Probenreihe 3 (höchste Kopfzugfestigkeit) deutlich kleiner als bei den anderen beiden Probenreihen (Abbildung 4, Abbildung 5).

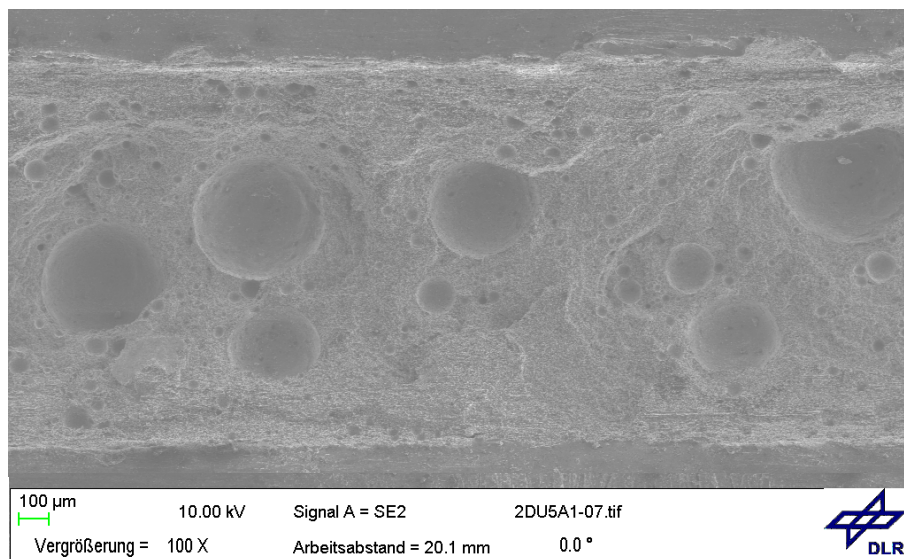


Abbildung 4: Übersicht-Aufnahme (Probenreihe 2)

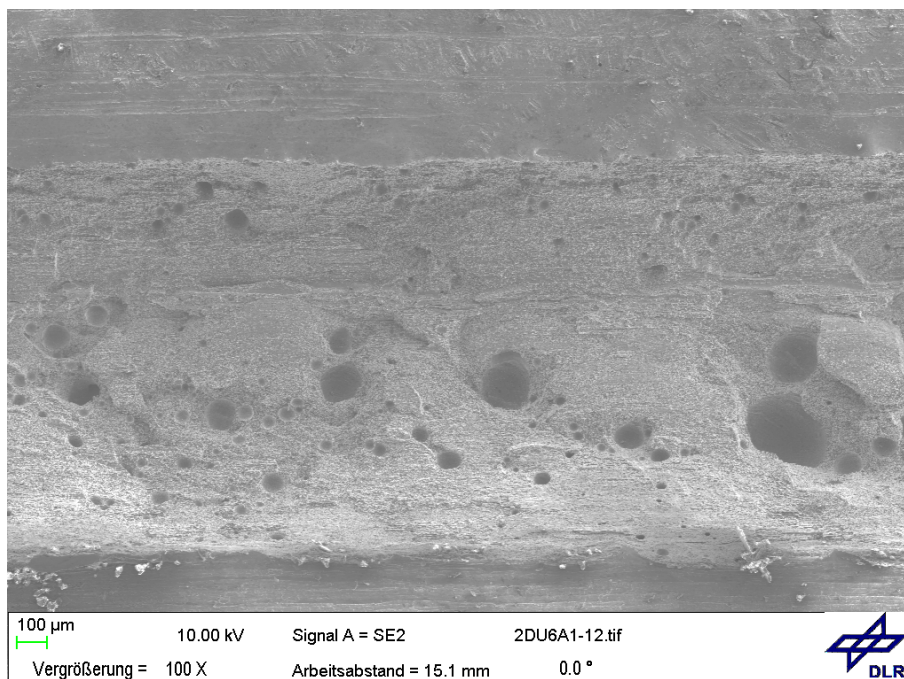
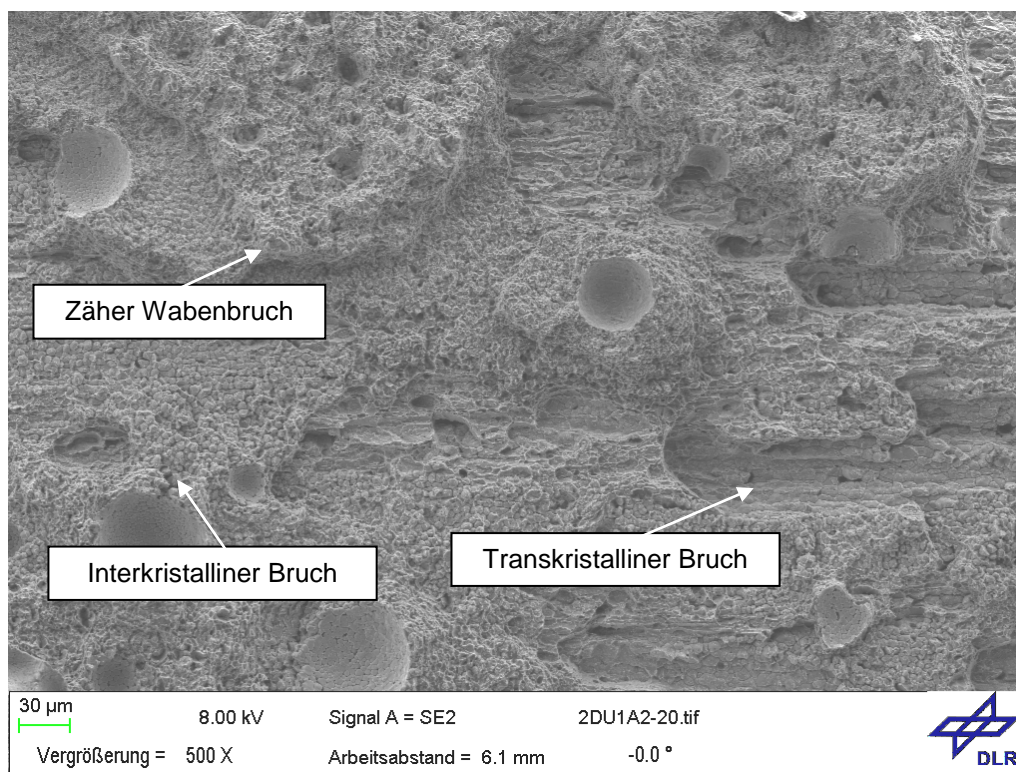


Abbildung 5: Übersicht-Aufnahme (Probenreihe 3)

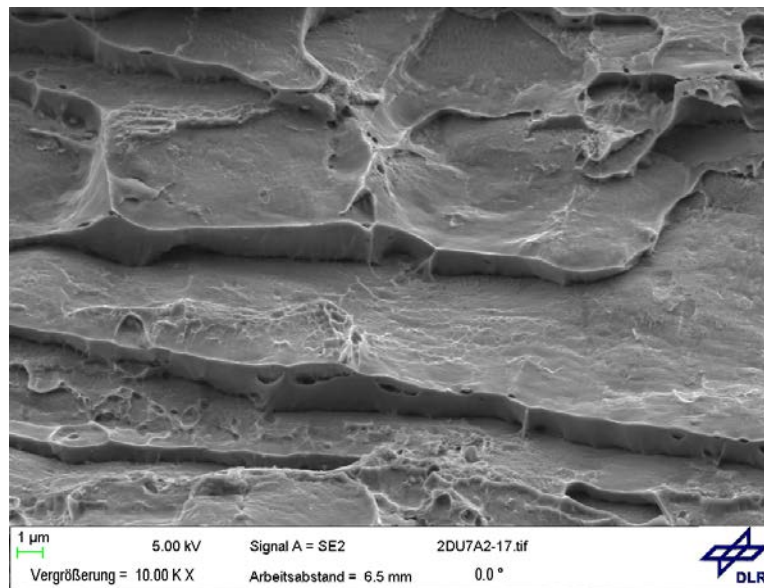
Soweit im Rahmen dieser Untersuchung festgestellt werden konnte, ist die Bruchflächencharakteristik der verschiedenen Probenreihen recht ähnlich. Auf allen Bruchflächen zeigen sich ähnliche Eigenheiten (Abbildung 6): Es gibt Bereiche mit spröden transkristallinen Brüchen (Abbildung 7) ebenso wie mit duktilen Wabenbrüchen (Abbildung 8) und auch Bereiche mit interkristallinen Brüchen, die wie ein loser Verbund von Kristalliten erscheinen (Abbildung 9). Letztere Bereiche gibt es augenscheinlich auf allen Bruchflächen, jedoch auf den Bruchflächen der Probenreihe 1 sind diese Bereiche scheinbar flächiger vorhanden, auf den Bruchflächen der Probenreihen 2 und 3 hingegen nur in geringem Ausmaß. Die hier vorgestellten Untersuchungen geben zwar Aufschluss über die unterschiedlichen Nahtqualitäten, weiterführende Untersuchungen für ein vertieftes Prozessverständnis wären jedoch empfehlenswert. Es werden beispielhaft einige Aufnahmen aufgeführt.



**Abbildung 6: Ausschnitt mit verschiedenen Bereichen (Probenreihe 1)**

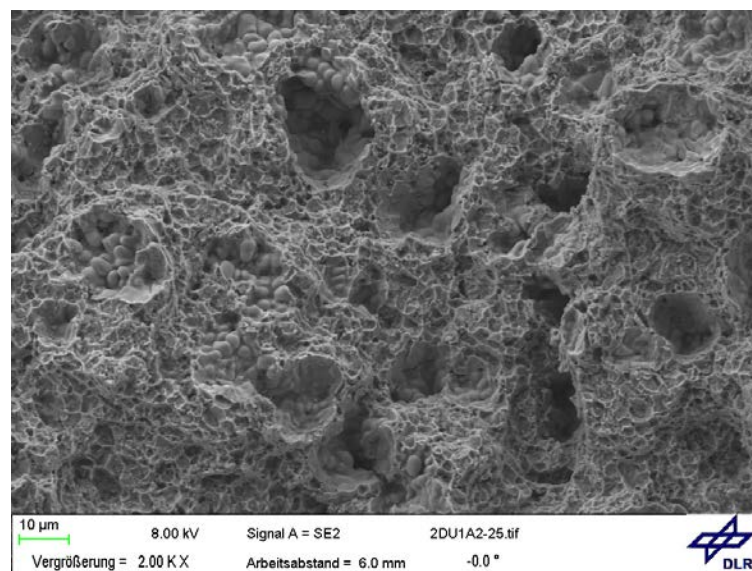
Wie bereits erwähnt, zeigt Abbildung 6 exemplarisch die Charakteristika, wie sie auf allen untersuchten Bruchflächen gefunden wurden. Lediglich in der räumlichen Ausdehnung der verschiedenen Bereiche (Wabenbruch, trans- oder interkristalliner Bruch) wiesen die einzelnen Proben Unterschiede auf.

Die in Abbildung 7 dargestellten Spaltflächen zeigen lokal sprödes (transkristallines) Versagen an; solche Bereiche wurden ebenfalls mehrfach beobachtet.

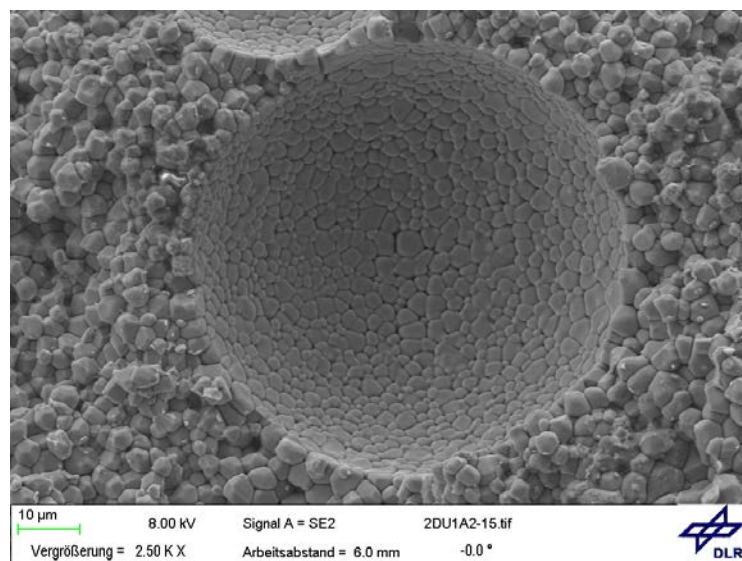


**Abbildung 7: Spaltbruch (Probenreihe 3)**

In Abbildung 8 deutet der hohe Anteil an plastischer Verformung auf eine feste, duktile Schweißverbindung hin. Warum hier einige Bereiche von 10 – 20 µm Größe interkristallin gebrochen sind, was auf eine lokal mangelnde Anbindung hinweist, sollte im Rahmen weiterführender Untersuchungen geklärt werden.



**Abbildung 8: Zäher Wabenbruch mit einzelnen „Nestern“ von interkristallinem Bruch (Probenreihe 1)**



**Abbildung 9: „Interkristalliner Bruch“ mit Pore/Hohlraum (Probenreihe 1)**

Die fehlende plastische Verformung und die scheinbar lose Kornstruktur in Abbildung 9 lassen lokal ein Versagen bzw. vollständiges Fehlen der Schweißverbindung vermuten. Ob hier tatsächlich eine Bruchfläche oder aber das völlige Fehlen einer Schweißverbindung zu sehen ist, ist fraglich, da dieses Erscheinungsbild recht unüblich ist.

Im Rahmen dieser Untersuchungen und auch aufgrund der relativ geringen Probenzahl kann hier keine abgeschlossene Analyse aufgezeigt werden. Folgende Rückschlüsse sind jedoch naheliegend: Die Härteverläufe weisen darauf hin, dass die Schweißparameter der Probenreihe 3 zwar die höchsten Kopfzugfestigkeitswerte liefern, aber die Prozessstabilität vermutlich nicht optimal ist, da hier die größten Schwankungen bei den Härtemessungen vorliegen. Die Bruchflächen zeigen, dass bei Probenreihe 3 die Porosität zwar recht hoch ist, aber immer noch etwas weniger als bei den anderen Probenreihen, so dass hierin vermutlich der Grund für die höchste Kopfzugfestigkeit zu suchen ist.

Insgesamt betrachtet zeigt keine der untersuchten Schweißnähte eine zufriedenstellende Qualität. Es wurde gezeigt, dass die Kopfzugfestigkeit offenbar abhängig von der Menge und Größe der Poren/Hohlräume ist, dass sich die Wärmeeinflusszone analog zur eingebrachten Streckenenergie verhält, und dass die Stabilität des Prozesses ggf. beeinträchtigt sein kann. Die hier gezeigten Ergebnisse können als Anhaltspunkt für weiterführende Schweißversuche bei PAG herangezogen werden. Somit ist das Ziel antragskonform erfüllt, da „diese Arbeiten der Einführung des Laserschweißens bei neuen Materialien dienen und damit zur Erreichung der genannten Kosten- und Gewichtsziele beitragen.“



## **II.1.2 TA 10 - Qualitätssicherung**

Das Thema Qualitätssicherung ist im Projekt HERMET themenübergreifend angelegt, organisatorisch aber unter diesem Teilarbeitspaket TA 10 angesiedelt. Um aber die Qualitätssicherung in den einzelnen Gebieten themenorientiert darzustellen, werden im vorliegenden Schlussbericht die entsprechenden Arbeiten beim jeweiligen Teilarbeitspaket geschildert. An dieser Stelle wird somit nur über zwei Themen berichtet, die dem Laserstrahlschweißen bzw. dem Thema „Qualitätssicherung“ allgemein zugeordnet werden können.

### **TRL-Kriterien für zerstörungsfreie Prüfverfahren**

#### **Ausgangssituation**

Beim Laserschweißprozess hat sich die Qualitätssicherung als Engpass in der Herstellungskette herausgestellt. Es zeigt sich, dass die Prüfung der Schweißnähte eines Panels unter Umständen länger dauert als deren Herstellung. Somit liegt hier der Einsatz eines schnelleren Verfahrens nahe. Seitens PAG wurden mehrere infrage kommende Verfahren in den Raum gestellt, die hinsichtlich ihrer Einsatztauglichkeit begutachtet werden müssen.

#### **Ziele und Herausforderungen**

Die infrage kommenden Prüfverfahren für laserstrahlgeschweißte Nähte sollen auf ihre Eignung hin untersucht werden. Dabei gilt es zum Einen, alle relevanten Eignungsaspekte zu beleuchten, und zum Anderen, auch grundverschiedene Prüfverfahren miteinander vergleichbar zu machen.

#### **Vorgehensweise**

Analog zu den bekannten Technology-Readiness-Levels (TRL) für die systematische und umfassende Bewertung neuer Technologien sollen nun TRL-Kriterien für Prüfverfahren entwickelt werden. Anhand dieser Kriterien kann dann die Entwicklungsreife von neuen Prüfverfahren bewertet werden, und zwar nicht nur für das hier aktuelle Laserstrahlschweißen (LBW), sondern für jede mögliche Prüfaufgabe. Nach Erstellen des Kriterien-Katalogs sollen dann die infrage kommenden Prüfverfahren für das LBW entsprechend eingeordnet werden.

#### **Ergebnisse**

Im Folgenden sind die TRL-Kriterien für neue Prüfverfahren aufgeführt, sowie die Bewertung der für das LBW infrage kommenden Prüfverfahren.

**Technology Readiness Level (Qualitätssicherung / Prüfverfahren)**TRL1 (Discover / Feasibility)

- Möglichkeiten entdecken / erforschen
- grundlegende physikalische Zusammenhänge werden erforscht / erkannt
  - Charakterisierung der Technologie
  - Stand der Technik und Vergleich dazu
  - erwartete Vorteile und mögliche Risiken
  - Prinzip funktioniert grundsätzlich
  - Planung bis TRL3

TRL2 (Understand / Process development)

- (genauer) Verstehen des Prinzips / Verfahrens
- Berücksichtigung des Einsatzorts: Fertigung und / oder Service
  - quantifizierbare Messergebnisse
  - Vision von der Implementierung der Technologie
  - Ermittlung von relevanten Patenten
  - Ermittlung des Potenzials für ein eigenes Patent
  - Einschätzung der Prüfdauer pro Bauteil
  - Einschätzung der Abhängigkeiten von anderen Produkten / Umständen / Gegebenheiten
  - Einschätzung möglicher Probleme bei der Übertragung vom Labor auf die Großanlage
  - Einschätzung des Einflusses auf vorhandenes Engineering
  - Einschätzung von Einflüssen auf die Umwelt

TRL3 (Adapt / Development on Coupons)

- Anwenden auf bauteilnahe Proben
- Identifizierung von Grenzen des Verfahrens
  - alle relevanten Fehler / Größen an Proben werden detektiert / gemessen
  - die Detektierung / Messung ist zuverlässig wiederholbar
  - ggf. Anmeldung von Patenten
  - Einschätzung des Aufwands für Wartung und Kalibrierung / Justierung
  - Einschätzungen aus TRL2 ggf. anpassen
  - Planung bis TRL6

TRL4 (Develop / Sub Elements)

- Anwenden auf ein Bauteil
- Berücksichtigung von Randbedingungen am Bauteil (Geometrie, Stoffeigenschaften, Oberflächen, Zugänglichkeit, ...)
- Einfluss der (Fertigungs-)Toleranzen der Bauteile
- Sind Teile der Prüfvorrichtung schwierig bzw. nicht zeitnah zu beschaffen und / oder sehr empfindlich, so dass eine Ersatzteile-Haltung nötig ist? Gibt es Verbrauchsmaterialien?
  - Entwicklung einer einfachen Prüfvorrichtung
  - Ermittlung der Prüfdauer pro Bauteil
  - vorangegangene Einschätzungen ggf. anpassen

TRL5 (Validate / Component)

- Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
- Einschätzung der Personal-Qualifizierung
- vorangegangene Einschätzungen ggf. anpassen

TRL6 (Validate / Demonstrator)

- Prototyp der Prüfvorrichtung in Einsatzumgebung an realem Bauteil
- endgültige Anforderungen und Spezifikationen
- Planung bis TRL9

Der zum Zeitpunkt der Recherche (2010) aktuelle Stand bei den begonnenen Entwicklungen sieht wie folgt aus:

- Online-Thermographie mittels High-Speed-Infrarotkamera
  - Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH)
  - TRL1 (noch nicht abgeschlossen)
  - Aufgrund der geringen Erfolgsaussichten soll das Thermographie-Verfahren, bei dem nur die Prozesswärme selbst als Wärmequelle für die Messungen dient, nicht weiter fortgeführt werden.
- Laser-Ultraschall
  - Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH (bias)
  - TRL1 (abgeschlossen), TRL2 (angefangen)
  - Das Verfahren bietet zwar interessante Perspektiven, ist aber noch nicht so weit fortgeschritten, als dass es innerhalb der Projektlaufzeit abgeschlossen werden könnte. Die Technik des Laser-Ultraschalls wird also im Rahmen dieses Projekts nicht weiter verfolgt.
- Online-Sichtprüfung
  - Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH (bias)
  - Bislang wurde eine Marktschau durchgeführt. Eine Bewertung der Entwicklung ist noch nicht möglich. Das Thema soll aber ggf. weiter bearbeitet werden.
- Thermographie, offline
  - Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik Dresden (IWS)
  - TRL2 (abgeschlossen), TRL3 (angefangen)
  - Kurz bevor das Teilprojekt eingefroren wurde, wurde Anfang des Jahres die weitere Vorgehensweise festgelegt: Bislang erfolgte die Anregung induktiv mit Mittelfrequenz, und es konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Bevor nun hier die Detailfragen angegangen werden, sollte -bei einer Wiederaufnahme der Arbeiten- ermittelt werden, ob andere Ansätze (sonotrodische Anregung, induktive Anregung mit Hochfrequenz, Lockin-Thermographie) bessere Ergebnisse erzielen. Von diesen neuen Ansätzen verspricht man sich eine defektselektive Anzeige, so dass die Fehler deutlicher, schneller und sicherer gefunden werden könnten.

Seitens PAG wurde dieses Thema bereits in einer frühen Projektphase (vgl. auch 3. Zwischenbericht zu HERMET) zu Gunsten eines anderen Schwerpunktes im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung eingefroren und innerhalb des Projektverbundes nicht wieder aufgenommen. Somit bieten die hier vorgestellten Ergebnisse eine gute Ausgangsbasis für eine ggf. zukünftig erfolgende neue Recherche. Die Arbeiten zum Thema „Koordinierung und Überwachung der Aktivitäten zur Entwicklung eines

Prüfverfahrens zur Qualitätssicherung von laserstrahlgeschweißten Stringern“ wurden somit an dieser Stelle abgeschlossen.

Statt weiterer Tätigkeiten bezüglich des Laserstrahlschweißens hat das DLR, wie nachfolgend gezeigt, die Koordinierung und Feinplanung für die Weiterentwicklung der Ultraschall-Squirter-Anlage bei PAG Nordenham übernommen.

## **Weiterentwicklung der US-Squirter-Anlage bei PAG Nordenham**

### **Ausgangssituation**

Die Ultraschall-Squirter-Anlage bei PAG Nordenham wird für die Qualitätssicherung großer Glare-Hautelder eingesetzt. Sie ist mit je einem Prüfkopf auf der Empfänger- und der Senderseite ausgerüstet. Es ist geplant, die Anlage in Phased-Array-Technik umzubauen, um hierdurch die für ein Glare-Hautfeld benötigten Scan-Zeiten deutlich zu reduzieren.

### **Ziele und Herausforderungen**

Vor der konkreten Planung des Umbaus soll die grundsätzliche Machbarkeit sowie die zu erwartende Leistungsfähigkeit der Phased-Array-Technologie für den vorliegenden Anwendungsfall „Glare-Hautfeld“ geprüft werden. Dazu soll untersucht werden, ob in Vorversuchen ausreichend gute Ergebnisse erzielt werden können, so dass eine spätere Qualifizierung als wahrscheinlich eingestuft wird.

### **Vorgehensweise**

Zunächst sollen Vorversuche bei General Electrics (GE) in Alzenau durchgeführt werden. Bei den Vorversuchen soll geklärt werden, ob mittels Phased-Array-Technik bei Glare eindeutige Signale erzielt werden können und prinzipiell die Fehlererkennung möglich ist. Danach folgt ein Demo-Test vor Ort in Nordenham an der Squirter-Anlage. Durch diesen Test unter betriebsähnlichen Bedingungen, bei dem z.B. die Wiederholgenauigkeit sowie die Scanbarkeit großer, sphärischer Bauteile untersucht wird, sollen Ergebnisse zur Verfügung stehen, die eine Einschätzung der Machbarkeit erlauben. Das DLR unterstützt bei der Koordinierung der Tests und übernimmt die Feinplanung sowie Auswertung derselben.

### **Ergebnisse**

Bei GE in Alzenau, die bei entsprechenden Untersuchungsergebnissen auch den Umbau der Squirter-Anlage vornehmen soll und bereits die bestehende Anlage entwickelt und gebaut hat, fand im November 2010 ein einwöchiger Test statt. Dafür stand eine Roboter-Anlage zur Verfügung, mit der die Phased-Array-Technik an den fraglichen Bauteilen geprüft wurde. Für diese erste Testwoche in Alzenau wurden hauptsächlich Prüfungen von ersten Klebungen vorgesehen. Jedoch müssen für eine vollständige Prüfung einer ersten Klebung das sogenannte „Master Reference Panel“ (MRP) und insbesondere das „Correlation Panel for Porosity“ (CPP) mitgescannt und ausgewertet werden. MRP und CPP sind somit Referenzen, anhand derer die

Ultraschall-Anlage bei jeder Messung kalibriert wird, um ein aussagekräftiges Messergebnis zu erhalten.

Diese beiden Referenzpanel wurden aber für die laufende Produktion in Nordenham benötigt und standen somit nur für einen Tag in Alzenau zur Verfügung. Als Ersatz für das fehlende CPP an den anderen Tagen wurde eine geeignete Stelle von den Probe-Panels eingesetzt („Ersatz-CPP“). Dieses Ersatz-CPP sollte bei allen Tests, auch bei denen mit dem Original-CPP, mit gescannt werden. Beim Scannen des Original-CPP am vorletzten Tag stellte sich heraus, dass die bis dato gewählten Parameter nicht das erwartete und gewohnte Ultraschallbild lieferten. Erst durch geeignetes Anpassen der Prüfkopf-Parameter konnte dann ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden, so dass damit die Grundlage für weiterführende Untersuchungen gelegt war. Auch die Reproduzierbarkeit der einzelnen Scans zeigt ein gutes Ergebnis. Die dB-Mittelwerte von vier defektfreien Bereichen bei fünf verschiedenen Scans weisen eine sehr geringe Streuung auf (Tabelle 1).

**Tabelle 1: dB-Mittelwerte von vier defektfreien Bereichen**

	<b>Bereich X 1</b>	<b>Bereich X 2</b>	<b>Bereich X 3</b>	<b>Bereich X 4</b>
<b>Scan 1</b>	58,3	55,5	55,9	58,5
<b>Scan 2</b>	58,4	55,1	55,8	58,8
<b>Scan 3</b>	58,5	55,8	58,0	58,8
<b>Scan 4</b>	58,5	55,4	58,1	58,7
<b>Scan 5</b>	58,4	55,3	58,0	58,7

Nach dem erfolgreichen Test in Alzenau im November 2010, konnte für Mai 2011 ein Zeitfenster gefunden werden, um den Demo-Test bei PAG vor Ort in Nordenham an der Squirter-Anlage durchzuführen.

Im Zuge dieses Demo-Tests wurden zwei Phased-Array-Prüfköpfe an der Squirter-Anlage in Nordenham provisorisch angebracht, um verschiedene Glare-Bleche (mit Fehlstellen) und ein sphärisches Glare-Hautfeld im Durchschallungsverfahren prüfen zu können. Die Ergebnisse der Vorarbeiten in Alzenau dienten dabei als Ausgangspunkt für diesen Test.

Bei den untersuchten Glare -Blechen handelt es sich um sieben Bleche, die teilweise eine künstlich eingebrachte hohe Porosität aufweisen oder kleinere Defekte zeigen. Diese Bleche sowie die Referenz-Panel CPP und MRP waren gleichzeitig in der Anlage aufgespannt und konnten mit einem Scan geprüft werden.

Die folgende Tabelle 2 zeigt, welche Untersuchungen an den genannten Blechen mit wie vielen Scan-Wiederholungen durchgeführt wurden: Reihe 1 wurde im Vorhinein als Vorbereitung auf den Test an der bestehenden Anlage erledigt; die Reihen 2 bis 8 wurden während des Demo-Tests an der umgebauten Anlage untersucht.

Es wurden insgesamt zwölf Defekte (auf vier Blechen) sowie das CPP für alle oben aufgeführten Scans ausgewertet. Dabei wurde für jeden Defekt das  $dB_{\text{range, normiert}}$  (normiert auf  $dB_{\text{detect}}$ ) ermittelt, sowie für drei Defekte die Fehlergröße bestimmt. Aus

sämtlichen Ergebnissen wurden Diagramme erstellt, in denen die Zahlenwerte veranschaulicht werden. Exemplarisch werden einige Diagramme dargestellt.

**Tabelle 2: Übersicht der Test-Reihen**

Reihe	Name	Beschreibung	Scan-Wdh.	Erklärung
1.	Einzelprüfkopf	Konventionell mit Einzelprüfkopf an der bestehenden Anlage im Vorfeld des Umbaus	5x	Ausgangssituation
2.	PA NOR 300_40/40_0°	Mit Phased Array an der umgebauten Anlage mit folgenden Parametern: Scangeschwindigkeit 300 mm/sec. 40 mm Abstand auf beiden Seiten zwischen Düse und Hautfeld Einschallung senkrecht zum Hautfeld	5x	Basis-Parameter für die PA-Technik
3.	300_35/45_0°	Wie 2., jedoch mit 35 mm Abstand zwischen Sender und Hautfeld sowie 45 mm Abstand zwischen Empfänger und Hautfeld	5x	Simulation von Abweichungen zur optimalen Lage des Hautfelds
4.	300_45/35_0°	Wie 2., jedoch mit 45 mm Abstand zwischen Sender und Hautfeld sowie 35 mm Abstand zwischen Empfänger und Hautfeld	5x	
5.	300_40/40_1°	Wie 2., jedoch mit 1° Abweichung zur senkrechten Einschallung	5x	
6.	300_40/40_2°	Wie 2., jedoch mit 2° Abweichung zur senkrechten Einschallung	5x	
7.	400_40/40_0°	Wie 2., jedoch mit 400 mm/sec. Scangeschwindigkeit	5x	Ggf. schnellere Scangeschwindigkeit zur Produktivitätssteigerung
8.	300_40/40_0°	Wie 2. (Diese Scans sind in den Diagrammen als Scans 6, 7 und 8 an Reihe 2 angefügt worden.)	3x	Nochmaliges, zeitversetztes Scannen wie Reihe 2 zum Nachweis der Reproduzierbarkeit

#### Vergleich zwischen Einzelprüfkopf (Ist-Zustand) und Phased-Array (geplant)

Das  $dB_{\text{range, normiert}}$  ist für die Reihen 1 und 2 für jeden Defekt dargestellt (Abbildung 10), um die Ergebnisse der konventionellen Prüfung mit Einzelprüfkopf (EPK) den Ergebnissen der Phased-Array-Prüfung (PA) gegenüberzustellen.

Der Mittelwert von  $dB_{\text{range, normiert}}$  ist beim EPK bei den verschiedenen Defekten durchweg größer -mit einer Ausnahme- als beim Prüfen mit PA: Viermal um 3,6 – 5,8 dB, zweimal um 2,2 – 2,4 dB und fünfmal um max. 1,7 dB, davon zweimal weniger als 1 dB.

Die Schwankungsbreite der  $dB_{\text{range, normiert}}$  -Einzelwerte ist bei den PA-Scans (acht Einzelwerte, Reihe 2 und 8) geringer als bei den EPK-Scans (fünf Einzelwerte, Reihe 1): Bei den PA-Scans zehnmals 1,0 - 1,6 dB und bei je einem Defekt 3,3 sowie 4,3

dB; bei den EPK-Scans achtmal über 3 dB (max. 6,9), dreimal 1,5 – 2,6 dB und einmal 0,7 dB.

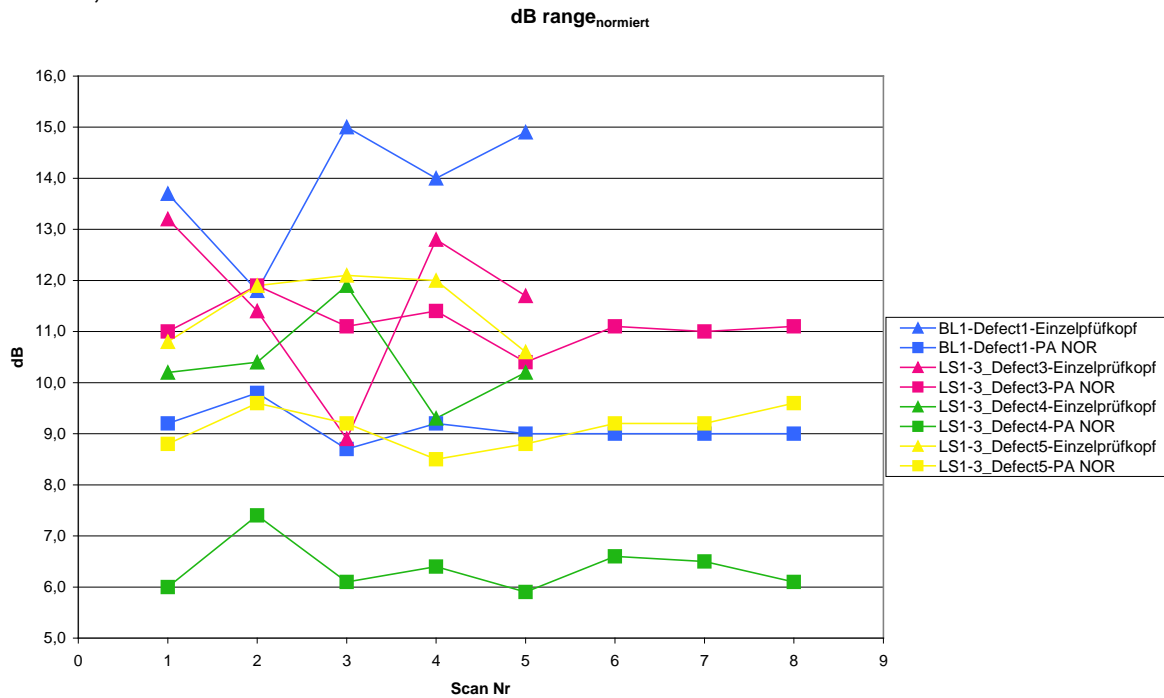


Abbildung 10: Gegenüberstellung von  $dB_{range,normiert}$  zwischen EPK und PA

In Abbildung 11 sind zusätzlich zu den  $dB_{range,normiert}$  -Werten hier auch die Fehlergrößen aufgetragen. Die Mittelwerte der Fehlergrößen sind bei den EPK- und PA-Messungen sehr ähnlich. Die Schwankungsbreite der Einzelwerte ist aber bei PA deutlich geringer.

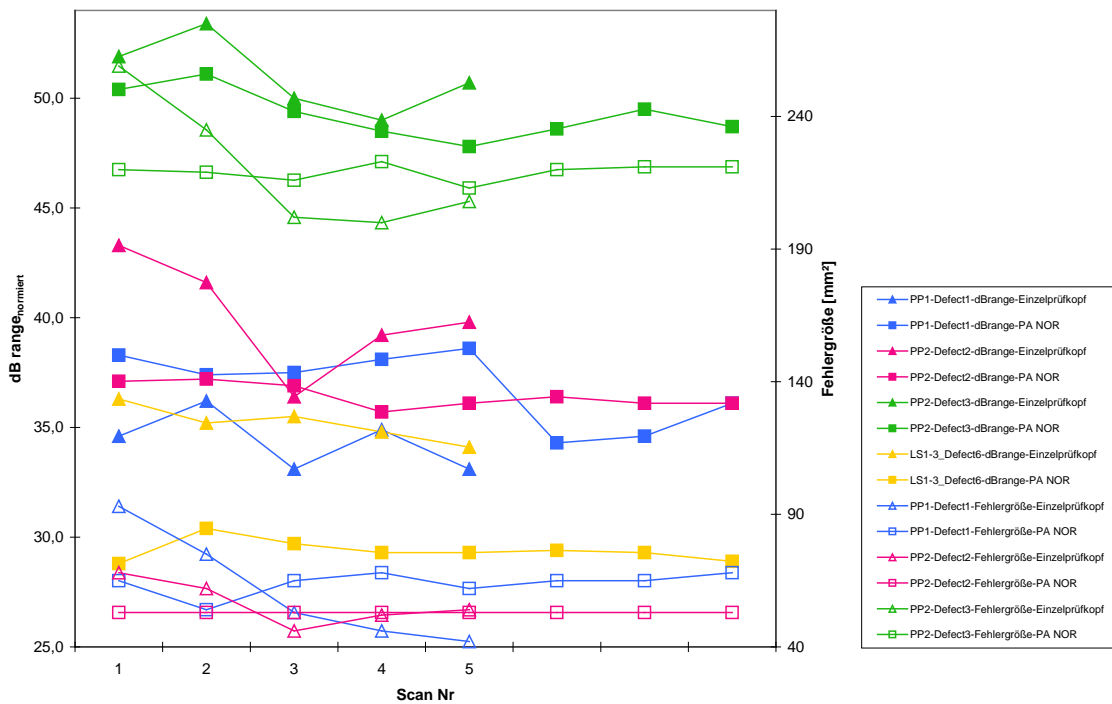
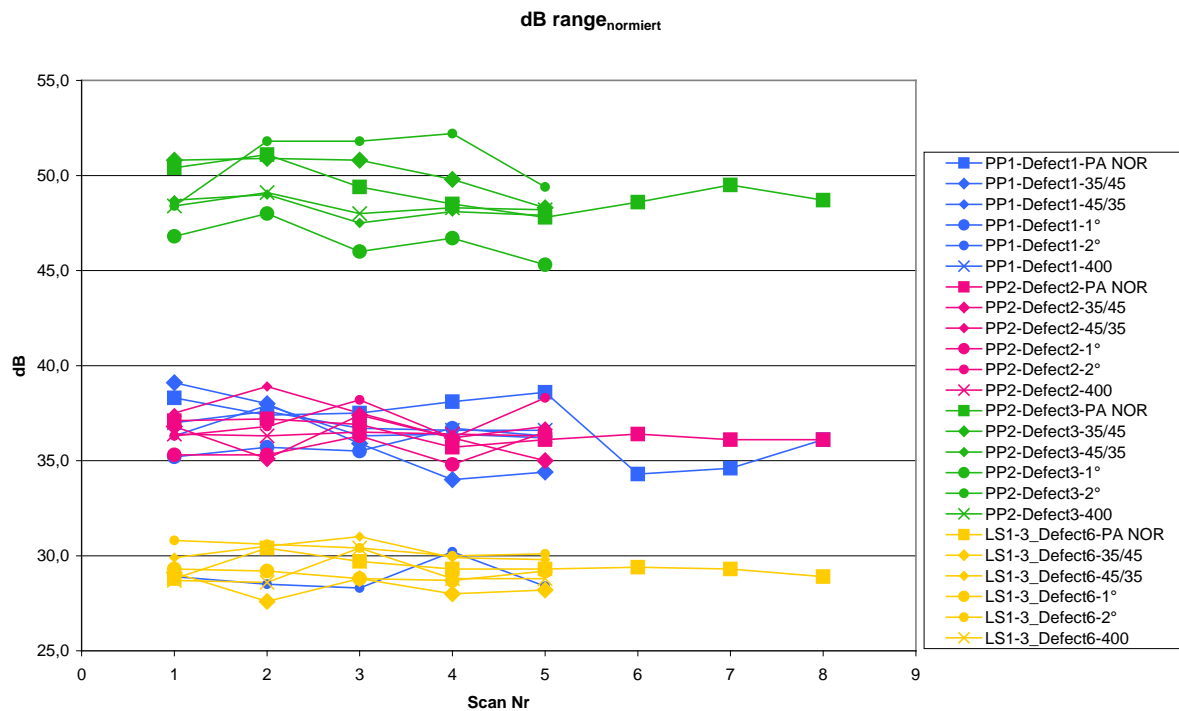


Abbildung 11:  $dB_{range,normiert}$  und Fehlergrößen

## Robustheit des geplanten Phased-Array-Systems

Das  $\text{dB}_{\text{range,normiert}}$  wurde für die Reihen 2 bis 8 für jeden Defekt ermittelt; d.h. es werden alle 33 PA-Einzelmessungen pro Defekt (einschließlich der Messungen mit nicht optimalen Parametern) dargestellt, um die Schwankungsbreite der PA-Messwerte (auch unter nicht optimalen Bedingungen) zu zeigen.

Die Schwankungsbreite aller 33 PA-Einzelmessungen pro Defekt beträgt fünfmal bis 2,4 dB und fünfmal 3,2 bis 4,9 dB; bei zwei Defekten gibt es eine „Ausreißer“-Reihe, so dass die Schwankungsbreite hier bei 6,9 bzw. 10,8 dB liegt. Beispielhaft sind einige Defekte in Abbildung 12 dargestellt.



**Abbildung 12: Schwankungsbreite von  $\text{dB}_{\text{range,normiert}}$  unter (bewusst eingestellten) nicht optimalen Bedingungen**

Wenn man für jeden Defekt einzeln die Reihen 2 bis 8 im Vergleich zueinander betrachtet, so lassen sie keinen deutlichen Trend in ihrer Beziehung untereinander erkennen. Offenbar sind die Abweichungen, die durch die nicht optimalen Parameter beeinflusst werden, relativ zufällig. Als Tendenz lässt sich erkennen, dass der Mittelwert von  $\text{dB}_{\text{range,normiert}}$  in Reihe 3 (300\_S35/E45\_0°) bei 10 von 12 Defekten geringer ist als in Reihe 4 (300\_45/35\_0°). Weiterhin liegen 2/3 der Mittelwerte von  $\text{dB}_{\text{range,normiert}}$  in Reihe 7 (400\_40/40\_0°) niedriger als in Reihe 2 und 8 (300\_40/40\_0°). Ebenfalls zu 2/3 ist die Schwankungsbreite in den Reihen 7 niedriger als in den Reihen 2 und 8; dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Reihe 7 nur aus fünf Einzelwerten besteht, die Reihen 2 und 8 zusammen aber aus acht Einzelwerten.



Nach den Test-Reihen an den Glare-Blechen wurde erfolgreich ein sphärisches Glare-Hautfeld gescannt, um zu zeigen, dass das Prüfen von realen Bauteilen ebenfalls möglich ist.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Einzelwerte der PA-Messungen trotz der - absichtlich eingestellten- nicht optimalen Bedingungen relativ dicht zusammen liegen, so dass man hier von einer gewissen „Robustheit“ des Systems gegenüber Abweichungen ausgehen darf. Die relativ geringe Schwankungsbreite der Einzelmessungen wird wahrscheinlich den Nachteil der niedrigeren Mittelwerte im Vergleich zu EPK –zumindest teilweise– kompensieren. So kann derzeit davon ausgegangen werden, dass mit einer Anpassung der Prüfvorschriften im Zuge der Qualifizierungsphase die Phased-Array-Technik an der Squirter-Anlage erfolgreich eingesetzt werden kann.

Die Entwicklung der Phased-Array-Technik an der Squirter-Anlage in Nordenham ist damit im Rahmen des Projekts HERMET abgeschlossen und wird nun im Zuge einer Investition von PAG weiter verfolgt.

### **II.1.3 TA 20 - Reibrührschweißen**

Wie bereits beim Stand von Wissenschaft und Technik (Unterkapitel I.4) erwähnt, wurde aufgrund des wachsenden Interesses am Einsatz der CFK-Technologie im Rumpfbereich des A350 die weitere Überführung des Reibrührschweißens (engl. Friction Stir Welding, FSW) in die industrielle Anwendung gestoppt. Für dieses Fügeverfahren sind deshalb bei Stumpfstößen insbesondere produktionstechnische Belange noch nicht ausreichend untersucht. Daher besteht ein wesentliches Ziel im Rahmen von HERMET darin, die benötigten technischen Grundlagen für das FSW bereitzustellen. Primär handelt es sich hierbei um Prozessparameter (Drehzahl, Vorschub, Anstellwinkel), sofern notwendig Anpassung des Werkzeugdesigns sowie weitere kritische Randbedingungen der Prozessführung (Wärmehaushalt, Spalt zwischen Stoßkanten der Fügelinie).

## **TA 20.1 Reibrührschweißen von neuen Aluminiumlegierungen**

### **Ausgangssituation**

Das bisher am meisten genutzte Fügeverfahren für metallische Rumpfstrukturen ist das Nieten (vgl. Unterkapitel I.4). Bereits ein Ersatz dieser althergebrachten Füge-technologie durch Schweißverfahren verspricht umfangreiche Gewichtseinsparungen. Beim im Folgenden untersuchten Reibrührschweißen handelt es sich um ein besonders energieeffizientes Fügeverfahren, da bei korrekter Prozessführung kein Aufschmelzen der Fügwerkstoffe stattfindet. Gleichzeitig bietet

dieser somit im Festzustand ablaufende Fügeprozess beste Voraussetzungen für eine besonders hohe Nahtqualität. Daher soll der Einsatz des FSW für das Fügen der neuen AlMgSc- und AlCuLi-Legierungen untersucht werden. Besonders diese Kombination verspricht ein umfangreiches Einsparpotential hinsichtlich Herstellungskosten und –zeit sowie Gewicht der gefertigten Rumpfstrukturen. Dieses Unterkapitel fasst somit die entsprechenden Beiträge zum Thema FSW von AlCuLi und AlMgSc zusammen, die im Rahmen von HERMET erarbeitet wurden.

### **Ziele und Herausforderungen**

Wesentliches Ziel dieses Arbeitspakets ist der Nachweis der Machbarkeit fehlerfreier FSW-Verbindungen aus den neuen Aluminiumlegierungen AlMgSc und AlCuLi. Weiterhin soll die Robustheit des FSW-Prozesses gegenüber nicht optimalen Bedingungen beim Schweißvorgang beurteilt werden, wie z.B. einem möglichen Spalt zwischen den zu verschweißenden Blechen. Die im Wesentlichen herangezogenen Qualitätskriterien der Verbindung sind Fehlerfreiheit, Härte und Festigkeit.

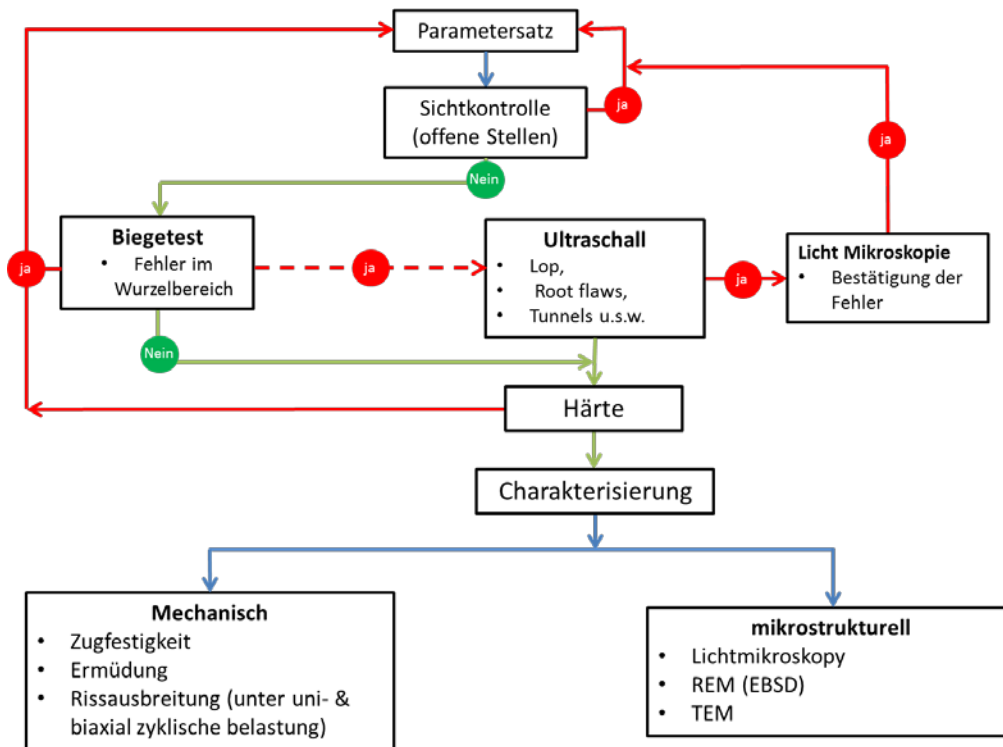
### **Vorgehensweise**

Abbildung 13 gibt einen schematischen Überblick, wie die FSW-Prozessparameter für neue Materialien am Institut für Werkstoff-Forschung üblicherweise systematisch ermittelt werden. Ausgangspunkt für die erste Schweißung ist normalerweise eine Parameterschätzung, die auf Grundlage jahrelanger Erfahrungen im Bereich des FSW-Prozesses wie auch metallographischer und werkstoffmechanischer Untersuchungen vielzähliger FSW-Verbindungen erfolgt.

Sowohl Drehzahl und Vorschub als auch Werkzeuggeometrie und Anstellwinkel werden je nach Legierungsgruppe heuristisch bestimmt. Die Qualität der Schweißnähte wird zunächst mit Hilfe von Sichtkontrolle und Biegetest geprüft: Nach dem Schweißen werden die FSW-Verbindungen optisch nach offenen Stellen sowohl auf der Oberseite als auch auf der Unterseite im Wurzelbereich kontrolliert; beim Biegetest werden gravierende Schweißfehler im Wurzelbereich, zum Beispiel „lack-of-penetration“ (LOP), Rootflaws oder u.U. Tunnel, üblicherweise direkt gefunden. Da geschlossene Fehler auch in der oberen Hälfte der Naht entstehen können, werden metallographische Querschliffe mikroskopisch untersucht. Anschließend wird die gesamte Schweißnaht hinsichtlich möglicher Diskontinuitäten durch Schweißfehler mittels Ultraschalltests geprüft. Für den Fall, dass Schweißfehler gefunden werden, erfolgt die gezielte Variation der FSW-Parameter solange, bis fehlerfreie Nähte vorliegen.

Der nächste Schritt in der Parameteroptimierung ist die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Härtemessungen korrelieren meist stark mit den quasi-statischen mechanischen Eigenschaften (Fließgrenze, Festigkeit) der Naht. Dies bedeutet, dass normalerweise jede signifikante Änderung der quasi-statischen mechanischen Eigenschaften durch Variation der FSW-Parameter bereits durch die

Härtemessungen qualitativ bestimmt werden kann. Aus diesem Grund werden für alle neuen Schweißungen Härteprofile quer zur FSW-Naht gemessen. Wenn sich trotz Parametervariation keine weitere Verbesserung der Härteprofile einstellen lässt, ist die erste Optimierung der Schweißnahtparameter abgeschlossen. Die zugehörigen FSW-Verbindungen werden anschließend weiter mikrostrukturell und mechanisch charakterisiert.



**Abbildung 13: Findung bzw. Optimierung der FSW-Prozessparameter neuer Aluminiumlegierungen**

Während der FSW-Prozess im Rahmen von HERMET unter Laborbedingungen abläuft, bietet die zukünftige industrielle Praxis weitere Herausforderungen. Im Labor kommen Bleche zum Einsatz, deren Ist-Geometrie normalerweise deutlich weniger als 0,1 mm von den Sollwerten abweicht, gleiches gilt für die Positionierung und Ausrichtung der zu fügenden Bleche in der FSW-Anlage. In der industriellen Anwendung liegen aber beispielsweise Maßtoleranzen für Bleche bisweilen bereits in der Größenordnung 0,1 mm. Und auch Position und Lage großer Rumpfbauteile lassen sich in der Regel nicht vollumfänglich mit Genauigkeiten deutlich kleiner diesem Wert einstellen. Ein wichtiger Faktor für die Qualität einer FSW-Naht liegt aber gerade in der Genauigkeit, mit der die Stoßkanten der Bleche aneinander liegen. Um somit die Robustheit des FSW-Verfahrens gegenüber den in einem zukünftigen Produktionsprozess möglichen Schwankungen zu untersuchen, werden Schweißungen mit einem bewusst eingestellten Spaltmaß von 0,25 bzw. 0,50 mm durchgeführt. Neben der Frage, ob trotz Spaltes überhaupt ein geschlossene Fügestelle erzielt werden kann, wird natürlich für visuell fehlerfreie Verbindungen auch die Qualität dieser Schweißnähte nach den üblichen Kriterien Härte und Zugfestigkeit untersucht.

## Ergebnisse

Während der Projektlaufzeit gab es drei wesentliche Gründe dafür, dass der Schwerpunkt der Untersuchungen in Abstimmung mit den Projektpartnern auf AlMgSc gelegt wurde.

1. Seit Projektbeginn bestanden speziell für AlCuLi Lieferschwierigkeiten, so dass das Institut für Werkstoff-Forschung direkt bei Aufnahme der Projektaktivitäten auf den internen projektunabhängigen und im Umfang beschränkten Blechbestand zurückgreifen musste.
2. In der Diskussion sowohl der eigenen wie auch in der Literatur vorhandener Untersuchungsergebnisse stellten die Projektpartner einvernehmlich fest, dass der Entwicklungsgrad für AlCuLi als bis dato nahezu ausreichend eingestuft werden kann. Im Vergleich zu AlCuLi wies AlMgSc also ein deutliches Untersuchungsdefizit hinsichtlich seiner industriellen FSW-Einsatztauglichkeit auf, das es im Rahmen des KOMET-Verbundes zu egalisieren galt.
3. AlMgSc weist im Bereich des Kriechformens ein deutlich höheres Potential als AlCuLi auf, wodurch sich ein weiterer Mehrwert der detaillierteren Untersuchung des FSW für AlMgSc ergibt.

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich der Großteil der nachfolgenden Ausführungen mit AlMgSc. Die Arbeiten zu AlCuLi erfolgten dementsprechend nur in dem Umfang, der notwendig war, um im Rahmen von KOMET eine Vergleichbarkeit der beiden Legierungen hinsichtlich ihrer industriellen FSW-Einsatztauglichkeit herzustellen.

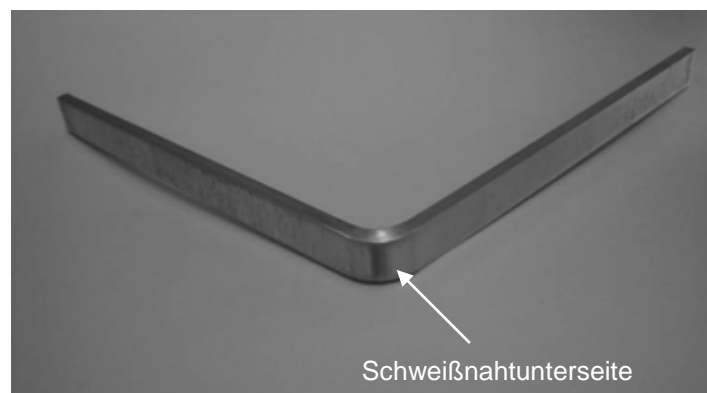
### Aluminium-Kupfer-Lithium FSW-Verbindungen

Rumpfstrukturen weisen in ihren Hautfeldern meist Blechdicken ungefähr im Bereich von 1 mm bis 6 mm auf. Dementsprechend erfolgten die Untersuchungen zum FSW-Stumpfstoß für AlCuLi (2098-T8) an im Institut vorhandenen Blechen mit einer Dicke von 3,2 mm. Die erste Wahl der Schweißparameter basierte wie weiter oben ausgeführt auf den Erfahrungen des Instituts für Werkstoff-Forschung im Bereich des Reibrührschweißens. Das gewählte Werkzeug hat einen Schulterdurchmesser von 12,5 mm und verfügt über einem konischen, profilierten Pin mit einem Durchmesser von 4,5 mm. Die Details dieses FSW-Prozesses sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

**Tabelle 3: FSW-Parameter der Stumpfnah in AlCuLi (2098-T8)**

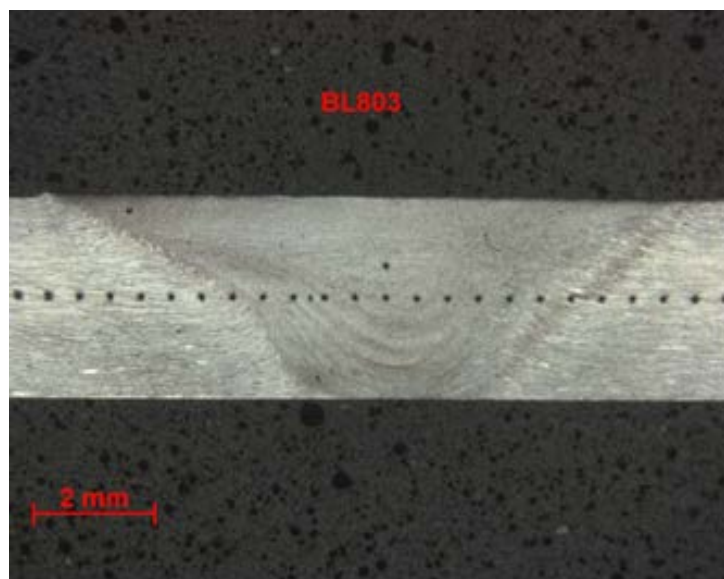
<b>Blech</b>	<b>Dicke [mm]</b>	<b>Drehzahl [U/min]</b>	<b>Vorschub [mm/min]</b>	<b>Anstellwinkel [°]</b>
BL803	3,2	1000	300	0,4°

Eine erste Beurteilung der Nahtqualität erlauben die einfach durchzuführenden Biegeversuche, bei denen die Proben so um 90° gebogen werden, dass die Schweißnahtunterseite auf dem äußeren Biegeradius liegt. Hierzu wurde ein 10 mm breiter Streifen quer zur Schweißnaht der AlCuLi-Legierung entnommen und um einen Radius von ca. 35 mm gebogen. Anschließend wurde die Schweißnahtunterseite mit Hilfe eines Mikroskops untersucht. Auf der Schweißnahtunterseite können kritische Schweißfehler, z.B. lack-of-penetration (LOP), entstehen. Bei Vorliegen eines Schweißfehlers wären nach dem Biegen auf der Schweißnahtunterseite Risse zu sehen. Bei der in Abbildung 14 gezeigten Biegeprobe der 2098-T8-Verbindung konnten keine solchen Risse gefunden werden, so dass bereits der erste FSW-Parametersatz als für die weiteren Untersuchungen geeignet eingestuft wurde.



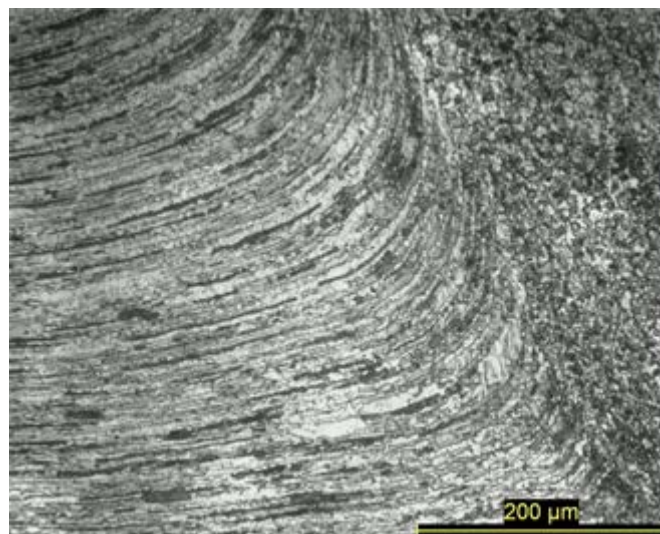
**Abbildung 14: Probe der FSW-Schweißnaht aus 2098-T8 nach dem Biegeversuch**

Auch der Querschliff in Abbildung 15 zeigt keine ausgeprägten Schweißfehler, so dass die Naht grundsätzlich als frei von LOP, Rootflaw und Hohlräumen angesehen werden kann.



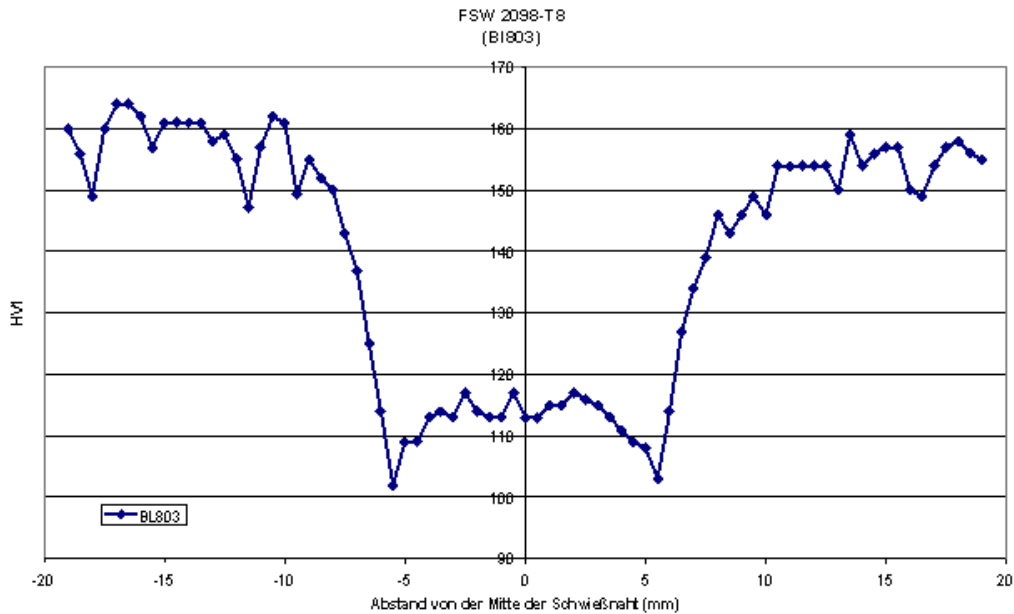
**Abbildung 15: Querschliff von Blech BL803, AlCuLi**

Deutlich zeigt das Schliffbild hingegen die drei für FSW-Nähte charakteristischen mikrostrukturellen Bereiche: Im Rührbereich in der Mitte der Schweißnaht entsteht aufgrund der Kombination aus hohem Verformungsgrad, hoher Temperatur und Vermischung der beiden gefügten Bleche das so genannte „Zwiebelringe“-Muster, das aus fein rekristallisierten Körnern besteht. An diesen Bereich schließt sich die thermomechanisch beeinflusste Zone (engl. Thermo Mechanically Affected Zone, TMAZ) an, die im Wesentlichen durch deutlich verformte Körner und unvollständige Rekristallisation des ursprünglichen Gefüges gekennzeichnet ist. Der Übergang zwischen Rührbereich und TMAZ erfolgt schlagartig, insbesondere auf der Advancing Side (AS) der FSW-Verbindung (Abbildung 16).



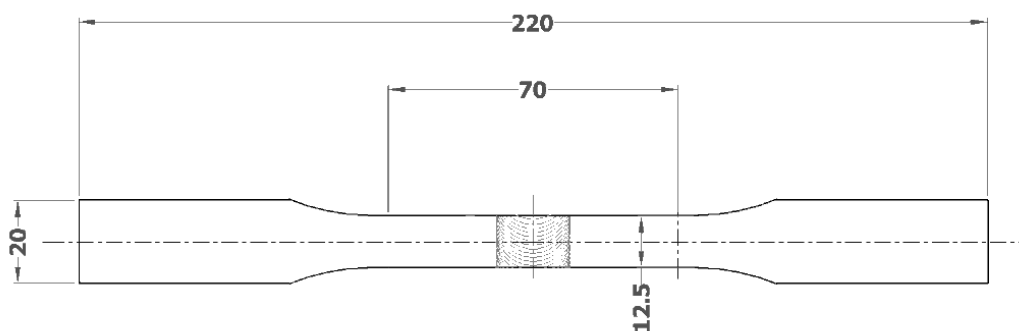
**Abbildung 16: Übergang zwischen Rührbereich und TMAZ**

In der Mitte des Querschliffes wurden Vickers-Härtemessungen (Abbildung 17) durchgeführt, wobei die Härtewerte (siehe auch Abbildung 15) einen guten Indikator für die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Gefüge darstellen. Der Nahtbereich selbst zeigt hierbei einen deutlichen Härteabfall im Vergleich zum Grundmaterial. Im Bereich der TMAZ fallen die Härtewerte auf beiden Seiten der Schweißnaht auf ca. 60 % der Härte des Grundmaterials ab. Die vergleichsweise hohen Temperaturen im Rührbereich führen vermutlich zu einer Überalterung des Werkstoffes in der Schweißzone, die mit einer Vergrößerung der Ausscheidungen und einem deutlichen Abfall der Härte verbunden ist. Weiterhin wurde im zentralen Bereich der Schweißnaht wahrscheinlich die Lösungstemperatur der feinen Ausscheidungsphasen überschritten, wodurch eine Wiederausscheidung während der Kaltauslagerung ermöglicht wird. Dies macht sich durch einen leichten Anstieg der Härtewerte im Rührbereich im Vergleich zur TMAZ bemerkbar.



**Abbildung 17: Härteverlauf quer zur FSW-Schweißnaht bei der AlCuLi-Verbindung**

Um den Einfluss des Härteverlusts im Rührbereich auf die mechanischen Eigenschaften der Verbindung zu untersuchen, wurden Zugversuche durchgeführt. Dafür wurden quer ( $90^\circ$ ) zur Schweißnaht Proben entnommen. Da diese Proben keine der allgemein verbreiteten Standardgeometrien aufweisen, zeigt Abbildung 18 die Geometrie und Orientierung der Proben mit angedeuteter FSW-Naht. Zur Ermittlung lokaler Dehnungen kam ein Laserextensometer zum Einsatz. Hierbei tastet ein Laser die mit Markierungen versehene Probenoberfläche während des Versuchs in Richtung der erwarteten Hauptdehnung ab. Das System registriert basierend auf den Reflexionsbildern des Laserstrahls Verschiebungen zwischen den Markierungen und somit letztendlich die lokalen Dehnungen für eine minimale Messlänge von jeweils 2 mm. Die globale Dehnung der Probe wird bezogen auf die in Abbildung 18 eingezeichneten 70 mm Länge bestimmt.



**Abbildung 18: Geometrie der Zugprobe von BL 803**

Die Zugfestigkeit der FSW-Verbindungen aus AlCuLi (2098-T8) ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Die FSW-Naht wies eine hohe Festigkeit auf. Der Festigkeitsverlust der quer zur Schweißnaht belasteten Probe beträgt lediglich 12%

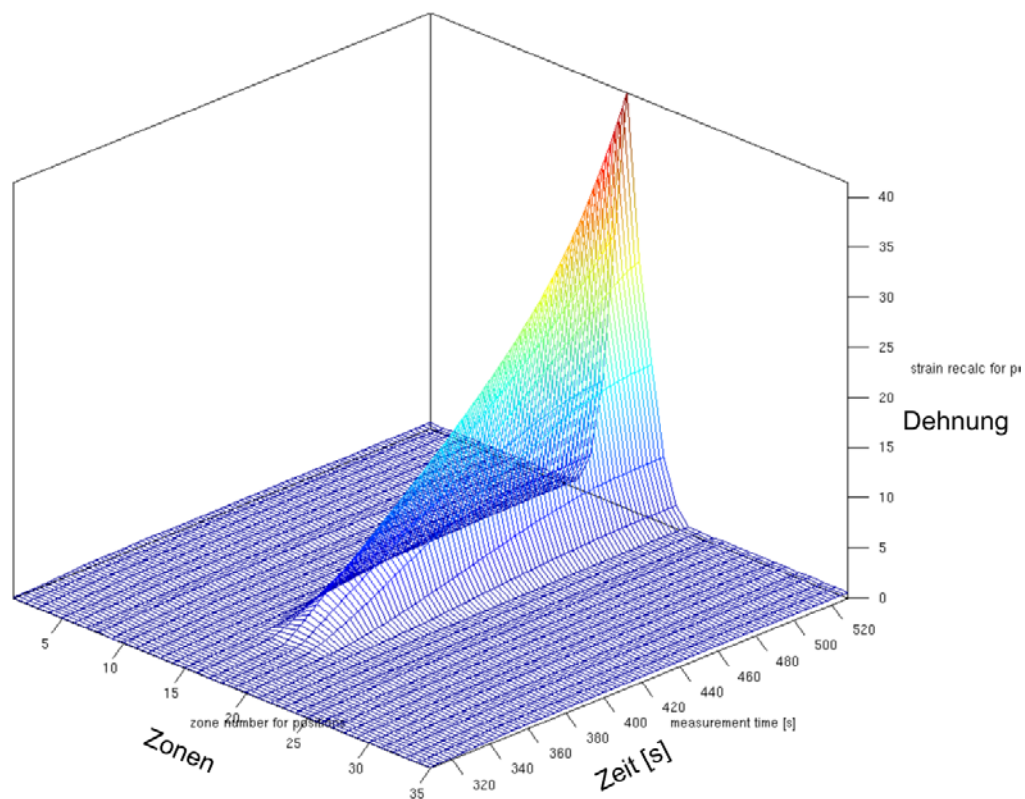
verglichen mit dem AlCuLi-Grundmaterial. Bei FSW-Verbindungen tritt im Zugversuch typischerweise eine inhomogene Verfestigung der verschiedenen Schweißzonen (HAZ, TMAZ und Rührbereich) und damit eine Dehnungslokalisierung im Bereich der späteren Bruchstelle auf, siehe Abbildung 19. Normalerweise korreliert die Dehnungsverteilung auf der Probenoberfläche für die FSW-Verbindung sehr gut mit dem Härteprofil. Die Lage der höchsten lokalen Dehnungen und die der Härteminima sowie die Lage der kleinsten lokalen Dehnungen und die der Härtemaxima fallen typischerweise zusammen.

**Tabelle 4: Festigkeit und Dehnungswerte der 3 mm dicken FSW 2098-T8**

Probe	Orientierung	Gauge length [mm]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	A [%]	FSW Index
JS0493S	90°	70	418	299	3,8	78%
		1 <sup>(*)</sup>		266	42	

<sup>(\*)</sup> gemessen mit Hilfe eines Laserextensometers.

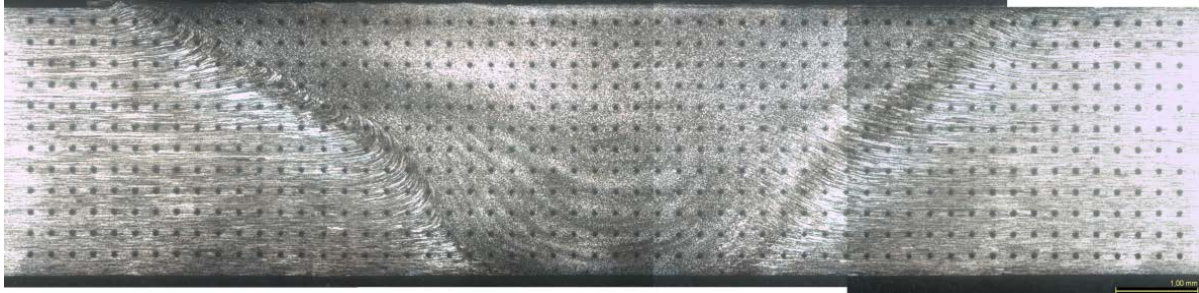
Wie der Vergleich zwischen Härteprofil und lokalen Dehnungen im Zugversuch zeigt, fand der Bruch der AlCuLi-Probe (JS0493S) in der Mitte der FSW-Naht, d. h. außerhalb der Härteminima (TMAZ) statt, vgl. Abbildung 17 und Abbildung 19.



**Abbildung 19: Probe JS0493S, Dehnungs-Zeit-Diagramm**

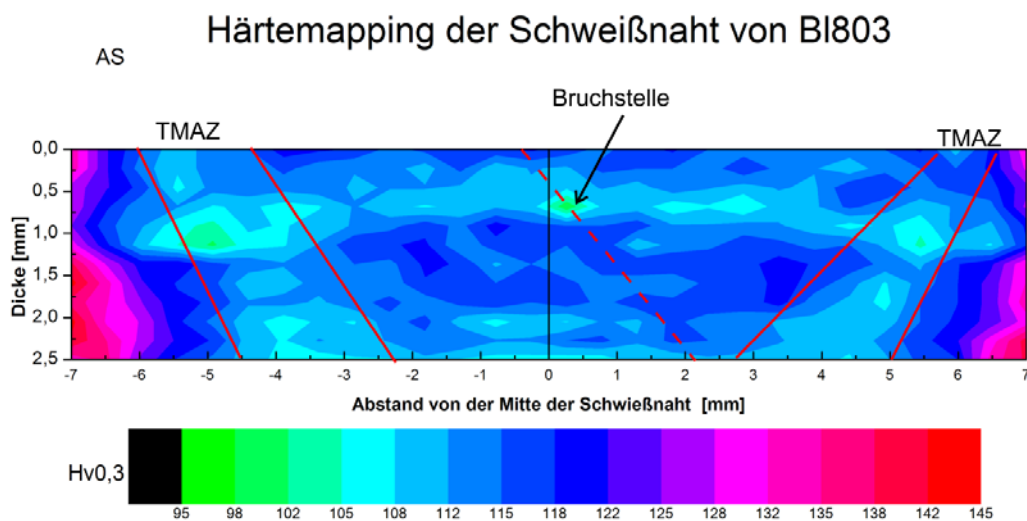


Dieses Versagen der Probe außerhalb der Härteminima ist eigentlich atypisch für fehlerfreie FSW-Nähte, so dass eine detailliertere Betrachtung der in der FSW-Naht vorliegenden Härteverteilung erfolgte. Hierzu wurden über die gesamte Fläche des Querschliffs verteilt Härtemessungen durchgeführt, siehe Abbildung 20. Die 0,3 HV-Indentationen wurden rasterförmig mit einem Abstand von 250  $\mu\text{m}$  platziert, wodurch eine hohe örtliche Auflösung der Härteverteilung erfolgt.



**Abbildung 20: FSW-Naht in AlCuLi, Querschliff mit rasterförmig angeordneten Eindrücken der Härtemessungen**

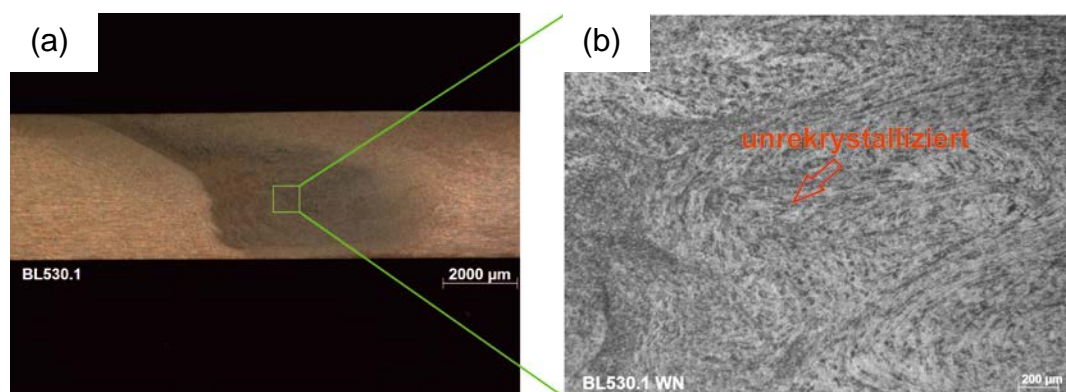
Abbildung 21 zeigt die gemessenen Härtewerte in Falschfarbendarstellung. Hierbei zeigen sich deutlich die ausgeprägten Härteminima im Bereich der TMAZ rechts und links der Schweißnaht. Ein bandförmiger Bereich mit ähnlichen Härtewerten befindet sich allerdings auch im oberen Bereich der Schweißnaht, wo letztendlich auch das Versagen im Zugversuch auftrat. Dieser dritte Bereich besonders niedriger Härte wurde in der sonst für Schweißnähte üblichen Messung entlang nur einer Linie nicht erfasst, da diese Linie im Bild unterhalb verläuft. Insofern scheint diese zweidimensionale Messung und graphische Darstellung des Härteverlaufes besonders empfehlenswert, um auf einfache Art und Weise eine möglicherweise unzureichende Schweißnahtqualität zu erkennen. Somit könnte bereits vor Durchführung z. B. von Zugversuchen eine gezielte und ausgeprägtere Optimierung der FSW-Parameter erfolgen, als es basierend auf den Härteprofilen entlang einer Linie möglich ist.



**Abbildung 21: Härtemapping der BL803 Schweißung**

## Aluminium-Magnesium-Scandium FSW-Verbindungen

Als Ausgangspunkt für die Parameterfindung dienten frühere Schweißversuche an AlMgSc-Legierungen, die im Rahmen einer Kooperation zwischen DLR und Airbus durchgeführt wurden. Bei den nachfolgend vorgestellten Versuchen wurden 2,6 und 3,4 mm dicke Stumpfstöße mit einer konkaven Werkzeugschulter (18 mm Durchmesser) und einer 0,5 mm dicken Titanfolie als Unterlage geschweißt. Sowohl bei den dickeren als auch bei den dünneren Blechen war der Materialtransport unterhalb des Schweißwerkzeugs während der ersten Versuchsreihen nicht optimal. In der Mitte der Naht traten deutlich unrekristallisierte Bereiche auf (siehe Abbildung 22), die in dieser Ausprägung ggf. einen negativen Effekt auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundes haben können. Außerdem hatte die Unterlage aus Ti-Folie eine sehr niedrige Wärmeabfuhr während des FSW-Prozesses zur Folge. Dies führte zu einem Anstieg der Prozesstemperaturen, so dass ob des wärmeren und damit leichter plastifizierbaren Materials ein deutlich ausgeprägter Materialaufwurf am Rand der Schweißnaht (sog. Flash, nicht dargestellt) auftrat.



**Abbildung 22: Mikrostruktur einer FSW-AlMgSc-Verbindung (Ko8242): (a) Makroschliff und (b) nicht rekristallisierte Körner in der Nahtmitte.**

Art und Umfang des Materialtransportes im Nahtbereich werden neben den Prozessparametern vor allem durch die Geometrie des eingesetzten FSW-Werkzeuges bestimmt. Zur Verbesserung des nicht optimalen bzw. ungenügenden Materialtransportes wurde somit im Rahmen von HERMET ein Neudesign der Werkzeugschulter durchgeführt. Insbesondere wurde die Schulterfläche mit spiralförmigen Ausschnitten versehen, die sich in der Mitte der Schulter treffen, siehe Abbildung 23. Solche Spiralen verbessern grundsätzlich den Materialtransport von der Oberfläche zur Unterseite des Blechs und können damit wesentlich zu einer Verbesserung der Mikrostruktur in der Schweißnaht beitragen. Zusätzlich wurde aufgrund der Erfahrungen mit den erhöhten Prozesstemperaturen und dem dadurch hervorgerufenen stärker ausgeprägten Flash auf die Verwendung der Ti-Unterlage verzichtet.



**Abbildung 23: Neues Werkzeugschulterdesign für FSW von AlMgSc-Legierungen (Darstellung ohne Pin)**

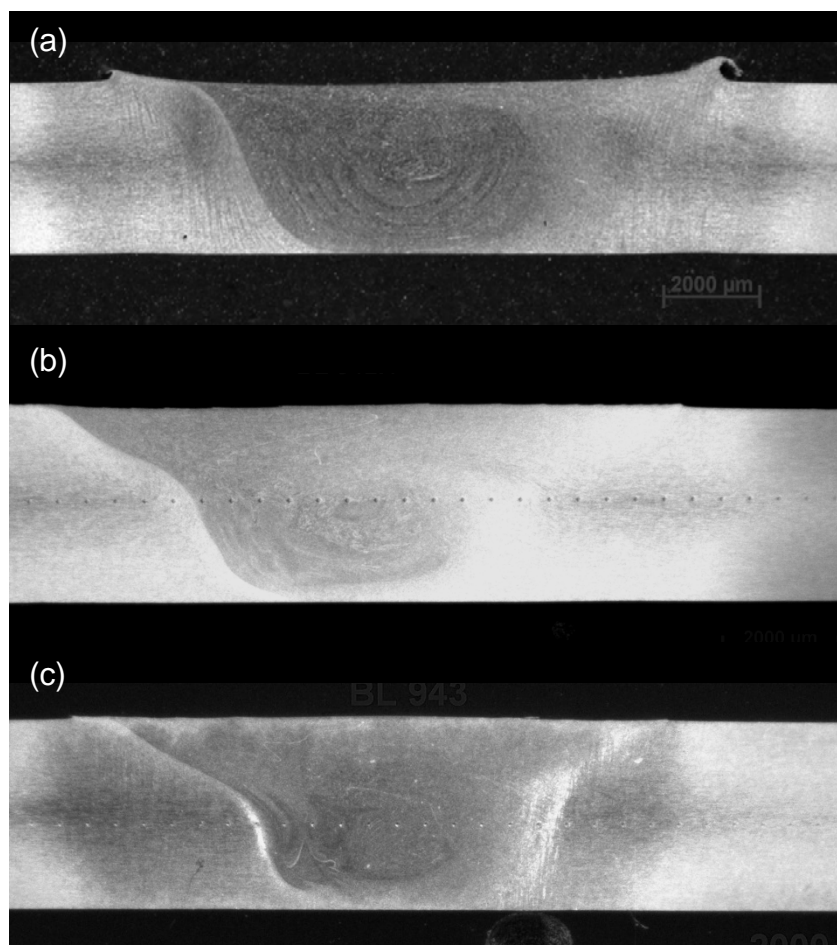
Alle weiteren Schweißversuche zur Optimierung der FSW-Parameter erfolgten unter Verwendung des verbesserten Werkzeugdesigns. Tabelle 5 fasst die untersuchten Parameter für AlMgSc-Bleche mit einer Dicke von 3,4 mm zusammen. Bei BL942 und BL943 wurde die Schweißgeschwindigkeit (Vorschub) erhöht, um kältere und infolgedessen üblicherweise verbesserte mechanische Eigenschaften zu erreichen. Hierbei trat allerdings bei der höchsten Vorschubgeschwindigkeit (BL943) ein Bruch des FSW-Werkzeugs auf; der Pin brach, nachdem Dreiviertel der zu fügenden Länge geschweißt worden waren. Die während des Prozesses gemessenen Schweißkräfte zeigen, dass der Schweißprozess unter diesen Prozessparametern keine stationären Prozessbedingungen (d. h. konstante Kräfte und Momente) erreicht hat. Die Ursache hierfür liegt in den zu niedrigen Prozesstemperaturen begründet, wodurch sich zu hohe Fließspannungen für das Material in der Prozesszone ergeben. Folglich kann sich der benötigte Materialfluss im Fügebereich nicht einstellen, und es kommt zu ausgeprägten Schwankungen in den Prozesskräften und Momenten. Im Ergebnis führten die zu hohen Kräfte letztendlich zum Bruch des Schweißpins.

**Tabelle 5: Schweißparameter und Festigkeit von FSW Ko8242**

Blechnummer	Legierung	Drehzahl [U/mm]	Vorschub [mm/min]
BL901	Ko8242	1200	300
BL942		1200	600
BL943		1200	1000

Ähnlich wie bei den Untersuchungen der AlCuLi-Legierung zeigt der Querschliff der FSW-Naht in AlMgSc besonders bei der Schweißung BL901 eine runde FSW-Naht mit dem typischen „Zwiebelringe“-Muster in der Mikrostruktur, siehe Bild (a) in

Abbildung 24. Das Flash-Material, welches durch die Reibung der Schweißschulter auf der Oberseite des Grundmaterials erzeugt wird, ist relativ stark ausgeprägt. Die Erhöhung des Vorschubs verursachte verschiedene Änderungen der Form der Nähte. Beide Bleche BL942 und BL943 besitzen „konische“ Schweißnähte, deren Geometrie in etwa dem Durchmesser und der Form des Schweißpins folgt. Dabei trat wenig bis gar kein Flash-Material auf der Oberseite auf. Dies weist darauf hin, dass im Vergleich zu BL901 bei diesen FSW-Prozessen jeweils ein kleineres Volumen plastifizierten Materials erzeugt wurde. Wenn die Plastifizierung während des FSW-Prozesses zu gering ist, kann es zu Schweißfehlern z. B. in Form sogenannter Tunnel kommen. Diese wurden auch im Rahmen der Untersuchungen an Probe BL943 ungefähr mittig in der FSW-Naht auf der Advancing Side gefunden.

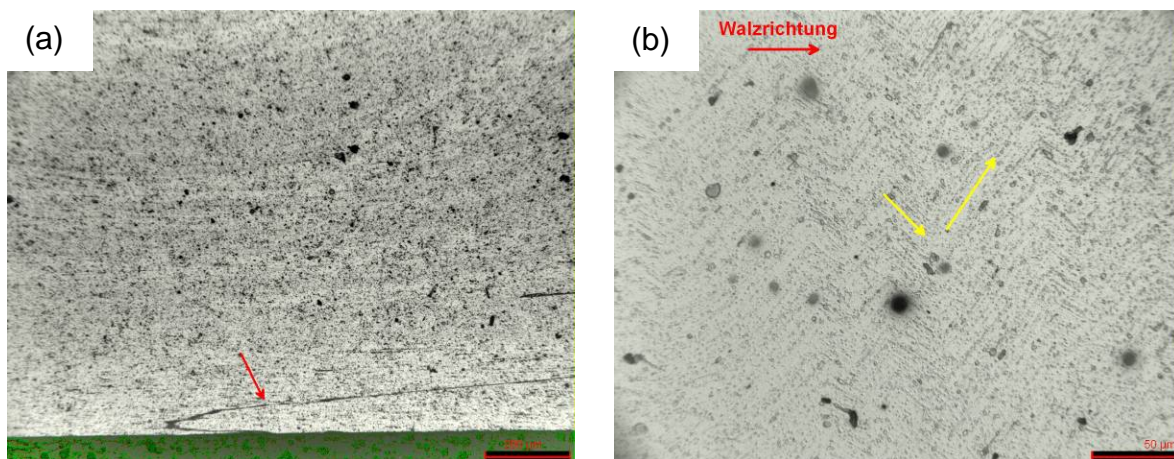


**Abbildung 24: FSW-Naht in AlMgSc (Ko8242), Stumpfstöße, (a) BL901, (b) BL942 und (c) BL943**

Trotz der Unterschiede in den drei FSW-Nähten zeigen sich auch Gemeinsamkeiten. Der Übergang zwischen der Wärmeeinflusszone und dem Rührbereich auf der Retreating Side (jeweils rechte Seite in Abbildung 24) ist bei allen drei Schweißungen diffus, während er auf der Advancing Side (linke Seite der Naht) sehr scharf ausgeprägt ist. Abbildung 25 (b) zeigt, dass die Ko8242-Legierung den ob des Scandium-Zusatzes erwarteten Widerstand gegen Rekristallisation aufweist. Die ursprünglichen Körner in der thermomechanisch beeinflussten Zone auf der

Advancing Side sind „faserig“ und verdreht, wobei die „Faserigkeit“ noch direkt auf die ursprüngliche Walzstruktur des Bleches zurückzuführen ist.

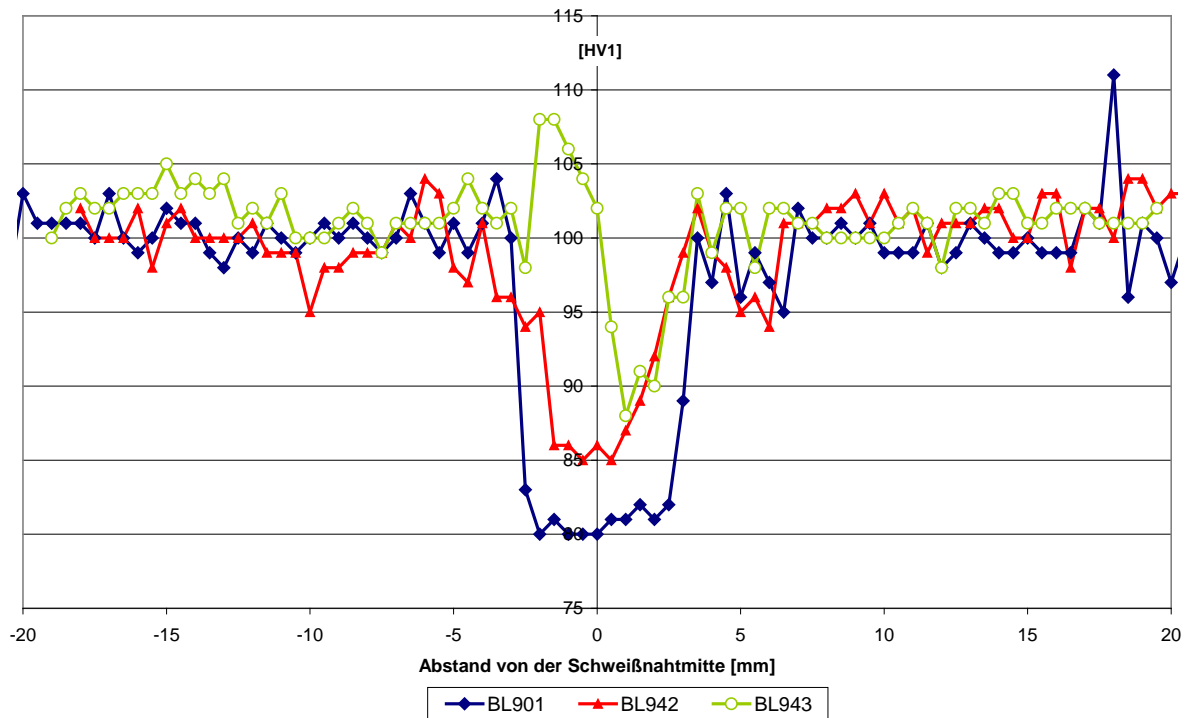
Die Untersuchungen der heißesten FSW-Verbindung (BL901) mit dem Lichtmikroskop weisen einen Rootflaw an der Unterseite der Schweißnaht auf, siehe roter Pfeil in Abbildung 25 (a). Aufgrund seiner Form und Ausprägung wird kein signifikanter Einfluss auf die statische Festigkeit der Verbindung erwartet. Ob dies allerdings auch, wie bisweilen in anderen Untersuchungen behauptet, für die Festigkeit unter zyklischer Beanspruchung gilt, sollte zukünftig vor einem industriellen Einsatz des FSW-Verfahrens für AlMgSc-Legierungen näher untersucht werden.



**Abbildung 25: Details der FSW-Naht in AlMgSc (Ko8242), BL901, (a) Rootflaw, (b) „verdrehte“, nicht rekristallisierte Körner in der HAZ auf der AS**

In Abbildung 26 sind die zugehörigen Härteprofile der Bleche BL901, BL942 und BL943 dargestellt. Alle untersuchten FSW-Verbindungen aus AlMgSc (Ko8242) zeigen grundsätzlich den charakteristischen Härteverlauf von reibrührgeschweißten kaltverfestigten Aluminiumlegierungen, bei denen es besonders im Rührbereich zu einem ausgeprägten Härteabfall kommt. Im vorliegenden Fall beträgt dieser Härteabfall relativ zum Grundmaterial ca. 20 % bei der heißesten FSW-Naht (BL901), was auf die mikrostrukturellen Veränderungen (vermutlich Rekristallisation) im Schweißnugget zurückzuführen ist. Die Breite der weichen Zone korreliert in etwa mit der Breite der verwendeten Werkzeugschulter. In größerer Entfernung (ca. 6 mm von der Mitte der Schweißnaht) weist das Härteprofil einen sehr steilen Härteanstieg bis zum Wert des Grundmaterials (ca. 110 HV<sub>1</sub>) auf. Die insgesamt niedrigeren thermo-mechanischen Belastungen während des FSW von BL942 resultieren in einem geringeren Härteabfall in der Mitte der Schweißverbindung. Gleichzeitig reduziert sich hierbei die Breite der weicheren Zone auf ca. 5 mm. Im Gegensatz dazu besitzt die kälteste Verbindung (BL943) ein auffällig asymmetrisches Härteprofil. Auf der Advancing Side der Schweißnaht (zwischen -2 mm und 0 mm) kann eine Erhöhung der Härte festgestellt werden, während die andere Hälfte der Naht auf der Retreating Side einen Abfall der Härte aufweist. Für ein vertieftes Prozessverständnis, wie es im Rahmen dieser Untersuchungen allerdings ob der

erzielten hohen FSW-Indexwerte (siehe Tabelle 6) nicht benötigt wird, wären zukünftig detailliertere mikrostrukturelle Untersuchungen und Auswertungen der Schweißparameter sowie Schweißkräfte empfehlenswert, um den Einfluss der FSW-Parameter auf die mechanischen Eigenschaften der Naht systematisch herauszustellen.



**Abbildung 26: Härteprofile der FSW-Verbindungen in AlMgSc (KO8242)**

Neben den Härtemessungen und metallographischen Untersuchungen wurden für die (tunnel-) fehlerfreien Nähte BL901 und BL942 ebenfalls Zugversuche an 10 mm breiten Streifen durchgeführt, um einen ersten Eindruck von der Festigkeit der Verbindung zu erhalten. Die Schweißnaht wurde hierbei wie üblich senkrecht zur Belastung ausgerichtet. Die ermittelten Festigkeiten sind in Tabelle 6 angegeben. In beiden Fällen erfolgte das Versagen der FSW-Verbindungen durch duktile Brüche, was die üblicherweise erwünschte Bruchform darstellt.

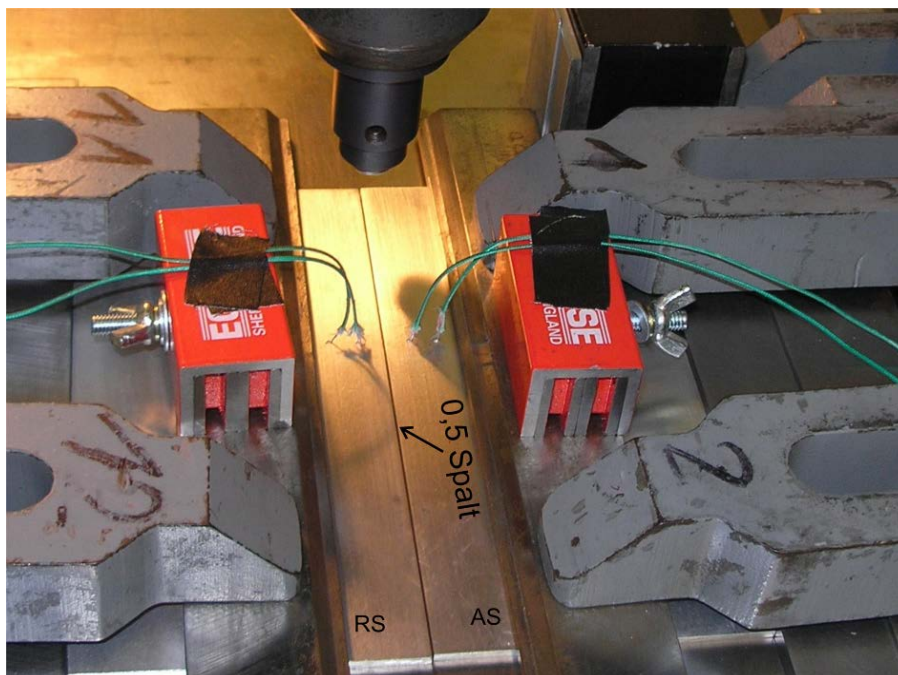
**Tabelle 6: Schweißparameter und Zugfestigkeit von FSW-Stumpfstößen aus AlMgSc (Ko8242)**

Probe	$R_m$ [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	FSW-Index [%]
BL901	303	---	80
BL942	317	233	86

Die Erhöhung der Festigkeit von 80 % bei BL901 auf 86 % bei BL946 ist auf den höheren Vorschub zurückzuführen. Es ist allgemein bekannt, dass höhere Vorschübe kältere Schweißbedingungen erzeugen, so dass kleinere rekristallisierte Körner entstehen, die zu einer Erhöhung der Nahtfestigkeiten führen können. Wie die Untersuchungen an Probe BL943 aber gezeigt haben, ist eine beliebige Steigerung des Vorschubs und damit ggf. der Festigkeit aus zwei Gründen nicht praktikabel. Zum einen kann es bei zu großem Vorschub zur Ausbildung von Fehlern, wie z. B. dem beobachteten Tunnel kommen. Zum anderen steigt die Wahrscheinlichkeit für einen Bruch des Werkzeuges bzw. des Pins deutlich an. Besonders beim FSW großer Rumpfstrukturen wäre ein solches Versagen des Werkzeugs natürlich fatal, da unter Umständen die ganze Struktur im Fügebereich irreparabel beschädigt werden könnte. Im Rahmen der hier durchgeführten Versuchsreihen wird somit für das verwendete Werkzeug ein Vorschub von 600 mm/min bei einer Drehzahl von 1200 U/min als optimal für das FSW von AlMgSc (Ko8242) angesehen.

### Spalteinfluss beim FSW

Während die beim DLR unter Laborbedingungen durchgeführten FSW-Prozesse mit (nahezu) beliebiger Genauigkeit ausgeführt werden können, gelten für einen späteren industriellen Einsatz aufgrund von Zeit- und Kostendruck andere Bedingungen. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, liegt ein wesentlicher Faktor hierbei in der Genauigkeit, mit der die Bleche für den FSW-Prozess relativ zueinander positioniert werden können. Somit ist der mögliche Einfluss eines Spaltes zwischen den zu verschweißenden Blechen von besonderer Bedeutung. Sein Einfluss auf die Endgeometrie der Schweißnaht ob der Volumenkonstanz des Prozesses kann z. B. durch Aufdickung der Bleche im Nahtbereich kompensiert werden und ist daher nicht Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchungen. Im Vordergrund steht vielmehr die Fragestellung, inwieweit die durch den Spalt veränderten lokalen Prozessbedingungen zu einer atypischen Degradation der Nahteigenschaften führen können. Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden jeweils drei verschiedene Spaltkonfigurationen betrachtet: Bleche ( $t = 2,5 \text{ mm}$ ) mit 0,25 mm und 0,50 mm und als Referenz jeweils eine Schweißung mit direktem Kontakt der Bleche, d. h. mit Spalt 0 mm. Der Versuchsaufbau bei der Durchführung der FSW Schweißung ist in Abbildung 27 gezeigt. Die Wahl der Schweißparameter für das „Spaltschweißen“ basierte auf den zuvor gezeigten Ergebnissen.



**Abbildung 27: Versuchsaufbau, Untersuchung des Spalteinflusses beim FSW, hier gezeigt für AlCuLi (2098-T8) mit 0,50 mm Spalt**

### Spalteinfluss beim FSW von AlCuLi

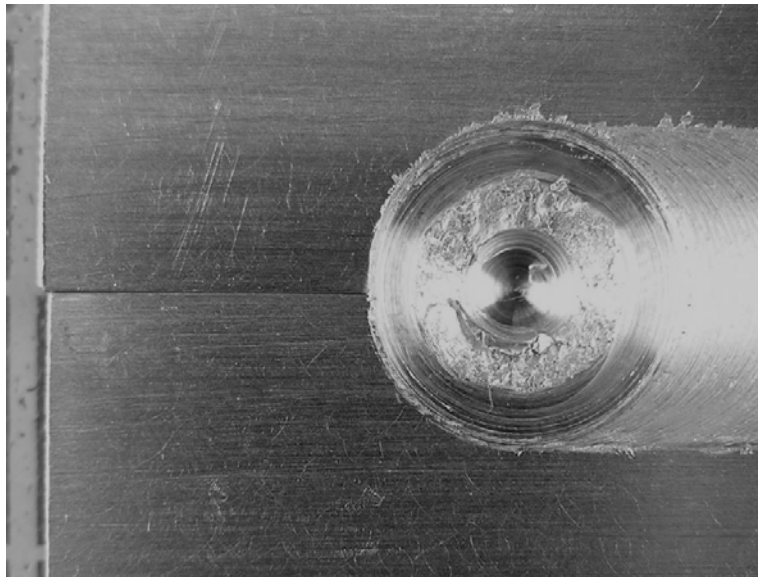
Zur Untersuchung des Einflusses eines Spaltes während des FSW von AlCuLi wurden drei Schweißkonfigurationen geprüft. Die wesentlichen Parameter sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

**Tabelle 7: FSW-Versuche zum Spalteinfluss bei AlCuLi (2098-T8)**

Probe	Material	Spalt [mm]	Drehzahl [U/min]	Vorschub [mm/min]
BL860	Al 2098-T8	0	1000	300
BL861		0,25		
BL862		0,50		

Die untersuchte AlCuLi-Legierung 2098-T8 weist eine sehr hohe Spaltmaßtoleranz auf. Selbst bei einem Spaltmaß von 0,50 mm hat sich der Spalt zwischen beiden Halbzeugblechen nach dem Reibrührschweißen vollständig zugezogen, wie in Abbildung 28 ersichtlich. Nach dem Schweißen wurden die Ober- und Unterseiten nach Fehlstellen untersucht. Alle geschweißten Bleche wiesen eine hohe Qualität auf. Es wurden keine Fehler, wie zum Beispiel lack-of-penetration oder zur Oberfläche offene Poren entdeckt.

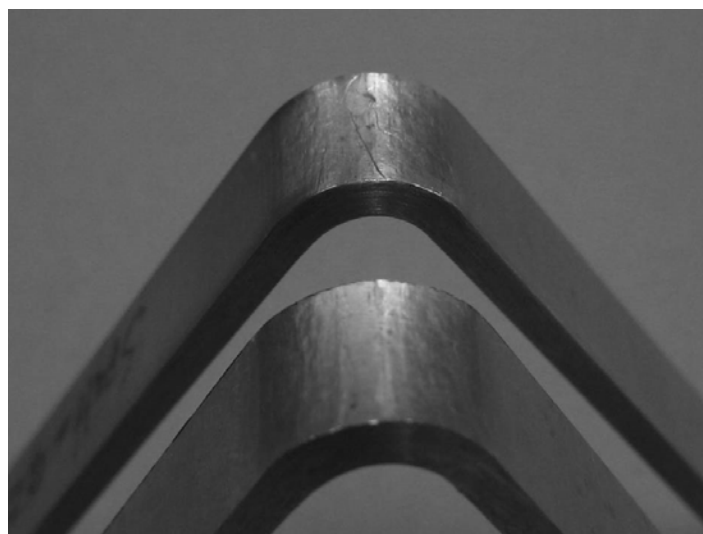




**Abbildung 28: FSW mit ursprünglich 0,50 mm Spalt zwischen den Stoßkanten, AlCuLi, Endloch von Blech BL862. Der ursprüngliche Spalt hat sich am Ende der Schweißung zugezogen**

Um die grundsätzliche Fehlerfreiheit der Nähte bestätigen zu können, wurden Biegeversuche an den mit Spalt geschweißten FSW-Verbindungen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden 10 mm breite Streifen quer zur Schweißnaht entnommen und um einen Radius von ca. 35 mm gebogen. Dabei wurden die Proben zu einem spitzen Winkel von etwa 60° gebogen, so dass die Schweißnahtunterseite auf dem äußeren Biegeradius liegt.

Abbildung 29 zeigt die Biegeproben zweier mit Spalt geschweißter FSW-Verbindungen aus AlCuLi (2098-T8). Bei keiner der Proben ist durch den Biegeversuch ein Bruch z.B. durch ungenügende Durchschweißung aufgetreten. Auch konnten nach detaillierten Untersuchungen unter dem Mikroskop weder Risse noch offene Stellen auf der Unterseite gefunden werden.



**Abbildung 29: Blech BL861 mit 0,25 mm Spalt (oben) und Blech 862 mit 0,50 mm Spalt (unten) nach dem FSW Schweißen**

Auch die angefertigten Querschliffe sowie die gemessenen Härteprofile bestätigen die gute Nahtqualität. Wie in Abbildung 30 zu sehen, ergeben sich trotz deutlich unterschiedlicher Spaltgrößen nahezu identische Härteprofile quer zur Schweißnaht, d. h. alle drei Varianten zeigen nur den für diese Legierung im Zusammenhang mit den verwendeten FSW-Parametern typischen Härteabfall im Rührbereich. Auch für den größten untersuchten Spalt von 0,50 mm ergeben sich keine negativen Abweichungen hiervon. Die ermittelten Zugfestigkeiten (siehe Spalte  $R_m$  in Tabelle 8) bestätigen diese Feststellung.

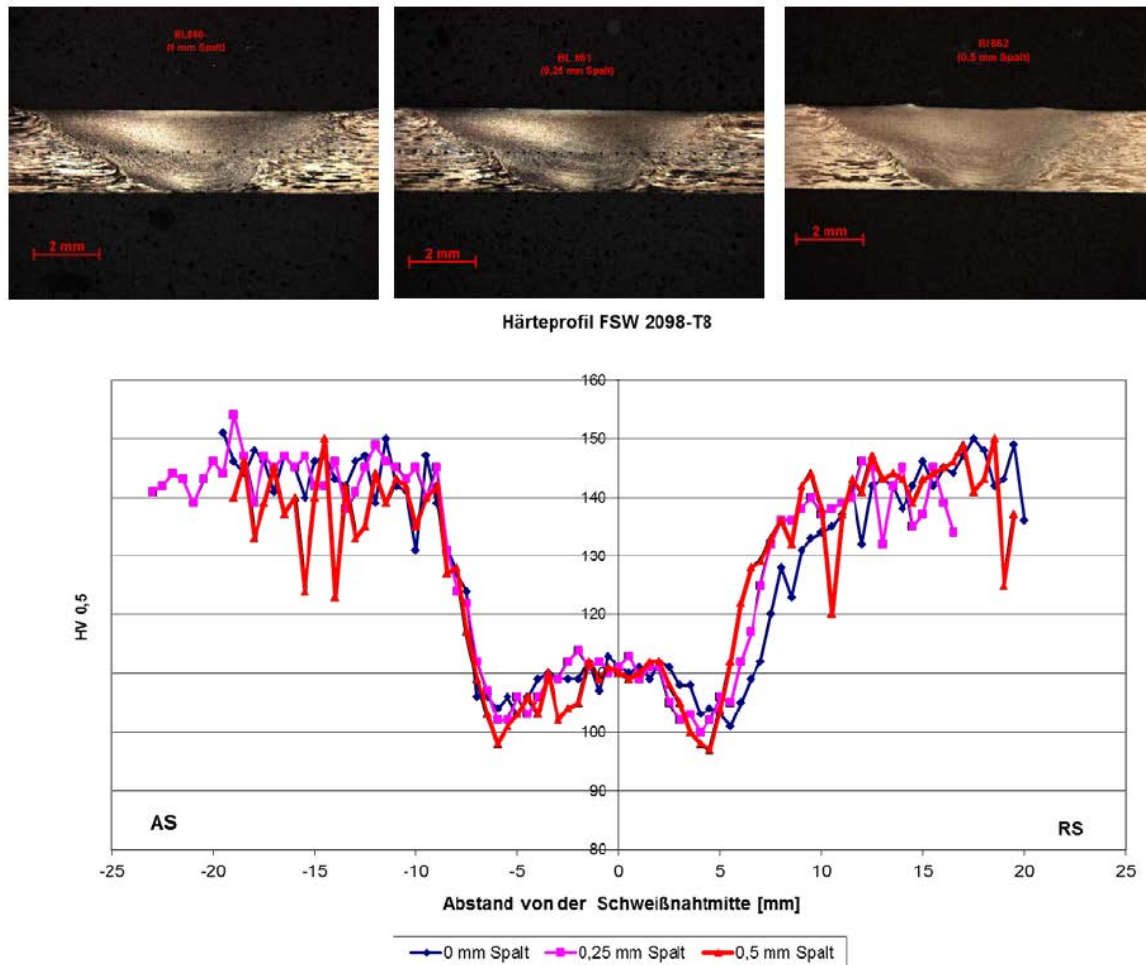


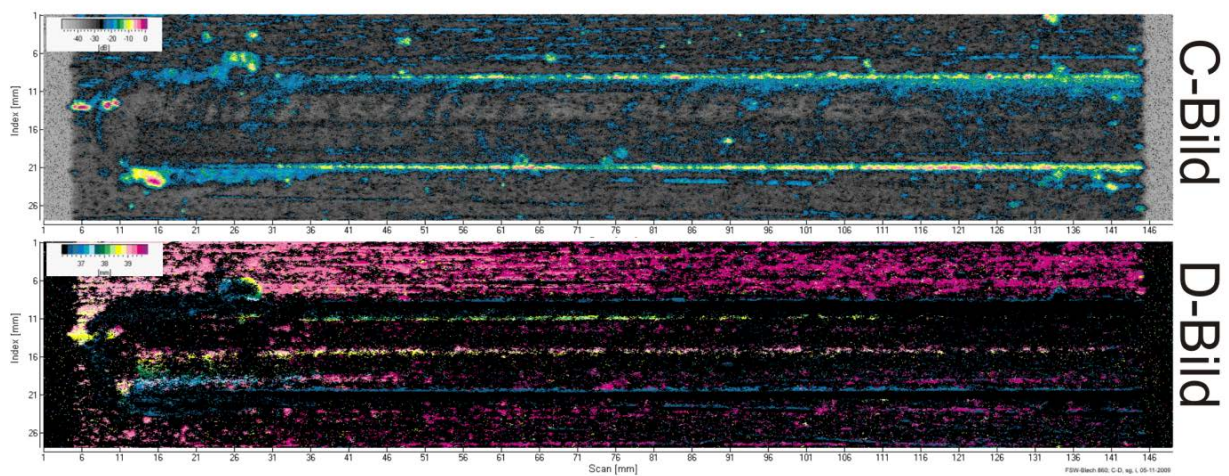
Abbildung 30: Querschliffe und Härteprofile, von links: 0 mm, 0,25 mm, 0,50 mm Spalt

Tabelle 8: Zugfestigkeiten und Biegetests (FSW von Al 2098-T8)

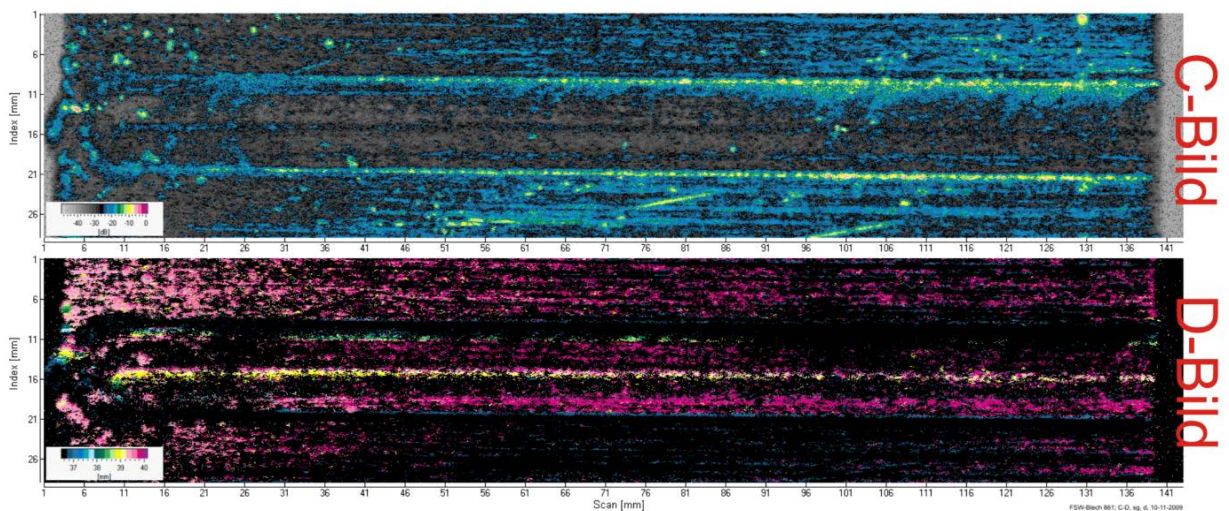
Probe	Spalt [mm]	$R_m$ [MPa]	Biegetest
BL860	0	400	i. O.
BL861	0,25	396	
BL862	0,50	395	

Da keine Wurzelfehler durch metallographische Inspektion oder Biegetest nachgewiesen werden konnten, wurden die mit Spalt geschweißten FSW-Verbindungen mittels Ultraschall geprüft (siehe Abbildung 31), um ggf. kleinere lokale Schweißfehler zu detektieren.

Wurzelfehler (wie zum Beispiel lack-of-penetration oder Rootflaws) sind aufgrund ihrer Orientierung unter senkrechtem Schalleintritt nicht oder nur sehr schwach detektierbar und können nur unter schrägem Schalleintritt überhaupt bzw. deutlicher abgebildet werden. Daher wurden die mit Spalt reibrührgeschweißten Stumpfstöße aus 2,5 mm dicken 2098-T8 Aluminiumblechen bei schrägem Schalleintritt ( $20^\circ$ ) im Puls-Echo-Verfahren mit einem einzelnen 25-MHz-Schall-Wandler geprüft. Für die Schrägeinschallung wurde Wasser als Kopplungsmedium verwendet.



(a)



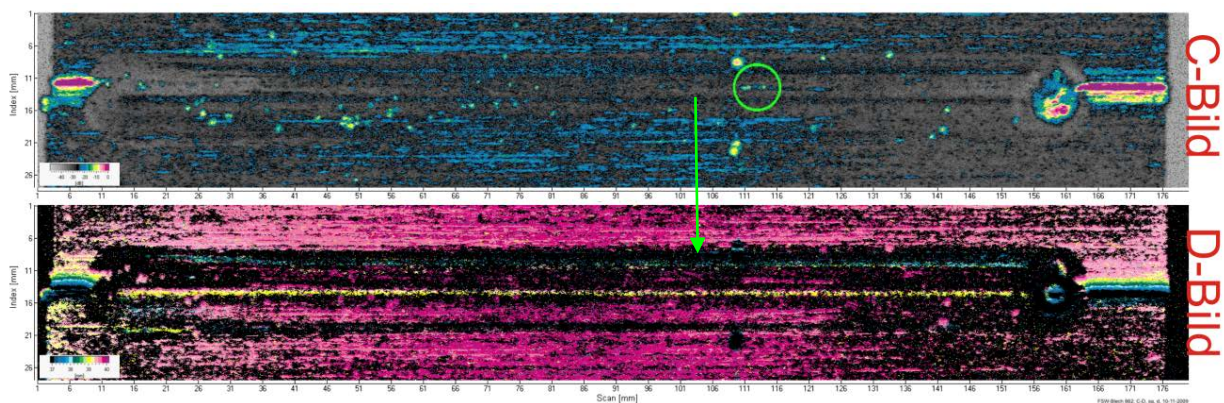
(b)

**Abbildung 31: C- und D- Bilder von ohne und mit Spalt fehlerfrei reibrührgeschweißten 2098-T8 Aluminiumlegierung (a) BL860 (Spaltmaß = 0 mm), (b) BL861 (Spaltmaß = 0,25 mm)**

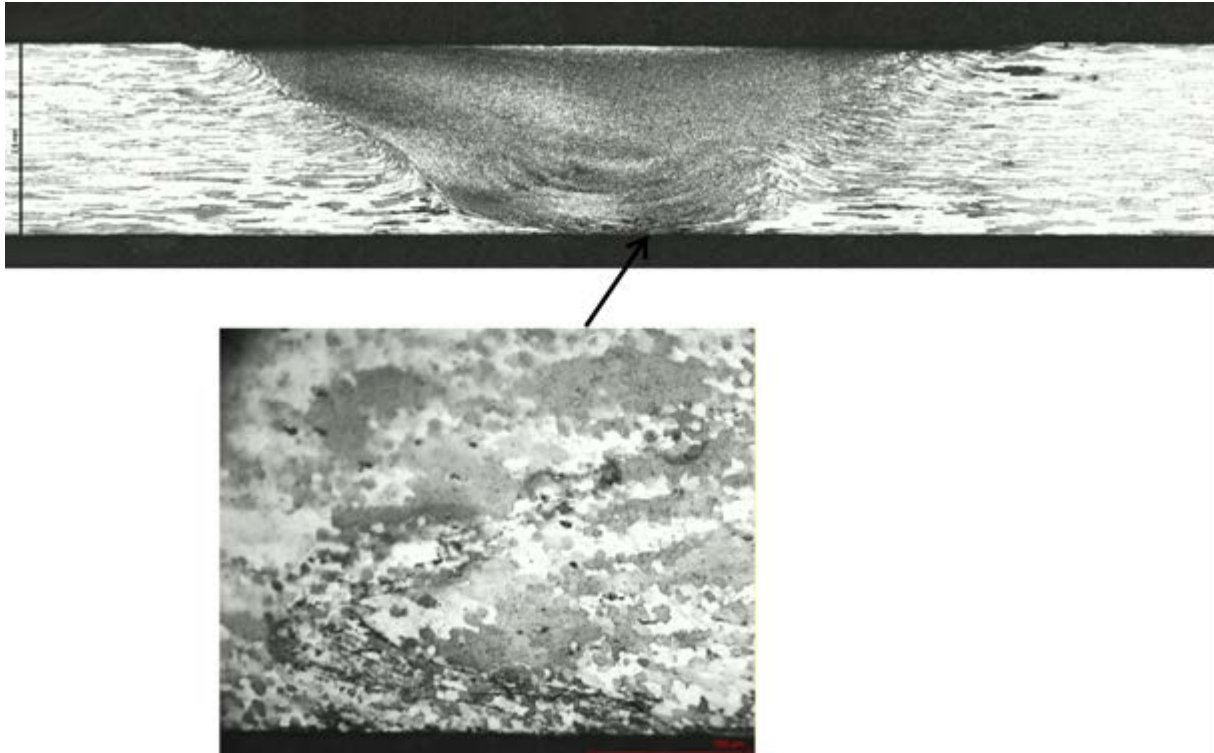
In C- und D-Bildern von FSW-Nähten, die bei schräger Einschallung aufgenommen wurden, werden senkrechte Fehler im Wurzelbereich in Schweißrichtung abgebildet. Aus den Impulslaufzeiten des zugehörigen D-Bilds lässt sich auf die Lage der Fehler innerhalb der Blechdicke schließen.

Im C-Bild der mit 0 mm bzw. 0,25 mm Spalt FSW Stumpfstöße (BL860 bzw. BL861) wurden keinerlei Signale im Bereich der Schweißnähte (siehe Abbildung 31) detektiert. Die blau-gelben Linien zeigen die Spuren der Schulter des Schweißwerkzeugs auf der Oberfläche.

Bei dem mit 0,50 mm Spalt geschweißten Blech wurde im C-Bild ein etwas stärkeres Signal in etwa 110 mm Entfernung vom Anfang der Schweißnaht erfasst (markiert mit dem Kreis in Abbildung 32). In dem dazugehörigen D-Bild ist diese Zone als eine rosa Linie in der Nahtmitte erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass diese Diskontinuität im Wurzelbereich entstanden ist. Um die Ausprägung dieser Fehlstellen zu überprüfen, wurden Querschliffproben aus dieser Region entnommen und metallographisch präpariert. Auf den ersten Blick scheint die Schweißnaht fehlerfrei zu sein. Unter einer höheren Vergrößerung zeigt sich jedoch, dass sich Diskontinuitäten im Wurzelbereich auf der Retreating Side befinden (Abbildung 33). Es ist nicht klar, ob diese Fehlstellen durch den Spalt (z.B. Lack of Bonding) oder durch Oxide (Rootflaw) entstanden sind. Unabhängig von der Ursache dieser Diskontinuitäten sollte man zum jetzigen Zeitpunkt einen Spalt größer als 0,50 mm als bedenklich betrachten und in einem zukünftigen Produktionsprozess entsprechend vermeiden. Ob diese Unregelmäßigkeiten einen Einfluss auf z. B. die Lebensdauer der Verbindung unter zyklischer Beanspruchung haben, sollte zukünftig ebenfalls noch untersucht werden.



**Abbildung 32: C- und D- Bilder von mit 0,50 mm Spalt fehlerhaften reibrührgeschweißten 2098-T8 Aluminiumlegierung (BL862)**



**Abbildung 33: Querschliff der mit 0,50 mm Spalt reibrührgeschweißten 2028-T8 Aluminiumlegierung, (unten) Rootflaws in der Wurzelregion der Naht.**

#### Spalteinfluss beim FSW von AlMgSc

Analog der Vorgehensweise bei AlCuLi wurden drei Schweißkonfigurationen zur Untersuchung des Einflusses eines Spaltes während des FSW von AlMgSc geprüft. In Tabelle 9 sind die wesentlichen Schweißparameter aufgelistet.

**Tabelle 9: FSW-Versuche zum Spalteinfluss bei AlMgSc (Ko8242)**

Probe	Material	Spalt [mm]	Drehzahl [U/min]	Vorschub [mm/min]
BL990	Ko8242-H116	0	1200	600
BL991		0,25		
BL992		0,50		

Die AlMgSc-Legierung Ko8242 weist vergleichbar zu AlCuLi (2098-T8) eine hohe Spalttoleranz auf. Auch hier wurde der Spalt nach dem Schweißen jeweils vollständig geschlossen. Bei der Sichtkontrolle zeigten sich ebenfalls keine auffälligen Defekte an der Oberfläche. Die Biegetests waren alle i. O., und auch die Schliffbilder und Härteprofile zeigen keinen negativen Einfluss des jeweiligen Spaltes (Abbildung 34).

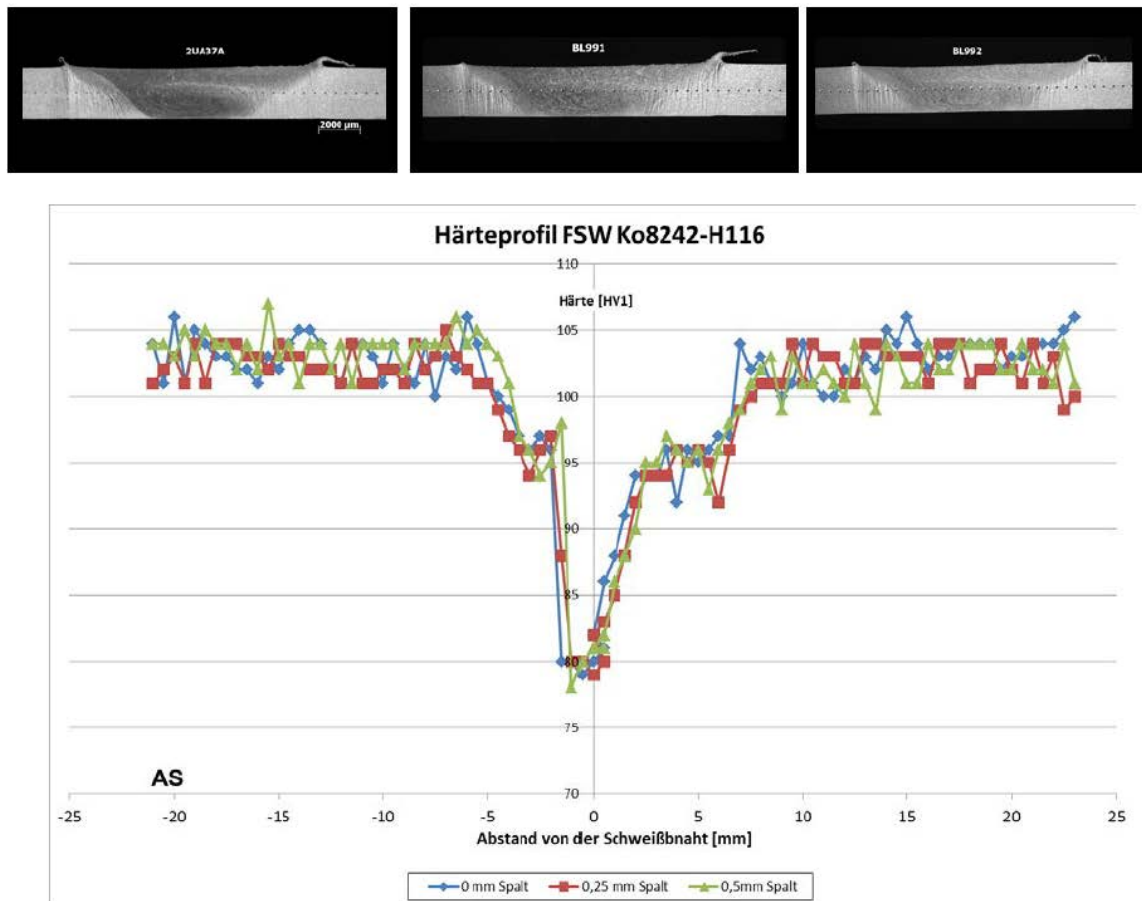


Abbildung 34: Querschliffe und Härteprofile, von links: 0 mm, 0,25 mm, 0,50 mm Spalt

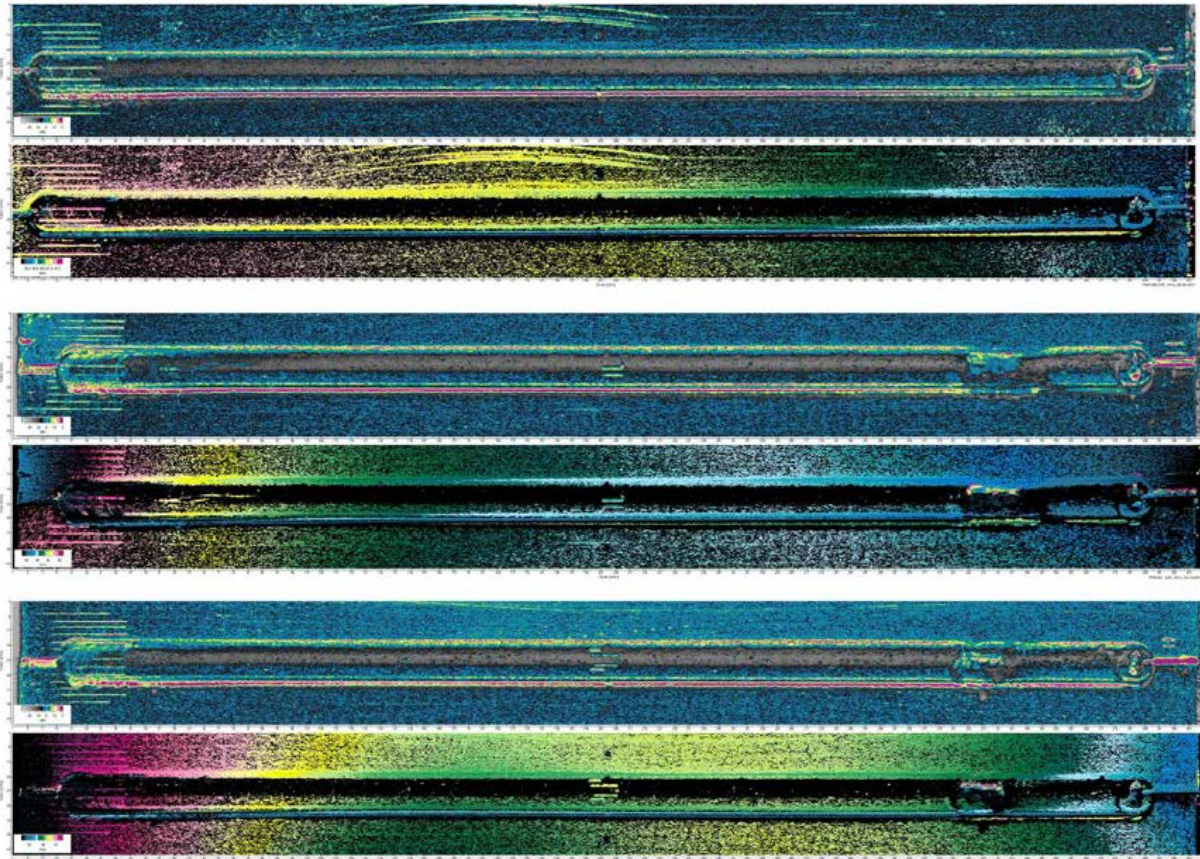
Die ermittelten Zugfestigkeiten (siehe Spalte  $R_m$  in Tabelle 10) bestätigen die hohen und besonders gleichbleibenden Nahtqualitäten.

Tabelle 10: Zugfestigkeiten und Biegetests (FSW von Ko8242-H116)

Probe	Spalt [mm]	$R_m$ [MPa]	Biegetest
BL990	0	303	i. O.
BL991	0,25	302	
BL992	0,50	308	

Um sicherzustellen, dass nicht doch vielleicht im Inneren der Nähte bisher unbemerkte Schweißfehler existieren, wurden wie bei AlCuLi auch alle Proben mittels Ultraschallprüfung untersucht. Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse dieser Ultraschallprüfungen.

Die Ultraschallbilder zeigen, dass alle drei FSW-Nähte fehlerfrei sind. Am Anfang der Schweißnähte (links) sind kleine Kratzer zu erkennen, die sich gemäß D-Scan an der Unterseite der Bleche befinden. Diese Kratzer wurden absichtlich zu Kontrollzwecken eingebracht. Klassische Schweißfehler, wie z. B. Tunnel oder Rootflaws sind nicht vorhanden.



**Abbildung 35: C- und D-Scans, AlMgSc ohne und mit Spalt; FSW-Bleche von oben nach unten: Nr. 990, ohne Spalt; Nr. 991, 0,25 mm Spalt; Nr. 992, 0,50 mm Spalt**

#### Zusammenfassung: Spalttoleranz von AlMgSc und AlCuLi

Vor dem Hintergrund dieser Untersuchungen werden die Legierungen AlMgSc (Ko8242) und AlCuLi (2098-T8) als tolerant gegenüber Schwankungen im FSW Prozess hinsichtlich des Spaltes zwischen den Blechen im Stumpfstoß eingestuft. Sollte zukünftig auch im industriellen Umfeld ohne Aufdickung geschweißt werden, so sollten Spalte größer als 0,50 mm unbedingt vermieden bzw. die Fehlerfreiheit der Verbindungen jeweils individuell überprüft werden.

#### Zusammenfassung: FSW von AlMgSc und AlCuLi

Abschließend kann festgestellt werden, dass für beide untersuchten Legierungen fehlerfreie FSW-Verbindungen hoher Festigkeit mit FSW-Indexwerten besser als 80 % hergestellt werden konnten. Wie eingangs erwähnt, wurde der Fokus der Untersuchungen zur Projektlaufzeit auf die Legierung AlMgSc gelegt. Zur weiteren

Steigerung der Nahtqualität wurde hierfür ein neues Werkzeugdesign entwickelt, das zu einem verbesserten Materialfluss während des FSW-Prozesses führt. Während diese Untersuchungen also die grundsätzliche Eignung der Legierungen für den FSW-Prozess gezeigt haben, geben die weiteren Untersuchungen zum Einfluss etwaiger Spalte am Fügestoß Hinweise zur Einsatztauglichkeit des FSW für beide Legierungen unter industriellen Bedingungen. Die aktuellen Ziele dieses Arbeitspaketes wurden somit erreicht.

## **TA 20.2 Reibrührschweißen von Tailored Welded Blanks**

### **Ausgangssituation**

Flugzeuge mit ihren modernen Rumpfstrukturen sind ein Paradebeispiel für den erfolgreichen Einsatz der Leichtbautechnologie. Wesentliches Ziel hierbei ist es, zwecks Gewichtsminimierung einen hohen Grad an Materialausnutzung zu erreichen, so dass z.B. Blechdicken auf das jeweils beanspruchungsgerechte Minimum reduziert werden müssen. In besonders hoch beanspruchten Bereichen, z. B. Fenster- und Türumgebungen, erfolgen dementsprechend üblicherweise Verstärkungen in Form von Materialaufdickung, um den lokal höheren Beanspruchungen gerecht zu werden. Die Ausführung solcher beanspruchungsoptimierter Strukturen erfolgt entweder in integraler oder differentieller Bauweise. Bei der integralen Bauweise werden bisher üblicherweise Bleche, deren Dicke mindestens der höchsten benötigten Materialstärke entspricht, durch Materialabtrag in die beanspruchungsgerechte Struktur überführt. Hierbei werden je nach Struktur oder Bauteil mehr als 90 % des Materials abgetragen, was neben hohen Fertigungszeiten und –kosten auch zu vergleichsweise hohen Materialkosten führt, da 100 % bezahlt werden müssen, aber (unter Vernachlässigung der Recyclingmöglichkeiten) z.B. nur 10 % genutzt werden können. Die differentielle Bauweise ist im Vergleich effizienter im Umgang mit dem Material, da die besonders dicken Bereiche separat gefertigt und in einem zusätzlichen Fügeprozess mit den dünneren Bereichen der Gesamtstruktur verbunden werden. Für das Fügen kommt bisher meist, wie auch in der Einleitung zu TA 20 erwähnt, das Nieten zum Einsatz. Während die differentielle Bauweise also schonend mit der Ressource Material umgeht, entstehen zusätzliche Kosten durch den vergleichsweise aufwändigen Fügevorgang des Nietens. Ein Lösungsansatz besteht im Einsatz sogenannter Tailored Welded Blanks (TWB), wobei im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen die Vorteile der differentiellen Bauweise mit den Vorteilen des effizienten Fügens mittels FSW vereint werden sollen.



## **Ziele und Herausforderungen**

Im ersten Teil zu TA 20 wurde bereits gezeigt, dass im Fall von Stumpfstößen aus AlMgSc mittels FSW (mit und ohne Spalt) Verbindungen hoher Qualität hergestellt werden können. Die in diesem Abschnitt untersuchte Fertigung der TWB basiert auf dem Fügen von Blechen unterschiedlicher Dicke mittels FSW. Die Herausforderungen hierbei sind vielfältig und betreffen vornehmlich Nahtkonfiguration (Geometrie im Bereich des Dickenübergangs), Prozessführung (Parameter, Werkzeugdesign) und Randbedingungen (Unterlagen, Einspannungen). Außerdem erfordert ein zukünftiger industrieller Einsatz FSW gefertigter TWB auch die Möglichkeit zur zerstörungsfreien Prüfung der FSW-Nähte, wodurch sich je nach Konfiguration aufgrund geometrischer Besonderheiten weitere Herausforderungen ergeben. Basierend auf den Untersuchungen zum FSW von Stumpfnähten werden somit nachfolgend alle wesentlichen Aspekte adressiert, um die Machbarkeit der Fertigung von TWB mittels FSW besonders für AlMgSc zu bewerten. Dem Charakter dieser Machbarkeitsstudie entsprechend, beschränken sich die Untersuchungen im Rahmen von HERMET auf eine grundsätzlich fertigbare TWB-Konfiguration. Weiterführende Untersuchungen zum FSW von TWB erfolgen im Rahmen eines der ebenfalls vom BMWi geförderten Nachfolgeprojekte (HERMO im KOSMO-Verbund). Aspekte der Besonderheiten bei der werkstoffmechanischen Prüfung von TWB werden im Rahmen von MTEXT (ECO-Verbund) behandelt.

## **Vorgehensweise**

Bei der umfangreichen Untersuchung der Machbarkeit von TWB aus AlMgSc mittels FSW werden folgende Aspekte adressiert.

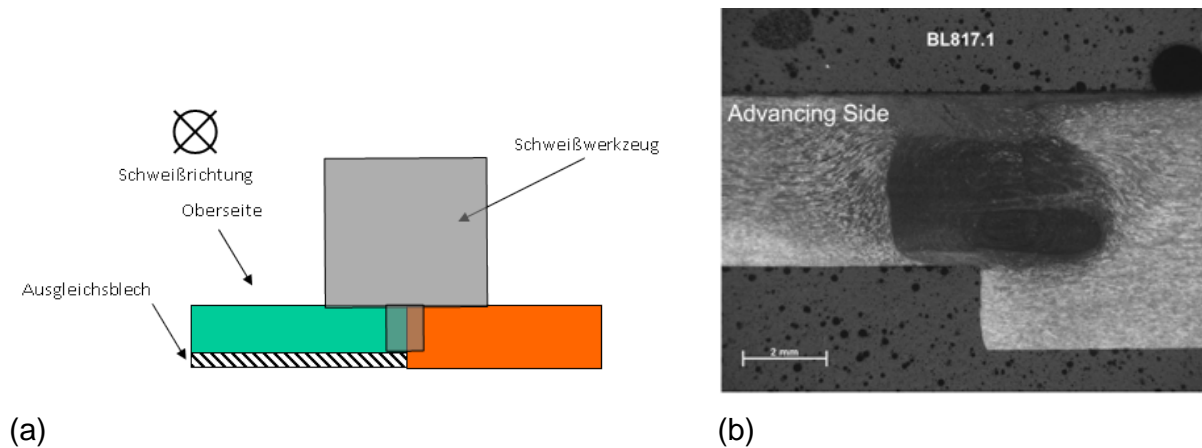
- Zur Definition einer FSW tauglichen TWB-Konfiguration erfolgen erste Schweißversuche an 2024-T3. Das Institut für Werkstoff-Forschung hat sehr umfangreiche Erfahrungen im FSW dieser Legierung, so dass der Einfluss der gewählten FSW-Konfiguration auf die Nahtqualität der TWB-Verbindung erwartungsgemäß mit einem Minimum an Versuchen herausgearbeitet werden können sollte.
- Basierend auf den weiter oben vorgestellten FSW-Untersuchungen mit AlMgSc erfolgt die Festlegung der Startparameter für die erste FSW-TWB-Schweißung.
- Durchführung der FSW-Versuche und erste Untersuchungen der Nahtqualität gemäß der Vorgehensweise bei der Untersuchung der AlMgSc-Stumpfnähte. Hierbei gezielte schrittweise Variation der Parameter bis eine fehlerfreie TWB-Verbindung vorliegt.
- Untersuchungen zur Machbarkeit der zerstörungsfreien Prüfung der gewählten TWB-Konfiguration mittels Ultraschallprüfung.

- Untersuchung der Nahtqualität mehrerer mit den gleichen Parametern geschweißten TWB zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit des FSW-Prozesses.
- Die meisten Bereiche einer Rumpfstruktur werden im Betrieb im Allgemeinen nicht nur statisch beansprucht. Folglich ist das Verhalten der FSW-TWB unter zyklischer Beanspruchung von entscheidender Bedeutung für ihre zukünftige Einsatzfähigkeit. Zusätzlich lassen die unterschiedlichen Blechdicken auf während des FSW gesteigert asymmetrische Prozessbedingungen schließen, insbesondere im Hinblick auf Temperaturentwicklungen. Vor diesem Hintergrund werden ausgeprägte Eigenspannungen sowie zugehörige Verzüge erwartet. Dementsprechend erfolgt neben den reinen Lebensdauerversuchen zusätzlich eine erste Abschätzung der Effekte des Verzuges auf die Rissausbreitung unter zyklischer Last.

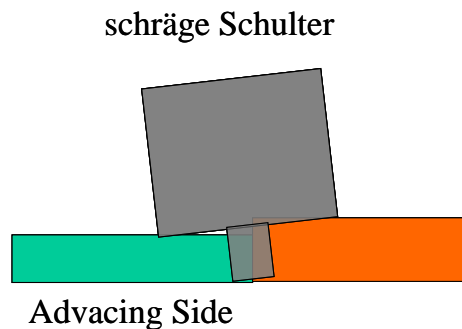
Nach dem Ermitteln der Schweißparameter (einschließlich der Unterlage), die zu einer fehlerfreien Naht in dieser TWB-Konfiguration führen, soll also auch die Möglichkeit zur zerstörungsfreien Prüfung von FSW-TWB untersucht werden. Anschließend folgen umfangreiche Untersuchungen zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte einschließlich Ermüdungsversuche an unpolierten sowie polierten Proben. Weiterhin werden Rissfortschrittversuche durchgeführt und die TWB-Geometrie in diesem Zusammenhang untersucht; abschließend erfolgt eine Abschätzung der auf die Rissausbreitung Einfluss nehmenden inneren Spannungen von TWB-Nähten.

### Ergebnisse

Bei den zunächst geschweißten **TWB aus 2024-T3** wurden beide Oberseiten der Bleche auf die gleiche Ebene gebracht (siehe Abbildung 36a). Unter das dünnere Blech wurden Ausgleichsbleche aus V2A-Stahl gelegt, um den Unterschied in den Dicken der zu verschweißenden Bleche auszugleichen. Obwohl hochfeste (FSW-Index = ca. 96%) fehlerfreie Nähte geschweißt wurden (Abbildung 36b), erwies sich diese TWB-Konfiguration mit Blick auf einen später industriellen Fertigungsprozess als äußerst riskant. Die offensichtlich asymmetrischen Bedingungen besonders im unteren Bereich der Werkzeugpins führten zu der Vermutung, dass bei dieser Konfiguration mit höherer Wahrscheinlichkeit gravierende Schweißfehler im Wurzelbereich entstehen könnten. Aus diesem Grund wurde diese TWB-Konfiguration trotz guter erster Ergebnisse wieder verworfen, um die in Abbildung 37 dargestellte Konfiguration weiter zu untersuchen.



**Abbildung 36: (a) Schematische Darstellung der TWB-Herstellung mittels FSW, (b) Makroschliff der FSW-Naht**



**Abbildung 37: Schematische Darstellung der FSW-Konfiguration für TWB aus AlMgSc**

Alle FSW-Versuche für die **TWB aus AlMgSc (Ko8242)** erfolgten in der Konfiguration gemäß Abbildung 37. Als TWB-Blehdicken wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern und in Anlehnung an existierende Rumpfstrukturen 1,6 mm und 3,2 mm gewählt. Das dickere Blech wurde dabei immer auf der Retreating Side fixiert, um den Materialtransport zu begünstigen und hierdurch die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von Schweißfehlern zu minimieren. Um den Einfluss der Wärmeableitung in das Spannbett während des FSW-Prozesses zu untersuchen, wurden die Schweißungen alternativ mit einer 0,5 mm Ti6Al4V Folie als Unterlage (geringe Wärmeableitung) oder einer Gusseisenplatte als Unterlage (hohe Wärmeableitung) durchgeführt. Als FSW-Werkzeug kam die bereits oben vorgestellte Neuentwicklung mit einer profilierten Schulter (18 mm Durchmesser) und einem konischen Pin (6 mm Durchmesser). Der FSW-Prozess selbst erfolgte unter Positionskontrolle von Werkzeug und Werkstück. In Tabelle 11 sind die Schweißparameter aller FSW-Versuche aufgelistet, die im Rahmen der FSW-Parameterfindung durchgeführt wurden.

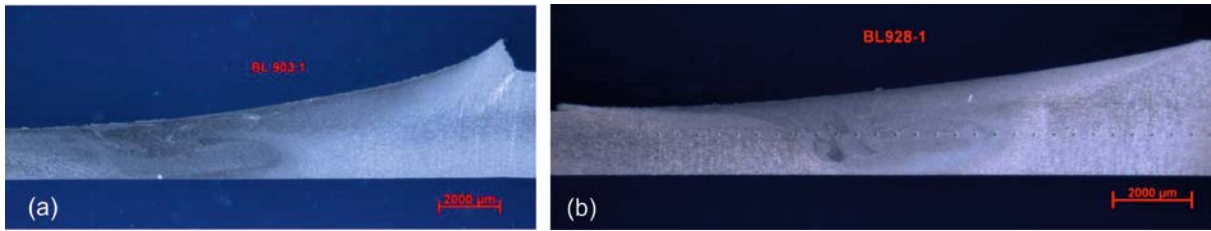
Im Allgemeinen hat die Schweißunterlage aus Ti-Folie eine sehr langsame Wärmeabfuhr verursacht, die in Verbindung mit der niedrigen thermischen Leitfähigkeit der AlMgSc-Legierung zu einem Aufschmelzen der Oberfläche und einem Überschuss an plastifiziertem Material geführt hat. Hierdurch bildet das

Material einen stark ausgeprägten Flash, siehe Materialaufwurf bei BL903 rechts oben in Abbildung 38 (a). Obwohl der Vorschub entsprechend der Versuchsmatrix (Tabelle 11) mehrfach angehoben wurde, war der resultierende Wärmeeintrag immer noch zu hoch. Bei der Verwendung einer massiven Gusseisenplatte anstelle der Ti-Folie als Schweißunterlage ergaben sich kältere Schweißbedingungen, so dass keine Aufschmelzungen mehr an der Oberfläche auftraten. Dennoch erwies sich die Feinjustierung der Schweißparameter als aufwändig, da die Legierung beim FSW von TWB sensibel auf die Prozessbedingungen reagierte. Entweder verlief der Schweißprozess zu warm, wie bei BL910, oder zu kalt wie bei BL912, siehe Bemerkungen in Tabelle 11.

**Tabelle 11: FSW-Parameter für TWB aus AlMgSc (Ko8242)**

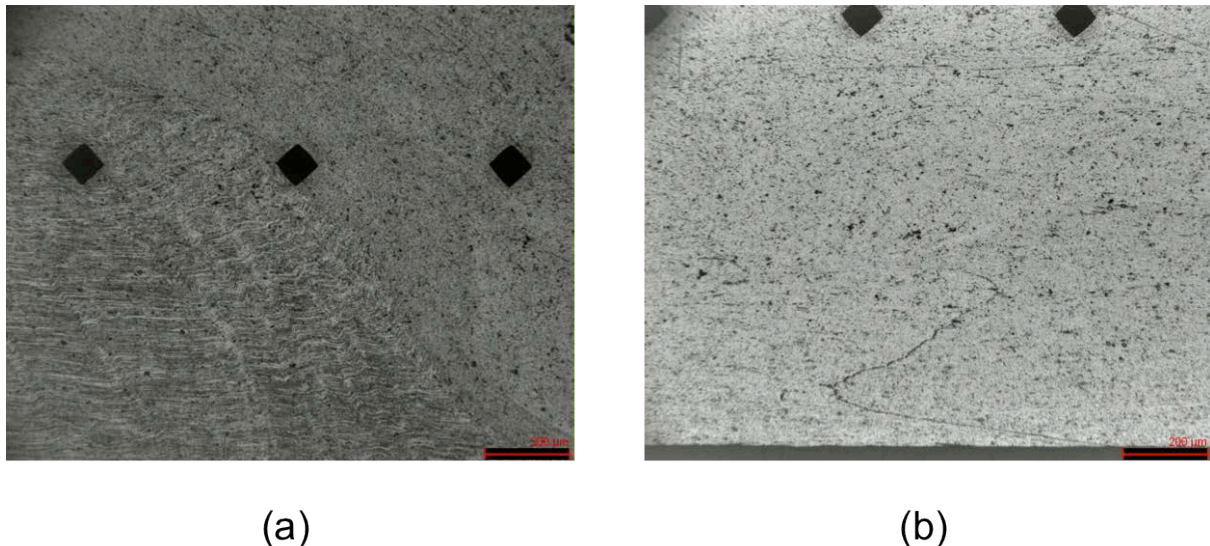
Probe	Unterlage	Drehzahl $\omega$ [U/min]	Vorschub $v$ [mm/min]	Bemerkungen
BL903	0,5 mm Ti6V4Al	1200	300	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zu heiß</li> <li>• Schmelzerscheinung</li> <li>• exzessives Flash Material</li> </ul>
BL904		1200	400	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zu heiß</li> <li>• exzessives Flash Material</li> </ul>
BL905		1200	500	
BL906		1200	600	
BL910	Gusseisen	1200	600	<ul style="list-style-type: none"> <li>• exzessives Flash Material</li> </ul>
BL911		900	600	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zu kalt</li> <li>• Tunnel</li> </ul>
BL912		900	900	
BL928		1200	800	<b>Fehlerfreie Verbindung</b>
BL929		1200	1200	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zu Kalt</li> <li>• Tunnel</li> </ul>

Die optimalen Parameter für TWB-Verbindungen aus AlMgSc (Ko8242) wurden bei einer Drehzahl von 1200 U/min und einem Vorschub von 800 mm/min gefunden (BL928 in Tabelle 11). Diese Parameter ergaben fehlerfreie Nähte mit sehr kleinem Flash, siehe Abbildung 38(b).



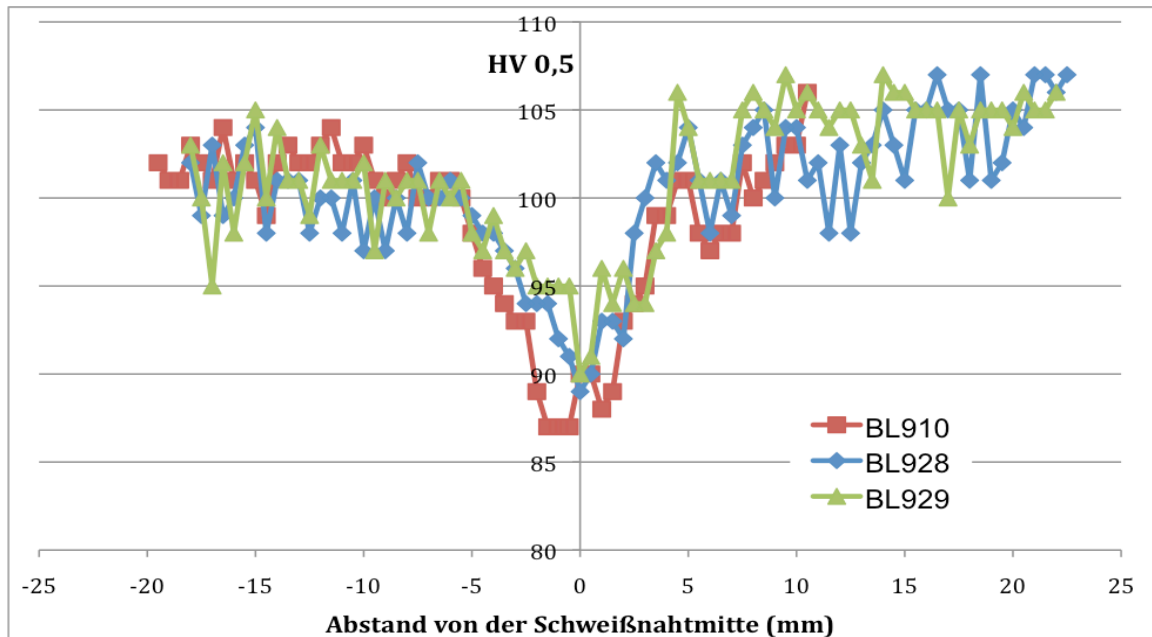
**Abbildung 38: Makrobilder, Querschliff, (a) BL903 und (b) BL928**

Die Schweißung BL928 zeigt eine typische runde FSW-Naht, ähnlich wie bei der AlMgSc-Stumpfnaht in TA20.1. Die Naht weist die erwartete so genannte „Zwiebelringe“-Mikrostruktur auf. Der Übergang zwischen HAZ und Rührbereich (WN) ist auf der Retreating Side diffus, während er auf der Advancing Side, siehe Abbildung 39 (a), abrupt ausfällt. Die Verbindung zeigt in Abbildung 39 (b) einen schwach ausgeprägten Rootflaw; dieser fällt jedoch deutlich kleiner aus als bei den anderen Blechen, wie z.B. BL910 (hier nicht weiter dargestellt).



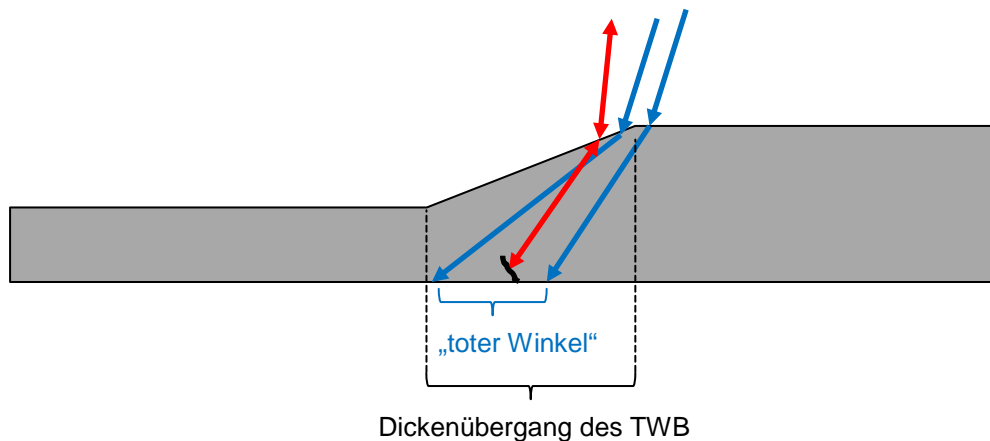
**Abbildung 39: Details aus Querschliff, BL928, (a) Übergang HAZ/WN; (b) Rootflaw in der Mitte der Schweißnaht**

Abbildung 40 zeigt die Härtewerte für unterschiedliche Vorschubgeschwindigkeiten 600 mm/min (BL910), 800 mm/min (BL928) sowie 1200 mm/min (BL929) bei einer konstanten Werkzeugdrehzahl von 1200 U/min. Der Vergleich der Schweißungen zeigt, dass der geringere lokale Wärmeeintrag aufgrund der höheren Vorschubgeschwindigkeiten bei den Proben BL928 und BL929 zu einem vergleichsweise geringen Härteabfall von lediglich 10 % der Härtewerte des Grundmaterials führt. Da nur BL928 frei von Schweißfehlern ist (vgl. Bemerkungen in Tabelle 11), liegt somit bei diesen FSW-Parametern die höchste Festigkeit vor.



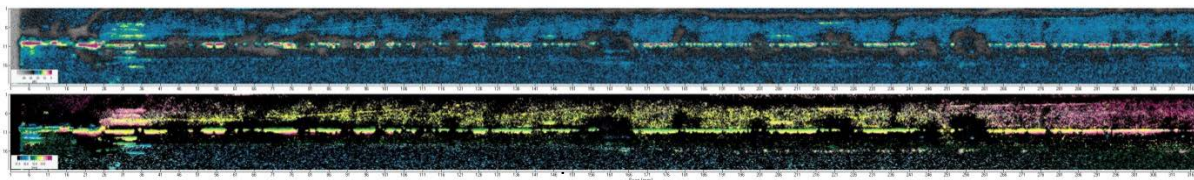
**Abbildung 40: Einfluss des Vorschubs (vgl. Tabelle 11) auf das Härteprofil**

Wie weiter oben bereits erwähnt, muss für eine zukünftig erfolgreiche industrielle Anwendung auch ein Verfahren zur **zerstörungsfreien Prüfung der reibrührgeschweißten TWB** bereitgestellt werden. Im vorliegenden Fall wird die Ultraschallprüfung hinsichtlich ihrer prinzipiellen Einsatztauglichkeit untersucht, da es sich hierbei um eines der gebräuchlichsten Verfahren zur Prüfung konventioneller reibrührgeschweißter Stumpfnähte handelt. Bei den TWB-Nähten müssen jedoch die besonderen geometrischen Bedingungen berücksichtigt werden. Wie in Abbildung 41 skizziert, wird der Schall beim Eintritt in das Blech in seiner Richtung abgelenkt, er wird gebrochen. Da der Schall auf der schrägen Blechoberfläche unter einem anderen Winkel auftrifft und entsprechend anders gebrochen wird, entsteht am Beginn des Dickenübergangs eine Art „toter Winkel“ (siehe blaue Pfeile), wobei ggf. dort liegende Fehler vom Ultraschall nicht erfasst werden. Wird nun der Einfallswinkel des Ultraschalls entsprechend der Orientierung der Blechoberflächen angepasst, so verschiebt sich auch der „tote Winkel“, und ein zuvor „unsichtbarer“ Fehler kann nun detektiert werden (rote Pfeile). Jedoch ist der Einfallswinkel nicht beliebig wählbar; der an der Oberfläche gebrochene Ultraschall muss im Material so orientiert sein, dass er einen Fehler detektieren kann.



**Abbildung 41: Skizze Ultraschall-Prüfung einer TWB-Naht**

Zwei TWB-Nähte (von 3 auf 4 mm und von 3 auf 6 mm) wurden mittels Ultraschall unter Berücksichtigung der obigen Ausführungen untersucht. Abbildung 42 zeigt das Ergebnis der Ultraschall-Prüfung für die 3 zu 4 mm Naht. Das Ergebnis unterteilt sich in das C-Bild (oben) und das D-Bild (unten); das C-Bild stellt dar mit welcher Stärke der Schall reflektiert wird, das D-Bild zeigt, basierend auf der Laufzeit, aus welcher Tiefe das Signal kommt, so dass man zwischen einem Fehler von der Blechunterseite und einem Fehler aus der Blechmitte unterscheiden kann. In Abbildung 42 ist demnach ein nahezu durchgängiger, jedoch unterschiedlich ausgeprägter LOP zu erkennen. Das Schlichtbild in Abbildung 43 zeigt den LOP an einer signalstarken Stelle der Schweißnaht.



**Abbildung 42: Ergebnis der Ultraschall-Prüfung der TWB-Naht von 3 auf 4 mm**



**Abbildung 43: Lichtmikroskopische Aufnahme des LOP in der TWB-Naht von 3 auf 4 mm**

Die TWB-Naht von 3 auf 6 mm (siehe Abbildung 44) weist eine steilere Schräge im Bereich des Dickenübergangs als die Naht im 3 zu 4 mm TWB auf, so dass hier der Effekt des „toten Winkels“ noch deutlicher hervortritt. In Abbildung 45 sind die Ergebnisse verschiedener Ultraschall-Untersuchungen gezeigt, die mit unterschiedlichen Einfallswinkeln durchgeführt wurden. Die beiden oberen zeigen den detektierten (mittig liegenden) LOP unmittelbar am Rand der Schweißnaht bzw. halb verdeckt an. Erst im unteren Ergebnis ist im C-Bild das Signal des LOP deutlich als solches zu erkennen. Abbildung 46 zeigt eine mikroskopische Detail-Aufnahme des nahezu durchgängigen LOP.

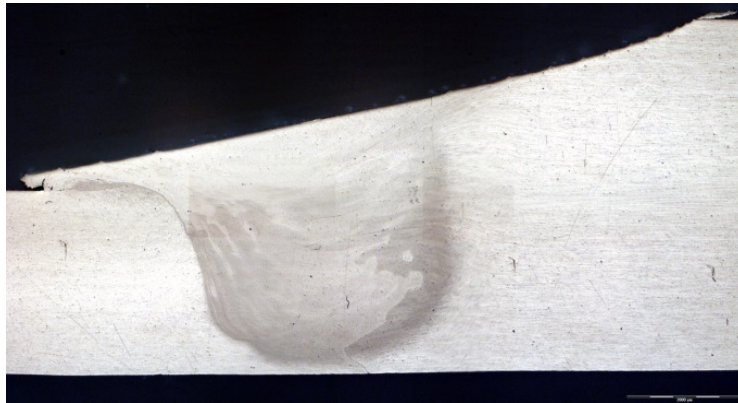


Abbildung 44: Lichtmikroskopische Übersicht der TWB-Naht von 3 auf 6 mm

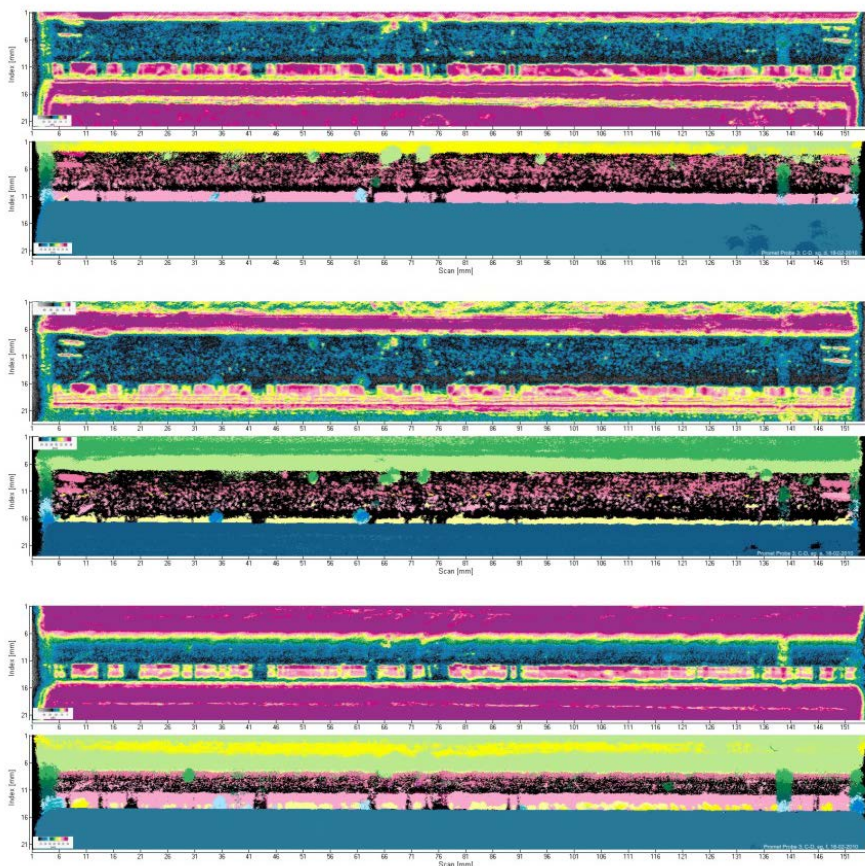
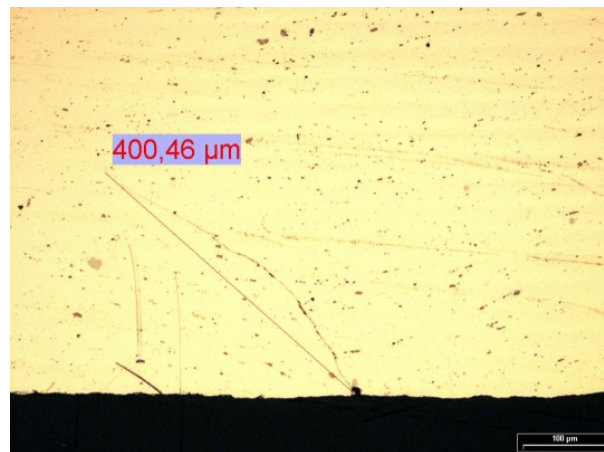


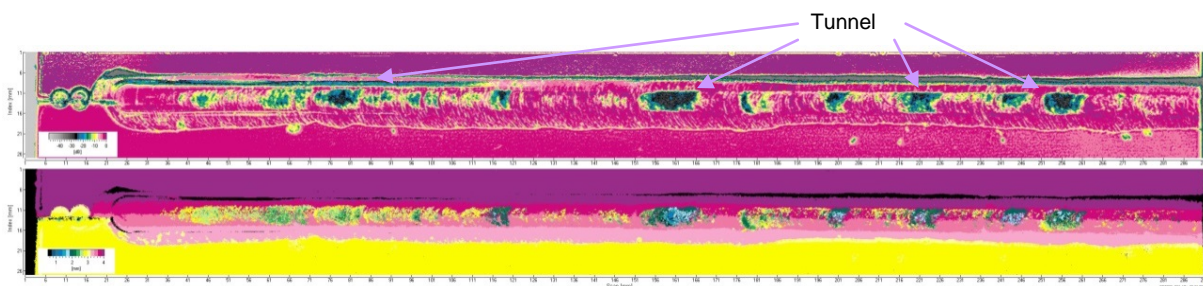
Abbildung 45: Ergebnis der Ultraschall-Prüfung der TWB-Naht von 3 auf 6 mm



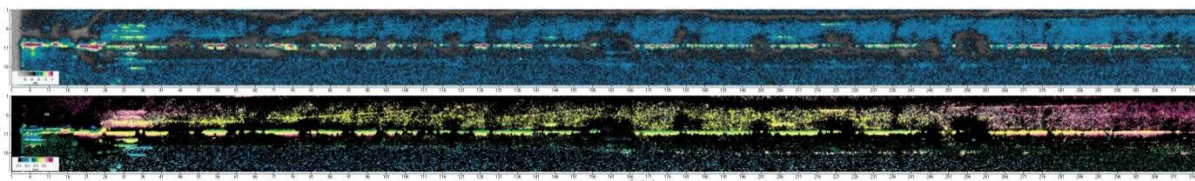


**Abbildung 46: Lichtmikroskopische Aufnahme des LOP in der TWB-Naht von 3 auf 6 mm**

Sollte beim Schweißen ein Fehler nicht oder nicht nur im Wurzelbereich der Naht auftreten, so ist Folgendes zu berücksichtigen: Ein Fehler, der dicht unter der Oberfläche auftritt ist mittels Ultraschall nicht detektierbar. Die Naht muss dann von der anderen Seite geschallt werden. Im folgenden Beispiel ist im FSW-TWB-Blech ein Tunnel-Fehler vorhanden. Um diesen Fehler zu detektieren, wurde das Blech von unten geschallt (siehe Abbildung 47, im Vergleich dazu Abbildung 48). Deutlich sind hier Fehlersignale, die aus der Blechmitte kommen, zu erkennen. In Abbildung 48 zeigen sich an den entsprechenden Stellen Abschattungen bei der Detektion des LOP. Hier wird jedoch ein tatsächliches Fehlersignal nicht aufgezeigt, da der Tunnel zu nah unter der Oberfläche liegt und somit durch das Eingangssignal verdeckt wird.



**Abbildung 47: TWB-Blech, von unten geschallt, Detektion des Tunnels**



**Abbildung 48: TWB-Blech, von oben geschallt, Detektion des LOP**

Somit bleibt festzustellen, dass mögliche Schweißfehler in FSW-TWB grundsätzlich detektierbar sind, sofern geeignete Randbedingungen vorliegen. Zu diesen Randbedingungen zählt in erster Linie der Dickenunterschied zwischen den zu

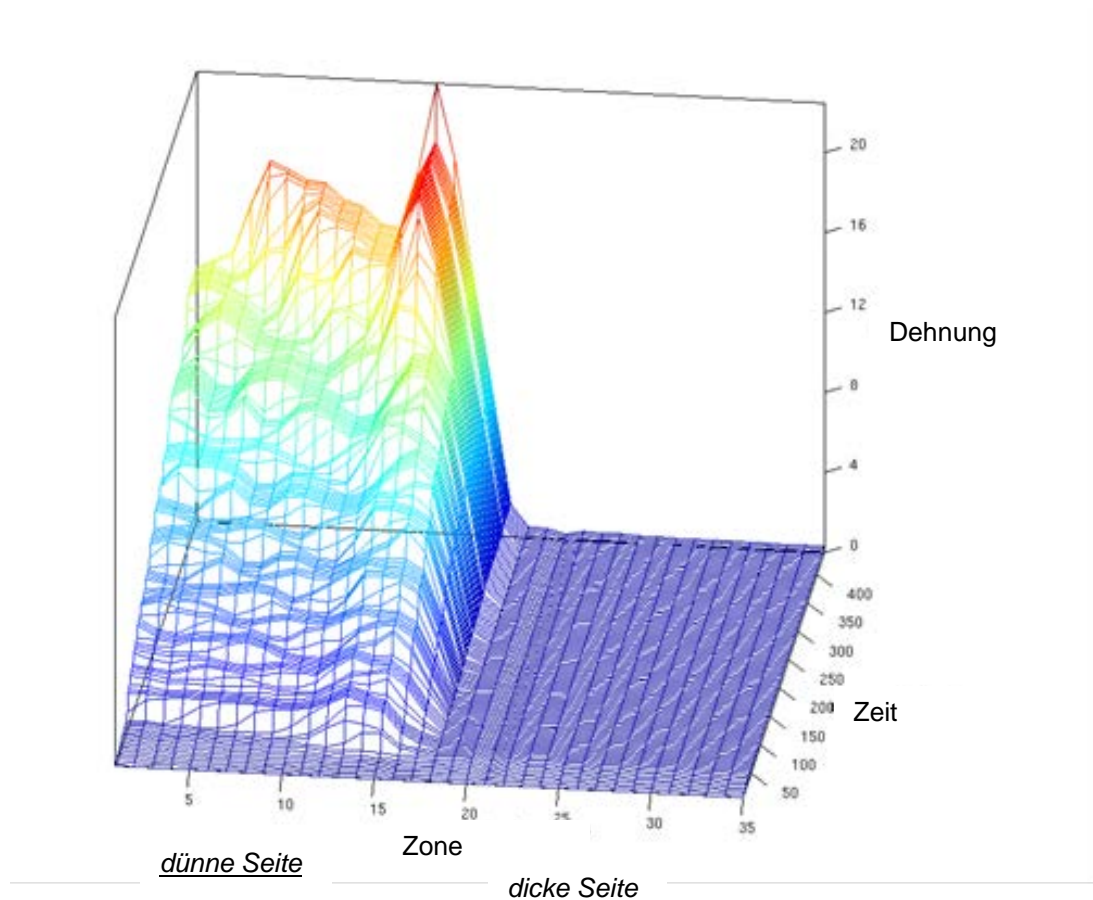
verschweißenden Blechen und damit die Schräge der Oberfläche im Übergangsbereich. Des Weiteren ist die tatsächliche Geometrie der Schweißnaht zu berücksichtigen (leicht konkav und nicht wie idealisiert angenommen eine ebene Schräge) sowie die Position und Ausrichtung der möglichen Fehler. Die Machbarkeit der zerstörungsfreien Prüfung von FSW-TWB ist bei einer sorgfältigen Einstellung der Prüfparameter somit grundsätzlich zu erwarten.

Um die **Reproduzierbarkeit des FSW-Prozesses** auch für TWB zu untersuchen, wurden aus mehreren FSW-TWB, die unter den gleichen Bedingungen geschweißt wurden, Härte-, Biege- und Zugproben entnommen und geprüft. Bei den Zugversuchen wurde ein Laserextensometer eingesetzt, um lokale Dehnungskonzentrationen zu erfassen. Die Aufnahme der Dehnung erfolgte auf der flachen Seite. In Tabelle 12 sind die ermittelten Zugfestigkeiten der FSW-TWB aus AlMgSc (Ko8242) zusammengefasst. Als Referenz dient die Festigkeit des 1,6 mm dicken, gefrästen Blechs aus AlMgSc (Ko8242) Grundmaterial (GM).

Alle untersuchten Proben besitzen eine hohe Nahtqualität. Es konnte kein signifikanter Schweißfehler (z.B. LOP oder Rootflaw) nach der Biegeprüfung gefunden werden. Die Festigkeit der FSW-TWB-Verbindungen erreichte bis zu 100 % der Festigkeit des Grundmaterials (FSW-Index). Der Grund für diese sehr hohe Festigkeit ist, dass der duktile Bruch in allen Fällen außerhalb des Schweißbereichs stattfand. Obwohl ein Härteabfall von 15 % der Ko8242-Legierung in der Naht und der Wärmeeinflusszone stattfand, erfolgte die höchste Dehnungskonzentration im dünneren 1,6 mm Material, wie in Abbildung 49 zu sehen. Der grundsätzlich vorhandene Festigkeitsverlust der Naht wird also bei dieser TWB-Konfiguration durch die Nahtgeometrie selbst kompensiert.

**Tabelle 12: Zugfestigkeit der FSW-TWB aus AlMgSc (Ko8242)**

Proben-Nr.	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A [%]	FSW-Index [%]	Bruchstelle	Biegetest
JS0603T	391	301	9,4	100,1	GM (Void)	i.O.
JS0616T	388	293	9,4	99,3	GM (Void)	i.O.
JS0617T	391	302	8,6	100,1	Schulterrand AS	i.O.
JS0619T	387	299	9,3	98,8	GM (Void)	i.O.
JS0625T	380	294	6,6	97,2	Schulterrand AS	i.O.
JS0632T	387	296	7,5	99,0	Schulterrand AS	i.O.
JS0633T	377	289	5,5	96,4	Schulterrand AS	i.O.
<b>Grundmaterial</b>	<b>391</b>	<b>302</b>	<b>17%</b>	---	---	---
<b>Mittelwert</b>	<b>386</b>	<b>296</b>	<b>8</b>	<b>98,7</b>		
<b>Standardabweichung</b>	<b>5,0</b>	<b>4,5</b>	<b>2,9</b>	<b>1,3</b>		



**Abbildung 49: Dehnung-Zeit-Kurven einer FSW-TWB aus AlMgSc (Ko8242)**

Wie eingangs erwähnt, bietet der FSW-Prozess bei TWB ein hohes Potential für gesteigerte Eigenspannungen bzw. Verzüge. Dementsprechend erfolgt an dieser Stelle eine erste Bewertung des Einflusses der Eigenspannungen bzw. der daraus resultierenden Verzüge auf das **Ermüdungsverhalten der TWB**. Zu diesem Zweck wurden die Ermüdungslebensdauer sowie die Rissausbreitung unter zyklischer Beanspruchung an den TWB-Verbindungen untersucht.

**Lebensdauerversuche** (Wöhlerversuche) wurden hierbei mit unpolierten und polierten Proben in einer Amsler Resonanzprüfmaschine durchgeführt. Alle Proben wurden mit einer Schwingfrequenz von 60 Hz und einem Lastverhältnis von  $R = 0,1$  ermüdet. Abbildung 50 (a) zeigt die verwendete Probengeometrie sowie die Orientierung der Schweißnaht in der Probe.

Die **Rissausbreitung** in der TWB-Verbindung wurde mittels SET-110 Proben untersucht. Die Schweißnaht befand sich hierbei parallel zur Lastrichtung. Dieser Fall „Riss wächst senkrecht auf Nahtbereich zu“ wurde gewählt, da hierbei größere Einflüsse der Eigenspannungen auf die Rissausbreitung und den Risspfad zu erwarten sind. Die Rissausbreitung fand von der dünneren Blechseite aus und in Richtung der dickeren Seite des TWB hin statt. Abbildung 50 (b) zeigt den Aufbau des Rissfortschrittversuchs.

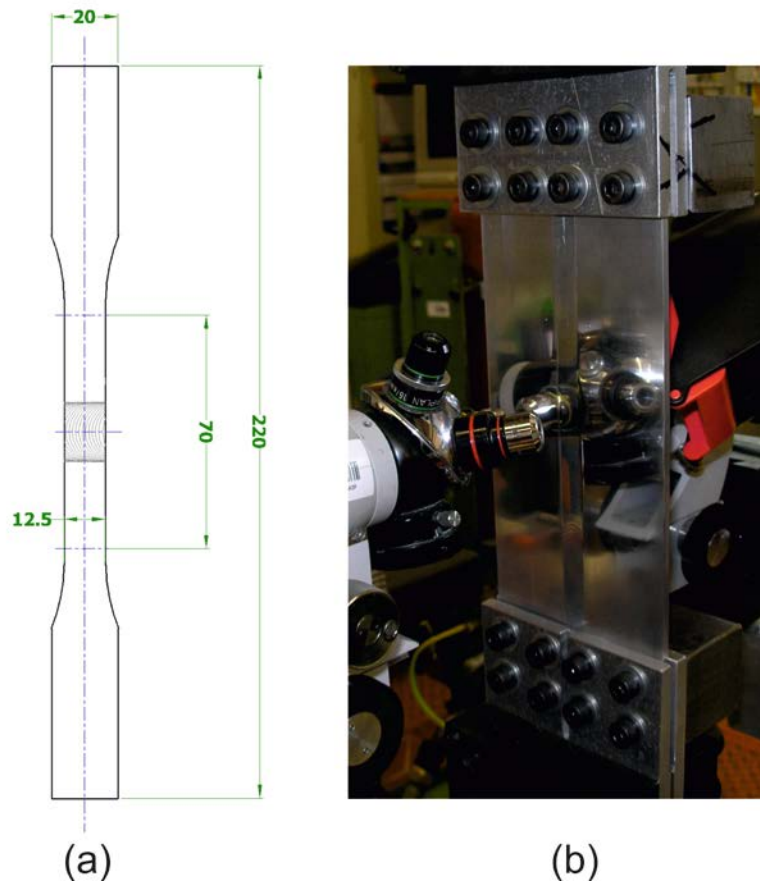


Abbildung 50: (a) Geometrie der Ermüdungsprobe, (b) Aufbau des Rissfortschrittversuchs von FSW Ko8242 TWB

In Abbildung 51 sind die ermittelten Lebensdauerdaten der FSW-TWB aus AlMgSc (Ko8242) dargestellt. Je nachdem, welche Schwingspielzahl als Grenzwert herangezogen wird, liegt die Dauerfestigkeit beider Probenzustände (poliert, unpoliert) basierend auf dem vorhandenen Datensatz im Bereich 130 bis 140 MPa.

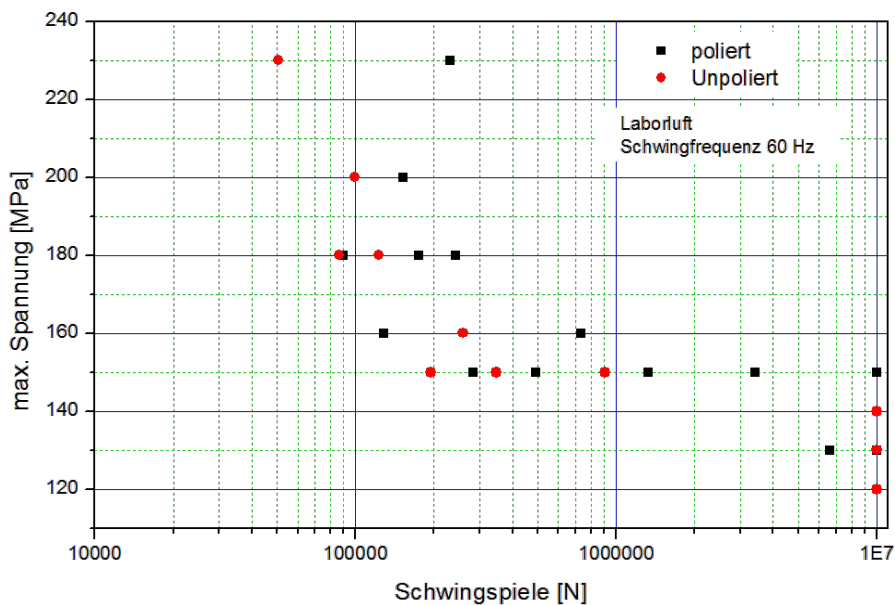
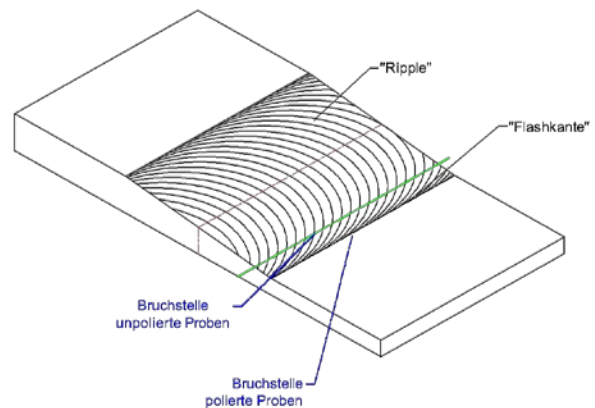
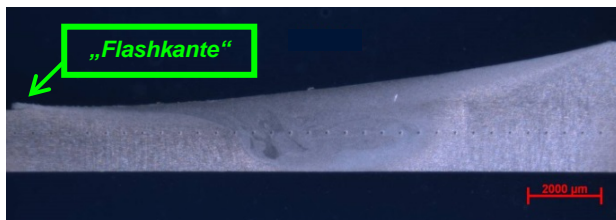


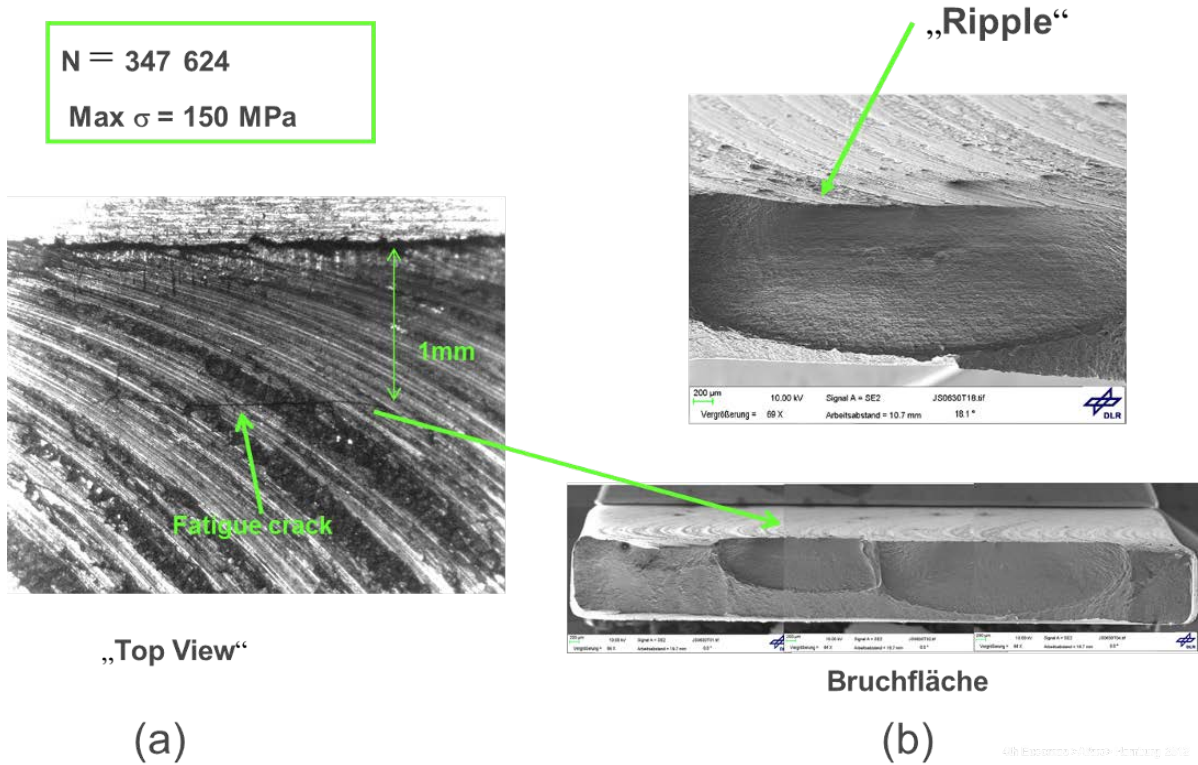
Abbildung 51: Wöhlerkurve von FSW-Ko8242-TWB-Verbindungen

Wie allgemein bekannt, sind Lebensdauern häufig großen Schwankungen unterworfen. Auch im vorliegenden Fall wird dies bestätigt. Besonders im Übergangsbereich zwischen Zeit- und Dauerfestigkeit weisen beide Probenarten große Streuungen in der Lebensdauer auf. Speziell bei 150 MPa kann den polierten Proben allerdings eine leicht höhere Lebensdauer bescheinigt werden. Um zukünftig belastbare Aussagen zum Einfluss etwaiger Oberflächennachbehandlungen im FSW-Nahtbereich auf die Lebensdauer zu erhalten, sollten entsprechend umfangreiche Versuchsreihen erfolgen. Basierend auf dem vorliegenden Datensatz wird den FSW-TWB aus AlMgSc eine ähnliche Lebensdauer für beide Oberflächenzustände bescheinigt. Deutliche Unterschiede zwischen den beiden Probentypen zeigen sich jedoch in den Rissausgangsorten (Bruchstellen).

Bei allen polierten Proben ging der Riss von der „Flashkante“, die beim Polieren nicht komplett entfernt werden konnte, an der Probenoberfläche aus (siehe Abbildung 52). Bei den unpolierten Proben fand die Rissinitiierung während der Ermüdung ca. ein bis zwei Millimeter von dieser „Flashkante“ entfernt im Übergang zum dickeren Blech statt. Die fraktographischen Untersuchungen zeigten hierbei, dass halb elliptische Ermüdungsriss in den Vertiefungen der von der Schweißschulter während des FSW-Prozesses produzierten Riefen („Ripples“) ausgingen (siehe Abbildung 53). Insofern wird trotz der nicht eindeutigen Lebensdauerergebnisse an dieser Stelle empfohlen, eine Nachbehandlung der Oberfläche im FSW-Nahtbereich durchzuführen, um eine glatte Oberfläche ohne die FSW charakteristischen „Ripples“ zu erhalten.

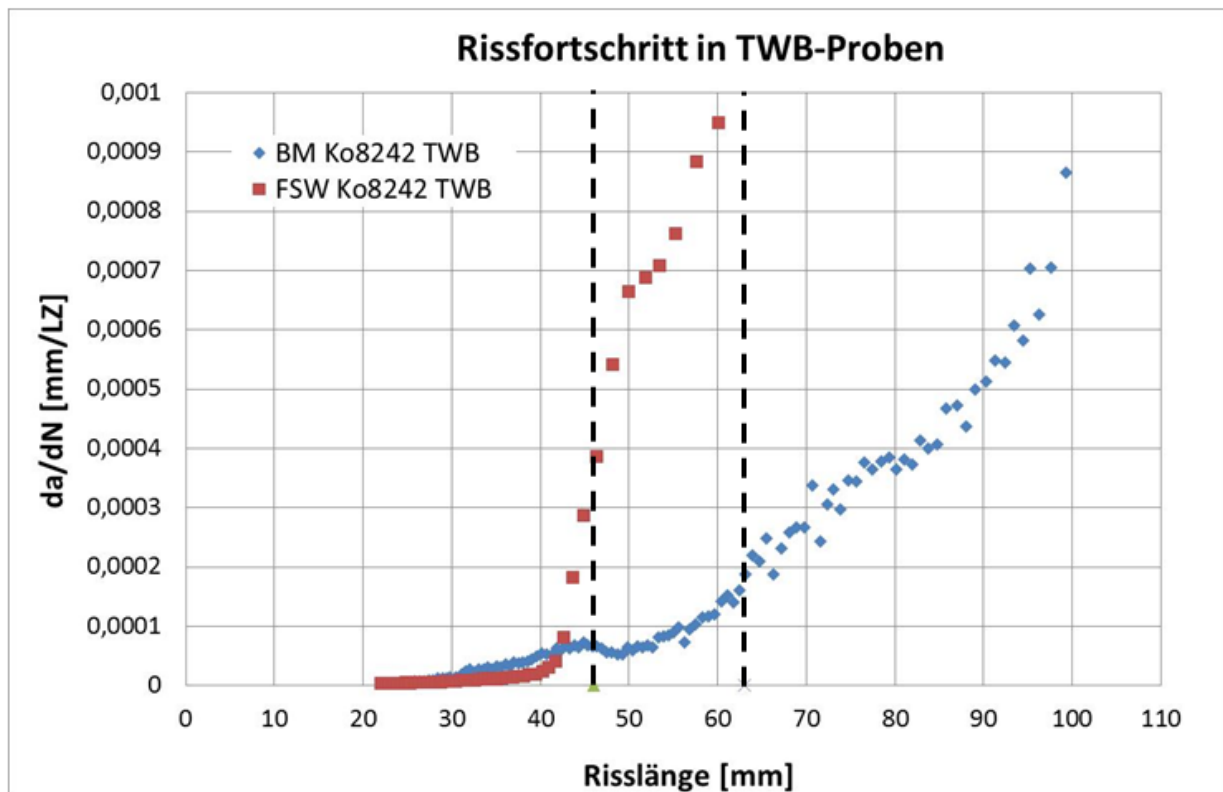


**Abbildung 52: Vergleich der Rissausgangsorte bei polierten und unpolierten FSW-TWB-Proben aus AlMgSc (Ko8242)**



**Abbildung 53: (a) „Ripple“ als Ermüdungsrissauslöser, (b) semi-elliptische Ermüdungsrisse auf der Bruchfläche**

Für das untersuchte Langrisswachstum sind weniger die geometrischen Feinheiten an der Oberfläche als vielmehr die Geometrie des TWB sowie die Eigenspannungen (bzw. Verzüge) als Ergebnis des FSW von Bedeutung. Zur separaten Betrachtung der geometrischen Einflüsse von den Eigenspannungseinflüssen durch das FSW wurden zwei unterschiedlich gefertigte Probenarten untersucht. Neben den mittels FSW gefertigten TWB wurde somit auch eine TWB Geometrie mittels Fräsen erzeugt und untersucht. Abbildung 54 zeigt die zugehörigen Rissausbreitungskurven. Die roten Punkte zeigen die Daten des FSW-TWB, während die blauen Punkte zur gefrästen TWB Geometrie gehören. Das dünnere Blech befand sich jeweils auf der linken Seite, d. h. bei kleineren x-Werten; das dickere Blech auf der rechten Seite. Die beiden gestrichelten Linien markieren den Übergangsbereich dazwischen.



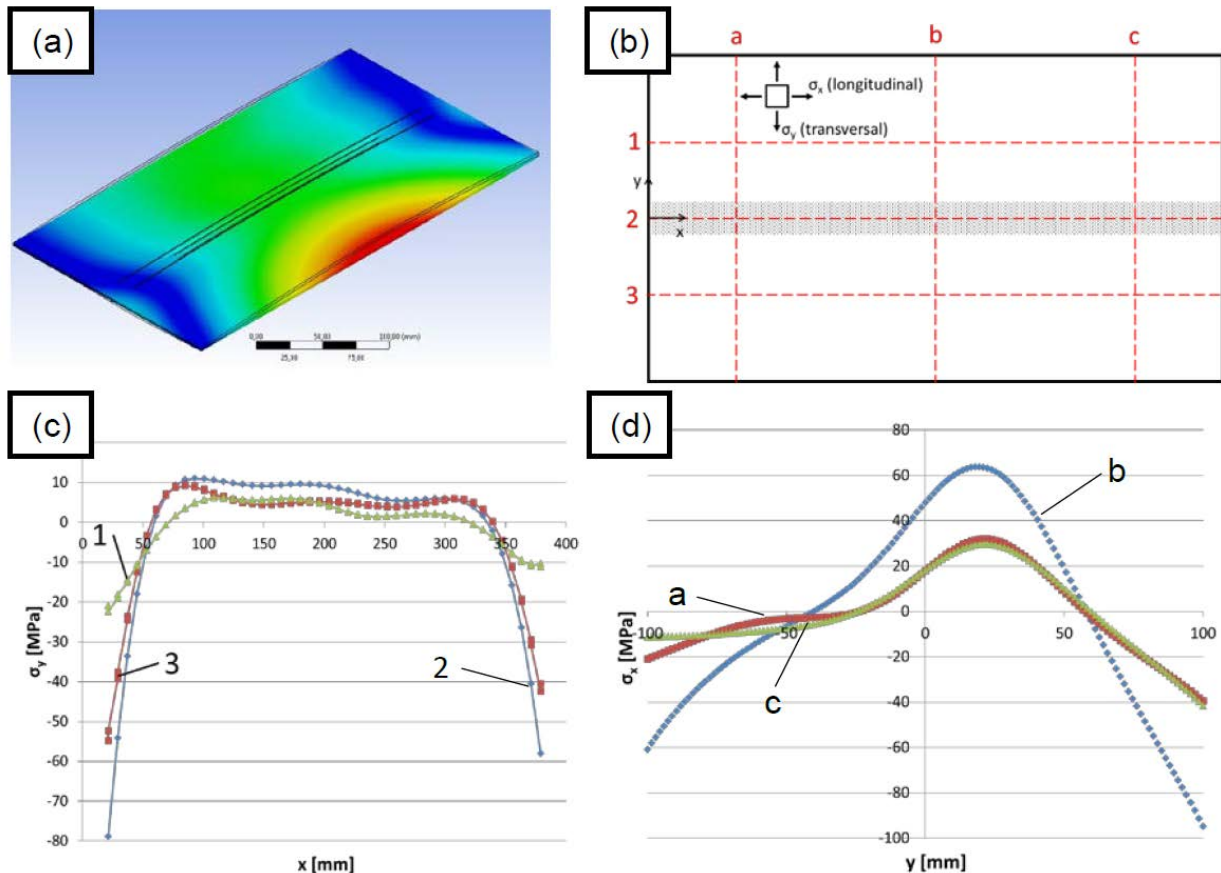
**Abbildung 54: Rissfortschritt in TWB aus AlMgSc unter zyklischer Beanspruchung**

Die Versuchsdurchführung erfolgte aus messtechnischen Gründen derart, dass die Anfangslasten so gewählt wurden, dass sich zu Beginn der Versuche in beiden Proben dieselbe Rissausbreitungsrate einstellte. Hierbei ergab sich für das FSW-TWB eine um den Faktor 3,5-mal höhere Last als für die blaue Kurve. Folglich beschränkt sich die Aussagefähigkeit der gezeigten Datenpunkte auf ihren qualitativen Vergleich. Bei dieser Art von bruchmechanischen Versuchen folgen die Kurven bei Blechen konstanter Dicke meist einem Potenzgesetz, wobei die Rissausbreitungsrate stetig zunimmt. Im Diagramm hingegen fällt auf, dass sowohl die gefräste TWB-Geometrie wie auch das „echte“ FSW-TWB bereits deutlich vor dem graduellen Dickenübergang eine signifikante Beeinflussung im Wachstum erfahren. Während das gefräste TWB durch die größere Steifigkeit der dickeren Blechseite eine Abnahme der Wachstumsgeschwindigkeit bei ca.  $x = 44$  mm erfährt, steigt die Ausbreitungsrate im FSW-TWB bereits ca. 6 mm vor Beginn des Dickenübergangs sprunghaft an. Ebenfalls auffällig ist bei den Daten des FSW-TWB, dass die Rissausbreitungsraten trotz deutlich höherer Probenlast bis ca.  $x = 43$  mm geringer sind, als im Fall der gefrästen TWB-Geometrie.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Proben besteht darin, dass die gefräste Realgeometrie sehr nah an ihrer Sollgeometrie ist, während FSW-TWB aufgrund der während des FSW entstandenen Eigenspannungen deutlichen Verzug aufweisen. Werden diese geometrisch verzogenen TWB in die Prüfmaschine eingespannt, so werden sie aufgrund der vergleichsweise hohen Maschinensteifigkeit in eine Form nahe der ebenen Sollkontur gezwungen. Hierdurch ergeben sich Biegespannungen, die sich den gewünschten Prüflasten additiv

überlagern. Die eingespannte Probe verfügt im eigentlich kraftfrei eingespannten Zustand somit bereits über innere Spannungen.

Die eigentliche Ursache hierfür liegt, wie oben erwähnt, in den Eigenspannungen, die sich während des FSW-Prozesses in der Probe einstellen und zu ihrem Verzug führen. Zur Abschätzung der effektiv auf die Rissausbreitung Einfluss nehmenden inneren Spannungen wurde ein vereinfachtes FE-Modell herangezogen, siehe Abbildung 55.



**Abbildung 55: Spannungen durch Verzug; (a) FE-Modell, (b) Pfade der Spannungsauswertung, (c) Spannungen senkrecht zur FSW-Naht, (d) Spannungen parallel zur FSW-Naht**

Hierbei wurden die Verformungen realer FSW-Bleche auf ein FE-Modell mit konstanter Blechdicke aufgebracht. Anschließend wurde dieses Modell in der Simulation in die ebene Form gebracht, wie es näherungsweise beim Einspannen der Proben in die steife Prüfmaschine geschieht. Mittels linear-elastischer FE-Analysen wurden anschließend die lokalen Dehnungs- und Spannungsfelder bestimmt.

Für die durchgeführten Rissausbreitungsversuche ist besonders der Spannungsverlauf entlang des Pfades b senkrecht zur FSW-Naht (siehe (b) und (d) in Abbildung 55) von Bedeutung, da die Rissausbreitung im Versuch prinzipiell entlang dieses Pfades stattgefunden hat. Die Spannungswerte verlaufen – bis auf die äußeren Randbereiche – alle zwischen ca. -40 und +64 MPa. Die in den Versuchen



wirkenden Nennspannungen betragen +15,2 MPa bzw. +53,0 MPa. Die durch den Verzug des FSW-TWB im Versuch wirkenden überlagerten Biegespannungen liegen somit in der Größenordnung der eigentlichen Prüflasten bzw. übersteigen diese sogar deutlich. Folglich ist eine ausgeprägte Wechselwirkung zwischen dem geometrischen Verzug eines FSW-TWB und den während der Rissausbreitung lokal wirkenden Lasten zu erwarten. Die im Rahmen von HERMET erzielten Ergebnisse belegen somit die Wichtigkeit der weitergehenden Untersuchung des Einflusses der Eigenspannungen und des Verzuges auf die Rissausbreitung in FSW-TWB.

Zur weiteren Quantifizierung dieser Einflüsse von Verzug und Eigenspannungen auf die Rissausbreitung müssen deutlich aufwändigere Simulationsmodelle aufgebaut werden, die z. B. unter der Verwendung sog. Rissspitzenelemente lokale Beanspruchungen an der Rissspitze bestimmen. Diese weiterführenden Untersuchungen erfolgen im Rahmen des ebenfalls vom BMWi geförderten Nachfolgeprojektes MTEXT innerhalb des ECO-Verbundes.

### **Zusammenfassung: Einsatz des FSW zur Fertigung von TWB aus AlMgSc**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets konnten alle wesentlichen Fragestellungen zur Beurteilung der Eignung des FSW für die Herstellung von TWB aus AlMgSc (Ko8242) beantwortet werden. Sowohl die Herstellbarkeit mittels FSW wie auch die grundsätzliche zerstörungsfreie Prüfbarkeit mittels Ultraschalltechnologie wurden nachgewiesen. Zusätzlich wurde im Rahmen erster Untersuchungen zur Rissausbreitung geklärt, dass besonders die durch das FSW entstehenden Eigenspannung und daraus resultierenden Verzüge bei Rissausbreitungsversuchen unter zyklischer Beanspruchung eine entscheidende Rolle spielen und dementsprechend berücksichtigt werden müssen. Die anvisierte Steigerung des Technologie-Reifegrades für das FSW von TWB wurde somit erreicht.

## **II.1.4 TA 30 - Fibre Metal Laminates**

### **Ausgangssituation**

Zum Aufbau von Faser-Metall-Laminaten (FML, z.B. Glare) werden 0,3 und 0,4 mm dünne Aluminium-Folien eingesetzt. Solche Folien lassen sich prozesstechnisch bedingt nur in einer begrenzten Breite durch Walzen herstellen. Breitere Metalllagen in den FML können nur durch Überlappungen erreicht werden, was neben einer Gewichtssteigerung auch zu aus mechanischer Sicht unerwünschten Unstetigkeiten im FML-Verbund führt.

### **Ziele und Herausforderungen**

Durch den Einsatz von reibrührgeschweißten Folien könnten die oben genannten Überlappungen vermieden werden, wodurch sich eine Gewichtsreduktion bei

gegebenenfalls gleichzeitig verbesserten mechanischen Eigenschaften erreichen ließe. Im Rahmen von HERMET soll daher die Machbarkeit bzw. Einsatzfähigkeit des FSW von dünnen Folien untersucht werden, wobei folgende Aspekte im Vordergrund stehen:

- Entwicklung einer geeigneten Spannmethode zur Vermeidung von Verwerfung der Bleche beim Schweißen
- Entwicklung eines geeigneten Tools zum Schweißen der dünnen Bleche
- Ermittlung des Prozessfensters (Parameter) zum Reibrührschweißen dünner Bleche aus AlMgSc und AlCuLi
- Werkstoffmechanische Charakterisierung der Schweißnaht zur Sicherung der Qualität
- Nachweis der Möglichkeit zur zerstörungsfreien Prüfung der FSW-Bleche mittels Ultraschall

### Vorgehensweise

Vor dem Hintergrund der langjährigen Erfahrungen des Instituts für Werkstoff-Forschung im Bereich FSW von Aluminiumwerkstoffen wurden folgende Aspekte adressiert, um ein möglichst erfolgreiches Untersuchungsprogramm sicherzustellen.

- **Einfluss des FML-Herstellungsprozesses auf FSW-Nähte:** Zuerst muss geklärt werden, welchen Einfluss der während der FML-Herstellung stattfindende Konsolidierungsprozess auf die Eigenschaften der FSW-Naht erwarten lässt.
- **Machbarkeit des FSW dünner Folien:** Für die ersten Untersuchungen soll auf AA2024-T3 zurückgegriffen werden, da hierzu bereits erste Erfahrungen aus vorangegangenen Untersuchungen vorliegen. Dazu werden Test-Schweißungen an Blechen mit einer Dicke von 0,4 mm durchgeführt, Die Wahl genau dieser Legierung für die ersten FSW-Untersuchungen hat den positiven Nebeneffekt, dass ein bei Airbus und PremiumAerotec GmbH verwendeter GLARE® (GLAss fibre REinforced Aluminum)-Typ aus Aluminium Blechen der Legierung AA2024-T3 besteht, so dass diese Legierung bereits für Glare zertifiziert ist. Folglich wird erwartet, dass ein ggf. zukünftig angestrebter Qualifizierungsprozess zum Einsatz von FSW-Folien aus AA2024-T3 für Glare voraussichtlich vergleichsweise schnell umgesetzt werden könnte.
- **FSW für AlMgSc- (und AlCuLi-) Folien:** Die Machbarkeit des FSW dünner AlCuLi-Bleche wurde nicht weiter untersucht, da aufgrund erhöhter Prozesstemperaturen während der FML-Herstellung mit ausgeprägten Überalterungserscheinungen im FSW-Nahtbereich zu rechnen ist (vgl. nachfolgenden Ergebnisteil). Dementsprechend wurde das

Untersuchungsprogramm in Abstimmung mit den Projektpartnern angepasst, so dass entsprechend umfangreiche Arbeiten zum FSW von AlMgSc erfolgten (siehe auch grundsätzliche Vorgehensweise Abbildung 13).

- **Möglichkeit der zerstörungsfreien Prüfung:** Wie bereits mehrfach im Bericht an anderen Stellen erwähnt, liegt eine wesentliche Voraussetzung für die zukünftige industrielle Anwendung des FSW in der Möglichkeit der zerstörungsfreien Prüfung der FSW-Verbindungen. Daher erfolgen erste Untersuchungen zur Ultraschallprüfung dünner FSW-Bleche.

Beim Werkzeugkonzept wurde aufgrund der erwähnten Vorerfahrungen des Instituts auf ein stiftloses, beschichtetes Stahlwerkzeug zurückgegriffen. Beim Spannen der Bleche wurde nicht, wie im Antrag geplant, die Vakuumspanntechnik genutzt. Stattdessen kam ein weniger aufwändiges Konzept mit verschraubten Stahlleisten zum Einsatz, was sich als äußerst effektive Vorgehensweise herausstellte.

Im Rahmen erster Versuchsreihen wurden geeignete Ausgangsparameter für das FSW der dünnen Bleche ermittelt. Zur Charakterisierung der Nahtqualität wurden zunächst für alle Schweißungen Biegeversuche durchgeführt, und metallographische Makroschliffe angefertigt. Wenn bei diesen Untersuchungen keine Fehler im Nahtbereich gefunden wurden, folgten Härtemessungen/Härteprofile (Vickers HV 0,3) und Zugversuche mit lokaler Dehnungsmessung mittels Laserextensometer.

Für ausgewählte Schweißungen erfolgten weiterführende Untersuchungen in Form von Makroätzung, Mikroskopie und Fraktographie. Bei Schweißungen der Legierung AA2024-T3 erfolgte die Präparation metallographischer Schliffe nach Keller, bei Schweißungen der AlMgSc Legierung mittels elektrolytischer Ätzung nach Barker. Bruchflächen und einzelne Querschliffe wurden mittels Rasterelektronen-Mikroskopie untersucht.

### Ergebnisse

Bei der FML-Herstellung wird das Material in einem Autoklaven mit einer Geschwindigkeit von ca. 2K/min auf 120° C erhitzt und anschließend eine Stunde bei dieser Temperatur gehalten. Dieser Temperaturzyklus kann bei FSW Verbindungen aus der aktuell in Glare genutzten Legierung AA2024-T3 voraussichtlich toleriert werden. Da AlCuLi üblicherweise im Zustand T8 eingesetzt wird, wird dieser erneute Temperaturzyklus besonders mit Blick auf eine vorhandene FSW-Naht als problematisch eingestuft. Weil AlCuLi im T8-Zustand bereits während des FSW zu Überalterungserscheinungen im Nahtbereich neigt, würde ein erneuter Temperaturzyklus während der Konsolidierung des FML zu einer weiteren Überalterung und dementsprechend Festigkeitsverlust führen. Daher wird in Abstimmung mit den Projektpartnern, das Reibrührschweißen von 0,4 mm dünnen AlCuLi Blechen nicht weiter untersucht. Auf Grund der hohen thermischen Stabilität von AlMgSc liegen bei dieser Legierung keine Bedenken vor. Somit liegt der

Schwerpunkt der weiterführenden Untersuchungen auf den Legierungen AA2024-T3 und AlMgSc.

Beim **FSW dünner AA2024-T3 Bleche** konnte bereits im Rahmen der ersten Versuchsreihe eine im Schliffbild fehlerfreie Naht realisiert werden. Jedoch wiesen alle anderen Schweißnähte eine deutliche mangelnde Durchschweißung (lack-of-penetration) auf. Da die defektfreie Naht bei einem relativ geringen Vorschub von 100 mm/min erzielt wurde, wurden in einer zweiten Versuchsreihe Parametersätze mit ebenfalls geringen Vorschubgeschwindigkeiten verwendet. Zur Anpassung der Linienenergie wurde die Drehzahl von 1250 U/min (ersten Versuchsreihe) auf 600-800 U/min (zweite Versuchsreihe) reduziert.

Die anfangs eingesetzte Titan-Unterlage erwies sich im Verlauf der Untersuchungen als ungeeignet. Aufgrund der vergleichsweise geringen Wärmeleitung der Titanfolie kam es zu erhöhten Prozesstemperaturen. Diese wiederum waren vermutlich Ursache für eine erhöhte Adhäsion zwischen Werkstück und Unterlage, so dass es zum Verkleben der geschweißten Bleche mit der Titan-Unterlage kam. Für die weiteren FSW-Arbeiten wurde somit statt Titanfolie eine Stahlgussplatte verwendet. Das Problem des „Verklebens“ von Werkstück und Unterlage wurde hierdurch beseitigt.

In den weiteren FSW-Versuchen wurden die Bleche jeweils komplett durchgeschweißt (visuelle Kontrolle, Biegeversuche). Somit wurden metallographische Schriffe angefertigt und Härtemessungen durchgeführt. Basierend auf den Kriterien „defektfreier Biegeversuch“ und „geringstmöglicher Härteabfall“ wurden die Parameter für die nächste Versuchsreihe ermittelt. Außerdem wurde die Werkzeuggeometrie dahingehend überarbeitet, dass der Durchmesser etwas vergrößert und die Rundung des Werkzeuges angepasst wurde, wodurch eine bessere Verrührung des Materials speziell im Wurzelbereich erreicht wurde.

Die Schweißung mit den Parametern 800 U/min (Drehzahl), 300 mm/Min (Vorschub) und einem Anstellwinkel von  $1,2^\circ$  zeigt hierbei den geringsten Härteabfall mit einem Minimum von 120 HV<sub>0,3</sub> (= 84 % Härte Grundmaterial) und die höchsten Zugfestigkeit mit  $R_m = 416$  MPa (= 94 % Zugfestigkeit Grundmaterial). Da es sich hierbei somit um die gemäß den Kriterien Zugfestigkeit und Härtewerte beste Schweißung handelt, werden im weiteren Text die Arbeiten zu dieser Schweißung (Abbildung 56) exemplarisch im Detail vorgestellt.



**Abbildung 56: Gesamtansicht Blech 855**

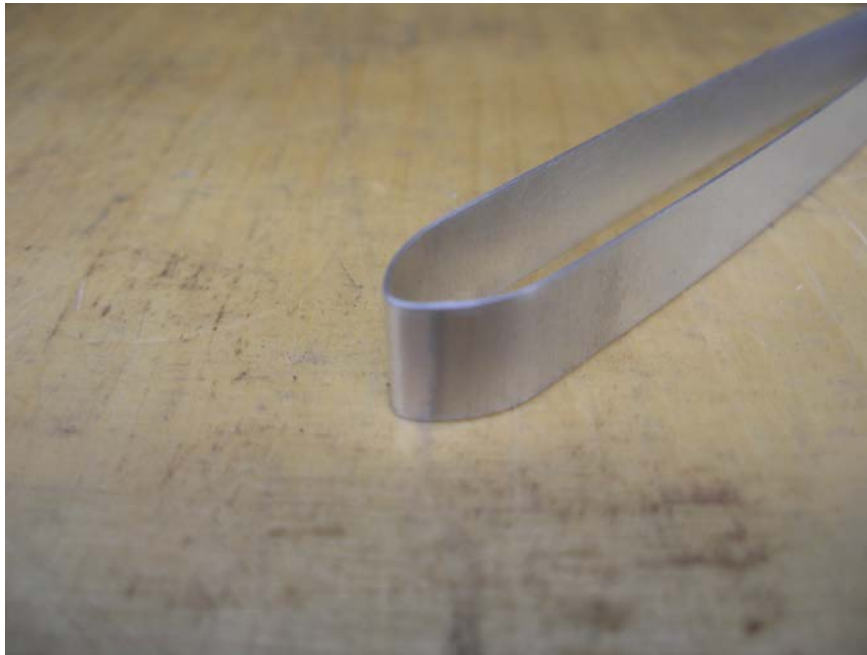
Die Übersichtsaufnahme des Bleches in Abbildung 56 zeigt neben einer glatten und gleichmäßigen FSW-Naht auch den Verzug, der sich aufgrund des FSW-Prozesses im Blech eingestellt hat. Auch wenn die Wölbung des Bleches deutlich erkennbar ist, wird sie im Falle dünner Bleche als irrelevant eingestuft. Dünne Aluminiumbleche, wie sie z. B. bei Glare zum Einsatz kommen, werden üblicherweise in sogenannten Coils, d. h. in aufgerolltem Zustand angeliefert und gelagert. Die ausgeprägte Wölbung des Bleches nach dem FSW liegt lediglich in der Größenordnung der Coil-Radien, so dass (im Gegensatz zu dickeren Blechen) ein negativer Effekt auf die Blecheigenschaften sowie die weitere Verarbeitung der geschweißten Bleche beim derzeitigen Kenntnisstand grundsätzlich ausgeschlossen werden kann.

Zur Beurteilung der Nahtqualität wurden im vorliegenden Fall folgende Untersuchungen durchgeführt.

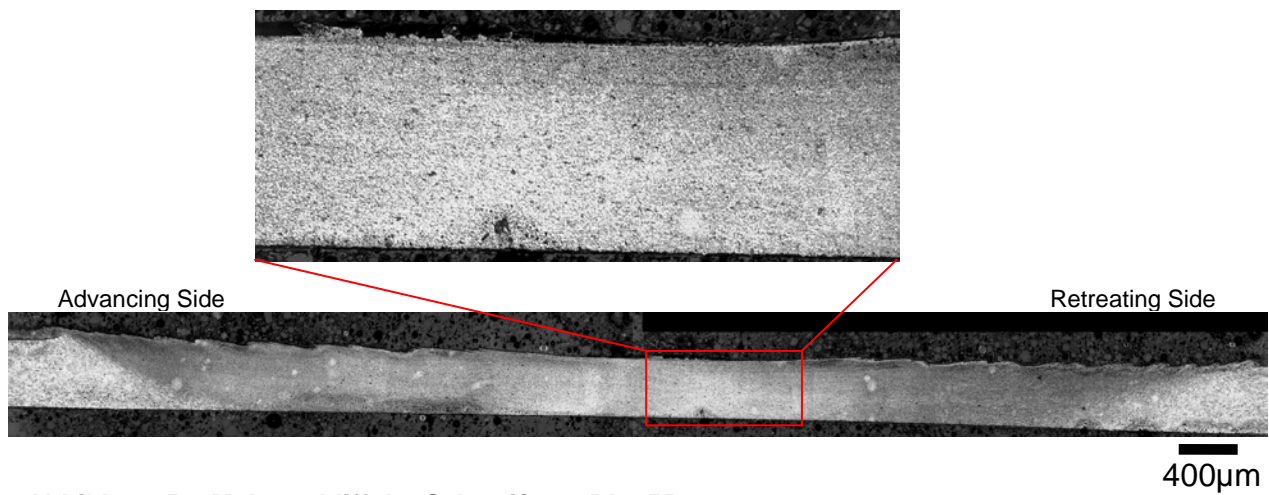
- Visuelle Kontrolle (bloßes Auge): Fehlerfreiheit
- Biegeprüfung: Fehlerfreier Wurzelbereich
- Makroschliffe: Mikrostruktur und (innenliegende) Defekte
- Härtemessung und Zugversuch: Mechanische Eigenschaften

Die visuelle Kontrolle sowie die Biegeprüfung (siehe Abbildung 57) waren unauffällig. Auch das Schliffbild in Abbildung 58 zeugt von einem fehlerfreien Nahtbereich. Der Bereich in der Schweißnahtmitte weist eine klare Feinkornbildung im Wirkungsbereich (SZ und TMAZ) des Werkzeuges auf.

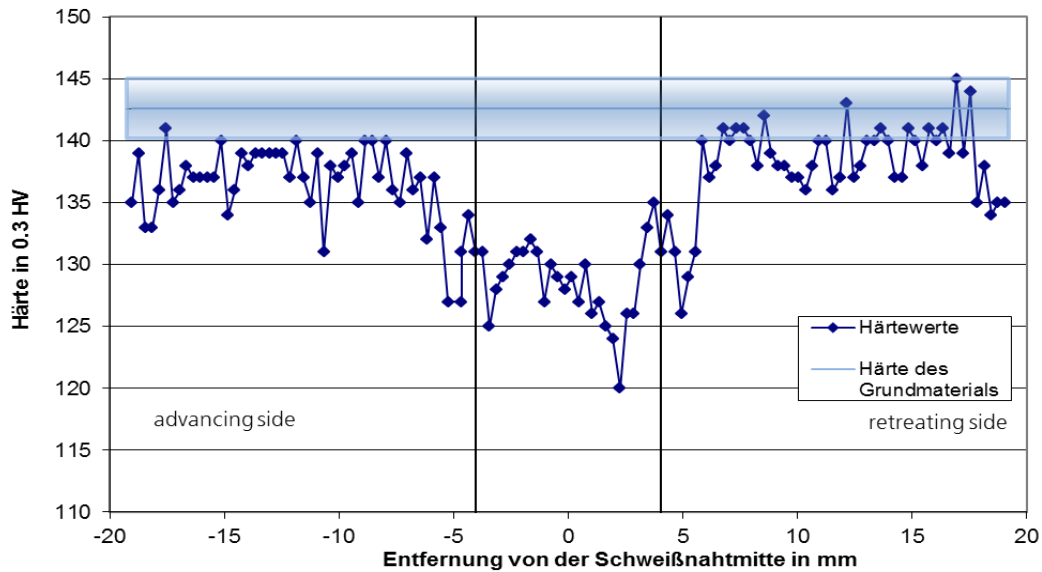
In Abbildung 59 ist das zugehörige Härteprofil dargestellt. Neben dem gemessenen Härteverlauf sind außerdem die Härte des Grundwerkstoffes und der thermomechanische Einflussbereich des Werkzeuges eingezeichnet. Das Diagramm zeigt den für FSW-Nähte charakteristischen Härteabfall im Nahtbereich.



**Abbildung 57: Biegeprobe der Schweißung BL 855**



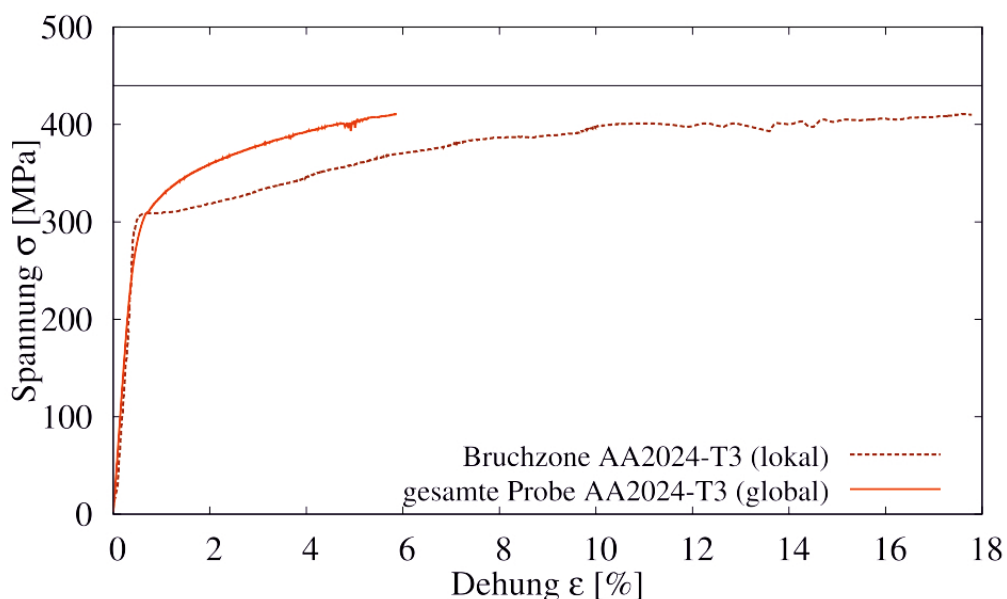
**Abbildung 58: Makroschliff der Schweißung BL 855**



**Abbildung 59: Härteverlaufskurve BL855**

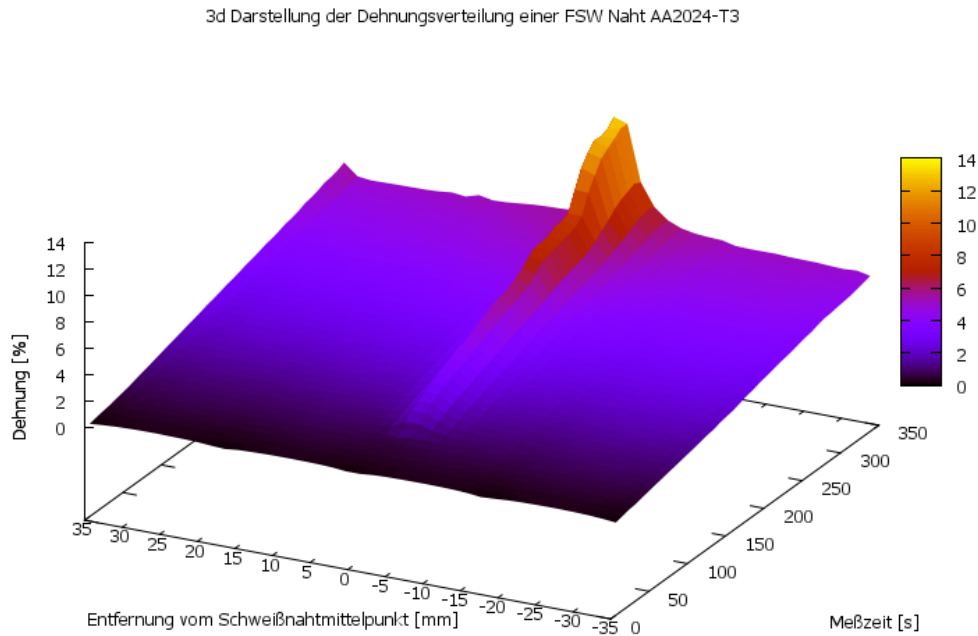
Alle Zugversuche wurden nach ASTM E8-M an Flachzugproben mit einer Messlänge von 70 mm durchgeführt. Zur Bestimmung der lokalen Dehnungen wurde ein Laserextensometer verwendet. Die lokale Auflösung der Dehnungsmessung betrug dabei 2 mm. Nachfolgend werden Größen bezogen auf die Messlänge von 70 mm als „global“ und solche bezogen auf die Messlänge von 2 mm als „lokal“ bezeichnet.

Die ermittelte Zugfestigkeit beträgt 415 MPa (Abbildung 60) und beträgt damit 94 % der Zugfestigkeit des Grundmaterials. Die globale Dehngrenze der FSW-Probe aus 2024-T3 beträgt 310 MPa, als globale Bruchdehnung werden 4 % erreicht. Das Grundmaterial 2024-T3 erreicht hingegen eine deutlich höhere globale Bruchdehnung von 15 %.

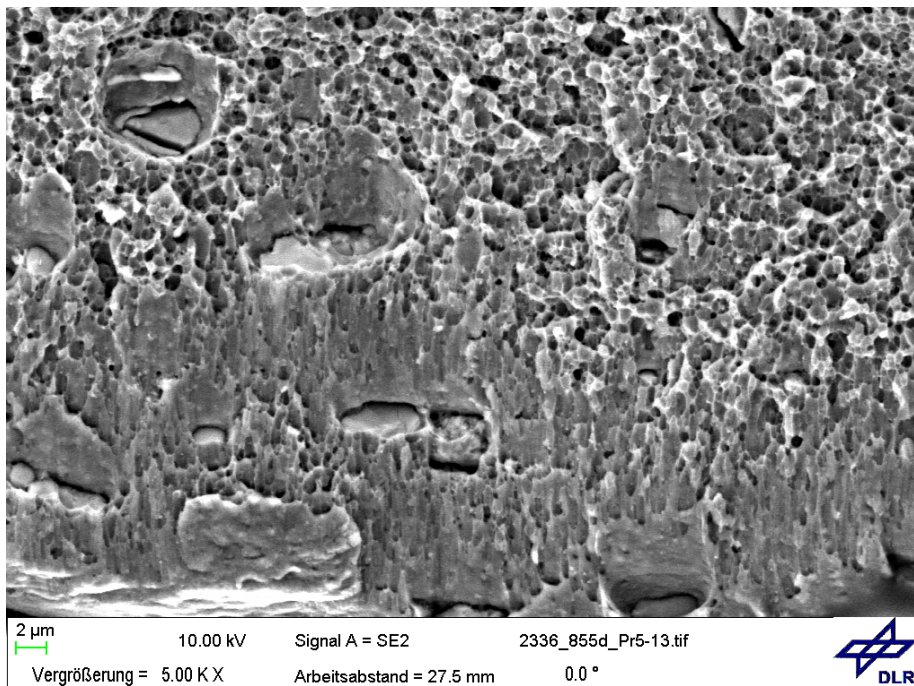


**Abbildung 60: FSW 2024-T3, Spannungsdehnungsdiagramm der gesamten Flachzugprobe und der lokalen Dehnung im Bereich der Schweißnaht**

Der Vergleich der lokalen Dehnungsmesswerte in Abbildung 61 mit dem Härteprofil (Abbildung 59) und der Bruchflächenanalyse (Abbildung 62) zeigt, dass es im Bereich des Härteminimums zu ausgeprägter Dehnungskonzentration von 16 % (vgl. Abbildung 60) und letztendlich duktilem Bruch kam.



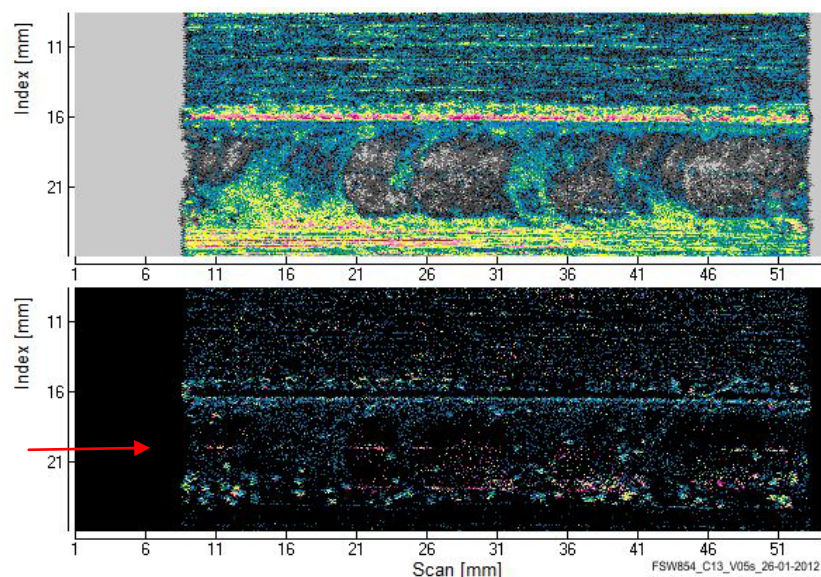
**Abbildung 61:** Dehnungszonen während des Zugversuches in Abhängigkeit von Ort und Messzeit



**Abbildung 62:** Bruchfläche nach dem Zugversuch (Probe im Bereich des Härteminimums gebrochen): Die ausgeprägte Dimpelbildung weist auf duktilem Werkstoffversagen hin.



Zur Beurteilung der **zerströrungsfreien Prüfbarkeit** der FSW-Folien erfolgten erste Untersuchungen **mittels Ultraschall**. Die Herausforderung hierbei lag unter anderem darin, dass bei üblichen Ultraschall-Untersuchungen das Eintrittsecho (das Signal des an der Blechoberfläche reflektierten Schalls) erst in etwa einem Millimeter Tiefe abklingt, und erst darunter verwertbare Signale aus dem zu prüfenden Probekörper empfangen werden können. Im vorliegenden Fall konnte mit einer sehr hohen Prüffrequenz von 75 MHz und der damit einhergehenden Verkürzung der Wellenlänge das Abklingen des Eintrittsechos soweit verkürzt werden, dass Folien mit einer Stärke von 0,4 mm geprüft werden konnten. Beispielhaft zeigt Abbildung 63 eine Messung, bei der ein vorhandener Rootflaw (roter Pfeil) erfolgreich in der FSW-Naht einer 0,4 mm dicken 2024-Folie detektiert werden konnte.



**Abbildung 63: C- und D-Scan (Ultraschall) einer FSW-geschweißten Folie mit Rootflaw (roter Pfeil)**

Nachdem somit alle im Rahmen von HERMET relevanten Aspekte der Machbarkeit des FSW zum Fügen dünner Aluminiumbleche nachgewiesen waren, erfolgten im nächsten Schritt die Untersuchungen zum **FSW dünner AlMgSc-Bleche**. Während des Projektzeitraumes war diese Legierung nicht als gewalztes Halbzeug in der gewünschten Dicke von 0,4 mm verfügbar. Deshalb wurden dickere Bleche von 3,2 mm auf die Nenndicke 0,4 mm abgefräst und für die weiteren Untersuchungen verwendet. Abbildung 64 zeigt zwei auf eine Sollstärke von 0,4 mm abgefräste und anschließend reibrührgeschweißte Bleche. Auf der Oberfläche sind noch Spuren des Fräskopfes zu sehen. Diese Versuchsreihe umfasst insgesamt vier Schweißungen mit unterschiedlichen Parametern.

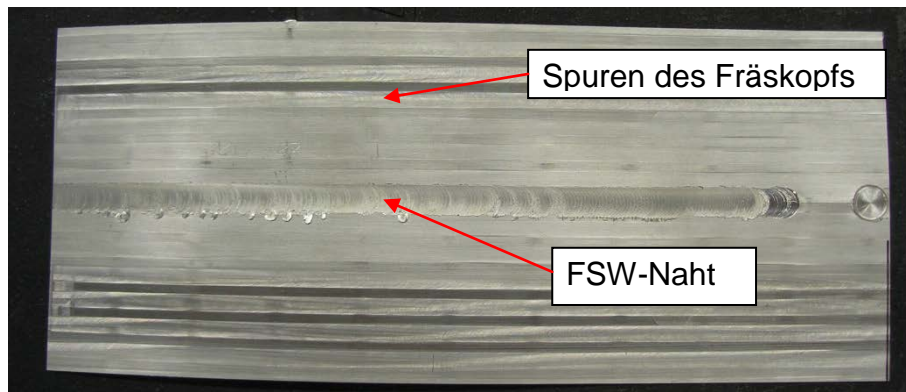



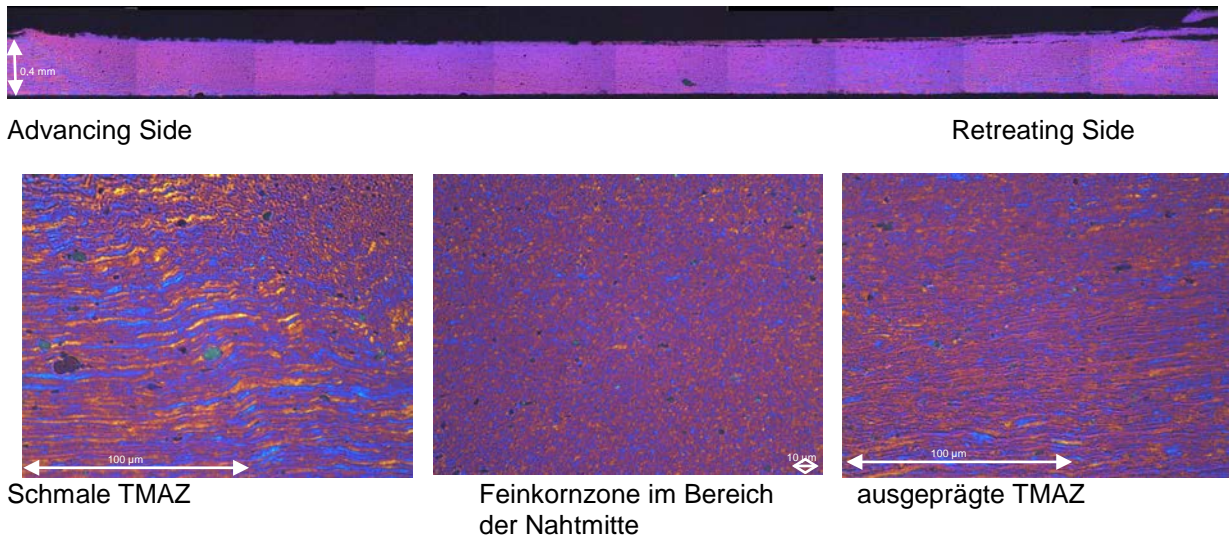
Abbildung 64: Bild eines dünngefrästen Blechs nach dem Schweißen

Die Erfahrungen aus den FSW-Untersuchungen an den dünnen (0,4 mm) AA2024-T3 Blechen und aus den Arbeiten zum FSW von dickeren (>1 mm) AlMgSc-Blechen (Ko8242) boten eine gute Ausgangsbasis für die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen. Als FSW-Werkzeug kam dasselbe wie bei den dünnen AA2024-T3 Blechen zum Einsatz. Tabelle 13 zeigt die Zusammenfassung des Untersuchungsprogramms.

Tabelle 13: Übersicht FSW-Versuche AlMgSc (t = 0,4 mm)

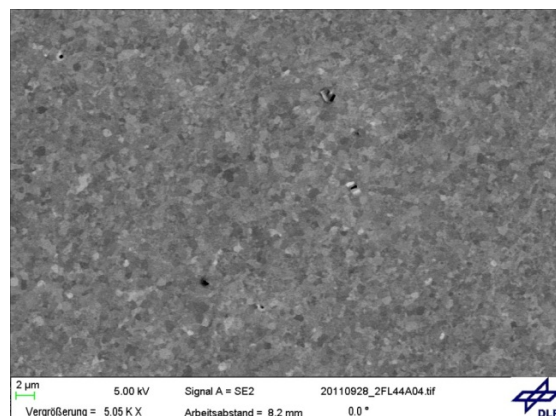
Blechnummer	BL922	BL923	BL924	BL925	BL926
<b>für Zugversuche:</b>	<b>BL932</b>			<b>BL933</b>	
Umdrehungsgeschwindigkeit in U/min	1200	1200	1200	1200	1200
Vorschub in mm/min	600	800	1000	1200	1400
Visuelle Prüfung	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
Biegeprüfung	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	gebrochen
Härtemessung absolutes Minimum in HV <sub>0,3</sub> und % GM	95 86,4 %	93 84,5 %	91 82,7 %	103 93,6 %	nicht untersucht
Zugfestigkeit in MPa und % GM (Mittelwert)	320 82 %	nicht untersucht	nicht untersucht	348 89 %	nicht untersucht
Dehngrenze R <sub>p0,2</sub> in MPa und % GM (Mittelwert)	273 90 %	nicht untersucht	nicht untersucht	305 100 %	nicht untersucht
Elastizitätsmodul in GPa und % GM (Mittelwert)	69 95 %	nicht untersucht	nicht untersucht	69 95 %	nicht untersucht
Bruchdehnung in % und % GM (Mittelwert)	2,6 % 13 % GM	nicht untersucht	nicht untersucht	5,6 % 32 % GM	nicht untersucht
Temperaturvergleich	warm				kalt

Gemäß den Kriterien Zugfestigkeit und Härteverteilung verfügt die Schweißung BL925 über die beste Nahtqualität und wird im Folgenden exemplarisch weiter diskutiert. Abbildung 65 zeigt den Makroschliff von BL925. Für eine Gefügeätzung wurde auf das elektrolytische Ätzverfahren nach Barker zurückgegriffen. Im polarisierten Licht werden unterschiedliche Kornorientierungen sichtbar, da die Ätzlösung die Kornflächen an der jeweiligen Kristallebene abträgt, so dass Orientierungsunterschiede farblich sichtbar werden.



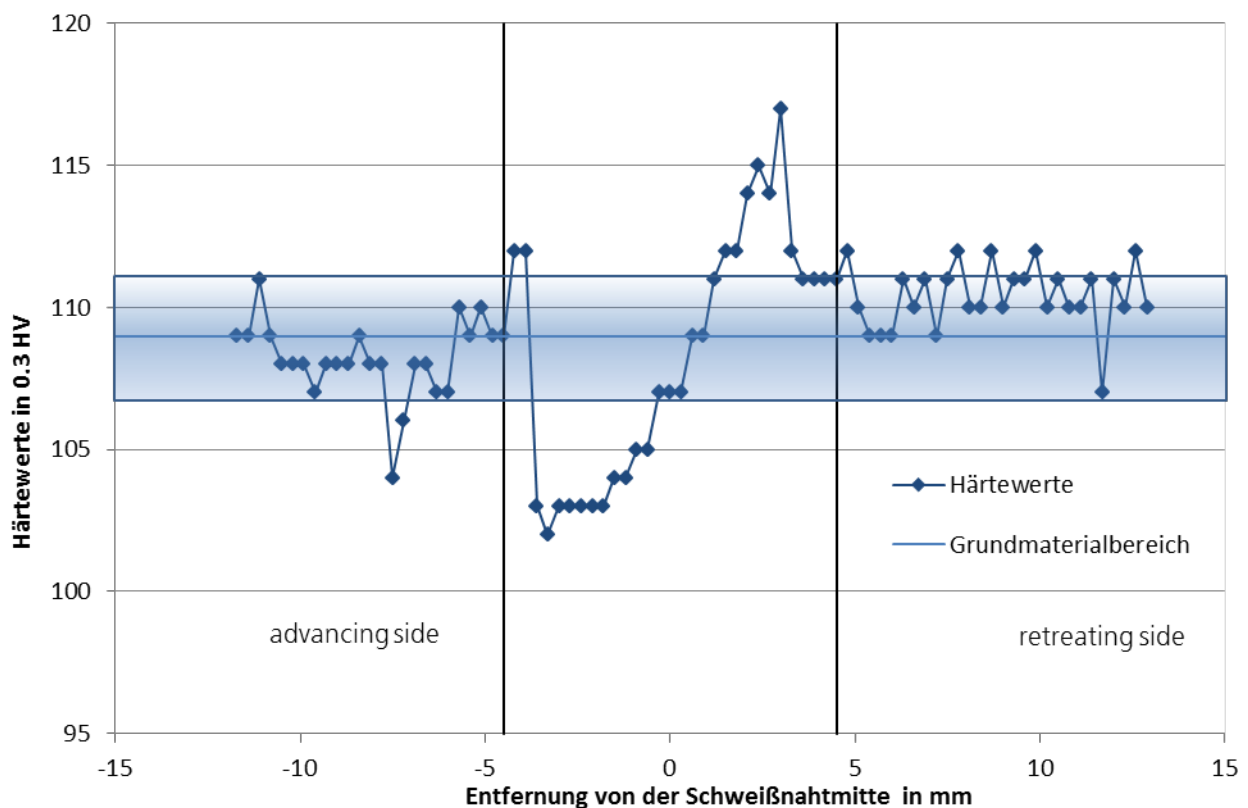
**Abbildung 65: FSW dünner AlMgSc-Bleche (Ko8242), lichtmikroskopische Aufnahmen des Querschliffs vom Nahtbereich (elektrolytisch geätzt nach Barker)**

Im Bereich des Grundmaterials ist das Gefüge charakterisiert durch längliche durch den Walzprozess bei der Blechherstellung verformte Körner. Im Bereich der TMAZ (thermomechanical affected zone) sind diese länglichen Körner des Grundmaterials deutlich wellenartig verformt. Die Struktur des Grundmaterials ist noch zu erkennen. Der Übergangsbereich zur Schweißzone ist auf der Advancing Side scharf, während sich auf der Retreating Side ein kontinuierlicher Übergang bildet, der je nach Schweißparametern mehrere Millimeter breit sein kann. Im Makroschliff ist die Feinkornbildung in der Schweißzone zu erkennen. Das rekristallisierte Gefüge kann aufgrund eines Korndurchmessers von ca. 1,5 µm nur mittels Rasterelektronenmikroskop sichtbar gemacht werden (siehe Abbildung 66).



**Abbildung 66: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Schweißzone**

In Abbildung 67 ist das Härteprofil der Schweißung dargestellt. Neben dem Härteverlauf sind außerdem die Härte des Grundwerkstoffes und der thermomechanisch beeinflusste Bereich des Werkzeugs (TMAZ und SZ) eingezeichnet. Im Gegensatz zur Legierung AA2024-T3 erreichen die Härtewerte außerhalb der TMAZ sofort wieder das Härteniveau des Grundmaterials. Somit lässt sich mit Hilfe dieser Härtemessung keine Wärmeeinflusszone nachweisen. Dies lässt sich dadurch begründen, dass bei der AlMgSc Legierung Ko8242 im Temperaturbereich des Schweißprozesses keine Veränderung an den für die mechanischen Eigenschaften ausschlaggebenden scandiumhaltigen Ausscheidungen stattfindet.



**Abbildung 67: Härteentwicklung der Schweißnaht AlMgSc**

Die Temperaturen und deren Einwirkzeit außerhalb der TMAZ beim FSW der 0,4 mm dünnen Bleche sind zu gering, um eine Rekristallisation zu bewirken, da die  $Al_3Sc$  Ausscheidungen durch Zener-Pinning die Rekristallisation hemmen bzw. verzögern.

Analog der Vorgehensweise bei AA2024-T3 wurden Zugversuche nach ASTM E8-M an Flachzugproben durchgeführt. Die Messlänge der gesamten Probe betrug jedoch nur 50 mm, da die verfügbaren AlMgSc Bleche schmäler waren als die beim FSW von 2024-T3. Zur Bestimmung der lokalen Dehnungen wurde wieder das Laserextensometer mit 2 mm breiten Dehnungsbereichen verwendet. Die ermittelte Zugfestigkeit beträgt 348 MPa (89 % der Zugfestigkeit des Grundmaterials), die globale Dehngrenze beträgt 305 MPa. Die globale Bruchdehnung liegt bei 5 %, Abbildung 68. Die Bruchdehnung der Grundmaterialprobe beträgt 17 %. Ähnlich wie beim FSW von AA2024-T3 konnte auch für Schweißnähte der AlMgSc-Legierung

eine lokale Dehnungskonzentration (Abbildung 69) im Bereich des Härteminimums (Abbildung 67) gefunden werden. Die lokale Dehnungsmessung ergab eine maximale Dehnung im Bereich des Härteminimums von ca. 12 %.

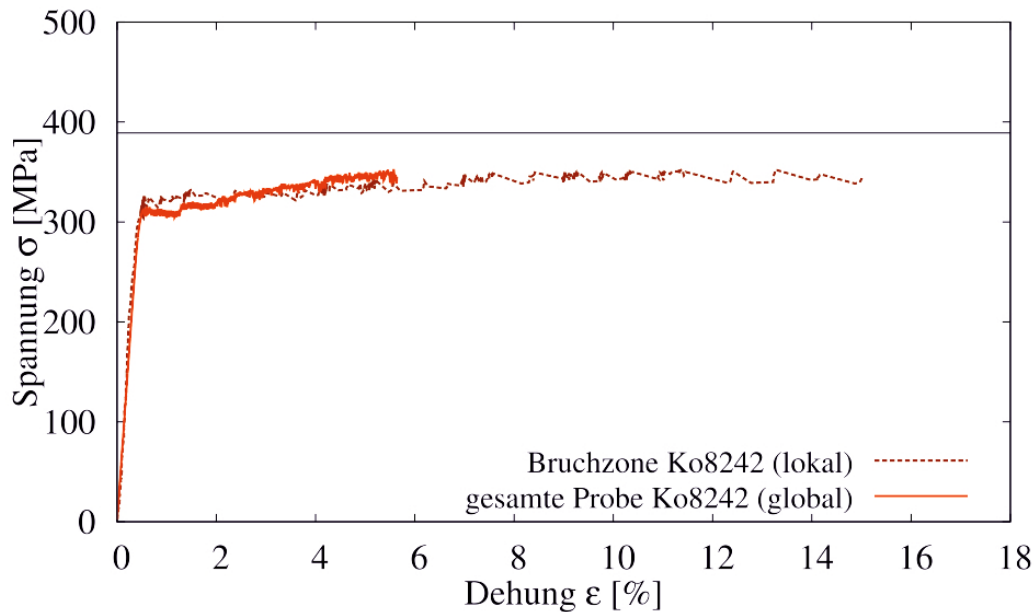


Abbildung 68: Spannungsdehnungsdiagramm der gesamten Flachzugprobe und der lokalen Dehnung im Bereich der Schweißnaht

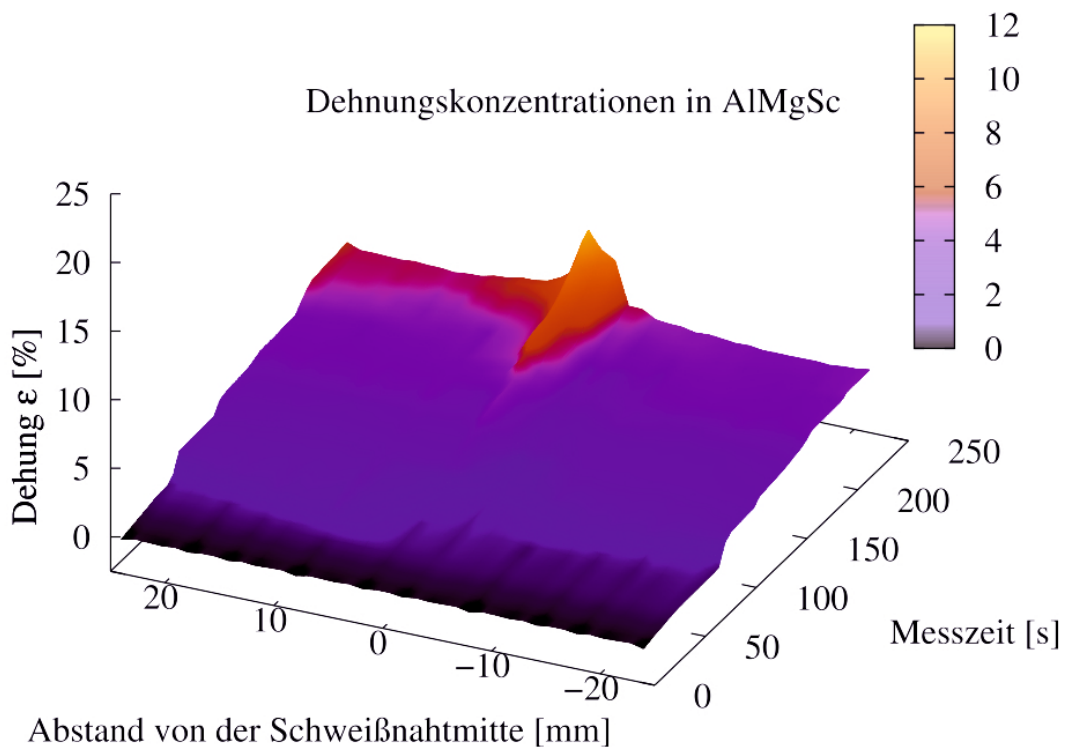
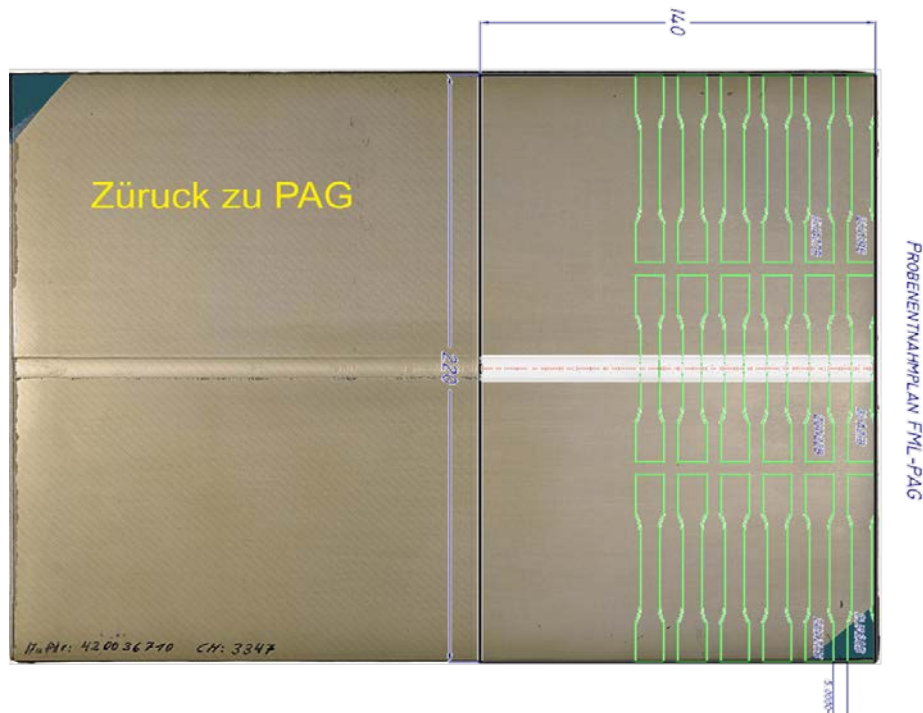


Abbildung 69: Dehnungszonen während des Zugversuches in Abhängigkeit von Ort und Messzeit

In Zusammenhang mit den mikrostrukturellen Untersuchungen hat die werkstoffmechanische Charakterisierung in Summe ergeben, dass beim Schweißen von dünnen (<0.4 mm) Blechen annähernd die gleichen Bedingungen vorliegen, wie bei dickeren (>1 mm) Blechen. Aufgrund der Geometrien (Volumen und Oberflächenverhältnis) ergeben sich andere Aufwärm- und Abkühlkurven als bei dickeren Blechen, so dass die Parameter angepasst werden mussten. Im Gesamtergebnis konnten Schweißungen erzeugt werden, die der üblichen (gem. einschlägiger Fachliteratur und eigenen Standards) Qualität für Schweißungen dickerer Bleche entsprechen. Somit konnten alle Meilensteine der Teilaufgabe 30 in der vorgesehenen Zeit abgeschlossen werden. Lediglich der für den Bereich des Schweißnuggets ungewöhnliche Härteanstieg bei den AlMgSc Schweißungen bei optimalen Bedingungen konnte noch nicht erklärt werden. Dieser Aspekt wird aber ebenso wie die Arbeiten mit dem Ziel eines geschweißten „Splice“ im thematisch direkt anknüpfenden Teilprojekt HERMO im Verbund KOSMO weiter untersucht.

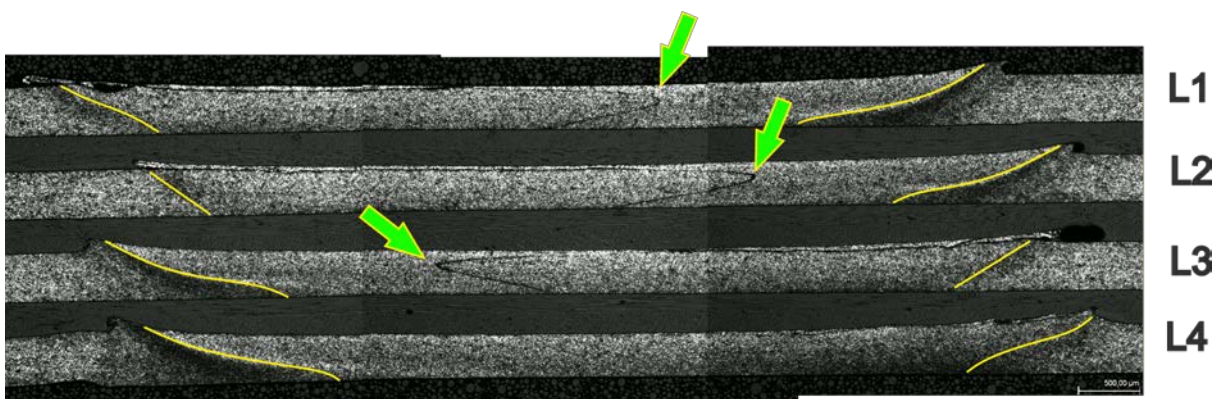
### **Demonstrator**

Durch die guten Fortschritte bei den Arbeiten zum FSW dünner Folien war es möglich, zusammen mit dem Projektpartner PAG -zusätzlich zum ursprünglichen Arbeitsplan- einen FML-Demonstrator aus FSW-gefügt AlMgSc-Blechen aufzubauen. Dazu wurde bei PAG ein 4/3-Laminat angefertigt, wobei die Fertigung sowie die zugehörige zerstörungsfreie Prüfung in der industriellen Prozessumgebung durchgeführt wurden. Bei dem Demonstrator bestehen die vier Aluminiumlagen aus 0,4 mm dünnen Ko8242-Blechen, die zuvor beim DLR reibrührgeschweißt worden waren. Die FSW-Nähte der vier Bleche wurden hierbei bewusst übereinander angeordnet, um eine Art „Worst-Case“-Szenario sowohl aus Sicht der FML-Fertigung wie auch für die mechanischen Untersuchungen abzubilden. Bei der späteren Anwendung würden die Nähte sicherlich anders angeordnet werden müssen, wobei die zugehörigen Untersuchungen aktuell im Rahmen des LuFo-Projektes MTEXT im ECO-Verbund stattfinden. Abbildung 70 zeigt den Probenentnahmeplan für die mikrostrukturelle und mechanische Charakterisierung. Metallographische Untersuchungen des Querschliffs wurden mit Hilfe eines Lichtmikroskops durchgeführt. Zugproben wurden sowohl vom Bereich mit geschweißten Folien als auch von Bereichen ohne Schweißnähte entnommen, um die Zugfestigkeit des ungestörten FMLs zu untersuchen.



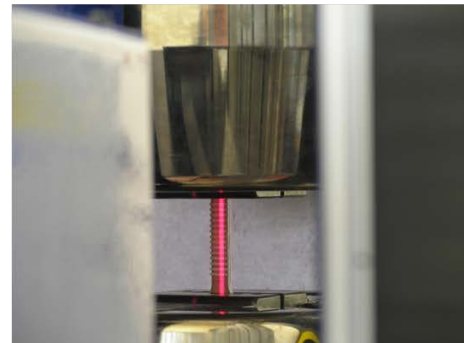
**Abbildung 70: Probenentnahmeplan des FML-Demonstrators**

Abbildung 71 zeigt einen Querschliff des Laminats. Aufgrund des niedrigen Kontrasts wurden die Schweißnähte mit gelben Linien markiert. Die geschweißten Folien L1, L2 und L3 weisen schwarzen Linien auf, die durch die ganze Naht verlaufen. Diese so genannten „Nuggetflaws“ (grüne Pfeile) sind möglicherweise eine Ansammlung von Oxiden. Denn die bei Aluminiumlegierungen an der Oberfläche vorzufindende Oxidschicht wird während des FSW-Prozesses in die Schweißnaht hineingerührt. Je nach Ausprägung und Werkstoff können solche „Nuggetflaws“ die statische wie auch zyklische Festigkeit der Verbindung negativ beeinflussen.



**Abbildung 71: Querschliff des vierlagigen FML**

Die Dehnungen im Zugversuch wurden mittels Laserextensometer gemessen. Dazu wurden auf die Oberflächen der Zugproben (Abbildung 72) in der Mitte der Messlänge von 28 mm Markierungen aufgebracht. Wie zuvor bereits mehrfach beschrieben, lassen sich mit Hilfe des Laserextensometers örtlich aufgelöst Dehnungs-Zeit-Kurven für jede Zone messen.



**Abbildung 72: Zugversuch von FML mit lokalen Dehnungsmessungen mit Laserextensometer**

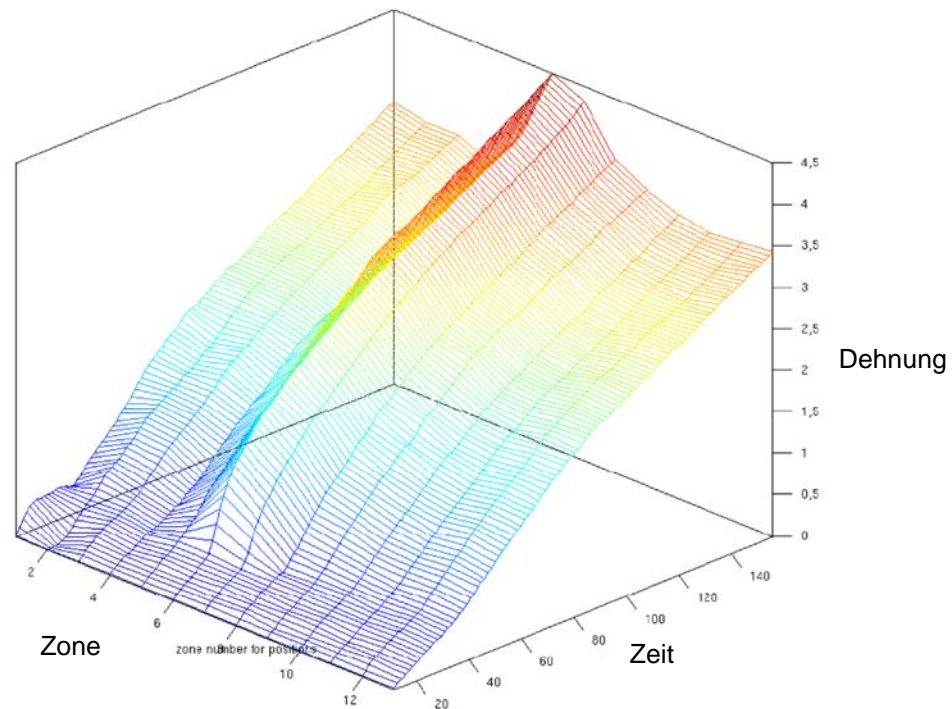
Die ermittelten Zugfestigkeiten des Laminats in den verschiedenen Bereichen sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Bei den FSW-FML fand der Bruch erwartungsgemäß in der Mitte der Probe statt; bei den FSW-freien FML sind die Proben jedoch am Rande des Radius gebrochen, so dass die dabei ermittelten Messwerte nur Mindestkennwerte darstellen.

**Tabelle 14: Mechanische Kennwerte der FML ohne und mit FSW-Naht**

Proben-Nr.		$R_{p\ 0.2}$ (Messstrecke 26mm)	$R_m$	E-Modul	$R_{p\ 0.2}$ (lokal)	$A_{26mm}$	$A_{Lokal}$
		MPa	MPa	GPa		%	%
2UA19B	nicht geschw.	279	563	55,7	276	3,0	3,0
2UA27B	nicht geschw.	280	558	58,0	277	2,8	2,9
2UA28B	nicht geschw.	283	565	56,9	279	2,8	2,9
2UA29B	nicht geschw.	286	579	57,6	279	2,9	3,0
<b>Durchschnitt</b>			<b>566</b>				
2UA21B	geschweißt	261	528	55,9		210	3,6
2UA22B	geschweißt	258	520	56,1		208	3,9
<b>Durchschnitt</b>			<b>524</b>				



Grundsätzlich weisen die Proben mit den geschweißten Folien etwas niedrigere Festigkeiten als das konventionelle FML ohne FSW-Nähte auf. Der relative Festigkeitsverlust beträgt ca. 9%. Der Bruch bei den FSW-FML fand unter erhöhter Dehnungslokalisierung im Bereich der Nahtmitte statt (siehe Abbildung 73). Es ist unklar, ob und wenn ja, welchen Einfluss die zuvor gezeigten Nuggetflaws haben.



**Abbildung 73: FML mit FSW-Nähten, Dehnung-Zeit-Diagramme von 2UA21B**

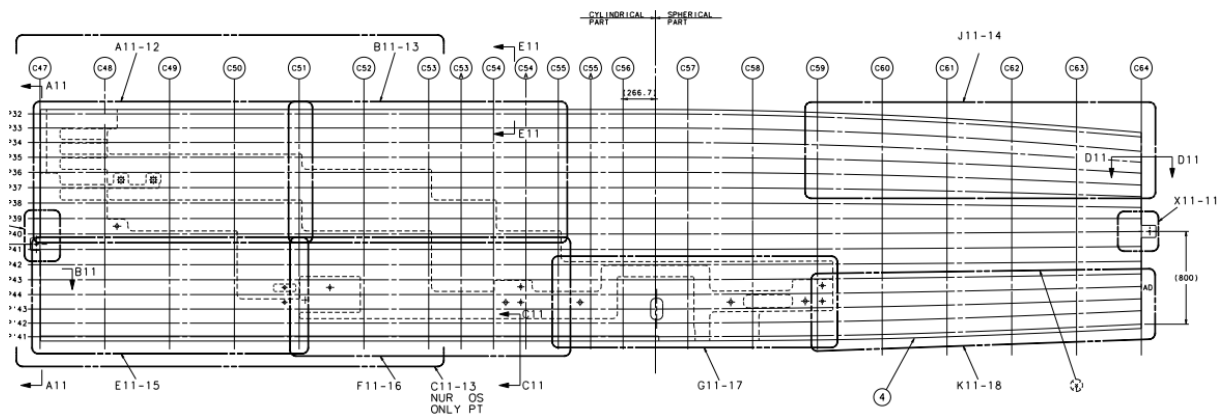
Sicherlich kann an dieser Stelle aber vermutet werden, dass eine andere Anordnung der FSW-Nähte im FML-Verbund zu einer höheren Festigkeit führen würde. Wie bereits erwähnt, erfolgen weitere Untersuchungen hierzu im Rahmen des ebenfalls vom BMWi gefördertern Projektes MTEXT (ECO-Verbund).

## II.1.5 TA 50 - Sub-Assembly

### Ausgangssituation

Wie bereits im Abschnitt I.5 erläutert, wurde in Zusammenarbeit mit der Firma CASIM GmbH – die vom Projektpartner PAG beauftragt wurde – der Einfluss der Herstellungstoleranzen auf die Abweichungen der Zusammenbaupositionen an einem Hautfeld 10 aus der Sektion 17 des A320 untersucht. Bei der Fertigung eines jeden Hautfelds treten geometrische Herstellungsungenauigkeiten auf. So kommt es auch bei der Herstellung eines Hautfeldes zu Abweichungen der tatsächlichen Geometrie von der Nominalgeometrie laut Zeichnung, z.B. Schwankungen hinsichtlich der Dicke der Haut oder der Stringer oder bei der Positionierung der Anlageflächen der Stringer. Die Schwankungsbreiten dieser Ungenauigkeiten liegen

innerhalb der Herstellungstoleranzen. Werden die insgesamt 16 Stringer, die jeder für sich mit Herstellungsungenauigkeiten behaftet ist, auf der Haut befestigt, die ebenfalls Herstellungsungenauigkeiten aufweist, dann deformieren sich Stringer und Haut gegenseitig (vergl. Abbildung 74). Insgesamt weist dann das zusammengebaute Hautfeld Abweichungen in den Anschlussmaßen zu den benachbarten Hautfeldern auf, z.B. zu dem in Sektion 18. Diese Abweichungen sollten so klein wie möglich sein und sie müssen insbesondere kleiner als die zulässigen Abweichungen sein, denn die Stringer müssen mit den Stringern der angrenzenden Hautfelder verbunden werden, weshalb diese zueinander in Flucht stehen müssen.



**Abbildung 74: Hautfeld 10 der Sektion 17 mit 16 Stringern montiert auf der Haut**

### **Ziele und Herausforderungen**

Eine Sensitivitätsanalyse ist in der Regel ein zusätzlicher Arbeitsschritt der somit mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist. In der Praxis ist es deshalb üblich, nur eine sehr vereinfachte Sensitivitätsanalyse durchzuführen, in dem nur immer eine der Einflussgrößen variiert und die Auswirkung dieser „eindimensionalen“ Variation auf die Zusammenbaugrößen ermittelt wird. Diese „eindimensionale“ und vereinfachte Vorgehensweise spart numerischen Aufwand, hat aber den Nachteil, dass die Einflüsse zweiter Ordnung nicht erfasst werden können. Als Einflüsse zweiter Ordnung bezeichnet man die Tatsache, dass der Einfluss einer Eingangsgröße sich verstärkt oder abschwächt, wenn sich gleichzeitig eine zweite Einflussgröße ändert. Oder anders gesagt - wenn sich zwei (oder mehr) Einflussgrößen gleichzeitig ändern, und deren Auswirkung auf die Ergebnisgrößen nicht mehr nur durch die einfache Summe der beiden (oder mehreren) Auswirkungen der jeweiligen, einzelnen Einflussgrößen ist, dann liegen Effekte höherer Ordnung vor. Dies ist in der Regel immer der Fall, wird aber aus den genannten Gründen in der Praxis ignoriert. Es soll deshalb im Projekt ein einfaches Verfahren entwickelt werden, dass einerseits nur einen geringen zusätzlichen Aufwand bedeutet, aber trotzdem Effekte höherer Ordnung berücksichtigt.

### **Vorgehensweise**

Im Rahmen einer Toleranzanalyse wird in der Regel eine Monte Carlo Analyse durchgeführt. Die damit erzeugten Daten werden verwendet, um in Form von Histogrammen die Schwankungsbreiten der Zusammenbautoleranzen zu visualisieren. Im Rahmen des Projekts HERMET wurde diese im Rahmen der Toleranzanalyse erzeugten Daten verwendet, um eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Dazu wurden die Daten mit Hilfe einer Korrelationsanalyse auf der Basis von zwei verschiedenen Korrelationskoeffizienten untersucht und ausgewertet. Es wurden somit keine neuen Daten erzeugt, sondern bereits vorhandene Daten verwendet. Als Korrelationskoeffizienten wurde der Pearson Korrelationskoeffizient und der Spearman-Rank-Order Korrelationskoeffizient verwendet. Beide Korrelationskoeffizienten messen, wie stark die Ergebnisgrößen, also die Zusammenbautoleranzen, mit den Herstellungs- und Positionierungstoleranzen der Eingangsgrößen korreliert sind. Ist diese Korrelation groß, dann kann von einer großen Sensitivität ausgegangen werden. Existiert dagegen keine solche Korrelation, dann ist auch die Sensitivität gering oder nicht vorhanden.

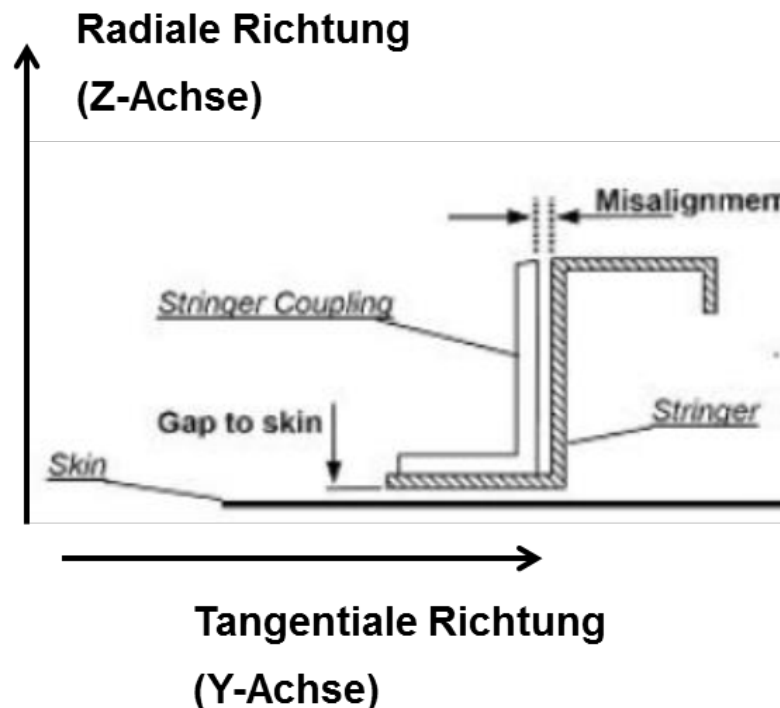
### **Ergebnisse**

Als Ergebnisgrößen wurden für das Hautfeld 10 der Sektion 17 eine A320 je drei Abweichungen der Zusammenbaupositionen (dof = direction of flight, tan = tangential, rad = radial) von zwei Stringern (P33, P42) am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18 ermittelt. Für die Bezeichnung der einzelnen Richtungsbezeichnungen ist zudem wichtig, dass die „Direction of Flight“ auch die X-Achse, die Tangentialrichtung auch die Y-Achse und die Radialrichtung auch die Z-Achse des Referenzkoordinatensystems ist. Die Ergebnisparameter haben folgende Bezeichnungen:

- P33\_S17\_(dof)
- P33\_S17\_(tan)
- P33\_S17\_(rad)
- P42\_S17\_(dof)
- P42\_S17\_(tan)
- P42\_S17\_(rad)

Abweichungen vom Nominalmaß in der „Direction of Flight“ führen dazu, dass der Stringer und die Stringerkupplung weniger oder mehr überlappen. Da der Stringer und die Stringerkupplung manuell miteinander abgebohrt werden, kann eine solche Abweichung problemlos ausgeglichen werden. Anders ist das bei Abweichung in tangentialer oder radialer Richtung. Eine Abweichung in tangentialer Richtung führt zu einer Lücke zwischen der Stringerkupplung und dem Stringer (in Abbildung 75 als „Misalignment“ bezeichnet). Eine Abweichung in radialer Richtung führt dagegen zu einer Lücke zwischen dem Stringer und der Haut (als „Gap to skin“ in Abbildung 75

bezeichnet). In beiden Fällen müssen Unterlagen in der richtigen Dicke eingefügt werden, um die Lücke auszugleichen (Shimming), was einen zusätzlichen manuellen Herstellungsaufwand und mithin zusätzliche Kosten bedeutet.



**Abbildung 75: Zusammenbauabweichungen zwischen Stringer und Stringerkupplung bzw. Stringer und Haut**

Mit dem vorliegenden Modell wurden zwei Varianten untersucht; zum einen die Herstellung mit genieteten Stringern und zum anderen die Herstellung mit geschweißten Stringern. Hierbei wurden 40 bzw. 34 verschiedene Einflussparameter berücksichtigt.

Von der Firma CASIM wurde die Streuung dieser genannten 6 Ergebnisparameter mit Hilfe von jeweils 10.000 Monte Carlo Simulationen ermittelt. Dazu wurden die 40 bzw. 34 Einflussparameter gemäß deren Schwankungsbreite und der jeweiligen statistischen Verteilung variiert und so 10.000 Sätze an Eingangsparametern generiert, die jeder für sich eine Einbausituation der Stringer auf der Haut darstellt. Mit Hilfe der Software „3DCS Compliant Modeler“ wurde für jede der 10.000 Einbausituationen die genannten 6 Ergebnisparameter ermittelt. Die beiden so erzeugten Datensätze wurden dem DLR für weitere statistische Auswertungen zur Verfügung gestellt.

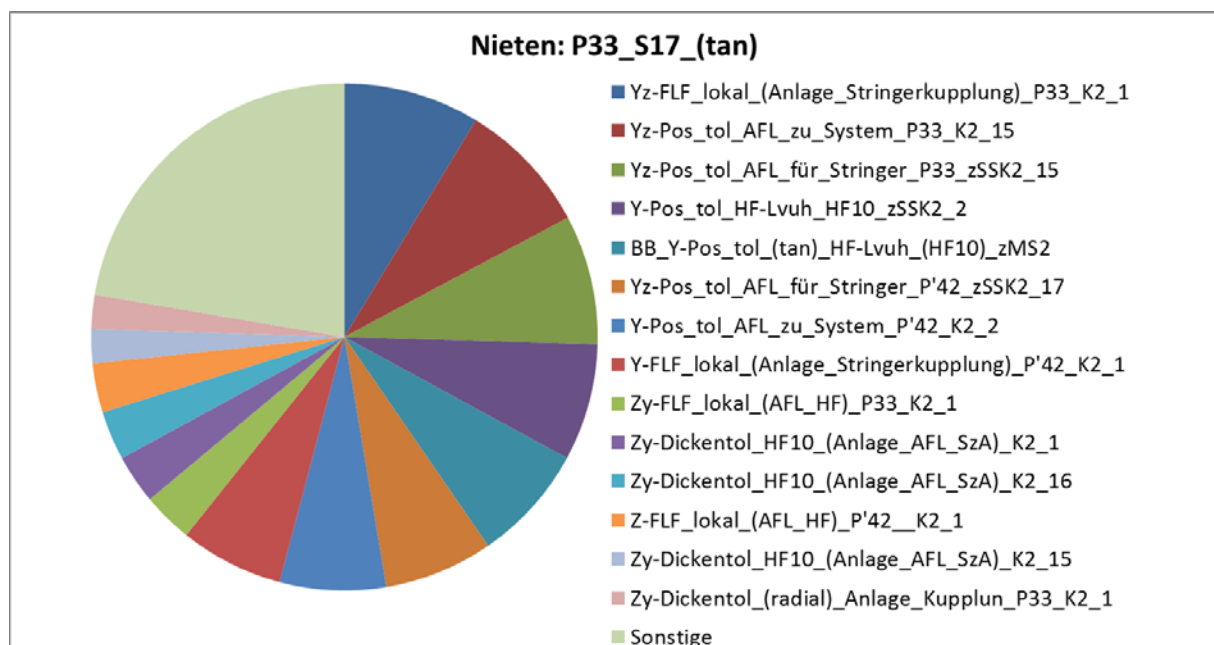
Dabei wurden die folgenden zwei Sensitivitätsmaße bestimmt:

- Linearer Pearson-Korrelationskoeffizient
- Spearman-Rank-Order-Korrelationskoeffizient

Der Pearson-Korrelationskoeffizient misst den Grad, in dem der Zusammenhang zwischen den Einflussparametern und den Ergebnisparametern durch einen linearen Funktion beschrieben werden kann. Darüber hinaus, wird sowohl ein linearer Zusammenhang als auch ein ggf. vorhandener nichtlinearer Zusammenhang durch den Spearman-Rank-Order-Korrelationskoeffizient abgebildet wird. Der Vergleich beider Koeffizienten gibt somit eine Auskunft darüber, ob die Beziehung zwischen Einflussparameter und Positionsabweichung linear oder nicht-linear ist. Beide Sensitivitätsmaße basieren nicht auf der numerischen Bestimmung von Gradienten, sondern messen wie stark die Ergebnisparameter mit den Einflussparametern korreliert sind. Die Korrelationskoeffizienten können dabei Werte zwischen -1 und +1 einnehmen. Je größer der Betrag der Korrelationskoeffizienten ist, desto größer ist deren Einfluss auf die betreffende Ergebnisgröße. Positive Werte des Korrelationskoeffizienten bedeuten, dass ein Anstieg der Einflussparameter einen Anstieg der Positionsabweichung verursacht. Eine negative Korrelation zwischen Einflussparameter und Positionsabweichung entspricht einer Verminderung der Positionsabweichung bei zunehmendem Wert des Einflussparameters.

### Ergebnisse beim Hautfeld mit genieteten Stringern

Im vorliegenden Fall des Hautfeldes mit genieteten Stringern ergab sich, dass kein großer Unterschied zwischen den beiden Korrelationskoeffizienten vorliegt. Im Folgenden werden deshalb nur die Ergebnisse auf der Basis des Spearman-Rank-Order Korrelationskoeffizienten dargestellt.

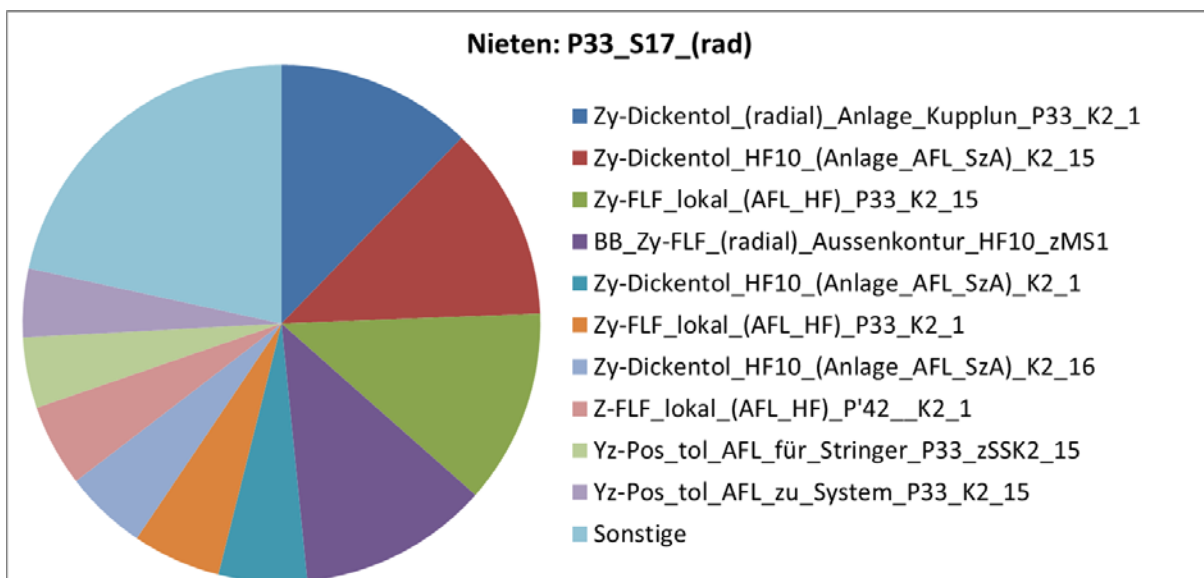


**Abbildung 76: Sensitivitäten der Abweichungen der tangentialen Position von Stringer P33 am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18**

In Abbildung 76 sind die Sensitivitäten der Abweichungen der tangentialen Position von Stringer P33 auf die Einflussgrößen (Herstellungs- und

Positionierungsungenauigkeiten von Stringer und Hautfeld) gezeigt. Konsistent mit der Erwartung zeigt sich, dass die Zusammenbauabweichung des Stringers P33 im Anschluss an das Hautfeld 18 in tangentialer Richtung primär von den Herstellungsungenauigkeiten und Positionierungsungenauigkeiten betroffen ist, die auch die tangentielle Richtung, d.h. die Y-Achse betreffen. Die Sensitivitäten sind der Größe nach sortiert, beginnend auf der 12-Uhr-Position mit der Einflussgröße, die auf die Positionierungsungenauigkeit des Stringers P33 in tangentialer Richtung den größten Einfluss hat. Die weiteren Einflussgrößen folgen im Uhrzeigersinn in absteigender Folge ihres Einflusses auf die Ergebnisgröße. Im Sinne einer Pareto 80/20-Regel sind nur diejenigen Einflussgrößen gezeigt, die insgesamt 80 % der Schwankungsbreite der tangentialen Position des Stringers P33 am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18 ausmachen. Die restlichen, eher insignifikanten Einflussgrößen sind unter „Sonstige“ zusammengefasst. Es zeigt sich weiterhin, dass von den insgesamt 40 Einflussgrößen nur 16 wirklich wichtig sind.

Analog dazu sind in Abbildung 77 die Sensitivitäten der Abweichungen der radialen Position von Stringer P33 auf die Einflussgrößen (Herstellungs- und Positionierungsungenauigkeiten von Stringer und Hautfeld) gezeigt. Hier zeigt sich, dass von den 40 Einflussgrößen sogar nur 10 relevant sind und in der Summe 80 % der Schwankungsbreite der Ergebnisgröße ausmachen. Die anderen Einflussgrößen wurden unter „Sonstige“ zusammengefasst. Auch hier bestätigt sich die Erwartung, dass die radiale Schwankung der Position des Stringers 33 am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18 primär von Einflussgrößen dominiert wird, bei denen es um Abweichungen in radialer Richtung geht, d.h. in Z-Achsen-Richtung.

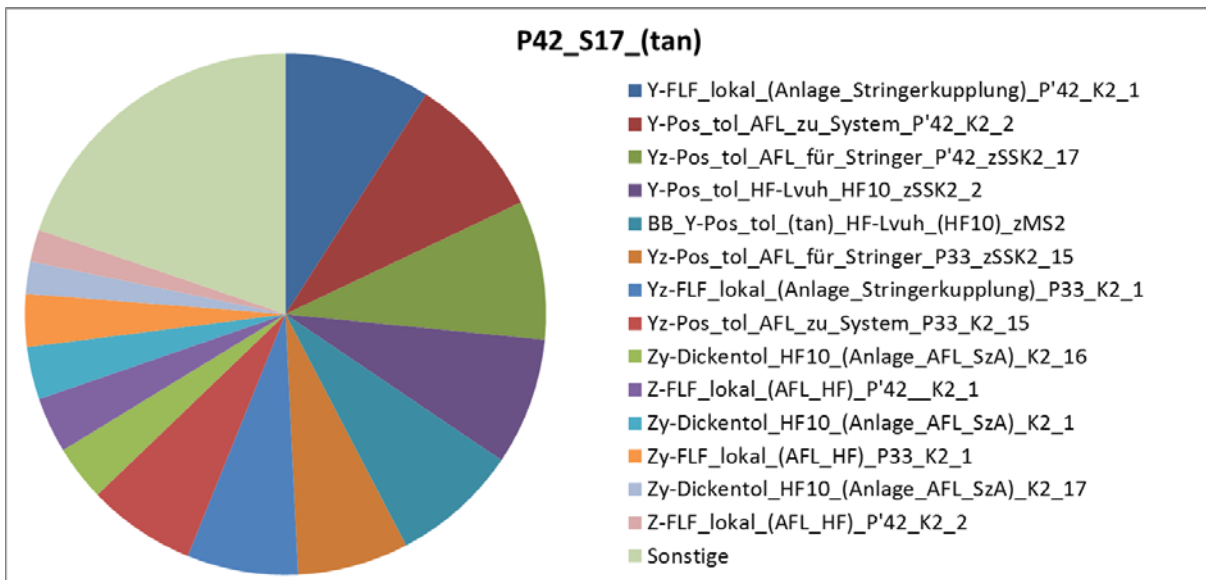


**Abbildung 77: Sensitivitäten der Abweichungen der radialen Position von Stringer P33 am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18**

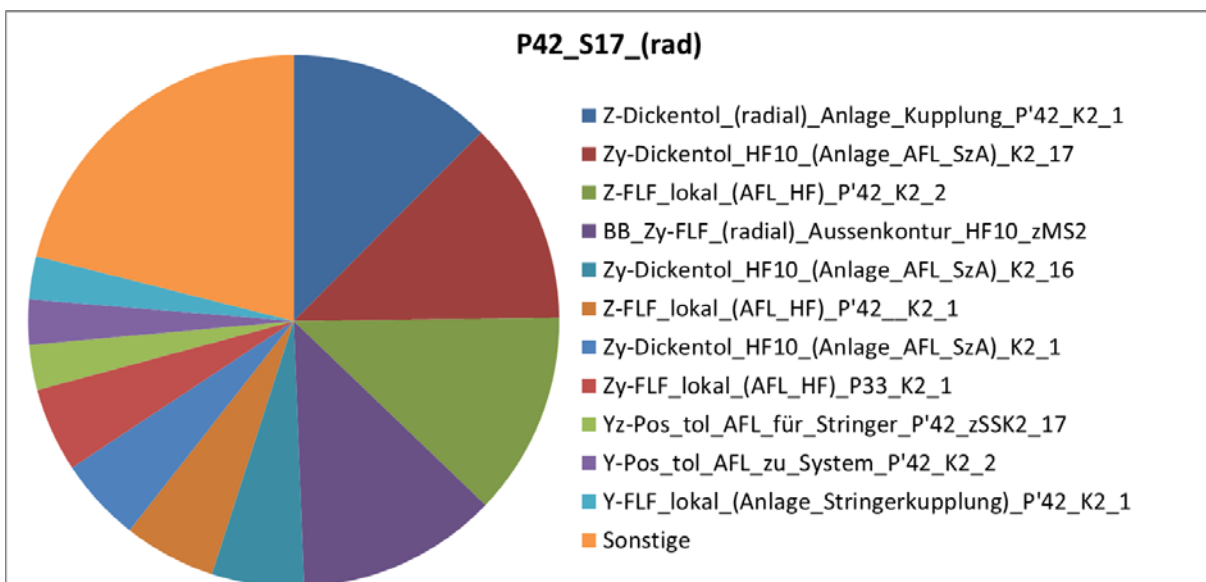
Der Vollständigkeit halber sind in Abbildung 78 und Abbildung 79 die Sensitivitäten der tangentialen und radialen Positionierung in Abhängigkeit der Einflussgrößen gezeigt. Auch hier bestätigt sich, dass nur wenige Einflussgrößen relevant und

wichtig für die Abweichungen der Zusammenbaupositionen am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18 sind.

Man sieht in Abbildung 76 bis Abbildung 79 auch, dass die Herstellungsungenauigkeiten der einzelnen Stringer sich in der Auswirkung auf die Anschlussmaße hin zum Nachbarhautfeld in Sektion 18 gegenseitig beeinflussen, da Herstellungstoleranzen von Stringer P33 und P42 gleichermaßen in den Diagrammen vorkommen.



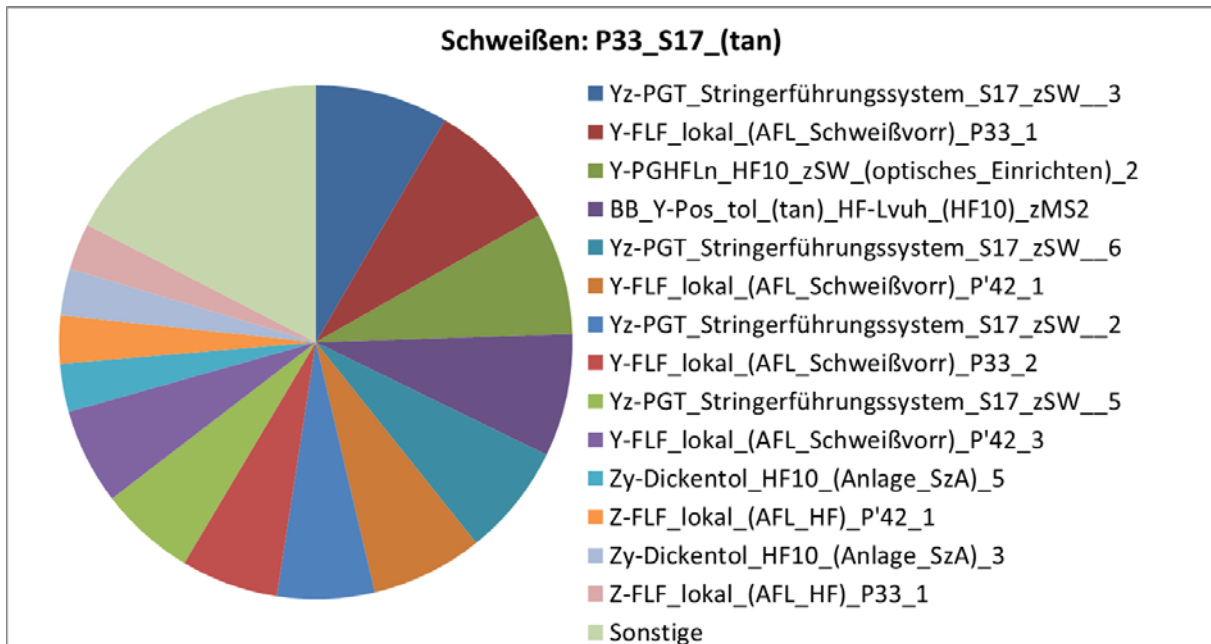
**Abbildung 78: Sensitivitäten der Abweichungen der tangentialen Position von Stringer P42 am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18**



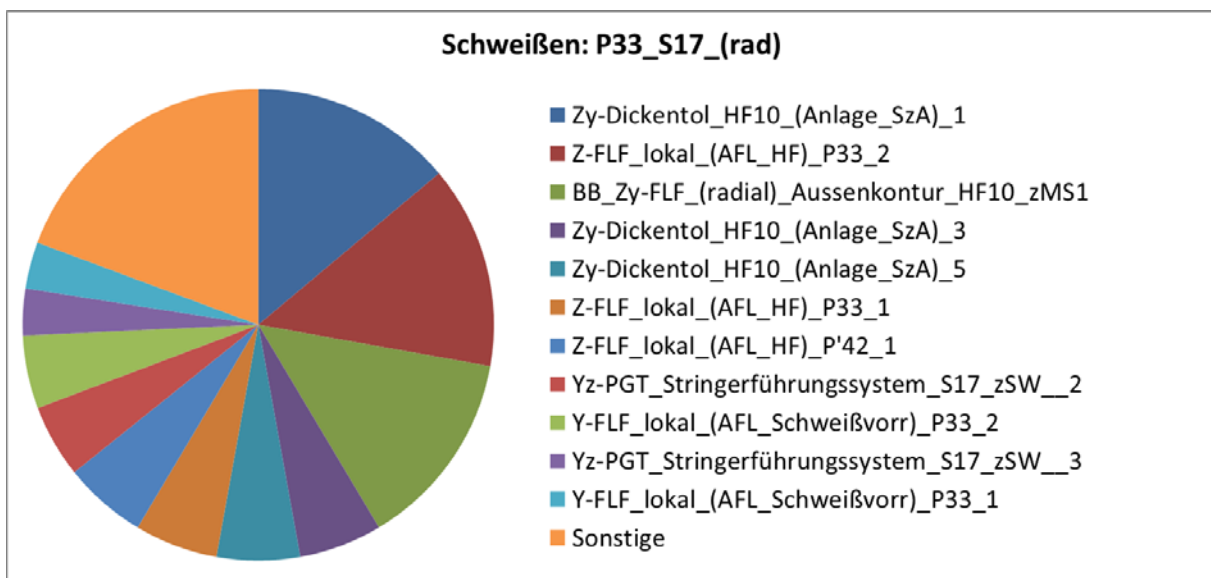
**Abbildung 79: Sensitivitäten der Abweichungen der radialen Position von Stringer P42 am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18**

### Ergebnisse beim Hautfeld mit geschweißten Stringern

Im Fall des geschweißten Stringers sind analog die Sensitivitäten für Stringer P33 und P42 an deren Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18 jeweils für deren tangentiale und radiale Positionierung gezeigt.

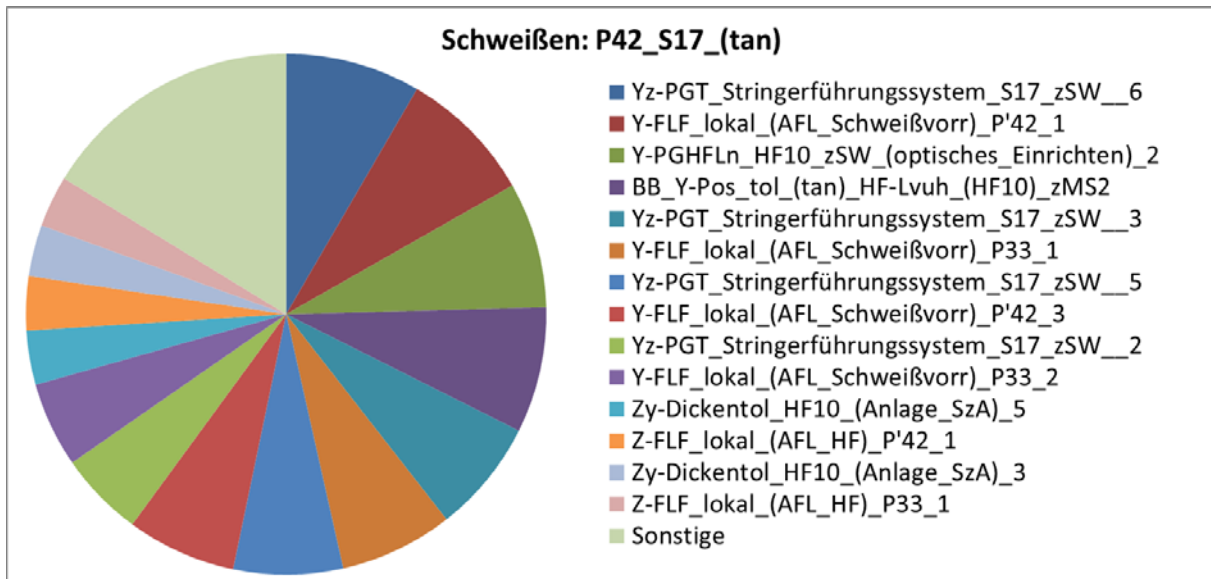


**Abbildung 80: Sensitivitäten der Abweichungen der tangentialen Position von Stringer P33 am Übergang zu Nachbarhautfeld in Sektion 18**

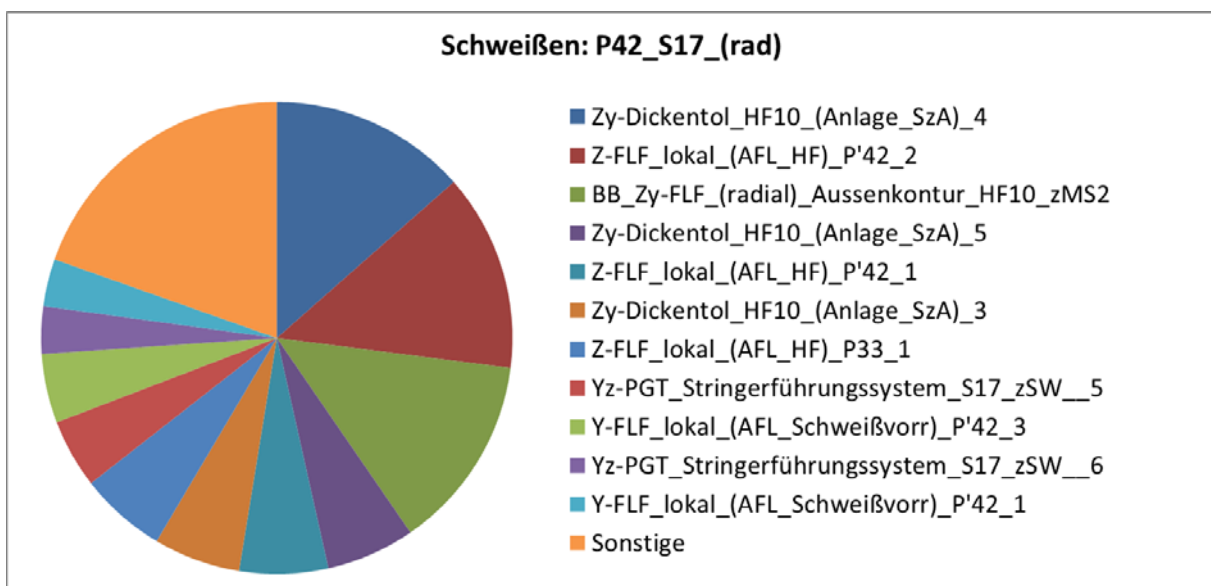


**Abbildung 81: Sensitivitäten der Abweichungen der radialen Position von Stringer P33 am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18**





**Abbildung 82: Sensitivitäten der Abweichungen der tangentialen Position von Stringer P42 am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18**



**Abbildung 83: Sensitivitäten der Abweichungen der radialen Position von Stringer P42 am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18**

### Vergleich der beiden Verbindungsverfahren – Nieten und Schweißen

Die einzelnen Schweißverfahren sind hinsichtlich der Sensitivitäten nicht direkt vergleichbar, weil unterschiedliche Einflussparameter vorliegen. So kommen z.B. beim Nieten Bohrungstoleranzen vor, die beim geschweißten Stringer gar nicht vorliegen. Ein Vergleich ergibt sich aber durch eine Untersuchung der Streuungen der Zusammenbaupositionierungsgrößen. Diese sind exemplarisch für die Positionierung des Stringers 33 am Übergang zu Hautfeld 18 in Abbildung 84 bis Abbildung 87 gezeigt. Dabei sind die beiden Herstellungsverfahren direkt

gegenübergestellt. In allen Fällen ist die Streubreite bei der geschweißten Bauweise geringer als bei der genieteten Bauweise, was auf eine robustere Herstellungsweise mit geringeren Nachbearbeitungskosten hinsichtlich der Einhaltung der Zusammenbautoleranzen schließen lässt.

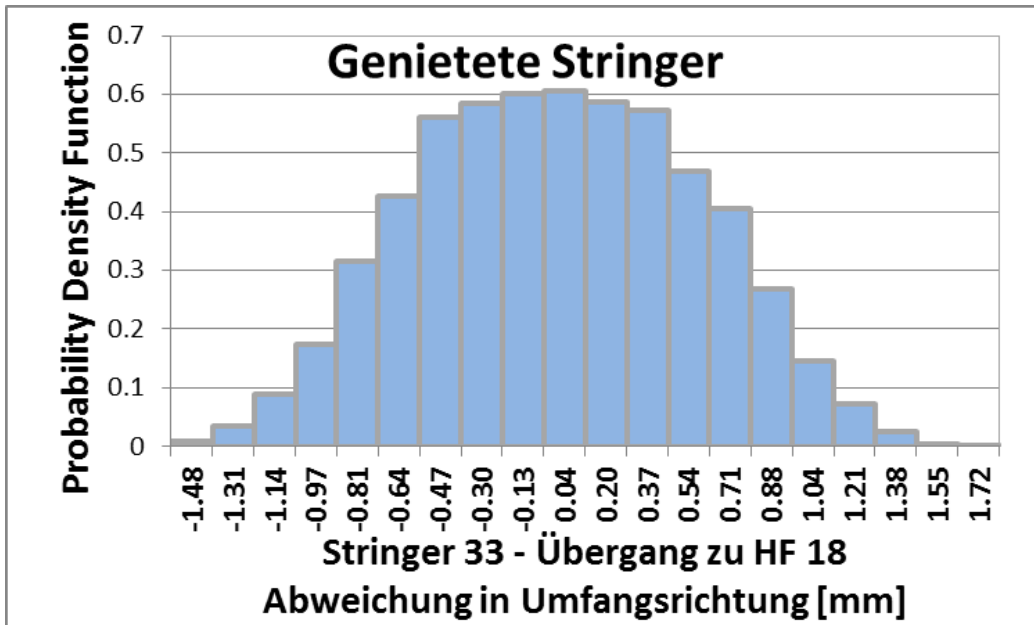


Abbildung 84: Streuung Abweichungen der Position von Stringer P33 in Umfangsrichtung am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18 bei genietetem Hautfeld

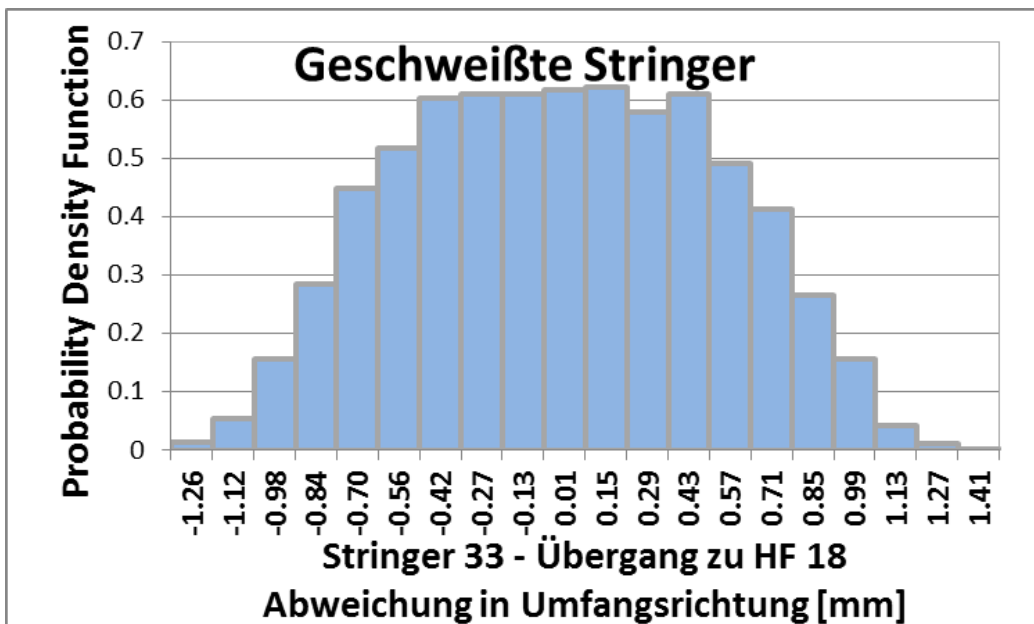


Abbildung 85: Streuung Abweichungen der Position von Stringer P33 in Umfangsrichtung am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18 bei geschweißtem Hautfeld

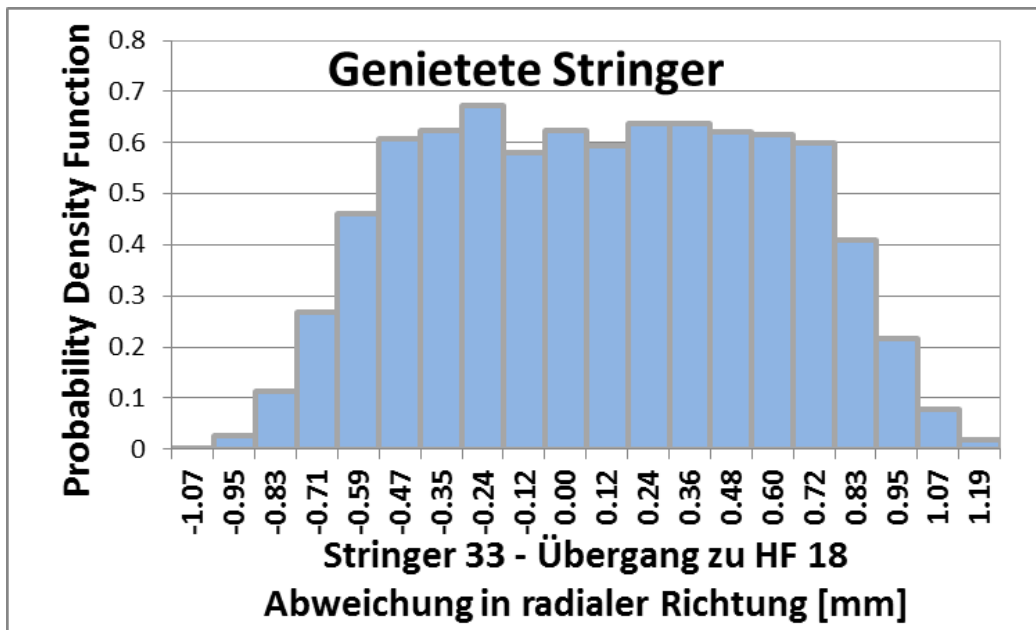


Abbildung 86: Streuung Abweichungen der Position von Stringer P33 in radialer Richtung am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18 bei genietetem Hautfeld

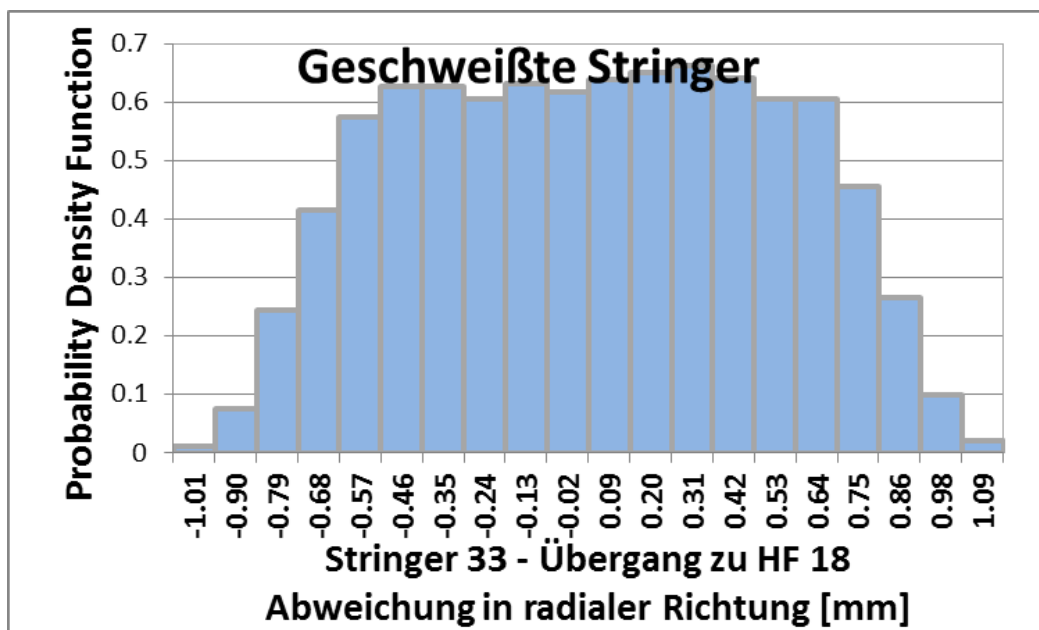


Abbildung 87: Streuung Abweichungen der Position von Stringer P33 in radialer Richtung am Übergang zum Nachbarhautfeld in Sektion 18 bei geschweißtem Hautfeld

## II.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Im Folgenden ist der zahlenmäßige Nachweis aufgeführt, wobei in der rechten Spalte die vorkalkulierten Kosten und in der linken Spalte die tatsächlich abgerechneten Kosten dargestellt sind.

**Graue Felder nicht ausfüllen (gelten nur für interne Zwecke)**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Köln, den 27.02.2013

GZ: 3001045

**Zahlenmäßiger Verwendungsnachweis**  
(Einzelnachweis) für Zuwendungen auf  
Kostenbasis an FhG/HZ

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
51179 Köln

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Projekträger Luftfahrtforschung  
Königswinterer Str. 522 - 524  
53227 Bonn

**FKZ:** 20W0807B, PT-LFT, Hein  
**GZ :** VIB1 - 417028/240  
**Laufzeit:** 01.01.2009 - 31.12.2012

Finanzdaten vom: 27.02.2013  
Bundesanteil: 100,00%  
Davon ESF-Anteil: 0,00%  
Bewilligte Zuwendung: 806.000,00 EUR  
Gezahlte Bundesmittel: 795.000,00 EUR

**Alle Beträge in Euro (€)**

1	2	3	4
Position Gesamtvor- kalkulation	Abgerechnete Kosten insgesamt bis einschl. 2012	Anerkannte Kosten insgesamt bis einschl. 2012	Gesamtvorkalkulation
0813	21.142,38		20.798,38
0823	25.245,00		23.720,00
0837	688.344,31		696.571,64
0838	9.999,49		12.293,81
0847	15.000,00		15.000,00
0848	0,00		0,00
0850	36.722,32		35.816,17
0856	0,00		1.800,00
0860	0,00		0,00
<b>Summe :</b>	<b>796.453,50</b>	<b>0,00</b>	<b>806.000,00</b>

	Nachgewiesen	Anerkannt
14 Abgerechnete Kosten insgesamt (Bundesanteil von Spalte 2)	796.453,50	
15 Anteil Eigenmittel lt. Vorkalkulation	0,00	
16 Anteil Mittel Dritter und Einnahmen lt. Vorkalkulation ohne Zeile 17	0,00	
17 Weitere Mittel Dritter und Einnahmen ohne Zeile 16 (vgl. Nr. 2 NKBF98)	0,00	
18 Verbleibender Anteil des Bundes (14 J. 15 J. 16 J. 17b)	796.453,50	
19 Zahlung auf Anteil des Bundes	795.000,00	
20 Kassenbestand am 31.12.2012 (19 J. 18)	-1.453,50	

Vorhabensspezifische Anlagen oder Gegenstände wurden nicht angeschafft oder hergestellt

sind in der beigefügten Liste vollständig erfasst.

Die Bestimmungen des Zuwendungsbescheides sind beachtet worden. Die Kosten waren notwendig. Es ist wirtschaftlich und sparsam verfahren worden. Die vorstehenden Eintragungen sind richtig und vollständig und stimmen mit den Büchern und Belegen überein.

*i.V. [Signature]* *i.P. [Signature]*

Rechtsverw. Unterschrift des Empfängers

Sachlich richtig | rechnerisch richtig (mit ... EUR) ...

dan

Unterschriften des fachl. und adm. Bearbeiters

Diese Daten wurden vollständig und richtig erfasst

von ... am ...

Gepüft: ...

- 1) Zureffendes bitte ankreuzen.
- 2) Ergänzung in Klammer gilt nur für die rechnerische Feststellung eines geänderten Betrages in Zeile 20.

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die für zukünftige Flugzeuge vom Markt geforderte Effizienzsteigerung der Wertschöpfungskette bei gleichzeitiger Verringerung des Strukturgewichtes stellt für metallische Rumpfstrukturen eine große Herausforderung dar. Zur Zielerreichung wird in Teilbereichen die Überschreitung heutiger Auslegungskonservatismen mit konsequenter Ausnutzung neuer Werkstoffe, zugehöriger Prozesse und Bauweisen bzw. Designkonzepte notwendig machen. Mit den Arbeiten im Rahmen des Projektes HERMET wendet das DLR die eigenen und vorhandenen Kompetenzen an, um grundlagennähere Werkstofflösungen in ihrem Reifegrad zu steigern. Die Projektarbeiten grenzen sich damit von den grundfinanzierten Arbeiten ab, bei denen es mehr um die Erarbeitung der Kompetenzen des DLR geht. Somit sind die anwendungsnahen Arbeiten im Rahmen des Projektes nicht durch die Grundfinanzierung gedeckt und hätten ohne die Projektförderung nicht durchgeführt werden können. Ohne die Zuwendung würde dieses Vorhaben für das DLR nicht tragbar sein. Mit einer Förderung wird ein wesentlicher Beitrag geleistet, die vorhandene technologische Kompetenz des DLR anzuwenden und somit die Voraussetzung für die Zukunftsfähigkeit der metallischen Themen im Forschungsportfolio des DLR zu gewährleisten.

## **II.4 Verwertung der Ergebnisse / Fortschreibung des Verwertungsplanes**

Für das Institut für Werkstoff-Forschung ergibt sich eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse des Vorhabens durch:

- Die wissenschaftlichen Ergebnisse erlauben dem DLR dazu beizutragen, die Verbesserungspotentiale metallischer Herstellungs- und Fügeverfahren weiter zu entwickeln und sich selbst damit im Rahmen von Industrie- und auch Forschungsk Kooperationen als kompetenter Partner zu empfehlen. Die geplanten Verwertungsziele wurden in allen Arbeitspaketen erreicht, am sichtbarsten ist dies vor allem im Arbeitspaket 10.3. Hier konnte das DLR dazu beitragen, dass beim Projektpartner PAG eine Phased-Array-Anlage zur Ultraschall-Prüfung von Hautfeldern erfolgreich evaluiert wurde. Hierdurch kann die Geschwindigkeit der US-Prüfung prinzipiell um den Faktor 4 gesteigert werden, wodurch ein limitierender Engpass in der Fertigung von Hautfeldern eliminiert würde. Die Ergebnisse der Arbeiten des DLR sind bereits in Investitionsentscheidungen des Projektpartners PAG eingeflossen.
- Erweiterung der Position und Sichtbarkeit des DLR als Know-How-Träger auf dem Gebiet metallischer Leichtbaustrukturen. Die Erreichung dieses

Verwertungsziels ist durch die Tatsache gegeben, dass das DLR seit Beginn des Projektes bereits als Partner an zwei Nachfolgeprojekten im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms teilnimmt.

- Erleichterung der Drittmittelakquise für das DLR. Insbesondere kann den Verbundpartnern sowie Airbus Deutschland ein professionelles Technologietransferpotential geboten werden. Die Erreichung dieses Projektziels ist offensichtlich durch die Tatsache gegeben, dass es mehrere Nachfolgeprojekte im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms gibt, bei denen Airbus das DLR gebeten hat, mit seinen Kompetenzen zum metallischen Rumpf teilzunehmen.
- Die Arbeiten dienen zur Ausbildung und Weiterqualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf allen Ebenen. Im Rahmen des Projektes wurden zwei Doktoranden über mehrere Jahre hinweg wissenschaftlich ausgebildet. Dabei ging es einerseits um das Verschweißen dünner Folien und der darauf basierende Aufbau von Fibre Metal Laminates bis hin zum FML-Demonstrator. Desweiteren wurden die Arbeiten zur numerischen Berechnung des Verzuges durch einen Doktoranden durchgeführt, dessen Mitarbeit im Projekt die Kompetenzen bei der Anwendung der Methode für reale Problemstellungen geschult hat.

Die wissenschaftlich-technische Verwertung der Ergebnisse ist durch folgende Punkte gegeben:

- Bessere Vermarktung der Kompetenzen auf dem Gebiet des Reibrührschweißens auch komplexer Leichtbaustrukturen, sowie der zugehörigen werkstoffmechanischen Prüfverfahren und mikroanalytischen Untersuchungsverfahren. Auch hier kann darauf verwiesen werden, dass die Ergebnisse des Projekts HERMET in mehreren Folgeprojekten aufgegriffen werden.

## **II.5 Relevante Ergebnisse Dritter**

Es sind keine Ergebnisse Dritter bekannt, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

## II.6 Veröffentlichungen

Die Ergebnisse der Projektarbeiten mündeten in mehreren Veröffentlichungen, die im Folgenden gelistet sind:

„Reibrührschweißen von dünnen Aluminiumblechen für den Aufbau von Metall-Faser-Verbundwerkstoffen“

Florian Landgraf (DLR), Ulises Alfaro (DLR), Heinz-Willi Sauer (DLR), Gerhard Biallas (HAW, Hamburg)

Werkstoff-Kolloquium Institut für Werkstoff-Forschung 2010

Der Vortrag „Reibrührschweißen von dünnen Aluminiumblechen für den Aufbau von Metall-Faser-Verbundwerkstoffen“ wurde anlässlich des Werkstoff-Kolloquiums des Institutes für Werkstoff-Forschung im Jahr 2010 gehalten. Das Thema des Kolloquiums war Untersuchungen an Faser-Metall-Laminaten und praktischer Einsatz von Faser-Metall-Laminaten. In diesem Zusammenhang wurde im Vortrag dargestellt, welchen Vorteil geschweißte Aluminiumbleche gegenüber dem Splice haben könnten, sowie das genutzte Reibrührschweißverfahren. Die Machbarkeit von Schweißungen in den Blechstärken von 0,4 mm wurde nachgewiesen. Desweiteren wurden die Vor- und Nachteile der beiden Legierungen AA2024-T3 und AlMgSc gegenübergestellt. Der Schwerpunkt des Vortrags lag auf den mechanischen Eigenschaften wie Härte und Zugfestigkeit.

„Microstructural and mechanical properties of friction stir welded butt joints made from 0.4 mm thin sheets of AA2024-T3 and AlMgSc“

F. Landgraf, U. Alfaro, G. Biallas, S. Reh

European Conference on Aluminium Alloys 2011

Der Vortrag „Microstructural and mechanical properties of friction stir welded butt joints made from 0.4 mm thin sheets of AA2024-T3 and AlMgSc“ wurde anlässlich der „European conference on Aluminum Alloys 2011“ gehalten. Das Thema der Konferenz war Aluminiumlegierungen aller Art, deren Einsatz, Mikrostruktur, mechanische Eigenschaften, Fügetechnik etc. Zunächst wurde als Motivation das Schweißen als Alternative zum Splicen vorgestellt. Auf das angepasste Reibrührschweißverfahren und die Vor- und Nachteile der beiden Legierungen AA2024-T3 und AlMgSc wurde detailliert eingegangen. Die untersuchten globalen und lokalen mechanischen Eigenschaften – Härte und Zugfestigkeit – wurden mit der Mikrostruktur verglichen. Beim Vergleich wurden Erklärungsansätze aus der Literatur verwendet. In der Zusammenfassung wurde die Machbarkeit von Schweißungen in

den Blechstärken von 0,4 mm nachgewiesen und im Ausblick auf weitere Untersuchungen mittels EBSD und TEM hingewiesen.

“Feasibility study: Production of tailored welded blanks made of AlMgSc alloy using Friction Stir Welding”

Ulises Alfaro Mercado, Heinz Willi Sauer, Michael Besel

Eucomas 2012

Bei der Konferenz „Eucomas 2012“ in Hamburg wurden neue Materialentwicklungen thematisiert, im Besonderen die Entwicklung, Simulation und Komponentenfertigung von CFRP, TiAl, Keramik und Leichtmetall-Strukturen. Im Rahmen der Eucomas 2012 wurde der Vortrag “Feasibility study: Production of tailored welded blanks made of AlMgSc alloy using Friction Stir Welding” gehalten. In diesem Vortrag wurden Ergebnisse aus HERMET wie auch aus HERMO vorgestellt. Es wurde eine Studie geschildert über die Machbarkeit von Tailored Welded Blanks aus AlMgSc. Dabei wurde der gesamte Hergang von der Parameterfindung bis zur Charakterisierung der erzeugten Schweißnähte dargestellt.

“Friction stir welded butt joints made from 0.4 mm thin sheets of AA2024-T3 and AA5024-H116 for welded splices in fibre metal laminates”

F. Landgraf, U. Alfaro, G. Biallas, S. Reh

FML Structure days 2012 (Airbus internal conference on GLARE®)

Der Vortrag „ Friction stir welded butt joints made from 0.4 mm thin sheets of AA2024-T3 and AA5024-H116 for welded splices in fibre metal laminates “ wurde anlässlich der Airbus internen „FML Structure days 2012“ gehalten. Das Thema der Konferenz waren Faser-Metall-Laminat im Einsatzspektrum von Airbus. Daher wurde intensiv auf das Schweißen als Alternative zum Splicen eingegangen und in diesem Zusammenhang die bekannten Arbeiten auf dem Gebiet Reibrührschweißen von 0,4 mm dicken Aluminiumblechen vorgestellt. Auf das angepasste Reibrührschweißverfahren und die Vor- und Nachteile der beiden Legierungen AA2024-T3 und AlMgSc wurde detailliert eingegangen. Die untersuchten globalen und lokalen mechanischen Eigenschaften – Härte und Zugfestigkeit – wurden mit der Mikrostruktur verglichen. Aufgrund einer passenden Gefügeätzung von AlMgSc konnten Erklärungsansätze zwischen mechanischen Eigenschaften und Mikrostruktur vorgestellt werden. In der Zusammenfassung wurde die Machbarkeit von Schweißungen in den Blechstärken von 0,4 mm nachgewiesen und im Ausblick die nächste Vorgehensweise in Richtung Praxiseinsatz von geschweißten Splices gegeben.



“Towards splice free fibre metal laminates: Friction stir welding of 0.4 mm AlCuMg and AlMgSc sheets”

F. Landgraf, U. Alfaro-Mercado, G. Biallas, S. Reh

Geplante Veröffentlichung

Das Paper mit dem Arbeitstitel „ Towards splice free fibre metal laminates: Friction stir welding of 0.4 mm AlCuMg and AlMgSc sheets “ soll in der Zeitschrift Materials Science Engineering A veröffentlicht werden. In der Veröffentlichung werden die Vorteile von geschweißten Aluminiumblechen im Vergleich zu den herkömmlichen Splices dargestellt. Im Folgenden werden die Legierungen einzeln vorgestellt. Für AA2024-T3 Bleche wurden lichtmikroskopische Querschliffe, Härtemessungen und Zugversuche mit lokaler Dehnungsmessung untersucht. Die erhaltenen Ergebnisse werden mit der Literatur insbesondere von Schweißnähten über 1 mm Blechdicke verglichen und erklärt. Bei AA5024-H116 wurden ebenfalls lichtmikroskopische Querschliffe, Härtemessungen und Zugversuche mit lokaler Dehnungsmessung vorgestellt. Da ein Härteanstieg in der TMAZ über das Grundmaterialniveau hinaus festgestellt wurde und dieser Effekt für das Reibrührschweißen ähnlicher Legierungen in keiner Literaturstelle gefunden wurde, wurden tiefergehende Untersuchungen mittels EBSD durchgeführt. Dabei wurde ein Anstieg der Kaltverfestigung in der TMAZ nachgewiesen und eine Erklärung gefunden. Im Ausblicksteil wird nochmals auf die Besonderheiten des Dünoblechschweißens im Vergleich zu Blechen mit über 1 mm Stärke eingegangen.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN --	2. Berichtsart <b>Schlussbericht</b>
3a. Titel des Berichts <b>Herstellungs-optimierter metallischer Rumpf (HERMET) - Schlussbericht</b>	
3b. Titel der Publikation --	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) <b>Stefan Reh, Michael Besel, Ulises Alfaro Mercado, Florian Landgraf, Ulrike Dreßler</b>	5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>31.12.2012</b>
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) --	6. Veröffentlichungsdatum <b>2013</b>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <b>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Werkstoff-Forschung Linder Höhe 51147 Köln</b>	7. Form der Publikation --
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) <b>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)  53107 Bonn</b>	9. Ber.Nr. Durchführende Institution <b>IB 334-03/13</b>
16. Zusätzliche Angaben --	10. Förderkennzeichen <b>20W0807B</b>
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) --	11a. Seitenzahl Bericht <b>99 Seiten</b>
18. Kurzfassung <b>Siehe Seite 2 und 3</b>	11b. Seitenzahl Publikation --
19. Schlagwörter <b>Laserstrahlschweißen, Qualitätssicherung, Phased-Array-US, Reibrührschweißen, Tailored Welded Blanks, Fibre Metal Laminates, Sub-Assembly, AlMgSc, AlCuLi</b>	12. Literaturangaben <b>keine</b>
20. Verlag --	14. Tabellen <b>14 Tabellen</b>
21. Preis --	15. Abbildungen <b>87 Abbildungen</b>

## Berichtsblatt\_2

### 18. Kurzfassung

1. Bislang werden im Flugzeugbau überwiegend Nietverbindungen verwendet. Hierzu sind entsprechende Überlappungen vorgesehen. Neben dieser Materialüberlappung selbst tragen natürlich auch die verwendeten Niete und das benötigte Dichtmittel zu Gewichtssteigerungen bei. Die Verwendung von Schweißnähten anstelle von Nietverbindungen ermöglicht eine gleichzeitige Reduzierung von Herstellungskosten und Strukturgewicht. Im Rumpf ziviler Flugzeuge sind AA2024 und direkte Nachfolger nach wie vor die am weitesten verbreiteten Legierungen, allerdings sind sie nicht schmelzschweißbar. Schweißbare AlCuLi-Legierungen bieten eine zu AA2024 vergleichbare Schadenstoleranz, aber eine höhere Steifigkeit und geringere Dichte als diese Standardlegierung. Mit dem möglichen Kriechziehen bei AlMgSc-Legierungen eröffnet sich die Möglichkeit der aufwandsarmen Fertigung versteifter sphärischer Schalen.

2./3. AP 10.2; Schweißtechnologie: Die Ursache für den Abfall der Kopfzugfestigkeit nach dem Laserstrahlschweißen von Stringern aus AA2096 soll ermittelt werden. Dies ist erforderlich, um den Einsatz des Laserstrahlschweißens bei dieser Legierung zu ermöglichen und dadurch die damit verbundene Gewichtseinsparung zu realisieren. Zu diesem Zweck wurden vom Projektpartner PAG einige Probenreihen mit einer AlCuLi-Legierung lasergeschweißt. Von diesen geschweißten Blechen wurden dem Institut für Werkstoff-Forschung des DLR Querschliffe der Schweißnaht sowie Bruchflächen von Kopfzugversuchen zur Verfügung gestellt. An den Querschliffen wurden Härteverläufe gemessen, die Bruchflächen raster-elektronen-mikroskopisch untersucht. AP 10.3: Qualitätssicherung: In diesem Arbeitspaket sind die Arbeiten zur Untersuchung eines online-fähigen Prüfverfahrens zur Qualitätssicherung von laserstrahlgeschweißten Stringern zusammengefasst. Die Ermittlung geeigneter online-fähiger Prüfverfahren ist erforderlich, um die Durchlaufzeit bei der Herstellung von Rumpfschalen deutlich zu reduzieren. Dazu sollen analog zu den bekannten Technology-Readiness-Levels (TRL) für die systematische und umfassende Bewertung neuer Technologien nun TRL-Kriterien für Prüfverfahren entwickelt werden. Anhand dieser Kriterien kann dann die Entwicklungsreife von neuen Prüfverfahren bewertet werden, und zwar nicht nur für das hier aktuelle Laserstrahlschweißen (LBW), sondern für jede mögliche Prüfaufgabe. Nach Erstellen des Kriterien-Katalogs sollen dann die infrage kommenden Prüfverfahren für das LBW entsprechend eingeordnet werden. Außerdem wurde in diesem Arbeitspaket die Machbarkeitsstudie bei PAG Nordenham koordiniert und ausgewertet. AP 20.1; Nahtgeometrie: Das Arbeitspaket fasst einerseits alle Arbeiten zusammen, um die optimalen Schweißparameter für das Reibrührschweißen (engl. Friction Stir Welding, FSW) von Stumpfnähten bei Blechen aus den Aluminium-Legierungen AlMgSc und AlCuLi zu ermitteln. Zudem wird in diesem Arbeitspaket untersucht, wie sensitiv die Qualität der FSW-Naht bei diesen Legierungen auf einen Spalt zwischen den beiden zu verschweißenden Blechen reagiert. AP 20.2; Tailored Welded Blanks: Als Tailored Welded Blanks (TWB) werden im vorliegenden Fall Blechstrukturen bezeichnet, die aus Blechen unterschiedlicher Dicke mit Hilfe eines Schweißverfahrens zusammengesetzt werden. In diesem Arbeitspaket sollen die optimalen Schweißparameter für das Reibrührschweißen von Tailored Welded Blanks durch eine gezielte schrittweise Variation derselben ermittelt werden, sowie die erzielte Nahtqualität untersucht werden. AP 30.1; Neue Werkstoffe: In diesem Arbeitspaket entwickelt das DLR Lösungen für Fibre Metal Laminates (FML) auf der Basis reibrührgeschweißter Folien aus den Aluminium-Legierungen AlMgSc und AlCuLi mit einer Dicke von 0,4 mm. Solche Folien lassen sich prozesstechnisch bedingt nur in einer begrenzten Breite durch Walzen herstellen. Die benötigten breiteren Metalllagen in den FML können nur durch Überlappungen der Metallfolien (sog. Splices) erreicht werden, was zusätzliches Gewicht bedeutet. Durch reibrührgeschweißte Folien lassen sich solche Überlappungen vermeiden. Dazu wird die Machbarkeit des FSW dünner Folien, insbesondere AlMgSc, untersucht. AP 50.1; Distorsion Engineering: In diesem Arbeitspaket entwickelt das DLR neue Methoden, um diejenigen Prozessschritte und Herstellungsparameter, die sich am stärksten auf den Gesamtverzug von Baugruppen (Schalen, Tonnen) auswirken, zu identifizieren, um deren Auswirkungen zukünftig minimieren zu können.

4. AP10.2: Insgesamt betrachtet zeigt keine der untersuchten Schweißnähte eine zufriedenstellende Qualität. Es wurde gezeigt, dass die Kopfzugfestigkeit offenbar abhängig von der Menge und Größe der Poren/Hohlräume ist, dass sich die Wärmeeinflusszone analog zur eingebrachten Streckenenergie verhält, und dass die Stabilität des Prozesses ggf. beeinträchtigt sein kann. Die hier gezeigten Ergebnisse können als Anhaltspunkt für weiterführende Schweißversuche bei PAG herangezogen werden. AP10.3: TRL-Kriterien und Bewertung von begonnenen Entwicklungen wurden erstellt. / Das Potential zur Steigerung der Geschwindigkeit bei der zerstörungsfreien Prüfung von Glare konnte aufgezeigt werden. Die Umsetzung der entsprechenden Maßnahme (nämlich der Umbau der Squirer-Anlage) befindet sich in der Planungsphase, wodurch künftig die Durchlaufzeit bei der Herstellung von Hautfeldern reduziert wird,

## Berichtsblatt\_3

### 18. Kurzfassung

AP20.1: Für die untersuchten Legierungen, AlMgSc (Ko8242) und AlCuLi (2098-T8), konnten fehlerfreie FSW-Verbindungen hoher Festigkeit mit FSW-Indexwerten besser als 80 % hergestellt werden. Der Fokus der Untersuchungen wurde zur Projektlaufzeit auf die Legierung AlMgSc gelegt. Zur weiteren Steigerung der Nahtqualität wurde hierfür ein neues Werkzeugdesign entwickelt, das zu einem verbesserten Materialfluss während des FSW-Prozesses führt. Während diese Untersuchungen also die grundsätzliche Eignung der Legierungen für den FSW-Prozess gezeigt haben, geben die weiteren Untersuchungen zum Einfluss etwaiger Spalte am Fügestoß Hinweise zur Einsatztauglichkeit des FSW für beide Legierungen unter industriellen Bedingungen. AP20.2: Die Herstellbarkeit von TWB aus AlMgSc mittels FSW wie auch die grundsätzliche zerstörungsfreie Prüfbarkeit mittels Ultraschalltechnologie wurden nachgewiesen. Zusätzlich wurde im Rahmen erster Untersuchungen zur Rissausbreitung geklärt, dass besonders die durch das FSW entstehenden Eigenspannung und daraus resultierenden Verzüge bei Rissausbreitungsversuchen unter zyklischer Beanspruchung eine entscheidende Rolle spielen und dementsprechend berücksichtigt werden müssen. AP30: In Zusammenhang mit den mikrostrukturellen Untersuchungen hat die werkstoffmechanische Charakterisierung in Summe ergeben, dass beim Schweißen von dünnen (<0.4 mm) Blechen annähernd die gleichen Bedingungen vorliegen, wie bei dickeren (>1 mm) Blechen. Aufgrund der Geometrien (Volumen und Oberflächenverhältnis) ergeben sich andere Aufwärm- und Abkühlkurven als bei dickeren Blechen, so dass die Parameter angepasst werden mussten. Im Gesamtergebnis konnten Schweißungen erzeugt werden, die der üblichen (gem. einschlägiger Fachliteratur und eigenen Standards) Qualität für Schweißungen dickerer Bleche entsprechen. Durch die guten Fortschritte bei den Arbeiten zum FSW dünner Folien war es möglich, zusammen mit dem Projektpartner PAG -zusätzlich zum ursprünglichen Arbeitsplan- einen FML-Demonstrator aus FSW-gefügten AlMgSc-Blechen aufzubauen und zu untersuchen. AP50: Die einzelnen Schweißverfahren sind hinsichtlich der Sensitivitäten nicht direkt vergleichbar. Ein Vergleich ergibt sich aber durch eine Untersuchung der Streuungen der Zusammenbaupositionierungsgrößen. Dabei sind die beiden Herstellungsverfahren direkt gegenübergestellt. In allen Fällen ist die Streubreite bei der geschweißten Bauweise geringer als bei der genieteten Bauweise, was auf eine robustere Herstellungsweise mit geringeren Nachbearbeitungskosten hinsichtlich der Einhaltung der Zusammenbautoleranzen schließen lässt.

5. Durch das Vorhaben HERMET konnte, im Verbund mit den Partnern, ein Beitrag geleistet werden, dass der metallische Rumpf im Vergleich zur CFK-Lösung sowohl als Forschungs- als auch als Entwicklungsthema wieder eine gesteigerte Aufmerksamkeit gewinnen konnte und die Konkurrenzfähigkeit einer metallischen Rumpflösung wieder wahrgenommen wurde. Der metallische Rumpf ist bei Airbus für die A30X wieder als Baseline gesetzt. In diesem Zusammenhang konnte – auch durch die Ergebnisse des Projektverbundes KOMET – der metallische Rumpf als nationaler Kompetenzträger eine deutlich bessere Sichtbarkeit erreichen. Die Community um den metallischen Rumpf basierend aus OEM, Lieferanten und Forschungspartnern konnte sich so wieder formieren. Dies wird auch durch die nachfolgenden Verbundprojekte KOSMO und ECO verdeutlicht.

Das Ziel des Vorhabens HERMET, die Unterstützung der Vorhabenspartner aus der Deutschen Luftfahrtbranche, um die metallischen Bauweisen durch Gewichts-, Kosten- und Durchlaufzeitverringerungen nicht nur wettbewerbsfähiger zu machen, sondern durch die Gewichtseinsparungen auch zu den allseits bekannten Klimaschutzzielen beizutragen, konnte in der Tat erreicht werden. Das Potential zur Steigerung der Geschwindigkeit bei der zerstörungsfreien Prüfung von Glare konnte in Arbeitspaket 10.3 aufgezeigt werden. Die Umsetzung der entsprechenden Maßnahme (nämlich der Umbau der US-Squitter-Anlage) befindet sich in der Planungsphase, wodurch künftig die Durchlaufzeit bei der Herstellung von Hautfeldern reduziert wird, so dass auch dadurch eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit erreicht werden kann.

## Document Control Sheet

1. ISBN oder ISSN --	2. Type of Report <b>final report</b>	
3a. Report Title <b>Herstellungs-optimierter metallischer Rumpf (HERMET) - Schlussbericht</b>		
3b. Title of Publication --		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) <b>Stefan Reh, Michael Besel, Ulises Alfaro Mercado, Florian Landgraf, Ulrike Dreßler</b>		5. End of Project <b>31.12.2012</b>
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) --		6. Publication Date <b>2013</b>
8. Performing Organization(s) (Name, Address) <b>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Werkstoff-Forschung Linder Höhe 51147 Köln</b>		7. Form of Publication --
13. Sponsoring Agency (Name, Address) <b>Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)  53107 Bonn</b>		9. Originator's Report No. <b>IB 334-03/13</b>
		10. Reference No. <b>20W0807B</b>
		11a. No. of Pages Report <b>99 pages</b>
		11b. No. of Pages Publication --
		12. No. of References <b>none</b>
		14. No. of Tables <b>14 tables</b>
		15. No. of Figures <b>87 figures</b>
16. Supplementary Notes --		
17. Presented at (Title, Place, Date) --		
18. Abstract <b>see pages 2 and 3</b>		
19. Keywords <b>Laser Beam Welding, Quality Assurance, Phased-Array ultrasonic inspection, Friction Stir Welding, Tailored Welded Blanks, Fiber Metal Laminates, Sub-Assembly, AlMgSc, AlCuLi</b>		
20. Publisher --		21. Price --

## Document Control Sheet\_2

### 18. Abstract

1. Up to now, riveting is the predominant joining technology for fuselage assembly. Both, the unavoidable overlapping as well as the rivets themselves and sealant increase the structural weight. Thus, replacing rivet joints with welded joints could provide two beneficial effects, namely reduction of manufacturing costs as well as lower structural weight. In airframe structures for civil aviation AA2024 and its various successors are mainly used as fuselage material. While these alloys lack weldability, newer alloys like AlCuLi offer both, weldability as well as damage tolerance similar to AA2024. At the same time AlCuLi has higher stiffness and lower density than the well-established standard alloys. Another candidate for future metallic fuselage structures is AlMgSc. Its microstructure is comparably stable even under higher temperatures and thus allows for creep forming of spherical fuselage structures. This would also result in high cost savings due to simplified manufacturing processes.

2./3. AP 10.2; Welding Technology: When applying laser beam welding (LBW) for joining stringers made of AA2096 the corresponding cross tension tests show a strongly reduced ultimate strength. For the save application of LBW for this alloy it is important to identify the mechanisms behind this loss in strength. Therefore, Premium Aerotec provided several series of LBW AlCuLi samples, namely the micrograph sections as well as the fracture surfaces of the cross tension test specimens. Local material strength was investigated based on hardness testing of the micrograph sections. The fracture surfaces were carefully examined using scanning electron microscopy. AP 10.3; Quality Assurance: This work package deals with the investigation of real-time quality inspection of LBW stringers. Those real-time measurement methods should allow for a strong reduction of manufacturing time of fuselage shells. In the first step, a catalog of criteria should be provided which can be applied to evaluate the Technology-Readiness-Level (TRL) of new real-time measurement methods. In the second step, this catalog is applied and a ranking of new measurement methods should be provided with respect to the real-time quality inspection of LBW stringers. AP 20.1; Weldseam Geometry: This work package is dedicated to the optimization of Friction Stir Welding (FSW) parameters for butt joints made of AlMgSc or AlCuLi. Furthermore, the effect of gaps during FSW on the quality of the weldseam is investigated. AP 20.2; Tailored Welded Blanks (TWB): TWB are welded structures made of plates of different thicknesses. Optimal FSW parameters are determined by systematic parameter variation during FSW of TWB until joints of high static strength are produced. AP 30.1; New Construction Materials: This work package deals with FSW of thin aluminum foils (thickness about 0.4 mm) for Fiber Metal Laminates (FML). The width of such foils is limited due to manufacturing process conditions. Therefore, to achieve FML with a width greater than the foil, a kind of overlapping technique is applied resulting in so called splices. These splices lead to an increased weight of FML structures. FSW is used to avoid splices by providing aluminum foils of arbitrary width. Therefore, the (FSW) weldability of thin AlMgSc foils is investigated. AP 50.1; Distortion Engineering: Various factors during the manufacturing of fuselage structures result in more or less pronounced deviations between design geometry and actual component's geometry. This work package deals with the development of analysis methods for the efficient identification of the most crucial process steps and manufacturing parameters and their effect on the global distortion of assembly groups like shells and barrels. This knowledge allows for a systematic reduction of distortion based on precise control of the identified dominant factors.

4. AP10.2: None of the LBW joints under investigation showed a sufficient joint quality. Cross tension strength was mainly affected by the density and size of pores/voids along the joint line. It was confirmed, that the forming of the heat affected zone correlates well with the energy input per unit length. Furthermore it can be concluded, that the welding process is not perfectly stable. These results provide the basis for further development of the LBW process at Premium Aerotec. AP 10.3: TRL criteria were provided and applied to evaluate current measurement methods for real-time application. / The possible increase in speed of non-destructive testing of GLARE could be clearly shown. It is intended to set up a phased-array device at Premium Aerotec's manufacturing site in Nordenham.

## Document Control Sheet\_3

### 18. Abstract

AP20.1: The FSW joints of both alloys, AlMgSc (Ko8242) and AlCuLi (2098-T8), were free from defects and showed good static material properties with FSW indexes greater than 80%. Most of the research work was focused on AlMgSc. A new tool design was developed resulting in an improved material flow, and thus higher joint quality. Additionally, the effect of gap width along the joint line was investigated as basic indicator for the applicability of FSW under industrial production conditions. AP20.2: TWB made of AlMgSc were successfully produced by FSW, and it was shown, that welding defects can basically be detected applying ultrasonic flaw detection. Crack propagation under fatigue loading was investigated. The results confirmed, that residual stresses as well as distortion (both caused by FSW) have a strong effect on the crack propagation behavior. AP30: Microstructural investigation and mechanical testing revealed, that the FSW joints of thin aluminum sheets (<0.4 mm) shows basically the same characteristics as the FSW of thicker plates (>1 mm). Due to geometric reasons (volume, surface to volume ratio) different temperature evolutions were observed during the FSW process. Therefore, the FSW parameters had to be adjusted for the FSW of thinner sheets. Finally, FSW joints of thin sheets could be produced with material properties similar to that of joints made of thicker plates. To show the basic applicability of FSW aluminum sheets for the production of FML a demonstrator was produced by the project partner PAG consisting of four friction stir welded aluminum sheets and three layers of prepreg. AP50: One important aspect of the assembly of larger fuselage components is distortion. The comparison of riveted stringers with LBW stringers reveals different distortion values. The LBW stringers show much lower scatter bands than riveted stringers, i.e. LBW is the more robust joining process, and therefore, should result in lower reworking costs to meet the required assembling tolerances.

5. HERMET and all cooperative project partners could significantly contribute to the further development of innovative metallic fuselage structures. Especially if compared to CFRP structures, the competitive position of metallic fuselage structures was successfully improved. As a result, light metals (esp. aluminum alloys) are the new baseline for the future Airbus A30X fuselage development. The joint research project KOMET could clearly demonstrate the national expertise in metallic fuselage structures. The corresponding community consisting of OEM, suppliers and research partners was formed up again. This forming process becomes manifest in the following joint research projects, namely KOSMO and ECO.

The project aim of HERMET was basically the support of the project partners from the German aviation industry by providing technologies to achieve weight-, cost- and lead time savings. These savings do not only improve the competitive position of metallic designs, but at the same time especially the weight savings significantly contribute to the well-established climate protection aims.

In the case of the GLARE production, the HERMET work package 10.3 clearly demonstrated great possible savings for the inspection duration for non-destructive testing. It is intended to set up a phased array ultrasonic test facility which will reduce inspection duration for GLARE panels, and thus, increase the competitive capacity of the corresponding project partner.