
Radikal neue Werkstoffe und Fertigungsverfahren für den metallischen Flugzeugrumpf

- RADICAL -

Abschlussbericht

Berichtszeitraum: 01.01.2012 – 31.03.2015

Erstellt von: E.D. Reese
Beiträge von: H. Fietzek, F. Gammel, T. Hack, D.P. Jonke,
A. Kurtovic, S. Nixon, F. Palm, E.D. Reese, J. Silvanus

Airbus Group Innovations
TX2

Zuwendungsempfänger: Airbus Defence and Space GmbH, 81663 München
(ehem. EADS Deutschland GmbH)

Verbundbezeichnung: ECO

Vorhabenbezeichnung: RADICAL

Förderkennzeichen: 20W1111F

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2012 – 31.03.2015

TX2-2015-281 Technischer Bericht
Airbus Group Innovations

Titel

Radikal neue Werkstoffe und Fertigungsverfahren für den metallischen Flugzeugrumpf (RADICAL)

- Abschlussbericht

Berichtszeitraum: 01.01.2012 – 31.03.2015

Erstellt von:

E.D. Reese

Projekt-Nr.

E.45373.1000

mit Beiträgen von: H. Fietzek, F. Gammel, T. Hack, D.P. Jonke, A. Kurtovic,
S. Nixon, F. Palm, E.D. Reese, J. Silvanus

Telefon

(089) 607-25585

Abteilung/Arbeitsbereich

TX2

Datum

15.10.2015

Bericht-Nr.

TX2-2015-281

Zusammenfassung

Das Vorhaben „Radikal neue Werkstoffe und Fertigungsverfahren für den metallischen Flugzeugrumpf (RADICAL)“ gehört zum Vorhabenverbund „Wirtschaftlicher Metallrumpf Generation Best-Eco-Mix (ECO)“ und ist hier komplementäres Modul zum Leitprojekt „NEXXT“ der Firma Airbus Operations GmbH sowie den weiteren Verbundprojekten „INRPO“ der Firma Premium Aerotec GmbH, „NEWTECH“ der Firma RUAG Aerospace Structures GmbH, „MTEXT“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. und „FUTURE“ des Institutes für Werkstoff- und Strahltechnik der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V..

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse zu den Arbeiten folgender Themen zusammen:

- Al-Mg-Sc-Legierung – 2. Generation
- FSW-Werkzeugentwicklung für MCA/FAL-Anwendung
- Lokaler Korrosionsschutz für Rühr-Reibschweißnähte
- Erhöhung Langzeitbeständigkeit durch Nachbehandlung
- Schnelle Schalenfertigung
- Aufdornprozess für „one-step-assembly“
- Einfluss der Anodisierung auf das Ermüdungsverhalten von AlMgSc Ko8542

Verteiler

Bilfinger-HSG – digitale Bibliothek (per e-mail od. DVD an Fr. Fleißner)

Seiten

92

Schlagwörter für Datenbankablage

Hochleistungswerkstoffe; Aluminium; AlMgSc; Scalmalloy®; Bandgießen; Schmelzspinnen; Schnellerstarrung; Rumpfanwendungen; Korrosion; Korrosionsschutz; Rühr-Reibschweißen; FSW; DeltaN; Aufdornen; lokale Vorbehandlung; lokale Anodisierung.

Vertraulichkeit

- 1 Public
- 2 Internal use
- 3 Confidential
- 4 Secret

Genehmigt

Eggert D. Reese

Mitarbeiter
(Verfasser von Dokument)

Elke Hombergsmeier

Team-/Departmentleiter
(Prüfung Dokument)

Elke Hombergsmeier

HoTCC/Lokale Vertretung
(Freigabe Dokument)

Inhaltsverzeichnis

TABELLEN.....	5
ABBILDUNGEN.....	5
1 EINLEITUNG.....	8
1.1 Verbund ECO.....	8
1.2 Vorhaben RADICAL.....	9
1.3 Ziele.....	10
2 ERGEBNISSE	12
2.1 AP1: Al-Mg-Sc-Legierung – 2. Generation.....	12
2.1.1 Allgemeine Motivation, Ziele und Vorgehensweise.....	12
2.1.2 Ergebnisse	17
2.1.3 Zusammenfassung	37
2.1.4 Ausblick.....	38
2.1.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	38
2.1.6 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan.....	39
2.1.7 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	40
2.1.8 Veröffentlichungen, Vorträge.....	40
2.1.9 Literatur.....	40
2.2 AP2: FSW-Werkzeugentwicklung für MCA/FAL-Anwendung	40
2.2.1 Aufgabenstellung.....	40
2.2.2 Voraussetzungen.....	41
2.2.3 Planung und Ablauf	41
2.2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	41
2.2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	42
2.2.6 Ergebnisse	43
2.2.7 Zusammenfassung	47
2.2.8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	48
2.2.9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan.....	48
2.2.10 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	48
2.2.11 Veröffentlichungen, Vorträge.....	48
2.2.12 Literatur.....	49
2.3 AP3.1: Lokaler Korrosionsschutz für Rühr-Reibschweißnähte.....	49
2.3.1 Aufgabenstellung.....	49
2.3.2 Voraussetzungen.....	49
2.3.3 Planung und Ablauf	51
2.3.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	52
2.3.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	52
2.3.6 Ergebnisse	53
2.3.7 Zusammenfassung	56
2.3.8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	57
2.3.9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan.....	57
2.3.10 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	57
2.3.11 Veröffentlichungen, Vorträge.....	57
2.3.12 Literatur.....	57
2.4 AP3.2: Erhöhung Langzeitbeständigkeit durch Nachbehandlung	58
2.4.1 Aufgabenstellung.....	58
2.4.2 Voraussetzungen.....	58

2.4.3	Planung und Ablauf	58
2.4.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	58
2.4.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	59
2.4.6	Ergebnisse	59
2.4.1	Zusammenfassung	61
2.4.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	61
2.4.3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan.....	61
2.4.4	Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	61
2.4.5	Veröffentlichungen, Vorträge.....	61
2.4.6	Literatur.....	61
2.5	AP4: Schnelle Schalenfertigung	62
2.5.1	Motivation und Ziele.....	62
2.5.2	Planung und Vorgehensweise.....	63
2.5.3	Ergebnisse	63
2.5.4	Zusammenfassung	71
2.5.5	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	72
2.5.6	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan.....	72
2.5.7	Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	72
2.5.8	Veröffentlichungen, Vorträge.....	72
2.5.9	Literatur.....	72
2.6	AP5.1: Aufdornprozess für „one-step-assembly“.....	73
2.6.1	Aufgabenstellung.....	73
2.6.2	Voraussetzungen.....	73
2.6.3	Planung und Ablauf	74
2.6.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	74
2.6.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	74
2.6.6	Ergebnisse	74
2.6.7	Änderung im Arbeitspaket.....	76
2.7	AP5.2: Einfluss der Anodisierung auf das Ermüdungsverhalten von AlMgSc Ko8542.....	77
2.7.1	Motivation und Ziele.....	77
2.7.2	Planung und Vorgehensweise.....	77
2.7.3	Ermüdungsversuche	78
2.7.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	80
2.7.5	Ergebnisse	81
2.7.6	Zusammenfassung	89
2.7.7	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	90
2.7.8	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan.....	90
2.7.9	Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	90
2.7.10	Veröffentlichungen, Vorträge.....	90
2.7.11	Literatur.....	90
3	WEITERE INFORMATIONEN	91
3.1	Zahlenmäßiger Nachweis.....	91
4	DOKUMENTATION	92

Tabellen

Tabelle 2.1-1:	Zusammenstellung aller FlexCaster® Versuche 2010 – 2015	17
Tabelle 2.3-1:	Übersicht der Langzeittests an lokal anodisiertem AA2024 unplattiert	54
Tabelle 2.4-1:	Einfluss der Nachtauchlösungen in Bezug auf das technologische Anforderungsprofil..	60
Tabelle 2.5-1:	Ausgewählte Thermoplaste mit geeigneten thermischen Eigenschaften. Werte sind den Herstellerangaben entnommen.....	64
Tabelle 2.7-1	Probennomenklatur und Vorbehandlungsserien (n = lfd. Nr 1- 8)	79

Abbildungen

Abbildung 1.1-1:	Airbus-Technologieströme	9
Abbildung 1.2-1:	ECO-Verbundstruktur	10
Abbildung 2.1-1:	Anwendungsszenario für mittelfestes AlMgSc-Blech (AA5028) im Airbus A330-300	12
Abbildung 2.1-2:	Roll-Form-Arbeiten an Standard-AlMgSc-Material (Spant und Stringer)	13
Abbildung 2.1-3:	Werkstoff-Leistungsziele für verbesserte AlMgSc-Legierung durch Airbus Operations, Bremen	14
Abbildung 2.1-4:	ALCOA-Publikation 1990, R. Sawtell u. C. Jensen, Metallurgical Transactions A	15
Abbildung 2.1-5:	FlexCaster-Technologie und Anlage bei NOVELIS, Kanada.....	16
Abbildung 2.1-6:	Wasserstoff-Blasenbildung auf Band-gegossenen AlMgSc-Blechen nach der finalen Wärmebehandlung (325°C)	18
Abbildung 2.1-7:	AlMgSc-Werkstoff-Schädigung durch Wasserstoffporosität im Querschliff und als fraktografische Ausprägung auf einer Zugprobe mit „gut“ und „schlecht“ Bereich (rechts-oben: Partiiell duktiler Gewaltbruch („Waben“) und rechts-unten-rechts: Wasserstoffschädigung mit lamellaren Versagen ohne jegliche Mikro-Plastizität)	19
Abbildung 2.1-8:	Walz-Temperatur Matrix am Beispiel des Abguss 938 zur Verbesserung der Mikrostruktur	20
Abbildung 2.1-9:	Statische Zugfestigkeit nach den Rückglühen (325°C/4h) an 937 Blech mit 70% und 82% Abwalzgrad	20
Abbildung 2.1-10:	Statische Zugfestigkeit nach den Rückglühen (325°C/4h) an 938 Blech mit 70% und 82% Abwalzgrad	21
Abbildung 2.1-11:	Statische Festigkeit des „Standard-AlMgSc“ AA5028 H116 (nach Rückglühung bei 325°C/4h), Herstellung der Probendicken durch Abfräsen aus einem 4,5 mm Blech	22
Abbildung 2.1-12:	Statische Festigkeit von AA2024 in 2 verschiedenen Werkstoffzuständen (mit und ohne Rein-Al Korrosionsschutz-Plattierung)	22
Abbildung 2.1-13:	Festigkeits- Zähigkeitsverhalten im Abguss 937 nach finaler Hochtemperatur-Glühung m/o Wasser- bzw. – Luftabschreckung + 325°C/4h.....	23
Abbildung 2.1-14:	Festigkeits- Zähigkeitsverhalten im Abguss 938 nach finaler Hochtemperatur-Glühung mit/ohne Wasser- bzw. – Luftabschreckung + 325°C/4h	23
Abbildung 2.1-15:	FlexCast Simulator Labor-Gießversuche bei NLM, gewalzt von 10 mm Dicke auf 3 mm bei ALCERECO in 8 Stichen (Zwischenglühen mit 335°C nach 4 Stichen)	24
Abbildung 2.1-16:	Vergleich FlexCast Simulator mit FlexCaster.-Material Guss 937 (rot gerahmt)	25
Abbildung 2.1-17:	Ergebnisse des FlexCaster Abguss 964	26

Abbildung 2.1-18:	Gefügehärt-Entwicklung durch Kaltwalzen mit und ohne Gussmaterial-Vorkonditionierung des Guss 1013 und 3 x NLM FlexCast Material N1 – N3.....	27
Abbildung 2.1-19:	Vergleich der Zugfestigkeitskennwerte des letzten Bandgussversuchs 1013 und des 2. NLM-Versuchs gespiegelt am Luftfahrt Standard AA2024 T3.....	28
Abbildung 2.1-20:	Vergleich der Dauerfestigkeit zwischen AA2024T3 und 4 verschiedenen NLM AlMgSc-FlexCast Legierungen in L-Richtung (gleiches Batch wie in Abb. 3-10 / 3-11).....	28
Abbildung 2.1-21:	Wöhlerlinien der 2 Bandguss-AlMgSc-Werkstoffvarianten aus dem Abguss 1013 im Vergleich zu AA2024 & AA2534 (Spec.-Werte).....	29
Abbildung 2.1-22:	Rissfortschrittmesskurven an NLM Material und Bandguss (1013) Material Typ B.....	30
Abbildung 2.1-23:	Rissfortschrittmesskurven an Bandguss (1013) Material Typ A	31
Abbildung 2.1-24:	Aufstellung der Versuchsmaterialien für die fügetechnischen Untersuchungen ⇔ es wurde nur FlexCaster Bandguss Material bewertet (kein NLM-Material).....	31
Abbildung 2.1-25:	Versuchsgeometrie und Verfahren der Schweißversuche	32
Abbildung 2.1-26:	Stumpfstoß-Probengeometrie und Keilprobengeometrie	32
Abbildung 2.1-27:	Zusammenstellung der Anlagen- und Spanntechnik für die Laserstrahl- und FSW-Versuche	33
Abbildung 2.1-28:	Gegenüberstellung der ermittelten Heißriss-Längen.....	33
Abbildung 2.1-29:	Zusammenstellung von Querschliffen an FSW und LBW Schweißproben	34
Abbildung 2.1-30:	Zusammenstellung der Zugfestigkeitswerte an LBW und FSW Proben im unbearbeitete Oberflächenzustand (aber Ober- und Unterraupen eingebnet).....	35
Abbildung 2.1-31:	Gegenüberstellung von verschiedenen FlexCaster AlMgSc Blech-Chargen im Korrosionstest	36
Abbildung 2.1-32:	Spannungsrissskorrosion nach ASTM G47/49.....	36
Abbildung 2.1-33:	Bewertung des Widerstand gegen lokale Korrosion (Lochfraß) nach ASTM G66.....	37
Abbildung 2.3-1:	Verfahrenheit X-Y-Tisch mit Steuereinheit der Schrittmotoren	50
Abbildung 2.3-2:	Arbeitsablauf zur Integration der Lokalanodisierung in bestehende Fertigungslinie des Oberflächenschutzes.....	54
Abbildung 2.3-3:	Korrosiv beanspruchte Bereich am Flugzeugrumpf	55
Abbildung 2.3-4:	Blasenbildung an SAA lokalanodisiertem AA2024 unplattiert mit Lackaufbau nach 14 Tagen Wasserauslagerung.....	56
Abbildung 2.5-1:	Oben: Herstellung von 1,6 mm dicken Pulverschichten zur Bestimmung von Viskosität, Fließ- und Benetzungsverhalten der Thermoplastschmelzen. Unten: Exemplarische Proben nach dem Aufschmelzen.....	65
Abbildung 2.5-2:	Versuchsmatrix für die Bewertung von Klebungen mit PPS und den Vergleich mit den Strukturklebern FM73 und FM300.....	67
Abbildung 2.5-3:	Links: Stirnabzugsproben in Positioniervorrichtung mit Gewichten beschwert im Ofen. Rechts: Vorrichtung für das Verkleben der Scherzugproben mit Gewichten für 0,1 MPa.....	68
Abbildung 2.5-4:	Gemessene Zugscherspannungen	68
Abbildung 2.5-5:	Bruchflächen der Scherzugproben mit PPS auf PSA und Laser 2 verklebt bei 0,05 MPa	69
Abbildung 2.5-6:	Links: Demonstrator Stringer auf Blech. Rechts: Umformvorrichtung zum Kriechumformen und gleichzeitigem Kleben bei 325°C.	70

Abbildung 2.5-7:	Umgeformt und gleichzeitig verklebter Demonstrator einer Klebeverbindung eines Stringers auf einem Flugzeugrumpfpfanel.....	70
Abbildung 2.5-8:	Bruchflächen der Stringerprobe nach dem Trennen	71
Abbildung 2.6-1:	Schematische Darstellung des Aufdornwerkzeuges	73
Abbildung 2.6-2:	Analyse der Belastungssituation am Werkzeug mit Hilfe der FEM.....	75
Abbildung 2.7-1:	Probenform für Ermüdungsversuche, L=200mm, b=30 mm, d=10 mm, a=3,2mm.....	79
Abbildung 2.7-2:	Oberflächenbehandlung der Ko8542 Proben (x = 1, n = lfd. Probennummer).....	80
Abbildung 2.7-3:	Ermüdungsergebnisse Ko8542 und AA2024 plattiert	81
Abbildung 2.7-4:	Ermüdungsergebnisse Ko8542.....	82
Abbildung 2.7-5:	Identifikation der Intermetallischen Phasen, Probe 1.4.11 ohne Ermüdung, Standard TSA-Behandlung, L-ST Schliffebene	83
Abbildung 2.7-6:	Rissinitiierung an Pits, Ko8542, Probe 1.1.8 , nach Alkalischem Reinigen, Fe-Nachweis	84
Abbildung 2.7-7:	Rissinitiierung an Pits, Ko8542, Probe 1.4.2, Standard Anodisierung	84
Abbildung 2.7-8:	Rissinitiierung/-verlauf entlang von Pits, Ko8542, Probe 1.1.8, Sole PSA.....	85
Abbildung 2.7-9:	Rissinitiierung/-verlauf entlang von Pits und Riefen, Ko8542, Probe 1.1.8, Sole PSA	85
Abbildung 2.7-10:	Oberflächenmorphologie in der Bohrungen verschieden Vorbehandlungen, Ko8542, nach Dekapierung, Standard TSA, Standard PSA.....	86
Abbildung 2.7-11:	Oberflächenmorphologie in der Bohrungen, Vergleich Standard TSA mit Nur Reinigen plus TSA	87
Abbildung 2.7-12:	Metallographische Untersuchung, Schlifflage.....	88
Abbildung 2.7-13:	Metallographische Auswertung der Muldenbildung nach Oberflächenbehandlung.....	88
Abbildung 2.7-14:	Probe 1.4.2, Standard TSA,.....	89
Abbildung 2.7-15:	Probe 1.5.9, Standard PSA.....	89
Abbildung 2.7-16:	Probe 1.6.2, Sole TSA.....	89
Abbildung 2.7-17:	Probe 1.7.3, Sole PSA.....	89

1 Einleitung

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützte im Rahmen des vierten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms von 2007 bis 2015 Forschungs- und Technologievorhaben mit einer Anwendung in der zivilen Luftfahrt am Standort Deutschland. Grundsätzlich sollte mit den Fördermaßnahmen die technologische Basis und die wirtschaftlich-technische Situation der Luftfahrtindustrie und des Luftverkehrs verbessert werden. Die Stärkung von Innovationskraft und Kompetenzen bei Forschung, Entwicklung und Produktion standen dabei im Mittelpunkt. Mit der Bekanntmachung vom 03. Februar 2011 erfolgte der vierte Programmaufruf (LuFo IV-4) für die Jahre 2012 bis 2015.

Der Forschungsförderung lagen die Ziele der ACARE (Advisory Council for Aeronautic Research in Europe)-Vision 2020 zu Grunde; sie orientierten sich an den zu der Zeit erkennbaren Herausforderungen:

- Fertigung, Wartung und Instandsetzung
- Umweltverträglicher Luftverkehr
- Steigerung der Transportleistung
- Sicherheit und Passagierfreundlichkeit
- Effiziente Luftfahrzeuge
- Integrierte Technologievorhaben

1.1 Verbund ECO

Der Vorhabenverbund „Wirtschaftlicher Metallrumpf Generation Best-Eco-Mix (ECO)“ unter der Leitung des Unternehmensbereichs Airbus Operations GmbH adressierte diese Schwerpunkte im Rahmen der Airbus R&T-Strategie zur Weiterentwicklung der Metallrumpf-Konzepte. Die hier definierten Technologieströme (Techno-Streams) waren gerichtet auf (Abbildung 1.1-1):

- Entwicklung von Schalenkonzepten auf Basis neuer Werkstoffe für Hautfeld-, Stringer-, Spant-Anwendungen (Al-Scandium, Al-Lithium, FML-Glare) – Techno-Stream 1
- Entwicklung von Fertigungskonzepten für Großkomponenten-Fertigung (MCA/FAL) – Techno-Stream 2
- Ausweitung der Techno-Streams 1 und 2 auf weitere Komponenten (DSS, Fußboden, Cross Beam, Türen, etc.) – Techno- Stream 3
- Entwicklung vollkommenen neuer Konzepte – Techno-Stream 4
- Entwicklung von Konzepten zur Full Scale Validierung – Techno-Stream 5

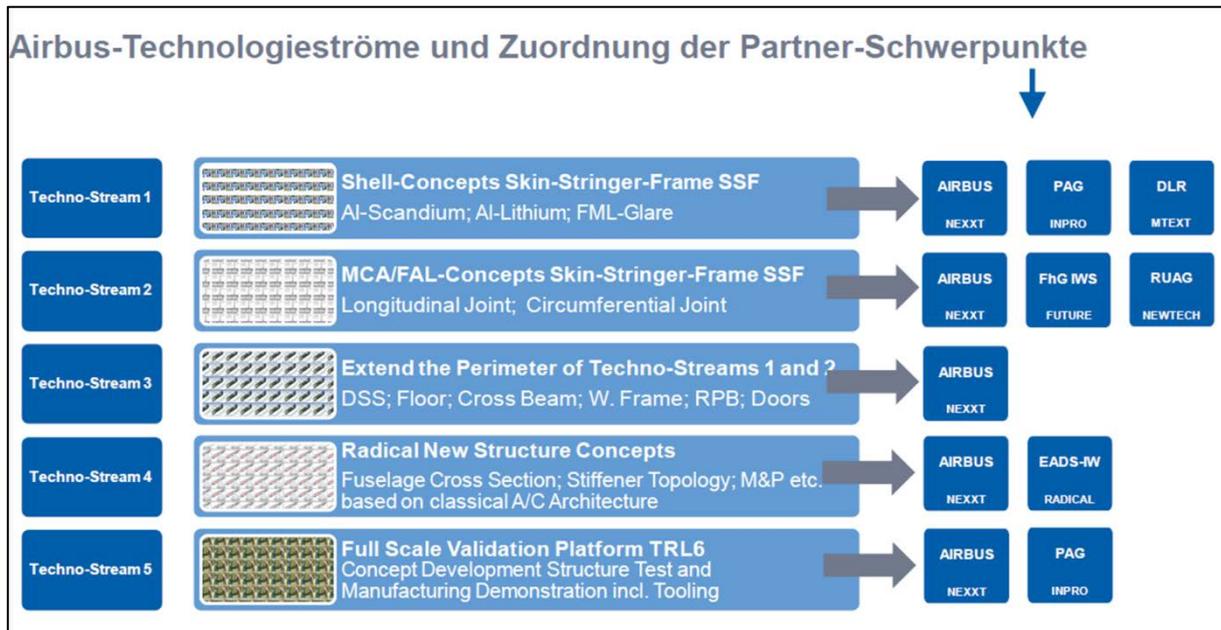


Abbildung 1.1-1: Airbus-Technologieströme

Am Verbund waren folgende Partner beteiligt:

- Airbus Operations GmbH (Federführer): Projekt „NEXXT“
- Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Institut für Werkstoff- und Strahltechnik: Projekt „FUTURE“
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR): Projekt „MTEXT“
- Premium Aerotec GmbH: Projekt „INPRO“
- RUAG Aerospace Structures GmbH: Projekt „NEWTECH“
- Airbus Defence and Space GmbH mit Airbus Group Innovations (AGI), ehemals: EADS Deutschland GmbH mit EADS Innovations Works Germany (IW): Projekt „RADICAL“

In Abbildung 1.2-1 ist die ECO-Verbundstruktur dargestellt.

1.2 Vorhaben RADICAL

Die Arbeitsanteile von Airbus Group Innovations (AGI) waren dem „Techno-Stream 4“ zugeordnet und im Vorhaben mit dem Titel „Radikal neue Werkstoffe und Fertigungsverfahren für den metallischen Flugzeugrumpf (RADICAL)“ zusammengefasst; sie adressierten die Themen:

- Al-Mg-Sc-Legierung – 2. Generation (AP 1)
- FSW-Werkzeugentwicklung für MCA/FAL-Anwendung (AP 2)
- Lokaler Korrosionsschutz für Rühr-Reibschweißnähte (AP 3.1)
- Erhöhung Langzeitbeständigkeit durch Nachbehandlung (AP 3.2)

- Schnelle Schalenfertigung (AP 4)
- Aufornprozess für „one-step-assembly“ (AP 5.1)
- Einfluss des Einflusses der Anodisierung auf das Ermüdungsverhalten von AlMgSc Ko8542 (AP 5.2)

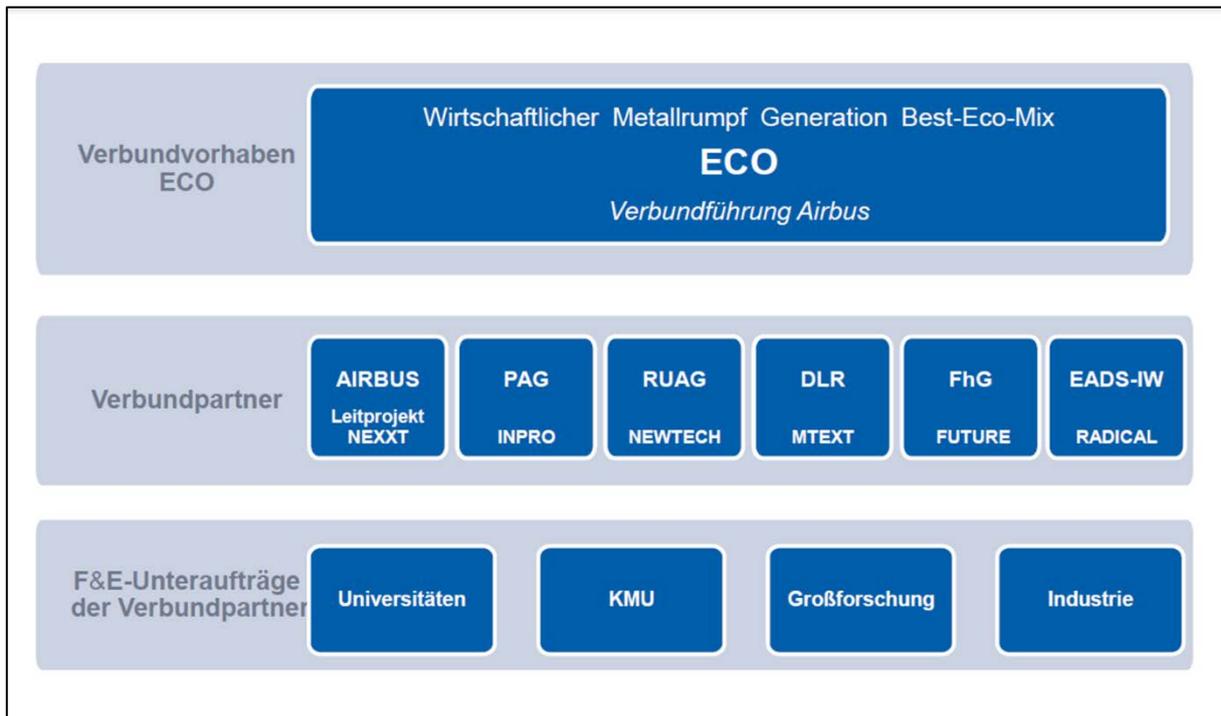


Abbildung 1.2-1: ECO-Verbundstruktur

1.3 Ziele

Im Rahmen des Vorhabenverbundes ECO befasste sich das Projekt RADICAL mit alternativen Werkstoff- und Fertigungskonzepten für den metallischen Flugzeugrumpf.

Auf *werkstofftechnischer* Seite sollte mittels des Verfahrens der Schnellerstarrung (engl.: rapid solidification process – RSP) eine besondere metallurgische Prozessroute dargestellt werden, die eine kostengünstige und ressourcen-schonende Herstellung einer hochfesten Aluminium-Magnesium-Scandium-Blechlegierung (Al-Mg-Sc) erlaubt, deren Eigenschaften die konventioneller Al-Mg-Sc-Werkstoffe übersteigen. Der so hergestellte Werkstoff sollte sowohl als Hautblech und als auch als roll-geformter Stringer eingesetzt zu eine deutlichen Verbesserung der Leistungsfähigkeit eines metallischen Flugzeugrumpfes beitragen. Die Technologiereife sollte idealerweise über die Darstellung in einem Demonstratorteil (z.B. Schale) nachgewiesen werden.

Im Bereich der *Fertigungsverfahren* sollte das Rühr-Reibschweißen (engl.: friction stir welding – FSW) als kostengünstige Alternative zum aufwendigen Nietverfahren für einen Einsatz in der „major component assembly“ (MCA) und „final assembly line“ (FAL) weiterentwickelt werden.

Um den fertigungstechnischen Randbedingungen (einseitiger Zugang) gerecht zu werden, waren umfangreiche Arbeiten zur Werkzeuggestaltung und -auslegung erforderlich, um eine einwandfreie Schweißnahtgüte gewährleisten zu können. Drei Werkzeugvarianten standen zur Diskussion. Sie sollten im Rahmen des Projektes hinsichtlich ihres Einsatzpotentials eingehend untersucht und optimiert werden.

Aus Korrosionsschutzgründen ist eine entsprechende Nachbehandlung einer FSW-Naht erforderlich. Auf Grund der Größe der geschweißten Komponenten ist eine Behandlung in einem Bad (Tank) nicht möglich, so dass lokale Korrosionsschutzmaßnahmen ergriffen werden müssen. Entsprechende Konzepte sollten hierzu entwickelt werden.

Ein weiterer Beitrag zur Kostensenkung durch Optimierung des Fertigungsablaufes war über die Kombination des Relaxationsumformprozesses von Al-Mg-Sc-Blechen mit Aufkleben der Stringer vorgesehen. Die gleichzeitige Nutzung von Temperatur und Zeit für den Umformprozess als auch für die Klebung ermöglicht die Einsparung eines Fertigungsschrittes. Hier sollte ein entsprechender Nachweis erbracht werden.

Schließlich sollte ein einstufiger Fertigungsprozess bei Überlappverbindungen betrachtet werden. Montagebohrungen, die zur Steigerung der Ermüdungsfestigkeit aufgedornt werden, bilden in Folge des Aufweitens am Rand eine Wulst, die mechanisch entfernt werden muss. Für die Zugänglichkeit ist eine Demontage der betroffenen Bleche erforderlich. Erste grundlegende Arbeiten hatten gezeigt, dass ein mittels eines alternativen, bei Airbus Group Innovations (vormals: EADS IW) entwickelten Aufdornwerkzeuges dieser Fertigungsschritt entfallen kann. Werkzeug als auch Verfahren sollten zur Einsatzreife gebracht werden.

Auf Grund der Vorteile des alternativen Verfahrens, insbesondere der erwarteten hohen Einsparungen bei den Fertigungskosten, und um einen zeitnahen Einsatz des Werkzeugs zu ermöglichen, hatte Airbus im Laufe des Projektes entschieden, die Industrialisierung des Werkzeugs einem Zulieferer zu übertragen. Die Entwicklungsarbeiten bei Airbus Group Innovations im Rahmen dieses Vorhabens wurden daraufhin eingestellt.

In Abstimmung mit Airbus wurde für die verbleibende Laufzeit ein anderes Thema definiert (siehe auch Änderungsantrag). Danach sollte der Einfluss einer Weinsäure-Schwefelsäure-Anodisierung (engl.: tartaric-sulphuric-acid – TSA), ein gängiges Verfahren zum Schutz vor Korrosion und als Vorbehandlung für den Anstrich, auf die Ermüdungsfestigkeit von Montagebohrungen in der AlMgSc-Legierung KO8542 untersucht werden. Bisherige Ergebnisse zeigten eine Abnahme der Ermüdungsfestigkeit nach einer TSA-Vorbehandlung. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollte möglichen Ursachen nachgegangen werden.

Das Projekt RADICAL startete am 01.01.2012 mit einer Laufzeit bis zum 31.03.2015. Das Vorhaben wurde vom BMWi unter dem Förderkennzeichen 20W1111F gefördert.

2 Ergebnisse

2.1 AP1: Al-Mg-Sc-Legierung – 2. Generation

Autor: F. Palm

2.1.1 Allgemeine Motivation, Ziele und Vorgehensweise

2.1.1.1 Motivation zur Herstellung von höherfesten AlMgSc-Blech

Seit ca. 15 Jahren entwickelt der zivile Flugzeugbauer Airbus in Zusammenarbeit mit der Fa. ALERIS, Koblenz sowie vielen anderen Partnern (inkl. Unterstützung durch Fördermittel vom BMWi) mittelfeste AlMgSc-Werkstoffe, welche als Blechlegierungen die heute noch verwendeten AlCuMg-Legierungen wie z.B. AA2024 ersetzen sollen. Ergebnisse dieser Kooperation sind die Werkstoffe AA5024 und AA5028, die mit Mg-Gehalten von 4,0 – 4,5 % eine ca. 5 % geringere Dichte als AA2024 aufweisen und dessen unteres Streckgrenzenlimit von 270 N/mm² durch die AlMgSc-Legierungen um 10 bzw. 20 % überboten wird. Ursächlich für diese Verbesserungen sind moderate Sc-Gehalte in den beiden Legierungen (0,15 – 0,25 %), wobei aufgrund der „normalen“ Gießtechnik zur Herstellung der Walzbarren dieser AlMgSc-Werkstoffe, das zulegierte Sc wegen dessen sehr begrenzter Raumtemperaturlöslichkeit im Al-Mischkristall weitgehend, schon während der Erstarrung als grobe Al₃Sc(Zr) Phase ausgeschieden wird. Nichtsdestotrotz ermöglicht das so hergestellte AlMgSc-Blechmaterial deutliche Verbesserungen in der Rumpfstrukturbauweise für Narrow (A320) und Wide Body (A330) – Flugzeuge, weshalb es von Airbus Operations als wichtige Entwicklungsoption angesehen wird (Abbildung 2.1-1).

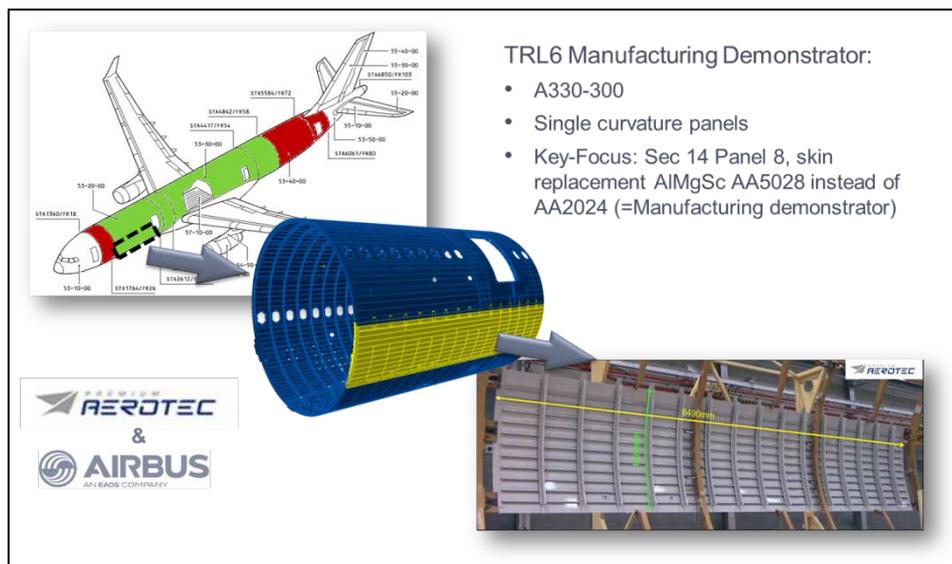


Abbildung 2.1-1: Anwendungsszenario für mittelfestes AlMgSc-Blech (AA5028) im Airbus A330-300

Schon der direkte Austausch des Blechwerkstoffs AA2024 T3 würde eine Gewichtsverbesserung erbringen. Im Falle eines Re-Designs würden die generierbaren Ratio-Potentiale deutlich anwachsen. Dafür ist aber unter Beibehaltung aller bekannten bzw. entwickelten guten Verarbeitungsmerkmale (Schweißbarkeit, gutes Korrosionsverhalten und Relaxations-Kriechumformbarkeit) eine Festigkeitssteigerung (Streckgrenze) notwendig. Diese kann im „Standard- AlMgSc-Material“ nicht mehr ohne weiteres generiert werden. Eine Erhöhung des Mg-Anteils auf mehr als 5% würde zwar eine Verbesserung der Streckgrenze von ungefähr 30 – 40 N/mm² bedeuten, gleichzeitig aber den Werkstoff korrosiv sensibilisieren (Interkristalline Korrosion).

Wesentlich effizienter wäre es, wenn zur Festigkeitssteigerung das Aushärtungspotential von kohärenten Al₃Sc-Phasen genutzt werden könnte. Hier ist ein Streckgrenzen-Zuwachs von ca. 50 N/mm² pro 0,1 wt % Sc Legierungsmasse möglich, vorausgesetzt, das Sc lag vorher im übersättigten Mischkristall in Zwangslösung vor. Folgerichtig könnte durch Zugabe von 0,4% Sc ein Mehrwert von 150 – 200 N/mm² erzielbar sein. Dies würde sogar eine Reduzierung des Mg-Gehalts erlauben, was wiederum der Korrosionssicherheit zu Gute käme.

2.1.1.2 Airbus Operations Zielsetzungen für eine neue AlMgSc-Legierung

Basierend auf den erreichten Eigenschaften bei Standard-AlMgSc (Status AA5028 H116) sollte das neu zu entwickelnde AlMgSc-Material respektive seine Herstellungsmethode (Gießen und Walzen sowie Wärmebehandeln) zumindest all das ermöglichen, was heute schon mit den Standard-AlMgSc-Blechmaterial gemacht wird (Abbildung 2.1-2). Dazu zählt:

- Klassische Blechnutzung und –verarbeitung (inkl. Chem. Fräsen und mechanisches Fräsen, Oberflächenkonditionierung (Anodisieren, Klebevorbereitung etc.))
- Herstellung roll-geformter Stringer und Spante
- Laserstrahlschweißen und Relaxationskriechumformung für einfach gekrümmte (zylindrische) und 2-fach gekrümmte (sphärische) Hautfeld-Stringer-Schalen



Abbildung 2.1-2: Roll-Form-Arbeiten an Standard-AlMgSc-Material (Spant und Stringer)

Sein R_{p0.2}-Festigkeitsverhalten sollte gegenüber der festesten Standard-AlMgSc-Legierung 5028 H116 (ehemals Ko8542) eine Verbesserung von mindestens 25 % aufweisen. Zusätzlich wurden auch für die dynamischen Eigenschaften die gewünschten Kennwerte nach oben verschoben (Abbildung 2.1-3).

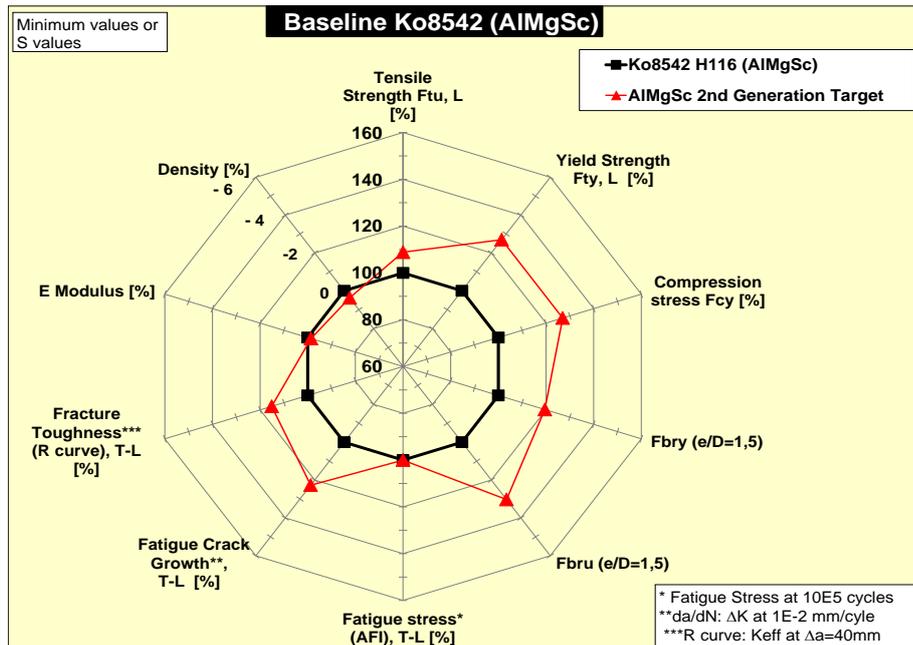


Abbildung 2.1-3: Werkstoff-Leistungsziele für verbesserte AlMgSc-Legierung durch Airbus Operations, Bremen

Neben den Schadenstoleranz-Design „Allowables“ sollte auch die Lochleibung deutlich verbessert werden, um bei hoch belasteten Nietungen keine Nachteile zu haben.

2.1.1.3 Metallurgische und verfahrenstechnische Vorgehensweise

Aus der Literatur ist bekannt, dass das Löslichkeitslimit eines metallischen Elements in einer Grundmatrix, sofern eine unbegrenzte Löslichkeit im flüssigen und eine begrenzte Löslichkeit beider Partner im festen Zustand beobachtet wird, nur durch Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeiten manipuliert werden kann. Im binären Legierungssystem Al-Sc liegt die maximale Löslichkeit bei ca. 0,38 %, wobei diese mit 658 °C schon recht nahe an der eigentlichen T_{liquidus} von Rein-Al liegt. Das Zulegieren von Magnesium verschiebt diese maximale Löslichkeit zu geringeren Werten (ca. 0,3 %), da die Besetzung von Zwischengitterplätzen durch Mg-Atome das Einlagern von Sc-Atomen erschwert [1]. Wie dem auch sei, es ist relativ problemlos möglich, mittels Schnellerstarrungsmethoden wie z.B. Melt-spin-Methode ($V_T = 10^5 - 10^7$ K/sec) durchaus bis zu 1,0 % Sc zwangszulösen und dann nachfolgend definiert bei 300 – 325 °C in Form von nano-skalierten Al_3Sc ($\varnothing = 2 - 5$ nm), voll-kohärenten Phasen wieder auszuscheiden, und so einen Festigkeitsgewinn von 450 – 500 N/mm² realisieren zu können [2]. In eigenen Airbus Group Innovations Laborversuchen wurde dies in den Jahren 2007 – 2011 umfänglich nachgewiesen (s. dazu auch BMWi Projekte „ENWERUM“). Zusätzlich gibt es Publikationen der Fa. ALCOA aus den Jahren 1988 – 1990 über klassisch kokillengegossenen AlMgSc-Legierungen mit nachfolgenden Walzversuchen, die das anvisierte Potential für eine neue Herstellungsmethode von AlMgSc-Blech-Legierungen aufzeigten (Abbildung 2.1-4).

METALLURGICAL TRANSACTIONS A			VOLUME 21A, FEBRUARY 1990—421						
Mechanical Properties and Microstructures of Al-Mg-Sc Alloys									
RALPH R. SAWTELL and CRAIG L. JENSEN									
Table I. Aluminum Alloy Composition and Density			Table II. Mechanical Properties of WR/A Materials						
Mg (Wt Pct)	Sc (Wt Pct)	Density (kg/m ³)	Alloy	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (Pct)	n	Tear Strength/ Yield Strength	UPE (kJ/m ²)
0.0	0.54	2704	Al-0.5Sc	286	297	14.5	0.020	1.74	319
2.0	0.54	2679	Al-2Mg-0.5Sc	341	370	13.5	0.051	1.95	317
4.0	0.56	2653	Al-4Mg-0.5Sc	381	443	14.5	0.072	1.93	278
6.0	0.54	2627	Al-6Mg-0.5Sc	381	467	10.5	0.107	1.20	84
4.0	0.00	2649							
			Table III. Mechanical Properties of WR/CR/A Materials						
			Alloy	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (Pct)	n	Tear Strength/ Yield Strength	UPE (kJ/m ²)
			Al-0.5Sc	298	319	10.5	0.008	1.59	193
			Al-2Mg-0.5Sc	376	401	8.5	0.052	1.74	123
			Al-4Mg-0.5Sc	414	460	9.5	0.064	1.68	114
			Al-6Mg-0.5Sc	433	503	10.5	0.074	1.33	100

Abbildung 2.1-4: ALCOA-Publikation 1990, R. Sawtell u. C. Jensen, Metallurgical Transactions A

Aufbauend auf all diesen Daten wurde das Zielwerkstoff-Konzept für den neuen AlMgSc Blechwerkstoff definiert:

1. **AlMg3Sc0,4Zr0,2** (Chemie)
2. Mg-Gehalt ca. 3^{+/-0,5} % ⇔ ausreichende Mischkristallverfestigung und Reduktion der Werkstoffdichte ohne Schädigung des angestrebten sehr guten Korrosionsverhaltens (→ „care-free aircraft structure“)
3. Sc-Gehalt ca. 0,4^{+/-0,05} % zur Erzielung von ca. 200 N/mm² Festigkeitsgewinn durch Ausscheidungshärtung
4. Zr-Gehalt ≤ 0,2% zur thermischen Stabilisierung der Ausscheidungskinetik der Al₃Sc-Phase → Al₃Sc_{1-x}Zr_x
5. Gesamt-Werkstoffverfestigung durch einen intelligenten Mix aus Mischkristallfestigkeit, Verformungsfestigung durch Walzverfestigung, Ausscheidungshärtung bei gleichzeitiger kontrollierter Entfestigung durch Erholung der Verformungsverfestigung aus dem Kaltwalzen

Als notwendige Schnellerstarrungsmethode mit ausreichender Eignung für die Herstellung von Blechmaterial wurde das kontinuierliche Bandgießen adressiert. Durch die Airbus-Vorgabe, Blechdicken von 0,8 – max. 5 mm erzeugen zu können, musste die Twin Roll Strip Casting Methode verworfen werden, da mit ihr nur relativ dünne Guss-Bleche (≤ 5 mm) darstellbar sind. Mit dem sogenannten FlexCaster® Verfahren der Fa. NOVELIS wurde eine Methode gefunden, die nominell Blechdicken bis über 20 mm direkt gießen kann, als Labor-Anlage (in Kingston, Ontario, Kanada) für Grundsatzversuche zur Verfügung stand und für die 2 industrielle Anlagen bei NOVELIS in Kanada als auch bei Nippon Light Metal Company (NLM) in Japan prinzipiell nutzbar waren.

Mit der Fa. NOVELIS, dem Erfinder und Technologie-Halter des FlexCaster® Twin Belt Strip Casting (TBSC) Verfahrens wurde eine Entwicklungskooperation diskutiert und vereinbart. Die

NOVELIS Laborgießanlage erzeugt ein ca. 370 mm breites Guss-Band und kann mit verschiedenen Schmelzanlagen betrieben werden. In der Regel wurde bei den Versuchen ein elektrisch widerstands-beheizter Schmelzofen mit max. 600 kg Fassungsvermögen verwendet. Das notwendige Legierungsmaterial wurde von Airbus Group Innovations beschafft und bereitgestellt. Den prinzipiellen Aufbau einer TBSC-Anlage zeigt Abbildung 2.1-5.

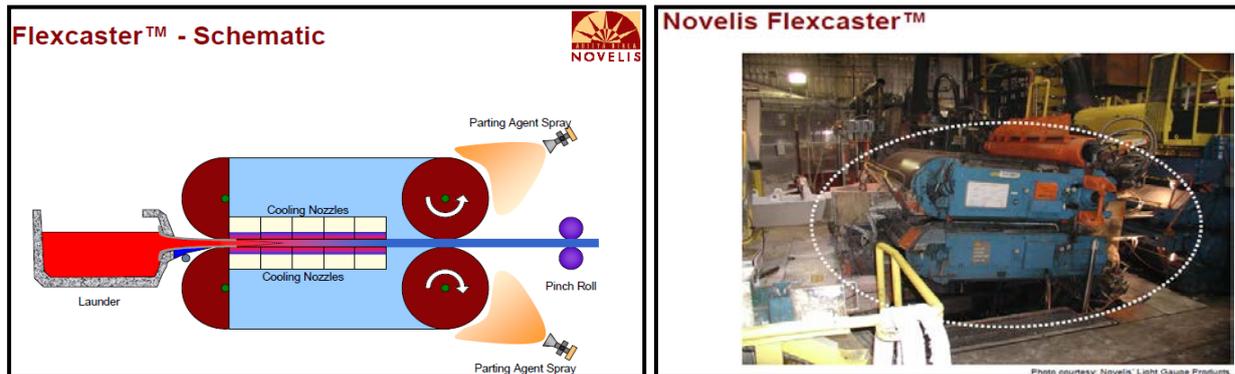


Abbildung 2.1-5: FlexCaster-Technologie und Anlage bei NOVELIS, Kanada

Als ein größeres Problem kristallisierte sich während der Durchführung der Labor-Gießversuche heraus, weil eine klassische Schmelzreinigung (Wasserstoff-Entgasung und Filterung) vor Ort in Kingston nicht machbar war. Dazu fehlte schlichtweg die notwendige Hardware. Da aber die hohen Schmelztemperaturen der AlMgSc-Schmelze (teilweise deutlich über 800 °C) und die relativ langen Haltezeiten bei solchen Temperaturen zu einer starken Wasserstoffaufnahme führten, war das Gießergebnis fortlaufend durch Mikrostrukturfehler belastet; mehr dazu im **Kapitel 2.1.2 Ergebnisse**. Leider hat sich im Laufe des Projektes immer wieder gezeigt, dass durch verfahrenstechnische Probleme und Unzulänglichkeiten das metallurgische Ergebnisse respektive die daraus abgeleiteten Aussagen unerwartet negativ getriggert wurden. Geschuldet ist diese Problematik letztlich dem Nebeneinander von notwendiger Verfahrensentwicklung in der grundsätzlichen AlMgSc-Werkstoff-Gießtechnik einerseits und andererseits der thermo-mechanischen (metallkundlichen) Prozessentwicklung sowie Bewertung eines gänzlich neuen Werkstoffkonzepts. Normalerweise bekommen wir den „zu erforschenden“ Werkstoff als Halbzeug fertig entwickelt vom Werkstoff-Lieferanten und bewerten dann aus unserer Produktperspektive seine Weiterverarbeitungseigenschaften oder Hinterfragen seine Werkstoffkennwerte.

Im Zuge der Weiterentwicklung zeigte sich, dass eine industrielle Umsetzung durch Zusammenarbeit mit der Fa. NOVELIS unmöglich wurde, denn NOVELIS hat mittlerweile seinen Serienfertigungs-FlexCaster® in Chicoutimi, Quebec, Kanada abgerüstet und den Betrieb der Anlage leider eingestellt. Deswegen wurden die Diskussionen mit NLM in Japan aufgenommen und ein Besuch der Serienanlage (relativ neu (Baujahr 2007), Gießbreite 2200 mm) vor Ort in Kambara, Präfektur Shizuoka, Japan gemacht. In Kambara betreibt NLM auch sein Forschungslabor und nutzt zur metallurgischen Simulation des FlexCaster Prinzips eine modifizierte Labor-Stranggussanlage mit Intensiv-Kühlung. Diese Anlage, von NLM FlexCast-Simulator genannt, bietet nach Auskunft von NLM die gleichen Abkühlbedingungen wie der klassische TBSC FlexCaster. Im Jahr 2013 wurde begonnen, parallel zu den Versuchen auf dem FlexCaster in

Kingston, in Kambara ausgewählte AlMgSc-Legierung abzugießen, auszuwalzen und zu prüfen, ein Teil der der Gussplatten ging auch nach Deutschland und wurde hier vor Ort untersucht sowie bewertet (mehr dazu im **Kapitel 2.1.2 Ergebnisse**).

Die Versuche bei NLM dienen auch der Vorbereitung des geplanten Großgießversuchs auf der Serienanlage, zu der es aber leider während des Projekts nicht mehr gekommen ist. Ein Grund dafür sind auch die benötigten großen Materialmengen, denn die Serienanlage hat zwei 40.000 kg Schmelzöfen und zwei 40.000 kg Halte-Öfen (zur Schmelzreinigung). Zum sinnvollen Betrieb ist eine Minimalmenge von ca. 10.000 kg notwendig, was bedeutet, dass ein Einsatz von ungefähr 2.500 kg AlSc2 Vorlegierung zu planen, sprich, zu beschaffen wäre. Beim zu kalkulierenden AlSc2 Vorlegierungspreis in 2014 (ca. € 150,-) ergab sich ein Ingots-Preis von € 375.000 Vorlegierung + Nebenlegierungselemente (Mg und Zr) ≈ € 400.000,-. Rechnet man die „Reinigungs(Spül)-Kampagne“ mit 99,8% Aluminium, um jegliche (verbleibende) Sc-Kontaminationen in der Serienanlage ausschließen zu können, dazu, wäre eine Gesamtinvestition von fast € 450.000,- zu betrachten, die im Rahmen dieses Projektes nicht zu stemmen war.

2.1.2 Ergebnisse

Nach der Durchführung der Vorversuche in 2010 (Gießkampagnen 914 (ohne Sc) und 915 (mit Sc), sowie der Gießkampagnen 935 (ohne Sc), 936 – 938 (mit Sc) welche bereits in 2011 stattgefunden haben, wurden neben der Auswertung weiterer thermo-mechanischer (Walz- und Wärmebehandlungsversuche) Versuche zwei weitere Gießversuche (968 (März 2013) und 1013 (Jan. 2015)) auf der Laboranlage von NOVELIS in Kingston unternommen (Tabelle 2.3-1). Die Auswertung der Walz- und Wärmebehandlungsversuche der 1013 Kampagne läuft immer noch und kann somit im Abschlussbericht leider nur partiell Erwähnung finden. Das relativ große Zeitfenster zwischen dem Gießversuch 968 und dem Gießversuche 1013 resultiert aus der Problematik, das NOVELIS das Forschungslabor in Kingston in 2014 geschlossen hatte und eine Weiterführung der Versuche damit unmöglich geworden war. Aufgrund eines „Management buy out“ wurde in der 2. Hälfte 2014 das Labor durch private Investoren übernommen und ein Neustart unter dem Firmennamen ALCERECO vollzogen. Der geplante Abbau der Bandgießanlage fand nicht (mehr) statt und ermöglichte so doch noch einen weiteren (leider etwas späten) Gießversuch.

Tabelle 2.1-1: Zusammenstellung aller FlexCaster® Versuche 2010 – 2015

Guss*	Mg (%)	Sc (%)	Zr (%)	Sonstige (5)	Gießversuch (Jahr)
915	3,1	0,38	0,24	Mn 0,57	2010
936	2,6	0,45	0,16		2011
937	3,1	0,40	0,15		2011
938	3,6	0,41	0,16		2011
968	3,3	0,475	0,18		2013
1013	3,0	0,36	0,14	Zn 0,29	2015

*gemäß Gießreport der Fa. NOVELIS bzw. ALCERECO (ICP/OES-Messung)

Mit dem Gießversuch 915 konnte nachgewiesen werden, dass das grundsätzliche Werkstoff- und Fertigungskonzept funktioniert. Die Bandgießanlage bei NOVELIS und ihre inhärenten Abkühlbedingungen halten das Sc weitgehend in Lösung und mittels nachfolgender Walz- und Wärmebehandlung waren Festigkeitswerte für R_m und $R_{p0,2}$ von über 400 N/mm² bzw. 350 N/mm² problemlos möglich. Jedoch zeigte sich auf den Blechproben eine Blasenbildung, insbesondere nach den Rückglüh-Wärmebehandlungen bei 275 – 325 °C, die die Kennwerte teilweise signifikant beeinflusste (gerade die Streuung der Werkstoffduktilität). Eine Wasserstoff bedingte Mikrostruktur-Schädigung wurde als Ursache nachgewiesen, wobei die unerwünschte Wasserstoffaufnahme schon beim Schmelzen und Gießen in Kanada erfolgte. Leider wurde dieses Problem in den nachfolgenden Gießversuchen, in denen die oberen und unteren Grenzen des Werkstoffkonzepts hinsichtlich Sc und Mg ausgelotet werden sollten, nicht gelöst. Auch diese Versuche respektive die durchgeführten Walz- und Wärmebehandlungsversuche litten in ihren Ergebnisse und Aussagekraft signifikant unter der Wasserstoff-induzierten Poren-Problematik (s. Abbildung 2.1-6).

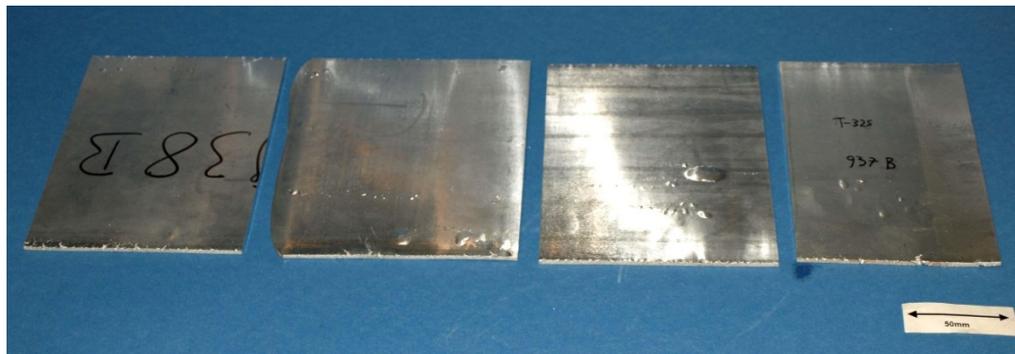


Abbildung 2.1-6: Wasserstoff-Blasenbildung auf Band-gegossenen AlMgSc-Blechen nach der finalen Wärmebehandlung (325°C)

Neben vielversprechende Zugproben mit guten Festigkeiten wurden in vielen Versuchsreihen immer wieder auch negative Ausreißer dokumentiert. Gerade die Ableitung von Werkstoff-Optimierungsmaßnahmen durch besondere Wärmebehandlungs-Kampagnen konnten deswegen in ihrer Wirksamkeit nicht final beurteilt werden (Abbildung 2.1-7).

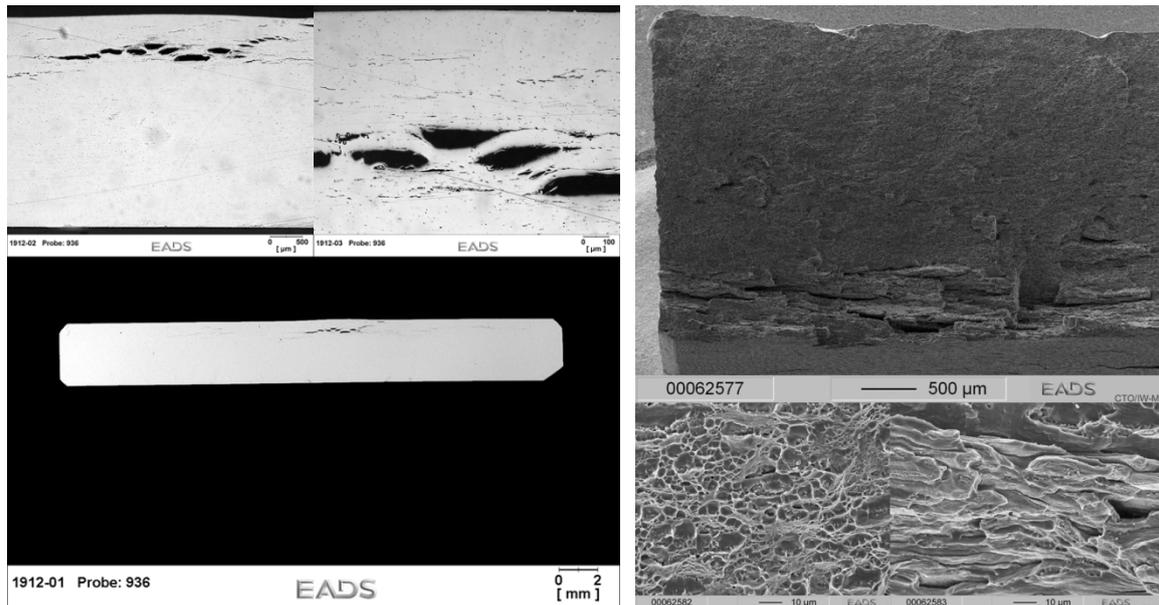


Abbildung 2.1-7: AIMgSc-Werkstoff-Schädigung durch Wasserstoffporosität im Querschliff und als fraktografische Ausprägung auf einer Zugprobe mit „gut“ und „schlecht“ Bereich (rechts-oben: Partiiell duktiler Gewaltbruch („Waben“) und rechts-unten-rechts: Wasserstoffschädigung mit lamellaren Versagen ohne jegliche Mikro-Plastizität)

Nichtsdestotrotz wurden die Untersuchungen zum Verarbeitungsverhalten (Schweißbarkeit und Korrosionsverhalten) mit Proben aus den Gießkampagnen 937 / 938 und 968 durchgeführt (s. dazu die noch folgenden Kapitel). Zusätzlich wurde ein Sonderprogramm mit einer großen Anzahl von thermo-mechanischen Varianten (Abbildung 2.1-8) an den Abgüssen 937 und 938 betrieben, in der Hoffnung so die Wasserstoffproblematik besser in Griff bekommen zu können. Die dabei ermittelten Ergebnisse werden zuerst im Kapitel **Statische Festigkeit** vorgestellt. Da sich gezeigt hat, dass schließlich nur die letzte Gießkampagne 1013 offenkundig keine Probleme aufgrund von unzulässig hoher Wasserstoffkontamination hat, gleiches gilt auch für alle von NLM in deren Labor mit dem FlexCast Simulator produzierten Proben, wird abschließend das dokumentierte dynamische Festigkeitsverhalten nur zu diesen Probenmaterialien dokumentiert.

2.1.2.1 Statische Festigkeit

2.1.2.1.1 Statische Festigkeit der Bandguss-Varianten 937 und 938

An Restmaterial der Abgüsse 937 und 938 wurde durch Variation der Gefügekonditionierung vor dem Walzen (Ziel: Vergrößerung der erreichbaren Kaltwalzhärte (= Festigkeit) als auch durch ein Zwischenglühen bei der Hälfte der benötigten Walzstiche) versucht, das Festigkeit ↔ Zähigkeitsverhalten zu optimieren. Die zuerst, an auf ca. 3 mm Dicke abgewalzten 937 und 938 Material, ermittelten Festigkeitswerte sind in Abbildung 2.1-9 in beiden Prüfrichtungen L und LT dargestellt. Zusätzlich wird der Einfluss des „weiter runter Walzens“ von 3,0 → 1,8 mm beschrieben.

Der höher mit Mg legierte Abguss 938 verhält sich ähnlich, wobei aber noch etwas höhere Festigkeiten zu erzielen sind. Dieses so prozessierte Material erfüllt die Airbus Vorgaben schon annähernd.

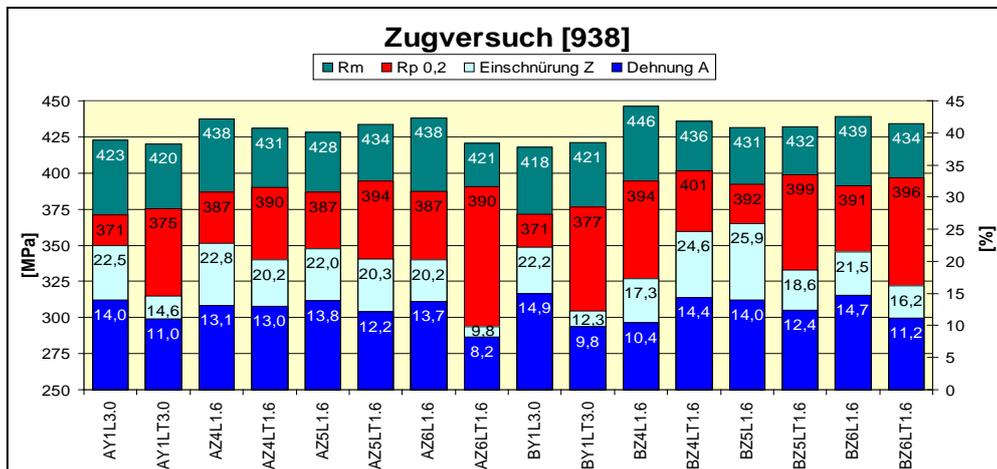


Abbildung 2.1-10: Statische Zugfestigkeit nach den Rückglühen (325°C/4h) an 938 Blech mit 70% und 82% Abwalzgrad

Dabei fällt besonders auf:

- ➔ Brucheinschnürung i.d.R. > als 20% & in LT-Richtung immer schlechter als L-Richtung
- ➔ Ursachen: Walztextur-Effekte und/oder ungünstige Gefüge-Merkmale (H2-Problematik)
- ➔ Stärkeres Abwalzen ⇔ Stärkeres Durchkneten + Vor- bzw. - Zwischenglühen verbessert Festigkeit & Dehnung als auch Brucheinschnürung!

Interessant wird der Vergleich mit dem „Standard“ Ko8542 (AA5028) (Abbildung 2.1-11), geprüft in den Werkstoffdicken 3,0 & 1,6 mm.

Die ausgeprägte Richtungsabhängigkeit der ermittelten Zähigkeitskennwerte ist schon etwas unerwartet. Das aus einem über 500 mm dicken Strangguss-Abguss heruntergewalzte Material, natürlich ohne jegliche Wasserstoffprobleme, spiegelt in ihren Eigenschaften wahrscheinlich den Walzprozess wider, da sehr viele Stiche nur in Längsrichtung durchgeführt werden:

- ➔ Brucheinschnürung und Dehnung sehr anisotrop ➔ nun „schwächere“ L-Richtung
- ➔ Ursachen unklar
- ➔ Nach 325°C/4h kein Einfluss auf die Kennwerte

An sich könnte man vermuten, dass aufgrund des Abwalzgrads von größer 95%, immer wieder durch Zwischenglühschritte unterbrochen, begonnen als Warmwalzen und dann ab ca. 20 mm beendet mittels Kaltwalzen auf die finale Dicke von 4,5 – 5,0 mm, ein homogeneres Werkstoffverhalten vorliegen sollte. Noch bekannter ist die Anisotropie, hier aber für die Streckgrenze, des Standard-Luftfahrt-Al-Werkstoff AA2024 T3 (bzw. AA2024 T3 Al-clad) (Abbildung 2.1-12).

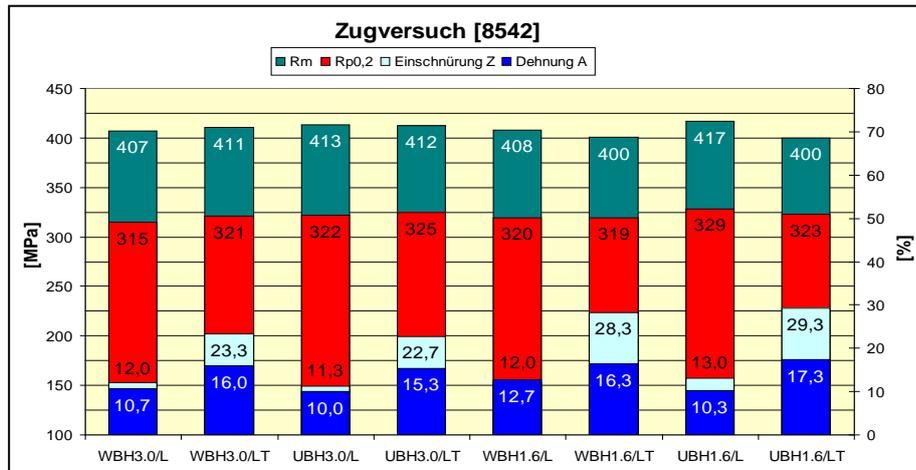


Abbildung 2.1-11: Statische Festigkeit des „Standard-ALMgSc“ AA5028 H116 (nach Rückglühung bei 325°C/4h), Herstellung der Probendicken durch Abfräsen aus einem 4,5 mm Blech

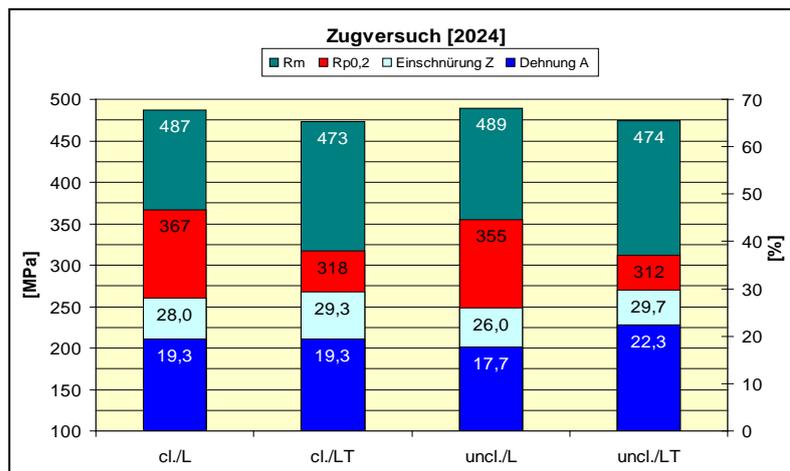


Abbildung 2.1-12: Statische Festigkeit von AA2024 in 2 verschiedenen Werkstoffzuständen (mit und ohne Rein-Al Korrosionsschutz-Plattierung)

- Streckgrenze bekanntermaßen sehr anisotrop → „schwächere“ LT-Richtung
- Dehnung & Brucheinschnürung sehr hoch
- Kein bzw. nur geringer Einfluss der Rein-Al-Plattierung auf die Kennwerte erkennbar

Spiegeln wir die Werkstoffkennwerte der etablierten AA2024 und der kurz vor der Anwendung stehenden AA5028 gegen die im Projekt durchprozessierten Abgüsse 937 und 938, so ist festzuhalten, dass das neue Bandgussmaterial schon jetzt eine deutlich bessere Dehngrenze aufweist. Noch dazu besticht das Bandgussmaterial mit einer erstaunlich guten Isotropie, denn die L und LT-Werte liegen eng beieinander und die LT-Richtung ist sogar reproduzierbar noch etwas besser als die L-Richtung. Weitere Versuche, durch höher temperierte Glühversuche (350°C und 375°C) inkl. einer Wasserabschreckung oder Abkühlen an ruhender Luft, das Zä-

higkeitsverhalten nach dem letzten Walzstich, gerade in LT-Richtung, verbessern zu können, sind in Abbildung 2.1-13 beschrieben. Der Startwert (die Festigkeitsbasis) des Materials 937 ist dabei der Balken A4/25H (ohne HT-Glühung, nur mit 325°C/4h).

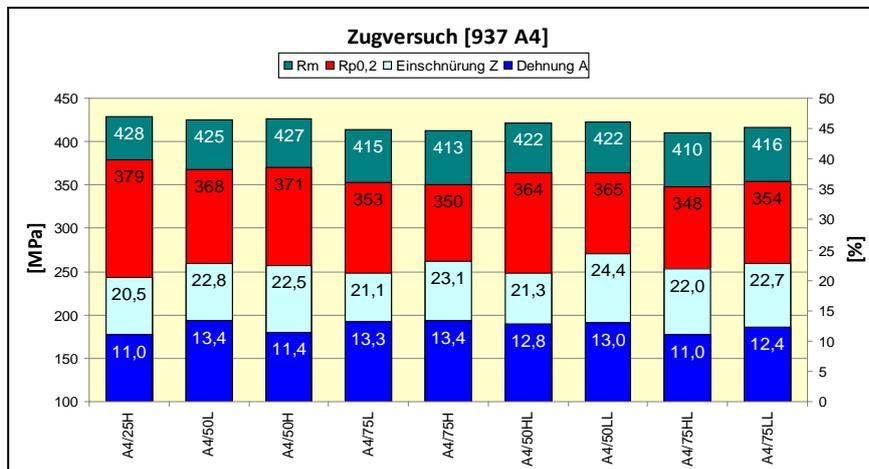


Abbildung 2.1-13: Festigkeits- Zähigkeitsverhalten im Abguss 937 nach finaler Hochtemperatur-Glühung m/o Wasser- bzw. – Luftabschreckung + 325°C/4h

- Brucheinschnürung nun immer > als 20% für die „schwache“ LT-Richtung
- Ursachen: „Ausheilen „Walztextur-Effekte u./o. ungünstige Gefüge-Merkmale)
- Erwartungsgemäß Rückgang der Festigkeit

Die untersuchten Maßnahmen waren bedingt erfolgreich. Im Vergleich zum Material 937 ist die Festigkeitsbasis des Materials 938 etwas höher (Balken ganz links AZ6/25H (Abbildung 2.1-14).

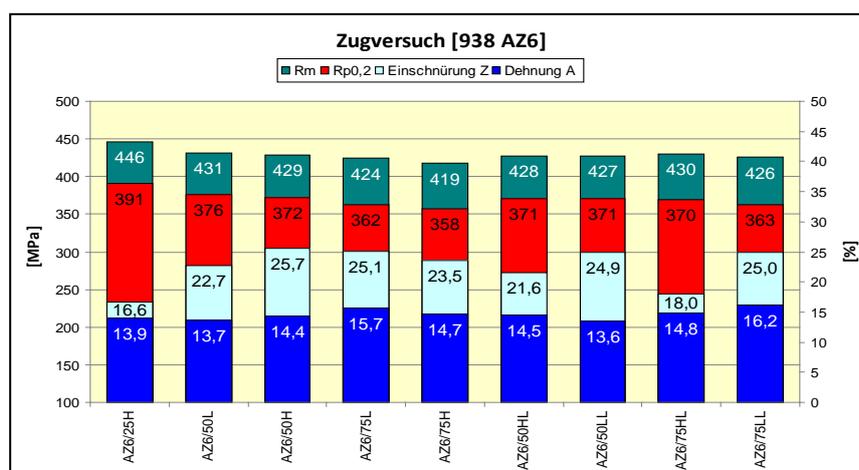


Abbildung 2.1-14: Festigkeits- Zähigkeitsverhalten im Abguss 938 nach finaler Hochtemperatur-Glühung mit/ohne Wasser- bzw. – Luftabschreckung + 325°C/4h

- ➔ Brucheinschnürung nun (bis auf 2 Ausnahmen) > als 20% für „schwache“ LT-Richtung
- ➔ Ursachen: „Ausheilen“ „Walztextur-Effekte u./o. ungünstige Gefüge-Merkmale)
- ➔ Kein ausgeprägter Effekt durch Wasserabschreckung oder Luftabkühlung erkennbar
- ➔ Erwartungsgemäß Rückgang der allgemeinen Festigkeit

Dies ist einzig auf den erhöhten Magnesium-Gehalt von 0,5% zurückzuführen, welcher hier mit einer zusätzlichen Mischkristallverfestigung von 10 - 15 N/mm² interagiert. Nichtsdestotrotz ließ sich zwar die Zähigkeit auf hohem Niveau stabilisieren, man musste aber erwartungsgemäß einen weiteren Rückgang der Streckgrenze akzeptieren, da bei 350 oder 375°C die Vergrößerung der Al₃ScZr-Phasen und die dazu kommende fortschreitende Erholung des walzharten Gefüges zu verzeichnen ist.

2.1.2.1.2 Statische Festigkeit des NLM FlexCast Simulator Materials (1. Abguss)

Nachfolgend werden die statische Festigkeit aus kalt-gewalzten 937 FlexCaster und bei 325°C rückgeglühten FlexCaster Material mit NLM Material aus dem ersten, dortigen FlexCast Simulator Versuch verglichen. Zum besseren Verständnis der Vorgänge respektive Wechselwirkung des Sc bei den FlexCast Simulator-Versuchen wurden einige Proben mit unterschiedlichen Sc-Mengen sowie Zr-Zugaben getestet.

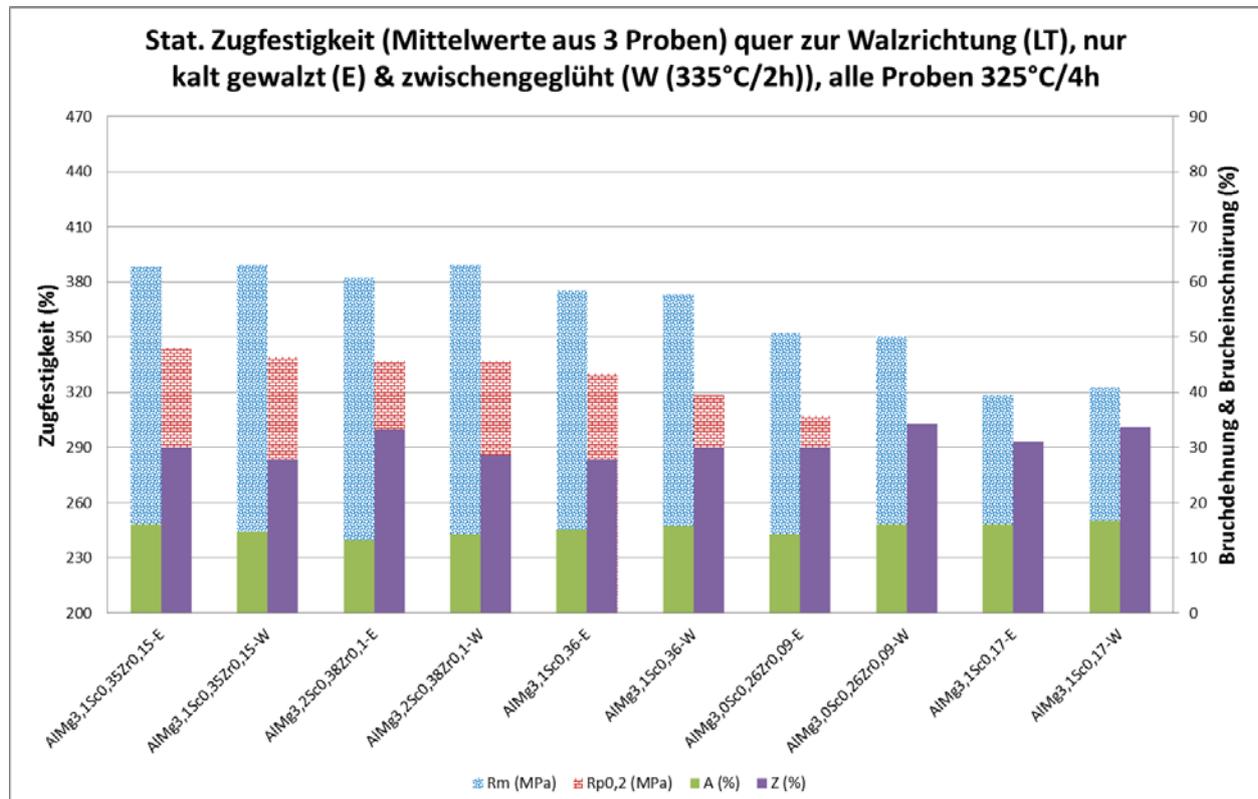


Abbildung 2.1-15: FlexCast Simulator Labor-Gießversuche bei NLM, gewalzt von 10 mm Dicke auf 3 mm bei ALCERECO in 8 Stichen (Zwischenglühen mit 335°C nach 4 Stichen)

Die Daten (Abbildung 2.1-15) belegen ganz klar die Notwendigkeit hoher Sc-Gehalte, um höhere Festigkeit erzielen zu können. Noch dazu zeigt sich die positive Wirkung von Zr, denn ohne Zr fällt der Verfestigungseffekt niedriger aus. Es zeigt sich auch kein großer Unterschied mit Blick auf den Effekt einer Zwischenglühung. Interessanter ist da schon der Vergleich mit dem „klassisch“ hergestellten FlexCaster Bandguss-Material 937, dargestellt als rot eingerahmter 5. Balken in Abbildung 2.1-16. Hierbei handelt es sich ebenfalls um kalt gewalztes Material mit einer finalen Wärmeendbehandlung von 325°C/4h.

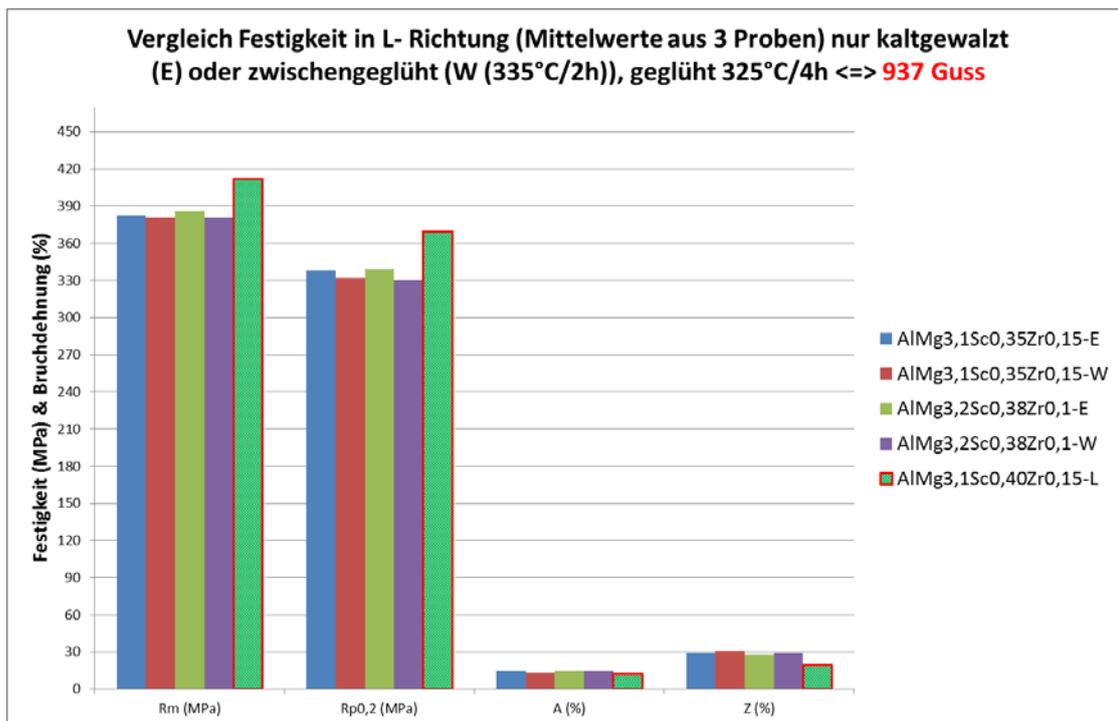


Abbildung 2.1-16: Vergleich FlexCast Simulator mit FlexCaster.-Material Guss 937 (rot gerahmt)

Das bandgegossenen FlexCaster Material erreicht gut 10% höhere Festigkeiten bei ähnlicher Dehnung und etwas geringerer Brucheinschnürung. Es scheint so zu sein, dass die Mikrostruktur inkl. Übersättigungsgrad an Sc + Zr als Resultat der Abkühlbedingungen beim FlexCaster Bandguss effizienter (besser) ausfällt, als auf der Labor-Anlage in Japan (ein so nicht erwartetes Ergebnis!). Die etwas bessere Brucheinschnürung des FlexCast Simulator Material könnte mit den „sauberen“ Gefüge zusammenhängen, da eine unerwünschte Wasserstoff-Belastung durch einen Spül-Reinigung-Prozess vermieden wurde.

2.1.2.1.3 Statische Kennwerte bzw. Beobachtungen zum 964 Abguss

Schon beim Abguss des relativ hochlegierten FlexCaster 964 Material wurde beobachtet, dass der relativ hohe Sc-Gehalt (0,48%) verbunden mit dem erhöhten Mg-gehalt (3,3%) ein wenig konsistentes Ergebnis lieferte. Durch einfache Härtemessungen im wie gegossenen Zustand und dann im ausgelagerten Zustand (325°C/4h) zeigte sich die unvollständige Zwangslösung des Sc in einer reduzierten Härtezunahme. Dazu kam wiederum eine ausgeprägte Blasenbildung während und nach den Walzversuchen mit dem Resultat sehr stark streuender Festig-

keitskennwerte. Es scheint so zu sein, dass die Grenzen des metallurgisch Möglichen (erreichbare Sc-Menge im Mischkristall) im TBSC-Prozess System NOVELIS damit erreicht wurden. Auch wenn teilweise beeindruckende Kennwerte generiert wurden (sowohl im R_m als auch $R_{p0.2}$ über der Airbus Spez.), war die mangelnde Reproduzierbarkeit der Hauptgrund, nach Rücksprache mit den NOVELIS Labor-Spezialisten (jetzt ALCERECO), diesen Weg mit so hohen Sc-Gehalten nicht weiter zu beschreiten. Deswegen werden die stark streuenden Ergebnisse nur übersichtshalber in einer Grafik (Abbildung 2.1-17) gezeigt.

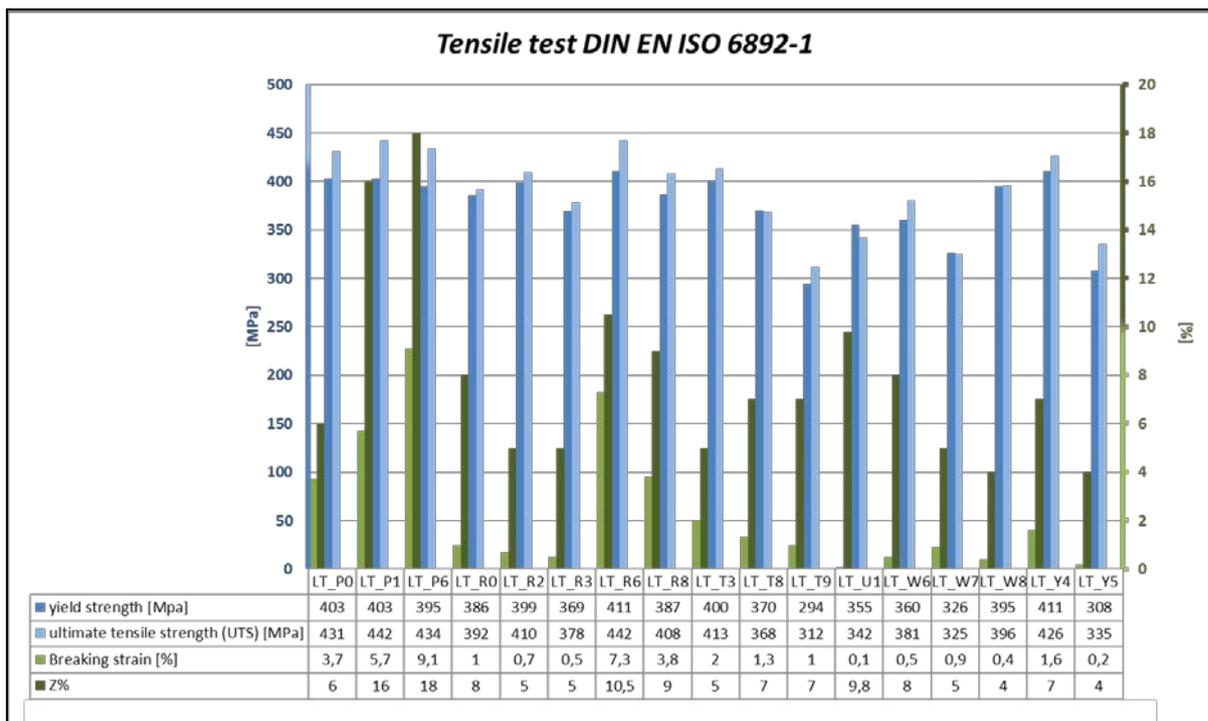


Abbildung 2.1-17: Ergebnisse des FlexCaster Abguss 964

Insbesondere die unbefriedigenden Zähigkeitswerte deuten erneut auf ein ausgeprägtes Wasserstoffproblem hin.

2.1.2.1.4 Statische Festigkeitswerte des Abguss 1013 und des 2. NLM FlexCast Simulator Abguss

Für den letzten Abguss 1013 wurde aufbauend auf den Erfahrungen der vorangegangenen Versuche die Prozessroute in nur noch 2 Varianten unterschieden:

1. Nur Kaltwalzen, gefolgt von finaler Rückglühung bei 325°C/2h
2. Guss-Konditionierung vor dem Kaltwalzen mit 350°C/2h, dann Kaltwalzen, gefolgt von finaler Rückglühung bei 325°C/2h

Ziel war hierbei die Ausgangshärte des gewalzten Blechbands zu maximieren, um so eine höhere Endfestigkeit einstellen zu können. Dass diese Gefügehärte durch die Konditionierung deutlich ansteigt, sieht man in Abbildung 2.1-18 sehr gut. Wiederum zeigt sich die bessere Effizienz des FlexCaster Bandgusses im Vergleich zum NLM-Material aus dem 2. Abguss in Ja-

pan, da eine bessere, weil größere Walzverfestigung zu erreichen ist, obwohl im NLM Material nominell ein höherer Sc-Gehalt vorlag. Dies schlägt sich dann auch in den Zugfestigkeitskennwerten nieder (Abbildung 2.1-19), die bei einer Härte von 130 HB bis an 450 N/mm² heranreichen. Nach dem Glühen bei 325°C offenbart das auf ca. 2,5 mm runter gewalzte Blech durchweg sehr ähnliche Festigkeitswerte, wobei das Mehr an Sc im NLM Material zu keinen höheren Festigkeiten führt. Wie schon in der Analyse des 1. NLM Guss-Versuchs zeigen die FlexCast AlMgSc-Materialien eine leicht verbesserte Duktilität.

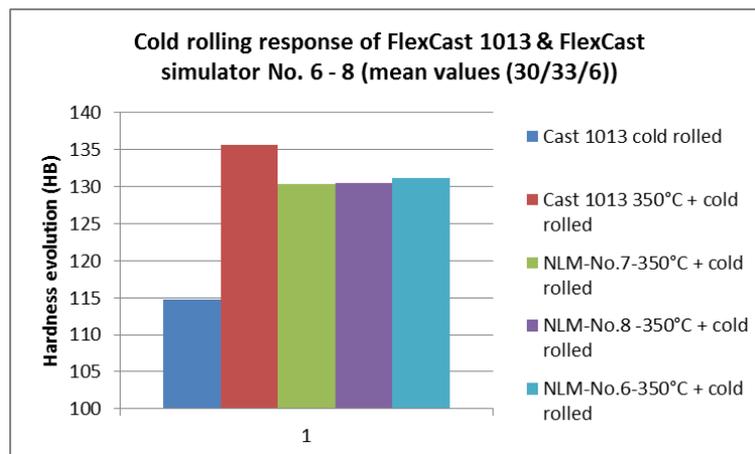


Abbildung 2.1-18: Gefügehärte-Entwicklung durch Kaltwalzen mit und ohne Gussmaterial-Vorkonditionierung des Guss 1013 und 3 x NLM FlexCast Material N1 – N3

Metallurgisch interpretiert, sagen die Daten aber auch, dass mit der abschließenden Glühung bei 325°C im bei 350°C vorauslagerten Blechmaterial nur noch eine Erholung = Entfestigung stattfindet, denn die hohe Festigkeit von 430 – 450 N/mm² fällt auf ca. 415 – 420 N/mm² zurück, die Streckgrenze reagiert sogar noch stärker.

Der ideale Zustand eines additiven Verhaltens von Walzhärte und Ausscheidungshärtung scheint mit dieser Prozessroute so nicht erreichbar zu sein. Jedoch zeigen sich hier noch Ansätze für zukünftige Optimierungen.

2.1.2.2 Ermüdungsfestigkeit NLM-FlexCast-Material und Abguss 1013

An dem recht gleichmäßigen, wenn auch nicht so festen, AlMgSc-Material aus dem 1. NLM FlexCast Simulator Abguss wurden zu besseren Einordbarkeit Ermüdungsuntersuchungen durchgeführt (Abbildung 2.1-20) und direkt gegen den Standard AA 2024T3 (gelbe Ist-Werte-Kurve) gespiegelt. Hier erweist sich das AlMgSc Material sowohl in der Zeitfestigkeit als auch in der Dauerfestigkeit als überlegen. Gerade die Dauerfestigkeit, ermittelt in einem definiert gekerbten Zustand, ist beeindruckend!

Die nachfolgende Überprüfung des FlexCaster Bandguss-Materials aus dem Abguss 1013 dokumentiert ein vergleichbares Verhalten. Wiederum ist die Ermüdungsfestigkeit ähnlich gut, womit klar wird, dass es sich hier eher um eine positive Werkstoff-typ immanente Eigenschaft handelt. Zusätzlich sehen wir in Abbildung 2.1-21, dass die LT-Richtung im Vergleich zur L-

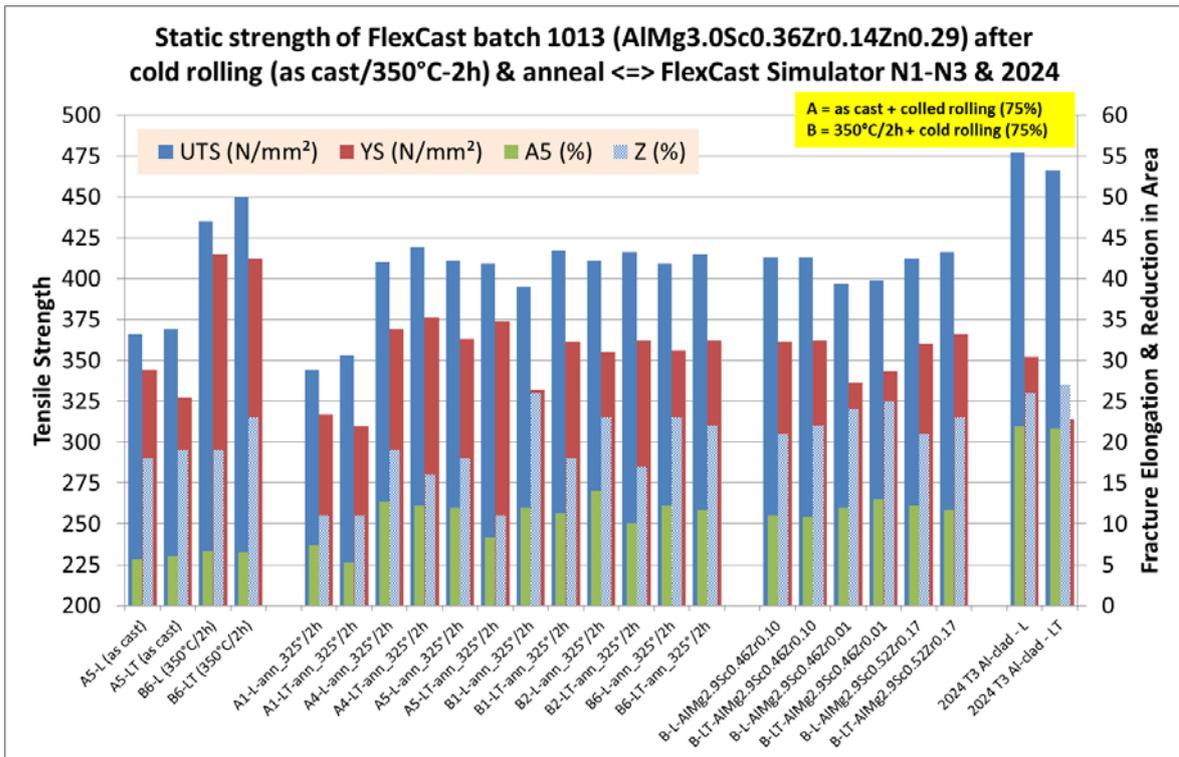


Abbildung 2.1-19: Vergleich der Zugfestigkeitskennwerte des letzten Bandgussversuchs 1013 und des 2. NLM-Versuchs gespiegelt am Luftfahrt Standard AA2024 T3

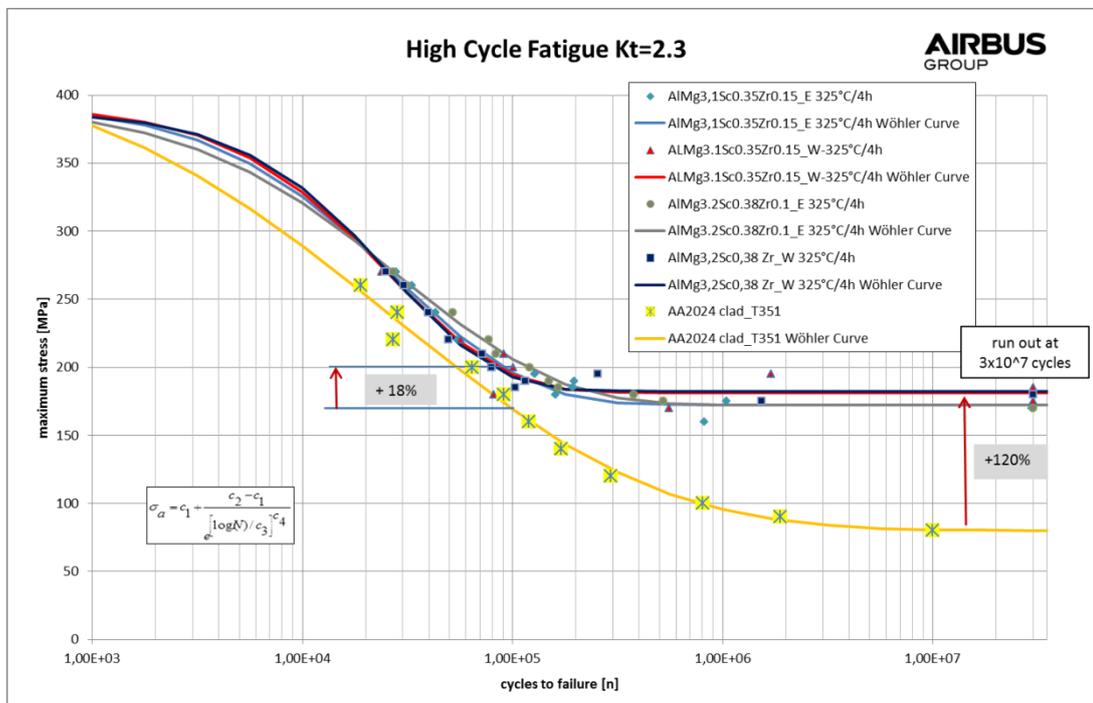


Abbildung 2.1-20: Vergleich der Dauerfestigkeit zwischen AA2024T3 und 4 verschiedenen NLM AlMgSc-FlexCast Legierungen in L-Richtung (gleiches Batch wie in Abb. 3-10 / 3-11)

Richtung etwas „schwächelt“. Das mit getestete AA2024 T3-Los liegt aber auch noch über der Spez.-(Mindest-Werte-)Linie des sich noch leistungsfähigeren AA2524T3 Werkstoff, stellt somit einen guten (konservativen) Vergleich dar. Zusammengefasst kann dem AlMgSc-Bandguss-Material ein sehr gutes Ermüdungsverhalten attestiert werden, welches durch eine noch saubere Mikrostruktur (klassische industrielle Schmelzbehandlung → Entgasen und Filtern) möglicherweise weiter verbesserbar sein sollte.

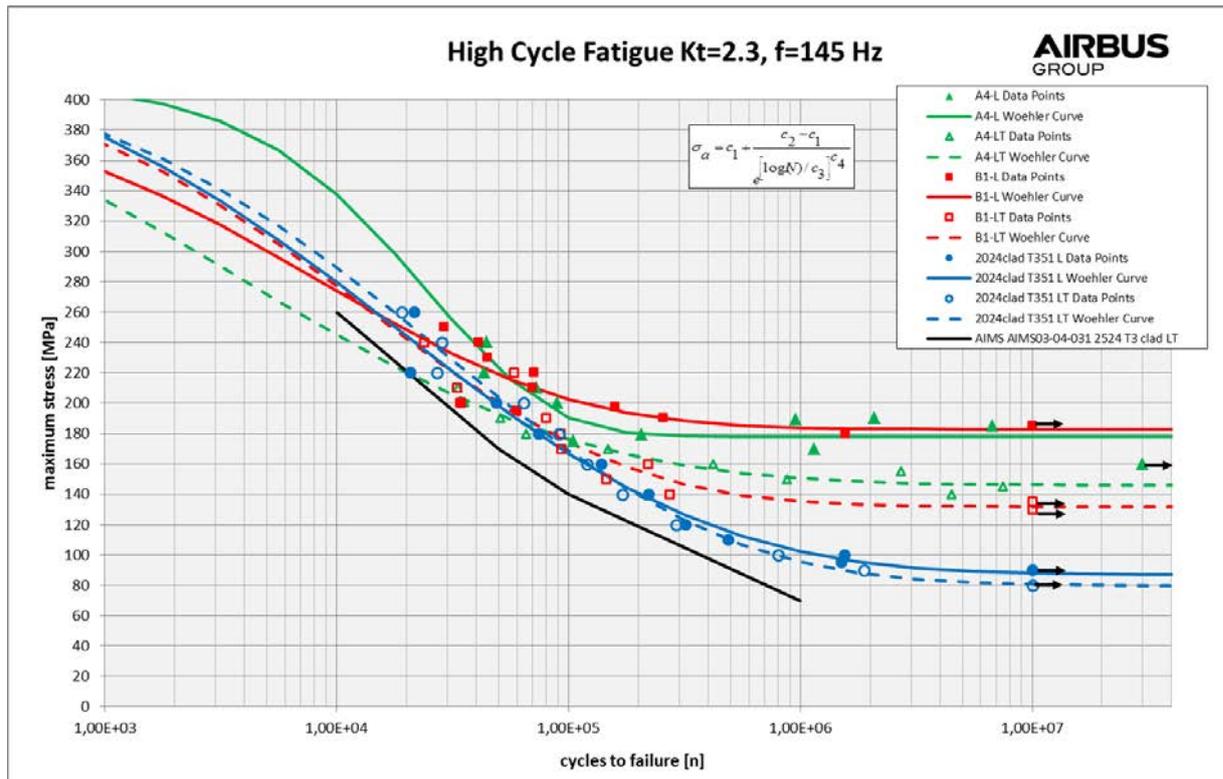


Abbildung 2.1-21: Wöhlerlinien der 2 Bandguss-AlMgSc-Werkstoffvarianten aus dem Abguss 1013 im Vergleich zu AA2024 & AA2534 (Spec.-Werte)

2.1.2.3 Rissfortschrittsverhalten

Bereits nach dem nominellen (zeitlichen) Abschluss des RADICAL-Projektes wurden neben den Dauerfestigkeitsuntersuchungen auch noch Rissfortschrittsuntersuchungen durchgeführt. Diese zeigen ein etwas eigenartiges Verhalten. Das Kurzrisswachstum ist im Vergleich zu AA2024 T3 schlechter als das Mittel- und Langrisswachstum (Wechsellpunkt bei ca. $\Delta K = 20 \text{ MPa m}^{1/2}$). Zusätzlich fällt auf, dass die Zr-freie NLM-FlexCast Simulator Legierungsvariante eine signifikante Rissverzögerung bewirkt (Abbildung 2.1-22). Der Grund hierfür ist unklar. Es gibt aber schon länger den Verdacht, dass Zr zwar gut für die statische Festigkeit ist, aber die AlMgSc-Werkstoffzähigkeit negativ beeinflussen könnte. Die beiden 1013 Abguss-Varianten B (= 350°C vorkonditioniert) und A (nur Kaltwalzen) zeigen in mittleren und höheren ΔK Bereich ein dem AA2024 T3 sehr ähnliches Verhalten (Abbildung 2.1-22, Abbildung 2.1-23). Sie sind damit wiederum auch weitgehend deckungsgleich mit den mit Zr-legierten NLM-AlMgSc-Materialvarianten. Somit offenbaren diese ersten Schadenstoleranz-Bewertungsversuche keine

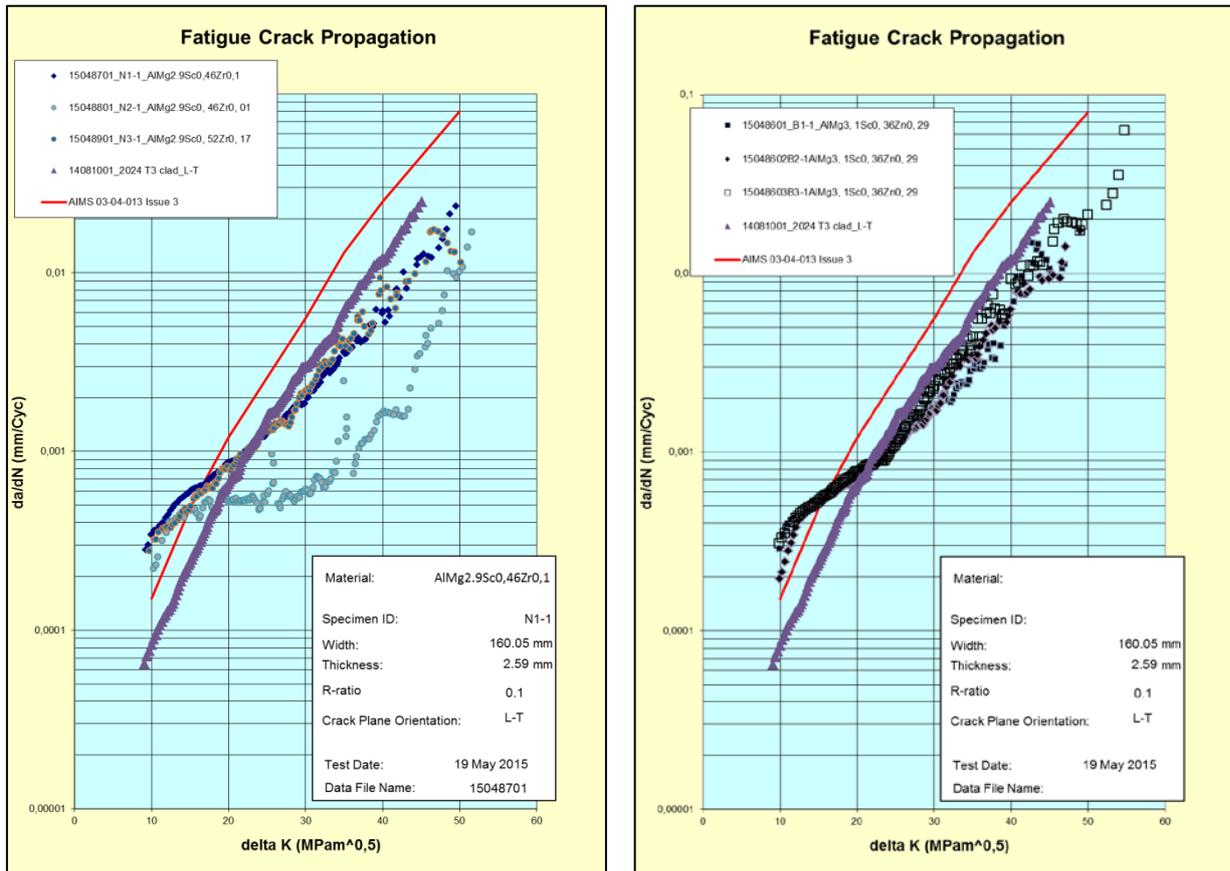


Abbildung 2.1-22: Rissfortschrittmesskurven an NLM Material und Bandguss (1013) Material Typ B

besonderen „pro und cons“. Aufgrund der „Frische“ der vorliegenden Rissfortschritts-Ergebnisse haben tiefer gehende Analysen noch nicht stattgefunden. Spekulationen, was, warum oder wie für das beobachtete Versagensbild entscheidend ist, machen deswegen zurzeit wenig Sinn.

2.1.2.4 Laserstrahl- und Rührreißschweißbarkeit

Zum Schweißverhalten von AlMgSc-Legierungen liegen bei Airbus Group Innovations aus den letzten 15 Jahren sehr viele Daten vor. Die in diesem Abschlussbericht zusammengestellten Versuche und Ergebnisse wurden im Zuge einer Diplomarbeit (Simone Dietrich, TU München „Bewertung und Einordnung des Laser- und Rührreißschweißverhaltens einer neuen AlMgSc-Blechlegierung für zukünftige Luftfahrtstruktur-Anwendungen“, in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen) erarbeitet.

Zwei Verfahren wurden gegenübergestellt, wobei beim Yb-YAG-Laserstrahlschweißen zusätzlich ein Sc-modifizierter Schweißzusatzwerkstoff (SZW) 1571 (russ.) und sein Sc-freier deutscher Counterpart AA5087 Verwendung fanden.

Als wichtiges Merkmal der Schmelzschweißbarkeit wurden neben den obligatorischen Stumpfstoßen zusätzlich eigen-beanspruchte (Erstarrungs)Heißrissproben (sogenannte Keilproben) (Abbildung 2.1-26) ohne Verwendung von SZW hergestellt.

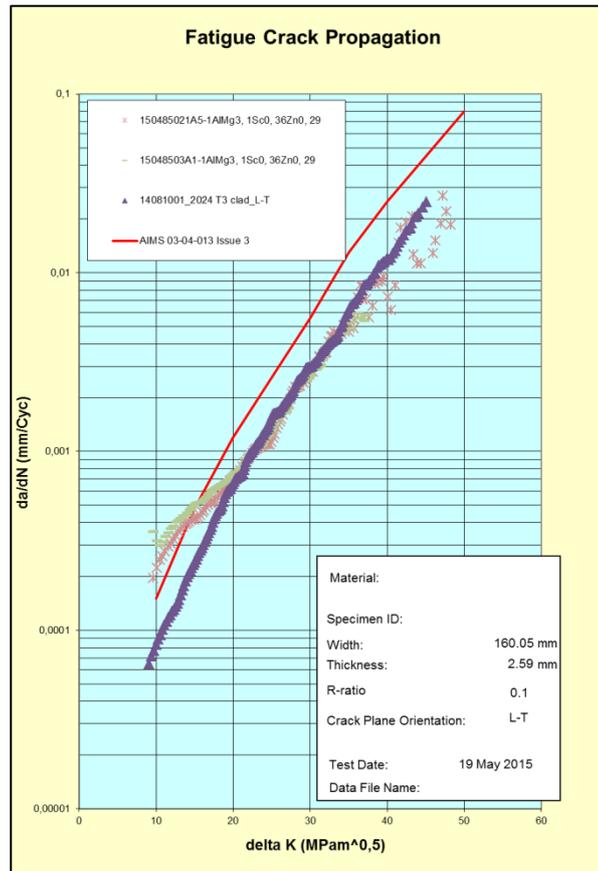


Abbildung 2.1-23: Rissfortschrittmesskurven an Bandguss (1013) Material Typ A

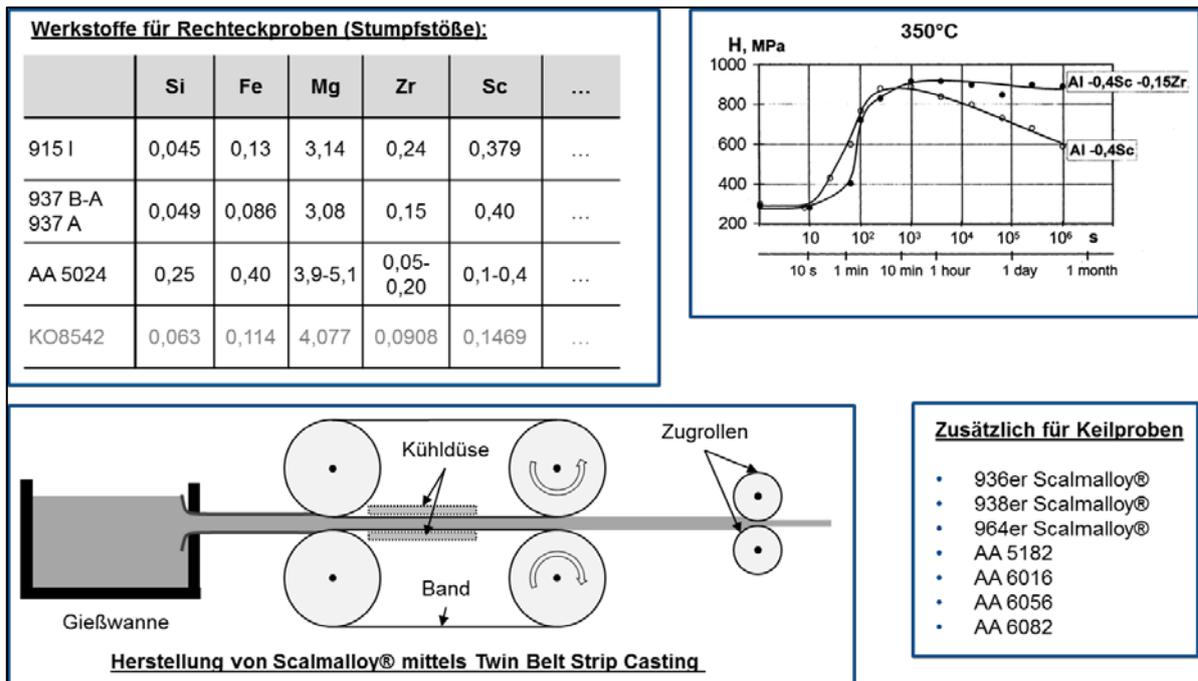


Abbildung 2.1-24: Aufstellung der Versuchsmaterialien für die fùgetechnischen Untersuchungen
⇔ es wurde nur FlexCaster Bandguss Material bewertet (kein NLM-Material)

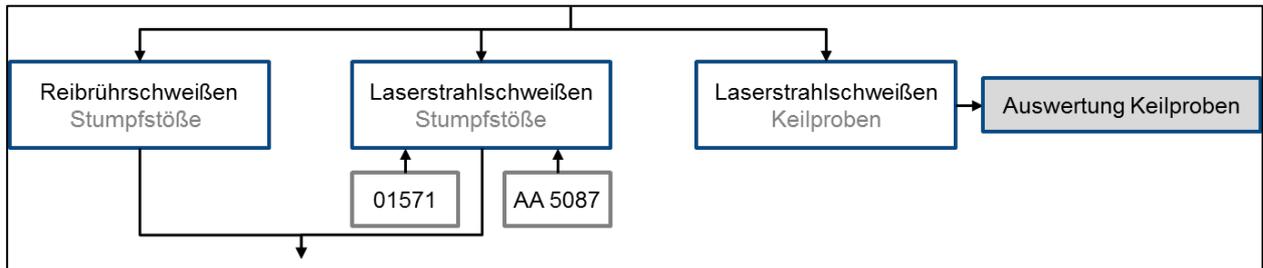


Abbildung 2.1-25: Versuchsgeometrie und Verfahren der Schweißversuche

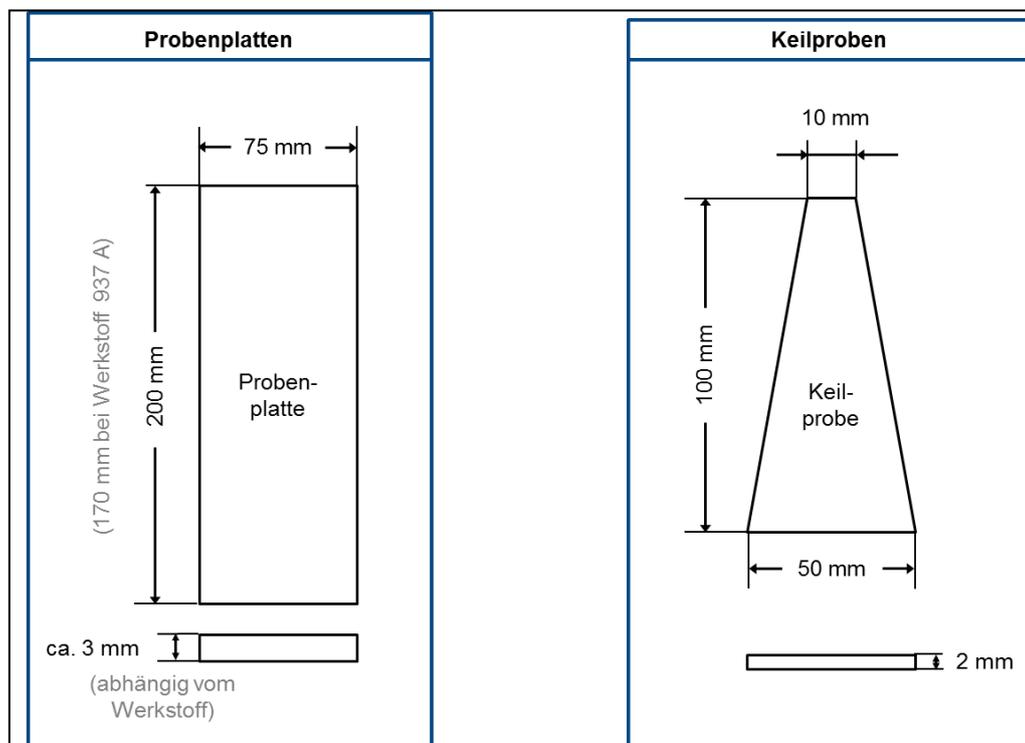


Abbildung 2.1-26: Stumpfstoß-Probengeometrie und Keilprobengeometrie

Hierbei wird von der schmalen Seite aus eine Blindnaht gezogen, welche bedingt durch die Geometrie während der Erstarrung unter Zugspannung steht, und dann, abhängig von der spezifischen Werkstoffempfindlichkeit, die Ausbildung eines Risses provoziert. Je länger dieser Riss ausfällt, desto geringer ist der Widerstand des geschweißten Materials gegenüber der unerwünschten Heißrissbildung.

Das Laserstrahlschweißen (engl. Laser Beam Welding (LBW)) erfolgte auf der AGI eigenen Versuchsanlage unter Verwendung eines hoch brillanten Yb-YAG Scheibenlaser der Marke TRUMPF TruDisk 8002 mit Faserkopplung, 200 mm Brennweite, nominell 0,2 mm Fokussdurchmesser und DINSE Schweißzusatzdraht Zuführung.

Das Reibrührschweißen (FSW = Friction Stir Welding) wurde mit Hilfe eines verstärkten KUKA Schwerlast-Roboter unter Verwendung der unitären Delta-N-FSW-Werkzeug Technologie

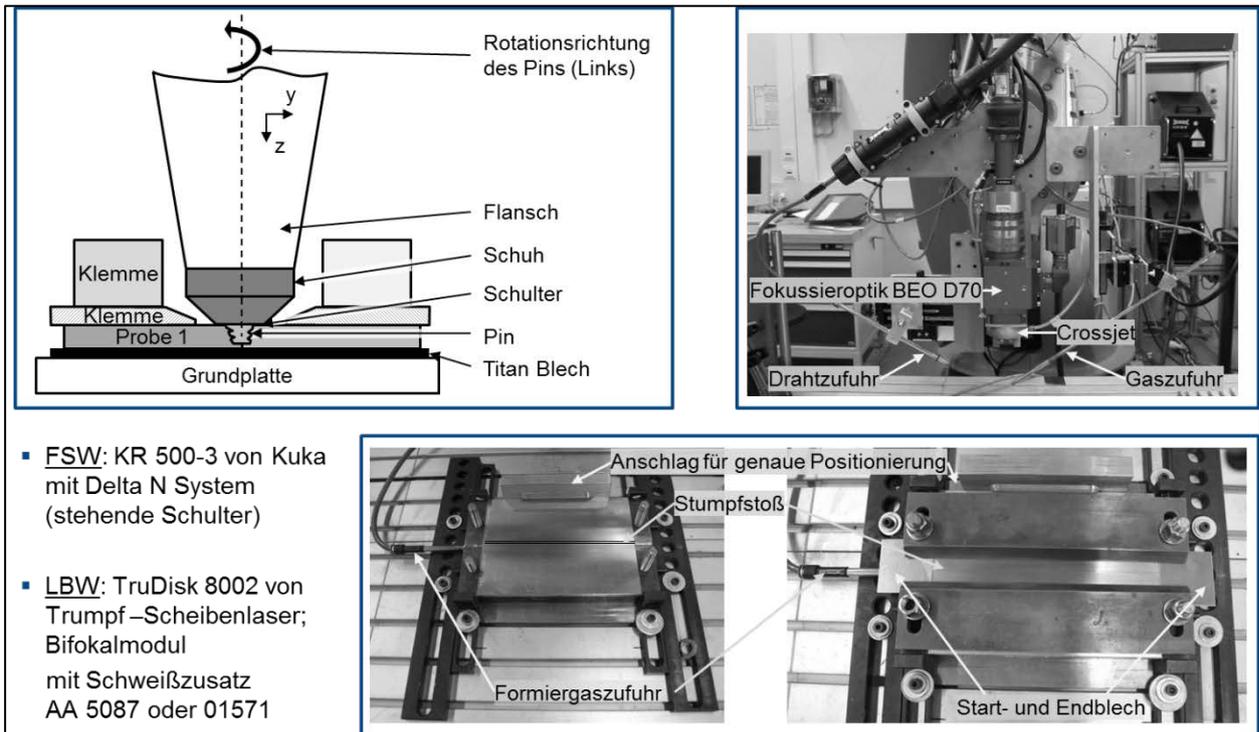


Abbildung 2.1-27: Zusammenstellung der Anlagen- und Spanntechnik für die Laserstrahl- und FSW-Versuche

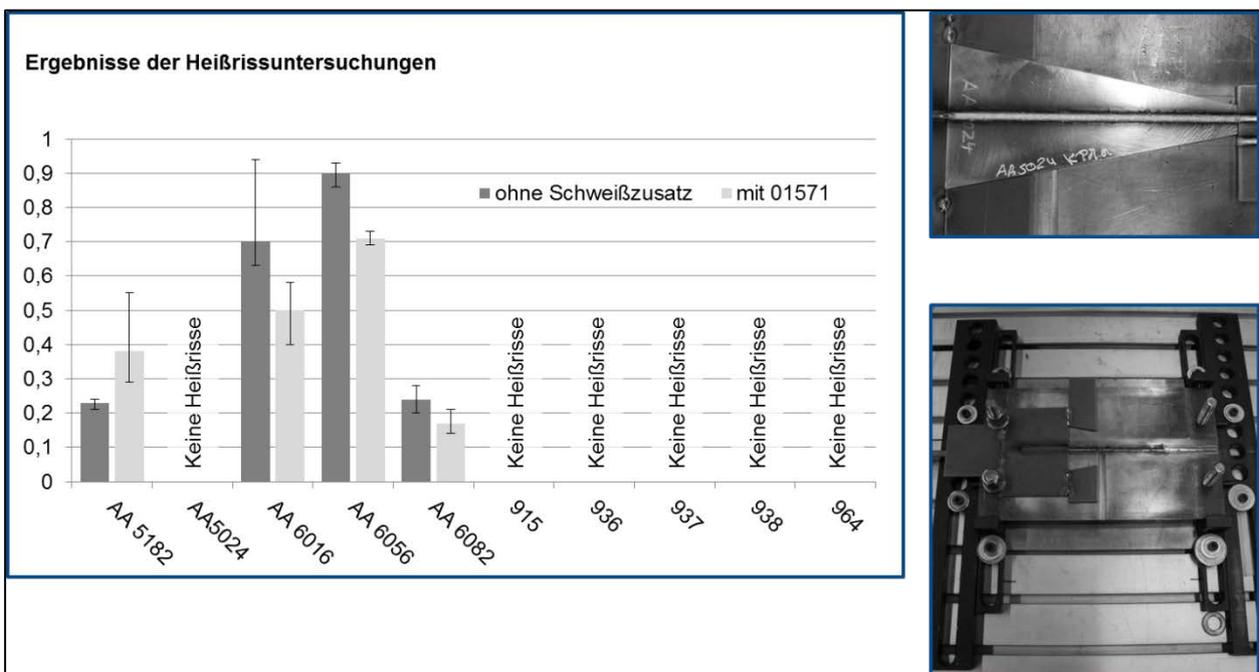


Abbildung 2.1-28: Gegenüberstellung der ermittelten Heißriss-Längen

ausgeübt. Das Delta-N-Werkzeug hat einen rotierenden Pin, aber eine stehende Schulter, ermöglicht somit eine sehr Wärme-arme Schweißverbindung. Da das FSW-Verfahren eine Fü-

gung im festen (teigigen) Zustand geniert, spielen Erstarrungs-bedingte Werkstoffphänomene (wie Heißrisse) keine Rolle. Für beide Herangehensweisen galt es, die passenden Prozessparameter zu finden und im Versuch abzusichern. Dann wurden entsprechende Testkörper hergestellt, visuell und metallografisch begutachtet und dann im Zugversuch zerstörend bewertet.

Die Heißriss-Schweißversuche bestätigten die schon bekannten und somit erwarteten guten Werte der AlMgSc-Legierungen.

Alle getesteten FlexCaster Bandguss-Legierungen 915 / 936 / 938 / 964 zeigten einen großen Widerstand gegen Heißrissbildung, wären dementsprechend gut für späteren Einsatz in geschweißten Flugzeug-Schalenstrukturen geeignet. Die Solidität der Aussage ist daran zu erkennen, dass die Vergleichstest mit klassischen Al-Legierungen (AA6xxx), bei denen Heißrisse zu erwarten waren, diese auch zeigten.

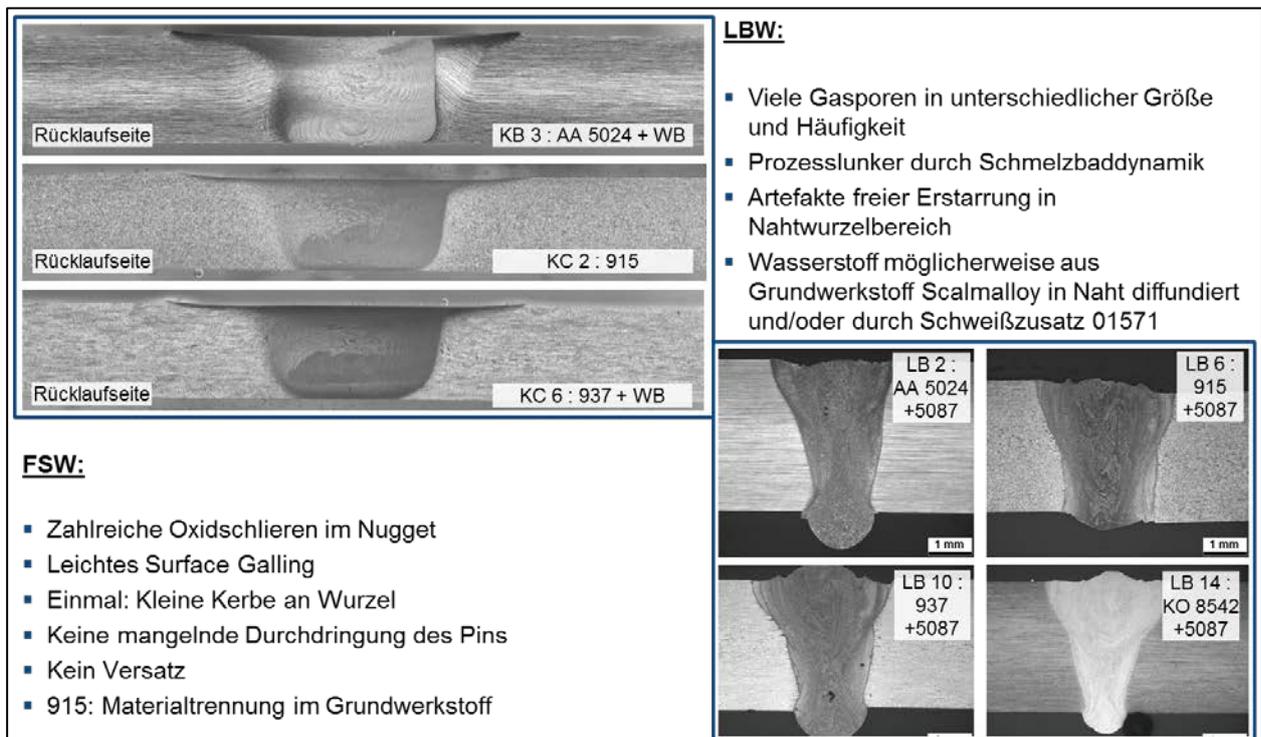


Abbildung 2.1-29: Zusammenstellung von Querschliffen an FSW und LBW Schweißproben

Die metallografische Beurteilung der Schweißnahtqualitäten erfolgte mittels Querschliffe. Hier wurden keinerlei Auffälligkeiten beobachtet. Es konnten Merkmals-arme, Luftfahrtqualität entsprechende Verbindungen reproduzierbar erzeugt werden. Der in den Grundmaterialien immer wieder kritisch bemerkte Wasserstoffgehalt machte sich in den Schweißverbindungen nur sporadisch bemerkbar. Proben, die solche Auffälligkeiten zeigten, wurden von der mechanisch-technologischen Bewertung (Zugversuche) ausgeschlossen.

Wie zu erwarten war, zeigt die Wärmenachbehandlung 325°C/4h einen Ausscheidungshärtungseffekt in der Schweißnahtzone, da in Lösung gegangenes Sc wieder frisch als kohärente Al₃ScZr-Phase auftaucht. Dieser Effekt ist beim Schmelzschweißen deutlich ausgeprägter als

sibilisierung statt und in Folge dessen war auch der Materialabtrag vernachlässigbar. Beide Ausnahmen gehören zur 938 Material-Variante mit höheren 3,6% Mg-Gehalt.

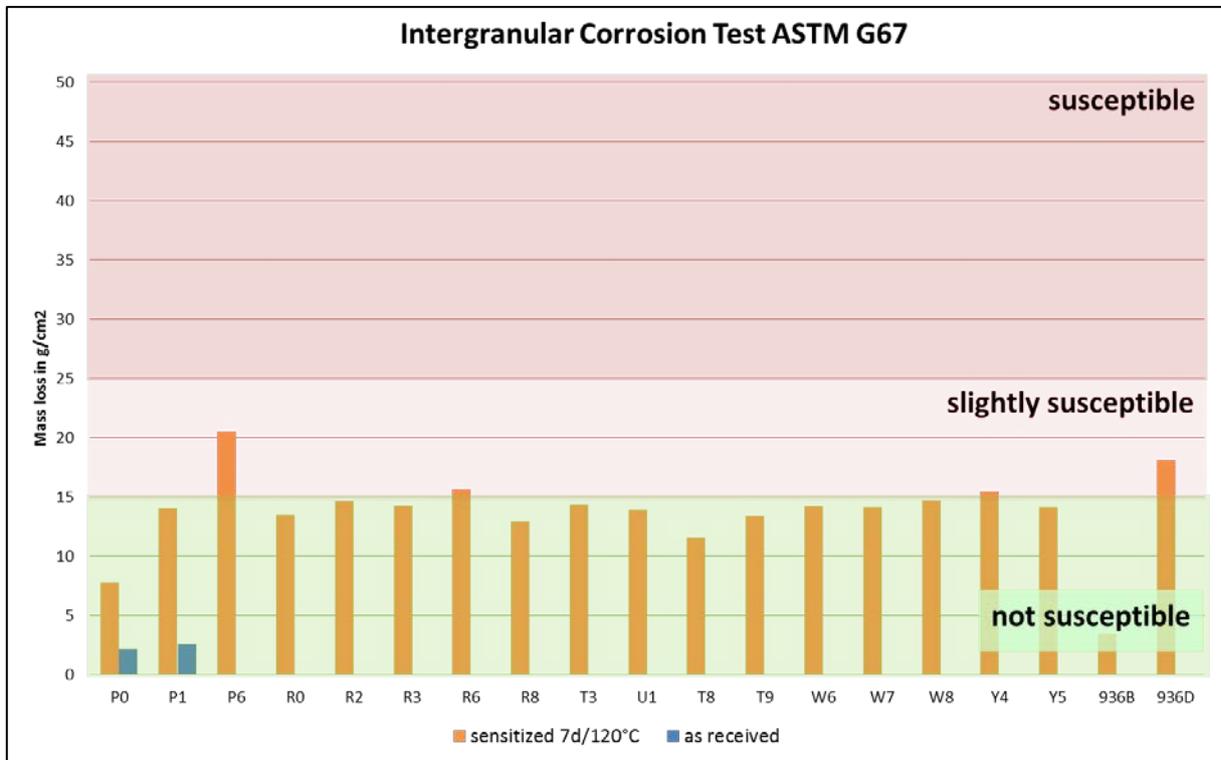


Abbildung 2.1-31: Gegenüberstellung von verschiedenen FlexCaster AlMgSc Blech-Chargen im Korrosionstest

Ergebnisse → Korrosionsverhalten nach ASTM G47/49 (SCC)

Versuchsparameter	
Temperatur	27°C ± 1°C
Luftfeuchtigkeit	45% ± 10%
Testlösung	3,5% NaCl
pH-Wert	6,4 - 7,2
Prüfspannung [N]	75%Rp0,2

- Kein Bruch der Proben nach 30d
- Test auf 42 Tage (1000h) verlängert
→Kein Bruch, kein Riss
- In keinem Fall wurde Sensibilität für Spannungsrisskorrosion festgestellt.

T9; sensibilisiert (120°C/7d);
Makroaufnahme nach Test; oben
Seite 1, unten Seite 2

Abbildung 2.1-32: Spannungsrisskorrosion nach ASTM G47/49

Die Untersuchungsergebnisse zum, in der Luftfahrt sehr unerwünschten sprich gefürchteten, Spannungsrisskorrosionsverhaltens sind in Abbildung 2.1-32 dargestellt. Der Test beweist, dass bandgegossenes AlMgSc-Material keinerlei Einschränkungen durch potentielle Spannungsrisskorrosion unterliegt.

Das entwickelte Material ist also deutlich besser als klassische Al-Luftfahrtwerkstoffe der 2xxx, 7xxx oder 2xxxLi – Gruppen, welche alle einen knockdown Faktor für Spannungsrisskorrosion berücksichtigen müssen. Abgeschlossen wurden die Untersuchungen durch Bewitterungsversuche in NaCl, um den Widerstand gegen Loch- oder Muldenkorrosion bestimmen zu können. Dieser in einer NaCl-Lösung durchgeführte Versuch zeigte erneut ein recht konservatives Verhalten der neuen Band-gegossenen AlMgSc-Legierungen.

ASTM G66		P0_1	P0_2	P1_1	P1_2	P6_1	P6_2	R0_1	R0_2	R2_1	R2_2	R3_1	R3_2	R6_1	R6_2	R8_1	R8_2
Pitting/ Pit- blistering	N	X	X				X										
	PA			X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PB																
	PC																
Exfoliation	EA							X						X		X	
	EB																
	EC																
	ED																

ASTM G66		T3_1	T3_2	T9_1	T9_2	U1_1	U1_2	W7_1	W7_2	W8_1	W8_2	Y4_1	Y4_2	Y5_1	Y5_2
Pitting/ Pit- blistering	N														
	PA		X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X
	PB														
	PC														
Exfoliation	EA	X		X	X	X		X		X					
	EB														
	EC														
	ED														

Final discrimination between PA (Pit blistering) and EA (slight exfoliation) can be given after metallographic investigation

sensitized 7 days /120°C **X** after metallography

Abbildung 2.1-33: Bewertung des Widerstand gegen lokale Korrosion (Lochfraß) nach ASTM G66

2.1.3 Zusammenfassung

Es konnte im Laufe des Projektes nachgewiesen werden, dass das neue AlMgSc (Scalmalloy®) Werkstoffkonzept mit geringen Mg-Gehalten und deutlich höheren Sc-Gehalten als das etablierte AlMgSc-Material der Fa. ALERIS (AA5024 und AA5028) über eine innovative Schnellerstartmethode („Twin belt strip casting = FlexCaster®-Technologie der Fa. NOVELIS) darstellbar ist. In Kombination mit einem angepassten Wärmebehandlungskonzept, wobei die Gussmikrostruktur vor dem ersten Kaltwalzstich zur verbesserten Kaltwalzverfestigung eine Voraushärtung erfährt, und einer angemessenen Materialdurchschmiedung (Dickenreduktion von $\geq 75\%$ (Startdicke 10 mm)) konnten nach definierter Rückglühung (325°C/2 - 4h) Festigkeit von bis zu 450 N/mm², Streckgrenzen von bis zu 415 N/mm² und Dehnungswerte von bis zu 15% gemessen werden. Leider war die Kennwert-Reproduzierbarkeit durch unerwünschte Wasser-

stoff-Einlagerung im Gussmaterial (→ Porenbildung nach Wärmebehandlungen) eingeschränkt. Insbesondere die Werkstoffduktilität zeigte deswegen starke Schwankungen. Nichtsdestotrotz sind die zusätzlich ermittelten dynamischen Kennwerte (Ermüdung und Rissfortschritt) ermutigend, denn sie liegen schon heute ähnlich gut oder sogar über den von etablierten Luftfahrtwerkstoffen wie AA2024 T3, obwohl die Mikrostruktur durch die Wasserstoffproblematik noch sicher verbesserbar ist. Dies wird auch durch die werkstofftechnischen Vergleiche mit den von der japanischen Fa. NLM produzierten AlMgSc-Proben untermauert. Auch wenn diese dort nicht mit einem Strip-Caster hergestellt wurden, sondern unter Nutzung eines sogenannten FlexCast-Simulators (Labor-Strangguss-anlage mit Intensiv-Kühlung) aber bei vergleichbaren Abkühlbedingungen entstanden sind. Neben den metallurgischen und verfahrenstechnischen Fragestellungen konnte im Projekt die grundsätzliche Verarbeitung mittels Schweißen (Reib-Rühr-Schweißen und Laserstrahlschweißen) erfolgreich nachgewiesen werden. Des Weiteren bestätigten Korrosionsversuche das prognostizierte gute Werkstoffverhalten mit sehr hohem Korrosionswiderstand. Jedoch hat der beabsichtigte semi-industrielle Großgießversuch auf der 2200 mm breiten Bandgießanlage bei der Fa. Nippon Light Metal (NLM) Co. In Kambara, Japan nicht mehr stattgefunden. Dieses Projektziel wurde somit (noch) nicht erreicht.

2.1.4 Ausblick

Das neu entwickelte Werkstoffkonzept basierend auf dem Schnellerstarrungsverfahren Twin-Belt-Strip-Casting der Fa. Novelis zeigt vielversprechende Eigenschaften und scheint die Airbus Werkstoffvorgaben für ein AlMgSc-Material der 2. Generation mittelfristig erfüllen zu können. Hierfür ist es aber unabdingbar, dass industriell „sauberes“, sprich Wasserstoff freie Guss-Material zur Verfügung steht, um dann passend thermo-mechanisch als Blech dargestellt zu werden. Auch wenn das BMWi Projekt RADICAL nun ausgelaufen ist, wird seitens AGI mit noch vorhanden Restmaterial des Abguss 1013 weitergeforscht und mit etwas Glück der industrielle Groß-Gießversuch auf der FlexCaster-Anlage bei NLM im Kambara (in 2016) nachgeholt.

2.1.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Flugzeuge bzw. die weltweite Vernetzung durch Lufttransport (Mensch & Material) sind aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Sie sind ein wichtiger Bestandteil unseres Wirtschaftslebens. Obwohl sie bereits einen hohen Entwicklungsstand in Bezug auf Leistung, Sicherheit und Komfort erreicht haben, verlangen vor allem wirtschaftliche – insbesondere der Wettbewerbsdruck -, aber auch legislative Randbedingungen, z. B. in Bezug auf Emissionen, eine ständige Weiterentwicklung. Innovative Technologien sind erforderlich, die dazu beitragen sollen, weitere Fortschritte zu erzielen, vor allem in den Bereichen Transportleistung, Umweltverträglichkeit, Sicherheit und Passagierfreundlichkeit, sowie Effizienz sowohl im Betrieb als auch bei Wartung und Instandsetzung.

Neue Werkstoffe (wie z.B. AlMgSc-Bleche), Bauweisen (→ geschweißte Druckrumpfstrukturen) und Technologien können dazu beitragen, die Leistungsfähigkeit zukünftiger Luftfahrzeug weiter zu steigern. Das geförderte LUFO-Projekt RADICAL hat mit der Bewertung eines neuen Werkstoffherstellungskonzepts für korrosionsbeständige AlMgSc-Blechwerkstoffe einen entsprechenden Beitrag dazu geleistet.

Dabei konnte gezeigt werden, dass die schon vor einigen Jahren entwickelte Grundidee funktioniert. Das Material besitzt eine bessere Festigkeit als die derzeit entwickelten AlMgSc-Blechlegierungen (AA5024 & AA5028) der Fa. ALERIS, eignet sich für geschweißte Rumpfstrukturen und offenbart eine deutlich besser Korrosionssicherheit. Diese Aussagen wären ohne Durchführung der geförderten Entwicklungsmaßnahme so nicht möglich gewesen.

2.1.6 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan

Airbus Group Innovations (AGI) als übergeordnete Konzernforschung der Airbus Group befasste sich im Rahmen dieses Vorhabens mit der Untersuchung neuer Bauweisen und Technologien für eine spätere Anwendung in der Luftfahrt. Die Nutzung bzw. die Verwertung der erzielten Ergebnisse erfolgt über Synergieeffekte in der gesamten Airbus Group, vorrangig aber in den Bereichen Airbus Operations (Airbus Deutschland GmbH), dem zivilen Flugzeugbauer in der Airbus Group. Hierbei spielt die zukünftige Partnerschaft mit einem potentiellen Blechmaterial-Hersteller eine große Rolle. Nippon Light Metal Company (NLM), Japan, betreibt eine industrielle FlexCaster-Bandgießanlage. Deswegen wurde die entsprechende Kooperation innerhalb dieses Projektes begonnen, auch aus dem Bewusstsein heraus, dass in Deutschland leider keine passende Anlagentechnik zur Verfügung steht. Hier gilt es nun den technischen Reifegrad der Technologie von ~ TRL 3 in den kommenden 2 Jahren auf ~ TRL 6 anzuheben, um die angestrebte Implementierung für zukünftige Airbus-Flugzeugprojekte möglich zu machen. Zusätzlich wird erkennbar, dass das entwickelte AlMgSc-Werkstoffkonzept auch für weiterentwickelte sogenannte GLARE-Komposite, wie sie zurzeit intensiv im Druckrumpf des Airbus A380 Verwendung finden, tauglich ist. Eine Übertragung/Fortführung der Technologie in das nun anlaufende LUFO-Projekt AUTOGLARE erscheint sinnvoll und zielführend.

Weiter Gesichtspunkte der Verwertung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare Verwertungsmöglichkeiten.*

Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen wurden nicht gemacht.

- *Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – z.B. auch funktionale / wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen / -industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt).*

Die Arbeiten dienen dem wirtschaftlichen Erfolg des Konsortialführers Airbus Group

- *Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z.B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.a. einzubeziehen.*

Fortsetzung der Entwicklungsarbeiten in Zusammenarbeit mit NLM zur Erzielung höherer TRL Grade (6 – 9)

- *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse.*

Fortsetzung der Entwicklungsarbeiten zur Darstellung von dünnen Folien (0,3 – 0,5 mm Dicke) als Basis einer Herstellung von verbesserten GLARE-Materialien (→ LUFO V-2 AUTOGlare) in Zusammenarbeit mit NLM

2.1.7 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind im Projektzeitraum keinerlei andere Forschungsergebnisse zu diesem Thema bekannt geworden.

2.1.8 Veröffentlichungen, Vorträge

Es hat keine gesonderten Veröffentlichungen und Publikationen gegeben. Es wurden jedoch im Laufe des Projekts zwei Studienabschlussarbeiten durchgeführt:

- Simone Dietrich (Diplomarbeit, TU München) „*Bewertung und Einordnung des Laser- und Rührreißschweißverhaltens einer neuen AlMgSc-Blechlegierung für zukünftige Luftfahrtstruktur-Anwendungen*“, in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen)
- Sükran Zamur (Bachelor-Arbeit, Hochschule Aalen) „*Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften und des Korrosionsverhaltens einer neuartigen Al-Mg-Sc Legierung für zukünftige Luftfahrtstrukturen*“.

2.1.9 Literatur

- [1] Toropova, L.S.; Eskin, D.G.; Kharakterova, M.L.; Dobatkina, T.V., Advanced Aluminum Alloys containing Scandium, Gordon and Breach Science Publishers **1998**, p. 11–19
- [2] Seidman D.N., Marquis E.A., Dunand D.C, Acta Materialia 50 (**2002**) p. 4021–4035

2.2 AP2: FSW-Werkzeugentwicklung für MCA/FAL-Anwendung

Autor: J. Silvanus

2.2.1 Aufgabenstellung

Ziel im Arbeitspaket AP2 ist die Entwicklung und Bewertung von Werkzeugen für das Rühr-Reißschweißen. Diese müssen unter den Randbedingungen der Endmontage Fertigung des Geschäftsbereiches AIRBUS Operations betrieben werden können.

2.2.2 Voraussetzungen

Die Randbedingungen sind wie folgt:

1. Für das Schweißen von Längs- und Umfangsnähten in der Sektionsmontage muss das Rühr-Reibschweißwerkzeug die für den Prozess charakteristische vertikale Prozesskraft in sich selbst aufnehmen. Es kann, bedingt durch die Geometrie der Fügeteile, keine Vorrichtung zur Aufnahme der Kraft genutzt werden. Daher ist die Entwicklung von so genannten 2-Schulter-Werkzeugen notwendig.
2. Die Prozessführung soll von extrem hoher Robustheit gekennzeichnet sein, weil eine eventuelle intensive Nacharbeit einer merkmalsbehafteten Schweißung oder sogar eine Verschrottung in diesem Status der Montage nicht hinzunehmen ist. Das Hauptaugenmerk in der Prozessentwicklung gilt der Darstellung von hochqualitativen RührReibschweißungen an den relevanten Legierungen EN-AW 6013, 6056, 2024, 2198 und 5024/-28 sowie der Vermeidung einer ungenügenden Durchschweißung.

2.2.3 Planung und Ablauf

Die Arbeiten innerhalb des RADICAL AP2 verliefen iterativ und zu einem sehr hohen Anteil empirisch.

Die Prämisse war, dass ein DeltaN1 Schweißwerkzeug grundsätzlich in die Lage versetzt werden kann, die gestellten Anforderungen zu erfüllen: Die Wärmegenerierung eines drehenden Pins und von nur einer anstatt zweier drehender Schultern soll an die Bedürfnisse aller relevanter Aluminiumblechhalbzeuge anzupassen sein.

Ausgehend von dieser Prämisse war vorwiegend der Pin des Schweißwerkzeuges Gegenstand von Änderungen, Optimierungen und auch grundsätzlichen Umbrüchen seiner Gestalt. Letztere führten zu einer Patentanmeldung wegen neuartiger Bauweise und Methode.

Die Prozessentwicklung begann mit den Legierungen, die die beste Eignung für das Rührreibschweißen mit 2-Schulter-Werkzeug aufweisen. Dies sind die Legierungen EN-AW 6013 und – AW6056. Danach wurden in Form der Legierungen EN-AW2024 und -AW2198 der Anspruch erhöht. Innerhalb RADICAL gelang es nicht, die Legierungen mit höchstem Anspruch weil extrem hohem Prozesskraftbedarf, die AlMgSc Varianten EN-AW5024 und –AW5028 merkmalsfrei zu schweißen. Diese Aufgabe wurde in das LuFo5-1 Nachfolgeprojekt NEWEFE übertragen und mittlerweile erfolgreich bearbeitet, so dass zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Abschlussberichtes das komplette Spektrum an Blechhalbzeugen für den Einsatz in der Flugzeugrumpfstuktur mittels DeltaN1 2-Schulter-Rührreibschweißwerkzeug fügetechnisch bearbeitet werden kann.

2.2.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Technisch geht es in dem RADICAL AP2 um das Fügen. Darunter um das thermische Fügen und dabei wiederum um das Festkörperschweißen. Das Reibschweißen ist eine Variante dessen. Von den 3 Verfahren des Reibschweißens ist das Rühr-Reibschweißen das einzige, das zur Reibwärmegenerierung nach einem Werkzeug verlangt.

Reife und mittlerweile auch sogar Großserienfertigung werden mit dem Rühr-Reibschweißen in seiner Standardkonfiguration oder der Variante mit der Markenbezeichnung DeltaN FS ausgeführt. Beide zeichnen sich durch eine Werkzeuggestalt bestehend aus einem Schaft, einer Schulter und einem Pin aus. Die vertikale Prozesskraft wird durch die Fügepartner hindurch in eine stabile Grundplatte, die Teil der Spannvorrichtung ist, abgeführt.

Bei der 2-Schulter-Werkzeug Rührreibschweißprozessvariante wird die vertikale Prozesskraft nicht aus dem Werkzeug herausgeleitet, sondern bleibt innerhalb dessen, also zwischen den beiden Werkzeugschultern. Das beansprucht diese Werkzeuge sehr und führt zu einer stark reduzierten Haltbarkeit oder Standzeit der Werkzeuge.

Industrieller Einsatz eines Ursprungstyps ist die Herstellung von Raumfahrtkomponenten. Die Materialdicken dabei sind für die Nutzung solcher Werkzeuge attraktiv, weil die große Wärmemenge, die bei 2 rotierenden Schultern, einem rotierenden Pin und keiner Wärme abführenden Grundplatte ansteht, hierbei von den Fügepartner abgeführt wird. Ist der Materialquerschnitt deutlich dünner als die 8 bis 12 mm der Raumfahrtstrukturkomponenten, so ist der Einsatz von konventionellen 2-Schulter-Rührreibschweißwerkzeugen sehr stark eingeschränkt – es ist nur noch die Verwendung an sehr gut wärmeleitenden 6xxx Aluminiumlegierungen möglich.

Die technischen Interessen für den Flugzeugdruckrumpf sind nur mit geringer Priorität an 6xxx Legierungen und mit hoher Priorität aus 2xxx und 5xxx Legierungen.

Dieser Bedarf hat die Entwicklungsaktivitäten an dem DeltaN1 2-Schulterrührreibschweißwerkzeug ausgelöst: Das Nicht-Rotieren einer der beiden Schultern verringert die Wärmegenerierung signifikant und erlaubt den Einsatz dieses Werkzeuges an, wie sich zum Projektende ergab, allen relevanten Flugzeugdruckrumpflegierungen.

2.2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das RADICAL AP2 ist inhaltlich vernetzt:

Der Projektpartner und industrielle Endanwender Airbus Operations definierte die Randbedingungen, die für die Werkzeugentwicklung für den Einsatz in der Endmontage gelten. Zeitlich nach der Definition wurde in regelmäßigen Arbeitsfortschrittsbesprechungen sowie streng formalen internen TRL Reifegradreviews der AP Zustand erfasst und gegebenenfalls für den nächsten Bearbeitungszeitraum angepasst.

Der produktionstechnisch forschende und ebenfalls von Airbus Operations inhaltlich gesteuerte Projektpartner Fraunhofer IWS hatte die Funktion des Empfängers der bei Airbus Group entwickelten 2-Schulter-Rührreibschweißwerkzeuge. Diese wurden zunächst dort in eine so genannte Pentapod Bearbeitungsmaschine eingesetzt und betrieben sowie danach und bis zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Abschlussberichtes in dem dortigen schienengeführten MUVAX Handhabungssystem.

Beide Zusammenarbeiten haben zur vollsten Zufriedenheit der Beteiligten funktioniert und geschahen sowohl elektronisch als auch in Form persönlicher Anwesenheit.

2.2.6 Ergebnisse

Explizit wurden Zwei-Schulter-Rührreibschweißwerkzeuge entwickelt.

Um deren Wärmeeintrag moderat zu halten, ist entweder eine oder sind beide Werkzeugschultern nicht rotierend ausgelegt.

Das so genannte DeltaN1 Werkzeug verfügt über einen rotierenden Pin, eine rotierende Schulter und eine stehende Schulter. Es hat im Rahmen des Projektes und in enger Kooperation mit den Kollegen von Airbus Operations den formalen Reifegradstatus TRL3 erreicht. Dieser Status gilt für die Nutzung des Werkzeugs unter Bedingungen der Endmontage wie oben beschrieben und für die Verwendung an den Legierungen EN-AW 6013, 6056, 2024 und 2198. Die Werkstoffgruppe AlMgSc mit ihren Vertretern EN-AW 5024 und 5028 überlasten das Werkzeug und sind darum ausgeschlossen. Die Haltbarkeit des DeltaN1 Schweißwerkzeuges wurde empirisch und wiederholt ermittelt und beträgt größer 34 Meter. Damit können Rumpfschalenlängen der Airbus A320 und 330 von 12 bzw. 16 Metern mit 2facher Sicherheit gegen Pin-Bruch geschweißt werden.

Ein weiteres erreichtes Ziel ist die Hardware und Prozessentwicklung des Rührreibschweißens mit einem Schweißwerkzeug, das über 2 nicht-rotierende Schultern verfügt – intern DeltaN2 genannt. Der zunächst angestrebte Ansatz, das DeltaN1 Werkzeug als Basis für DeltaN2 zu verwenden, musste früh verworfen werden. Die Belastung, die der Werkzeuginnenteil durch die nicht-drehende untere Schulter und die, aufgrund der geringeren Wärmegenerierung, auch geringeren Schweißgutentfestigung erfährt, führt zu einem sehr frühzeitigen versagen des Pins. Aus diesem Grund wurde das DeltaN2 Prinzip als eine Verfahrensvariante des Tatumaki Rührreibschweißprozesses weiterentwickelt. Hierbei sind ebenfalls 2 nicht-drehende Schultern im Einsatz, allerdings sind diese mechanisch entkoppelt und belasten daher nicht den Pin. Das Verfahren Tatumaki by DeltaN FS wurde innerhalb des Projektes parallel zum DeltaN1 Werkzeug bearbeitet und es konnten am Projektende sämtliche relevanten Legierungen in Dicken zwischen 1,2 und 4 mm geschweißt werden. Mit merkmalsfreien Rührreibschweißungen eines Mehrschulterwerkzeugs an AlMgSc, explizit EN-AW 5024, gab es zudem eine Weltpremiere.

Insbesondere die Entwicklung des DeltaN2 Schweißwerkzeuges ist ein inhaltlicher Schwerpunkt des LuFo 5-1 Projektes NEWEFE.

Die Arbeiten zur Zielerreichung waren über den 3-Jahres-Projektzeitraum im Detail wie folgt. Die Aktivitäten schlossen zeitlich bündig an die Inhalte des LuFo 4-3 ENWERUM Projektes an.

Es wurde das Werkzeugdesign erfolgreich weil kerbärmer modifiziert, um neben den 6xxx Aluminium Legierungen jetzt auch 2xxx Legierungen ohne frühzeitigen Werkzeugbruch schweißen zu können. Diese Schweißungen weisen einen attraktiv hohen schweißtechnischen Wirkungsgrad von circa 90% auf.

Des Weiteren wurden vorbereitende Maßnahmen ergriffen, um eine darüber hinaus deutlich belastbare Werkzeug Pin Variante empirisch in ihrer Tauglichkeit zu bestimmen: Hierbei ist der Pin hohl gebohrt um, einem Rückgrat gleich, ein keramisches Innenteil aufzunehmen, welches bei Prozess Temperatur mit hohem E-Modul das elastische Biegen des Pins unter Prozesslast reduziert. Die Inlays wurden spezifiziert, bestellt und aus 2 Keramikwerkstoffen unterschiedlichen Charakters geliefert. Der Zusammenbau zu einem funktionsfähigen DeltaN1 Schweiß-

werkzeug gelang nicht, weil die Duktilität der keramischen Bestandteile gegen die hohen Montagekräfte nicht ausreichte.

Zum Nachweis des theoretischen Potenzials eines hybriden Schweißwerkzeugpins wurden Finite-Elemente (FE) Berechnungen für verschiedene Werkzeugvarianten durchgeführt. Die Motivation zur Durchführung der aufwändigen Berechnungen ist zum einen, Kenntnis über den Ort der maximalen Spannung unter Prozesslasten zu erlangen, zum anderen, den Effekt einer Bauweisen Variante zu ermitteln, die sich deutlich von der vorherigen unterscheidet. Bei dieser neuartigen Bauweise besteht der zentrale Schweißwerkzeug Pin nicht mehr nur aus einem Teil, sondern er ist als Werkstoffverbund aufgebaut. Der lokale Werkstoffeinsatz ist jeweils entsprechend der Eigenschaften: Es gibt einen äußeren Teil, der einen attraktiven Reibkoeffizienten zu den Fügeteilen aufweist, sowie einen inneren Teil, der eine relativ hohe Steifigkeit gegen Verbiegen und damit Ermüdung aufweist. Die FE Berechnung ergibt eine circa 20% bessere Biegesteifigkeit dieses Konzeptes. Die Bauweise und die Verwendung des Werkzeugs wurde unter DE 10 2012 010 916.4 als Patent angemeldet.

Des Weiteren wurde ein 2-Schulter-Rührreißschweiß Werkzeug erdacht und bereits realisiert, das sich ebenfalls durch eine verbesserte Steifigkeit gegen Verbiegen auszeichnet. Hierbei sind die beiden Werkzeugschultern nicht durch einen einzelnen Pin miteinander verbunden, sondern durch eine Anordnung mehrerer dünnerer Pins. Diese sind theoretisch um den circa Faktor 3 biegesteifer als der einzelne Pin. Auch diese Bauweise und die Verwendung des Werkzeuges wurde unter DE 10 2012 025 140.8 als Patent angemeldet. Die empirische Bewertung dieser 2-Schulter-Werkzeugvariante mit multiplem Pin ergab eine grundsätzlich hohe Belastbarkeit allerdings mit dem intensiven Nachbesserungsbedarf, was die Fixierung der unteren Werkzeugschulter an der 3-Pin-Anordnung betrifft. Weil die Pins konturfrei weil kerbfrei gestaltet sind, ist die Anbringung der unteren Werkzeugschulter ausschließlich über Kraftschluss nicht tauglich. Die vertikale Position der Schulter verändert sich durch die hohen Prozesskräfte, die zwischen der oberen und der unteren Werkzeugschulter im Einsatz herrschen. Es wurde an einer verbesserten Fixierung, die dennoch idealerweise kerb-frei ist, gearbeitet.

Es fand eine Bestimmung der Eignung alternativer Werkzeug-Pin-Werkstoffe statt. Es ist so, dass für die Schweißaufgaben mit 2-Schulter-Werkzeugen sich nur ein Werkstoff als Bevorzugter für die Anwendung als Schweißstift/Pin eignet: Es handelt sich um die Legierung mit dem Handelsnamen MP159 des amerikanischen Herstellers Timken. Diese Situation ist für eine spätere Industrialisierung des Prozesses von Nachteil und deswegen werden nach Gelegenheit weil Verfügbarkeit Alternativwerkstoffe in Ihrer Eignung bewertet. Im Oktober 2012 fanden Gespräche mit Fa. Böhler-Uddeholm, Kapfenberg, Österreich, statt und es gab in Folge eine Bemusterung mit 2 Werkstoffen, die nach Einschätzung für die Anwendung als Schweißstift taugen könnten. Es handelt sich in beiden Fällen um pulvermetallurgisch hergestellte Werkstoffe. Die eine Option ist eine Kobalt-Basislegierung, die andere Option eine Schnellarbeitsstahlvariante. Beide Muster wurden zu Schweißstiften für die Nutzung im DeltaN1 Werkzeug verarbeitet und anschließend nach Vorschrift wärmebehandelt. Die empirische Erprobung endete frühzeitig mit Bruch des Schweißstiftes nach wenigen cm Schweißnahtlänge.

Neben dem originären 2-Schulter-Werkzeug mit 2 wirklichen Schulter, die durch einen zentralen Pin verbunden sind, gibt es in einer Nischenanwendung eine Rührreißschweißverfahrensvariante „Tatsumaki/Tornado“ bei der sehr wohl 2 Werkzeugschultern agieren, diese jedoch nicht mit-

einander in Verbindung stehen. Der Vorteil dieser Prozessführung besteht in der geringeren sowohl Kraft- als auch Momentbelastung des Pins. Diese hatte sich aus den vorangegangenen Arbeiten zu diesem Thema als sehr große Herausforderung dargestellt. Vor diesem Hintergrund wurde eine Verfahrensvariante entwickelt, die das DeltaN FS Werkzeug und seine Vorteile mit dem Tatsumaki Prozess kombiniert.

Hierzu galt es, die Komponente, welche die Funktion der zweiten, also unteren Werkzeugschulter hat, in Ihrer Konsistenz und Geometrie derartig anzupassen, das die für eine merkmalsfreie Schweißnaht notwendige Pressung aufgebaut werden kann, ohne dass das Schweißgut entweicht. Dieser Anspruch wurde erfüllt und es konnte nach mehreren Parameterfindungen gezeigt werden, dass sich sowohl die Werkstoffe EN-AW 6013 T6, -2198 T8 und -5024 H116 in der Dicke 3,2 mm merkmalsfrei schweißen lassen. Im Falle der Legierung EN-AW 5024 H116 ist das erfolgreiche Rührreibschweißen mit einem 2-Schulterwerkzeug eine Weltpremiere, denn die bisherigen Versuche derart führten zu einer nicht handhabbaren lokalen Überhitzung der Schweißnaht und damit zu nicht akzeptierbaren Verdichtungsfehlern. Zudem ist die Eignung des Prozesses für das Schweißen von dünnen Blechen ermittelt worden. Während zuvor das Interesse dem Schweißen von Standarddicken galt, so ist es für die Anwendung des Rührreibschweißens innerhalb der Fertigungskette des s.g. GLARE Werkstoffes interessant zu wissen, ob die Tatsumaki Bedingungen des Spannens der Fügeteile und der doch höheren Lateralkraft das Schweißen von empfindlichen Dünoblechen erlaubt. Dazu wurden Schweißwerkzeuge und Fügeteile aus der Legierung 2024T3 in Dicken 1,2 und 0,6 mm vorbereitet und anschließend mittels Tatsumaki Prozessführung rührreibgeschweißt.

Es ist so, dass die Dicke 1,2 mm mit einer attraktiven Geschwindigkeit von bis zu 300 mm/min und hoher Güte geschweißt werden konnte. Die Materialdicke 0,6 mm lässt bei keinem Vorschub eine Durchführung des Prozesses zu. Wegen der reibungsbedingt verhältnismäßig hohen Lateralkräfte und geringen Steifigkeit der Dünobleche entsteht ein Faltenwurf, der bewirkt, dass das Rührreibschweißwerkzeug die Fügeteile zerschneidet. Somit steht die Tatsumaki Rührreibschweißvariante nicht für das Schweißen von Aluminium Dünoblechen mit Relevanz für den GLARE Werkstoff, also Dicken zwischen 0.2 und 0.4 mm, zur Verfügung. Außer den Versuchen zur Bestimmung der Tauglichkeit an Dünoblechen wurde an Standard Blechdicken der für die Verwendung am Flugzeugrumpf relevanten Werkstoffe 2024T3, 6056T78, 2198T8 und 5024H116 probiert, ob sich das als positiv ermittelte Verhalten, auch bei Verlängerung der Schweißnahtlänge weiterhin so gestaltet. Weil die Anlagentechnik aus funktionalem Grund nicht den Schweißkopf, sondern die Fügeteile bewegt, und somit als Schlitten einen relativ großen Platzbedarf aufweist, ist die aktuell maximal darstellbare Schweißnahtlänge von 400 mm nicht industriell, aber doch immerhin eine Verdoppelung der bisherigen Schweißnahtlänge von 200 mm. Das Verlängern von Schweißnähten ist deshalb eine Herausforderung, weil üblicherweise mit Vorschüben unterhalb der Wärmeleitgeschwindigkeit der Fügeteile verfahren wird, und sich somit die Wärmemenge sowohl in ihrer Ausdehnung als auch in ihrer Maximaltemperatur steigert. Bei sensiblen Werkstoffen kann somit eine Anpassung der Schweißparameter notwendig werden. An allen Legierungen war die Verlängerung der Nahtlänge möglich. Die Legierung 5024H116 verlangte als Einzige nach einer Anpassung der Schweißrandbedingungen in Form vor intensiver Kühlung, um einer Überhitzung der Schweißung und damit einhergehenden Oberflächenmerkmalen entgegenzuwirken.

Um den Aspekt des Technologietransfers zu berücksichtigen, wurde das existierende und wie beschrieben sehr gut funktionierende DeltaN1 Rührreißschweißwerkzeug an einem alternativen Spannsystem erprobt, um dessen Tauglichkeit für ein späteres Hochskalieren bis hin zu realen Bauteilgrößen zu bestimmen. Der Unterschied zu der zuvor verwendeten Methode besteht in der Art der Generierung der Haltekräfte zur Fixierung der großen Füge­teile mit einer Länge von 1000 mm. Während das bisher mittels Leisten aus Stahl in Kombination mit Verschraubungen geschah, so wurde jetzt ausschließlich ein Vakuum zwischen Füge­teil und Vorrichtung dazu verwendet. Zusammenfassend hat sich dabei gezeigt, dass die Kräfte, die das DeltaN1 Rührreißschweißwerkzeug in die Füge­teile einleitet zu einer Schälbelastung führt, welche durch Verformung der Bleche aus 2024T3 mit Dicke 2,5 mm das Vakuum kollabieren lässt. Es muss an der Vakuum Spanntechnik im Detail optimiert werden, um die Füge­teile robust in Position zu halten. Diese Arbeiten fanden in Kooperation mit dem Projektpartner FhG IWS aus Dresden statt. Das IWS betreibt eine Kopie des DeltaN1 Werkzeuges für seine ECO Arbeiten zur Industrialisierung des Prozesses mittels MUVAX Krabbelroboter.

Des Weiteren wurde das DeltaN1 Schweißwerkzeug hinsichtlich einer Erweiterung des Eigenschaftsspektrums erprobt. In dem Zusammenhang gelang es, erfolgreich Bleche aus der Legierung 2024T3 und Dicke 2,0 mm sowie aus der Aluminium-Lithium-Legierung 2198T8 mit Dicke 3,2 mm mit maximaler Güte zu schweißen. Die Herausforderung bestand bei der Legierung 2024T3 in der Verringerung der Halbzeugdicke von zuvor 2,5 auf jetzt 2,0 mm und der damit einhergehenden Verschlechterung der Wärmeabfuhr aus dem tendenziell überhitzten Schweißbereich. Die Legierung 2198T8 weist gegenüber der Legierung 2024 wegen des vorhandenen Lithium Anteils eine verschlechterte Wärmeleitfähigkeit auf, die sich leicht negativ auf die Rührreißschweißbarkeit auswirkt. Die Prozessführung und der damit einhergehende Wärmehaushalt bei Nutzung des DeltaN1 Rührreißschweißwerkzeuges erlauben dennoch eine robuste Ausführung des Schweißprozesses und das Erzeugen einer merkmalsfreien Naht.

Es wurden an den Tatsumaki by DeltaN FS Rührreißschweißungen Zugversuche durchgeführt, um die statischen Festigkeiten zu ermitteln. Getestet wurden die beiden Legierungen, die als zukünftige Strukturwerkstoffe als Ersatz des EN-AW 2024T3 Blechwerkstoffes erwogen werden:

1. EN-AW 5024H116, bekannt als Scandium haltige Legierung.
2. EN-AW 2198T8, bekannt als Lithium haltige Legierung.

Die Zugversuche wurden an Streifenproben und im Zustand „wie geschweißt“ durchgeführt. Das heißt, dass keine Wärmenachbehandlung und keine mechanische Bearbeitung der Probenober- und Probenunterseite stattfanden, um Unebenheiten zu beseitigen. Die Zugversuchsergebnisse sind wie folgt: Die Legierung EN-AW 5024H116 im Tatsumaki by DeltaN FS geschweißten Zustand hat gemittelt eine Streckgrenze von 250 MPa, eine Zugfestigkeit von 330 MPa und eine Bruchdehnung von 4%. Das entspricht einem schweißtechnischen Wirkungsgrad von circa 80% und das ist angesichts der relativ warmen Prozessführung als gut einzustufen. Die Legierung EN-AW 2198T8 im Tatsumaki by DeltaN FS geschweißten Zustand hat gemittelt eine Streckgrenze von 280 MPa, eine Zugfestigkeit von 390 MPa und eine Bruchdehnung von 3%. Das entspricht einem schweißtechnischen Wirkungsgrad von circa 90% und das ist angesichts der relativ warmen Prozessführung insbesondere an dem Ausgangszustand T8(!) als sehr gut einzustufen.

Im Zusammenhang mit der Bewertung von Schweißungen mit dem DeltaN1 Rührreißschweißwerkzeug an der Legierung 2024 ist ein interessantes Phänomen als Ergebnis ermittelt worden: Bei der metallografischen Untersuchung der Schweißverbindung hat sich gezeigt, dass es möglich ist, mit der aktuellen Schweißwerkzeugkonstellation, also einer drehenden, einer nicht-drehenden Schulter und einem kerb-arm gestalteten Werkzeug-Pin, die Legierung 2024 inklusive ihrer Plattierung zu schweißen, ohne dass es zu der Ausprägung eines negativen Merkmals durch partiellen Einzug der Reinaluminiumplattierung in das Schweißgut kommt. Dieses Ergebnis birgt ein großes ökonomisches Potenzial, weil die bislang notwendige lokale Entfernung der Plattierung vor Durchführung der Schweißung sowie das Nachbearbeiten dieses Bereiches nach der Ausführung des Schweißens einen signifikanten Aufwand bedeuten. Die Robustheit der oben beschriebenen Prozessführung wird im Rahmen der LuFo 5-1 NEWEFE Projektaktivitäten Rührreißschweißen bestimmt werden.

Es ist am 30. September 2014 für das DeltaN1 Rührreißschweißwerkzeug das TRL3 Review mit dem Titel „FSW for FAL“, also Rührreißschweißen in der Endmontage (A320), bestanden worden.

2.2.7 Zusammenfassung

Die Aufgabenstellung lautete, Rührreißschweißwerkzeuge für das Fügen von relevanten Aluminiumblechhalbzeugen unter den Bedingungen der Endmontage zu entwickeln und zu testen. Wesentliche Aspekte dieser Bedingungen sind zweierlei: Ein nur einseitiger Zugang zur Fügestelle, was impliziert, dass die Schweißwerkzeugvariante so genannte 2-Schulter-Werkzeuge sein müssen. Diese Werkzeuge erzeugen die für das Rührreißschweißen notwendige vertikale Prozesskraft zwischen ihren beiden Schultern und haben aus diesem Grund einen extrem hoch belasteten Schweiß-Pin: Bei dem Standard Rührreißschweißprozess erfährt dieser Pin neben Temperatur zudem Torsion-, Biege- und Schub-Belastung. In der 2-Schulter-Werkzeugvariante kommt dazu noch die Zug-Belastung in der Größenordnung von mehreren Kilonewton. Diese Tatsache führt zu einer deutlich verringerten Haltbarkeit der Werkzeuge im Einsatz bei Vergleich mit der Standard-Prozessführung, wo Größenordnungen im Kilometerbereich realistisch sind. Die zweite Bedingung ist ein hohes Kollisionsrisiko mit Strukturbauteilen, die zu dem späten Fertigungszeitpunkt der Endmontage bereits vor Ort existieren. Das führt zu der Anforderung einer Kompaktheit der zu entwickelnden Werkzeuge.

Relevante Legierungen für den Einsatz am Flugzeugdruckrumpf sind multipel und stellen für das Rührreißschweißen aufgrund sehr unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und daraus resultierender Warmumformbarkeit und Wärmeleitfähigkeit individuelle Herausforderungen dar. Es hat sich frühzeitig die Notwendigkeit herausgestellt, bei der Rührreißschweißprozessführung mit 2-Schulter-Werkzeug die Wärmegenerierung zu begrenzen, um lokale Überhitzung und damit ein Kollabieren des Schweißprozesses zu verhindern.

Das Resultat ist ein unter der Bezeichnung DeltaN1 firmierendes Werkzeug, das es erlaubt, alle relevanten Blechhalbzeuge mit maximaler Güte zu schweißen und das zudem eine Haltbarkeit aufweist, die das Schweißen von Sektionen mit einer Länge von 16 Metern risikofrei erlaubt.

Das DeltaN1 Werkzeug hat mit dem RADICAL Projektende den Airbus Reifegrad TRL3 erreicht und ist damit sowohl tatsächlich als auch formal geeignet, aus dem Laborbetrieb in die Industrialisierung übergeben zu werden.

2.2.8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Inhalt der Arbeiten war neuartig und der Gegenstand ermöglichte es, Kosteneinsparpotentiale in der Endmontage zu erschließen.

Insbesondere relativ lange Rührreißschweißnähte wie z.B. Längsnähte einer Sektion von 12 oder 16 Metern Länge sind deutlich kostengünstiger darzustellen als mehrreihige Nietungen. Der in der RADICAL Projektlaufzeit betriebene Aufwand ist angemessen, weil er Kapazität und Risiko reduzierend in einem Laborbetrieb mit schlanker weil robotergestützter Anlagentechnik stattfand und mit minimalem Personaleinsatz bestehend aus einem Labortechniker und einem Schweißfachingenieur betrieben wurde.

2.2.9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan

Von 9 TRL Reifegraden wurde im September 2014 Reifegrad TRL3 zertifiziert. Es werden die höheren Review-Stufen in den Folgejahren angegangen. Der Rührreißschweißprozess ist Material unabhängig und darum nicht von grundsätzlichen Entscheidungen bei der Werkstoffwahl betroffen.

Die fertigenden Projektpartner PAG und Airbus Operations haben die Aktivitäten inhaltlich definiert und die Fortschritte begleitet.

Weiterführende Arbeiten sind Gegenstand des LuFo 5-1 Projektes NEWEFE.

Attraktiver wirtschaftlicher Nebeneffekt ist die Option des Technologietransfers in andere Branchen wie Eisenbahn- und Schiffbau. Airbus Group hat für die Ermöglichung solcher Geschäftsvorgänge mit der Airbus APWORKS GmbH in Ottobrunn eine 100% Tochterfirma gegründet, deren Geschäftsmodell genau darin besteht, <http://www.apworks.de/maerkte/>.

2.2.10 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die entwickelte Technologie ist innovativ und einzigartig, weil es bisher keine industrielle Nachfrage mit derartigen Randbedingungen gab: Aluminiumlegierungen mit eingeschränkter Rührreißschweißbarkeit sowie einseitiger Zugang zur Fügestelle.

2.2.11 Veröffentlichungen, Vorträge

Patentanmeldung national DE102012025140 sowie international PCT Europa und USA

Titel: "Reibrührwerkzeug, Herstellverfahren hierfür und Reibrührverfahren"

Erfinder: Tommy Brunzel, Katja Schmidtke, Jürgen Silvanus

Keynote Vortrag TMS2015, Orlando, USA, 17.3.2015: „Experiences with Friction-Stir-Welding in the Airbus Group“ Jürgen Silvanus, Marco Pacchione, Valentin Richter-Trummer, Delphine Allehaux, Dr. Julien Stein, Kai Fortkamp (PAG), Wulf Hoeflich, Dr. Marcus Gutensohn (PFW)

2.2.12 Literatur

Keine

2.3 AP3.1: Lokaler Korrosionsschutz für Rühr-Reibschweißnähte

Autoren: Dr. F. Gammel, A. Kurtovic, D. Jonke, H. Fietzek

2.3.1 Aufgabenstellung

Bei der Fügung von Bauteilen nach dem Rührreibschweißverfahren verbleiben im Schweißbereich ungeschützte Oberflächen, die nachträglich gegen Korrosion zu schützen sind. Dabei soll der lokal applizierte Korrosionsschutz dieselben Eigenschaften aufweisen, wie sie vom konventionellen Badverfahren (TSA, Tartaric-Sulfuric Acid Anodising = Weinsäure-Schwefelsäure-Anodisierung) her bekannt sind.

Ziel im Arbeitspaket AP3 ist daher, eine lokal zu applizierende Oberflächenbehandlung zu identifizieren und zu testen, die eine dem Badverfahren gleichwertige Oberflächenvorbehandlung liefert.

Die lokale Vorbehandlung erfolgt durch Applikation folgender Verfahren:

- Lokale Anodisation unter Verwendung eines Schwefelsäureelektrolyts
- Lokale Applikation von Oxidschichten mittels LASER

2.3.2 Voraussetzungen

Lokale Anodisation

Zunächst musste ein geeignetes Parameterfeld für die Behandlung der Legierungen AA2024 bzw. AA5028 (AlMgSc) erarbeitet werden. Da der Prozess später in Serie aufgrund der großen Bauteile nur mittels eines 3-D-Roboters erfolgen kann wurde hierfür im Labormaßstab ein X-Y-Tisch samt elektrischer Schrittmotoren aufgebaut. Mittels PC werden diese Motoren durch ein NC-Programm angesteuert und geregelt. Somit kommen zusätzlich zu den galvanischen Parametern wie Spannung, Stromstärke und Elektrolyttemperatur noch die Bewegungsdaten des Roboters hinzu. Diese sind die Verfahrensgeschwindigkeit des Behandlungskopfes und der Zeilensprung (Offsetwert) der Behandlungsbahnen zueinander. Abbildung 2.3-1 zeigt die Versuchsanordnung der X-Y-Verfahreinheit.

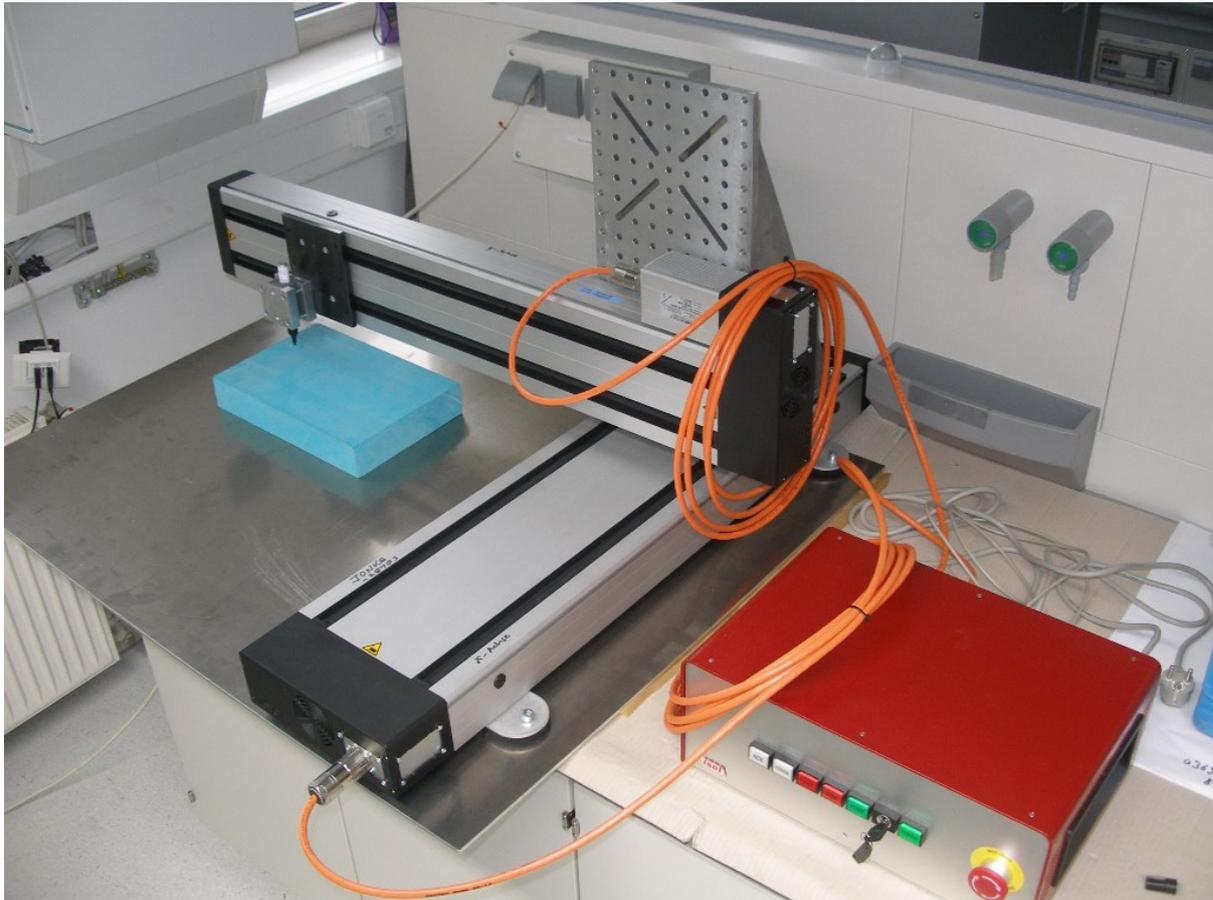


Abbildung 2.3-1: Verfahrenheit X-Y-Tisch mit Steuereinheit der Schrittmotoren

Ergebnisse bei der Ermittlung eines optimierten Parameterfensters SAA-Elektrolyt

- Eine Temperaturerniedrigung des Elektrolyten von 20°C auf 10°C verschlechtert die Korrosionsbeständigkeit, wobei insbesondere im neutralen Salzsprühtest (NSS) die Akzeptanzkriterien nicht mehr erreicht wurden
- In ähnlicher Weise verschlechtert eine Verdoppelung der Überfahrgeschwindigkeit von 50 mm/sec auf 100 mm/sec die Korrosionsbeständigkeit. Auch hier wurden im NSS die Akzeptanzkriterien nicht mehr erreicht
- Während mit dem lösemittelbasierten, chromathaltigen Lacksystem mit ausgewählten Parametern die Akzeptanzkriterien hinsichtlich Korrosion und Lackhaftung erreicht werden konnten, zeigt das wasserbasierte, alternativ inhibierte Lacksystem bereits beim Haftungstest (Gitterschnitt trocken/nass) ungenügende Ergebnisse.
- Als bester Anodisierparameter für den Schwefelsäureelektrolyt (SAA) wurde ermittelt: 30 V; 2,5 A; 20 °C; 50 mm/s, Offset 1mm

Untersuchung Phosphorsäure-Elektrolyt (PAA)

Zur Untersuchung der Oxidschichtbildung kamen zwei Elektrolyttemperaturen (10 und 40°C) zum Einsatz. Damit erzielbare Schichtdicken sollten in Vorversuchen ermittelt werden.

Ergebnisse:

- Bei niedrigen Spannungen (25 V) ist keine Schichtbildung zu beobachten.
- Anodisation bei 50 V erzeugt Oxidschichten im Bereich von 40 – 60 nm; höhere Spannungen wurden aus Gründen der Arbeitsplatzsicherheit nicht eingesetzt.
- Die Oxidschicht ist kompakt und glatt, eine offene Porenstruktur wie sie gewöhnlich aus dem PAA Badprozess her bekannt konnte nicht erzeugt werden.
- Der Einfluss der Temperatur ist gering. 40°C Elektrolyttemperatur führt zu etwas verminderten Schichtdicken von ca. 40 nm gegenüber 50-60 nm bei 10°C.

Der vorliegende PAA-Elektrolyt ist demnach ungeeignet zur Anodisation bei diesen Parametern. Eine Rücksprache mit dem Lieferanten DALIC ergab, dass es weitere Elektrolyte auf Basis PAA im Lieferprogramm gibt, die sich jedoch in der Konzentration der Wirkbestandteile unterscheiden. Da die PAA jedoch von untergeordneter Priorität für den Schweißprozess ist werden keine weiteren Versuche durchgeführt.

Laserbehandlung

Die Ergebnisse zeigten, dass Laserparameter, die zu einer höheren Oxidschichtdicke führen, tendenziell bessere Korrosionsergebnisse zeigen. Allerdings konnte mit den untersuchten Laserparametern die von Airbus geforderte Schutzwirkung nicht ganz erreicht werden. Es wurde daher versucht Prozessparameter bei höherer Laserleistung einzusetzen.

2.3.3 Planung und Ablauf

Es wurde von Anfang an die lokale Behandlung als wesentlicher Bestandteil dieses Arbeitspakets angesehen und festgelegt. Dies führte dazu, dass die Prämisse auf „lokal“, das heißt an der Baugruppe ohne eine Zerlegung selbiger in Einzelkomponenten als Fernziel applizierbar sein muss.

Airbus als Endanwender hat seine Vorgaben bezüglich einer Langzeitstabilität des Oberflächenschutzes entsprechende Voraussetzungen definiert. Für den Rumpf gilt das System des Oberflächenschutzes auf Basis anodischer Oxidschichten mittels TSA-Prozess in galvanischen Bädern aufzubringen sind. Hierdurch stehen Schutzsysteme auf Basis von Oxidschichten zunächst im Vordergrund. Für unsere Anwendung müssen sie dementsprechend lokal applizierbar sein. Dies führte zur Auswahl der Verfahren der anodischen Oxidation in wässrigen Medien (Schwefelsäureanodisation SAA) bzw. zu einer trockenen Alternative, der Laservorbehandlung zur Erzeugung von Oxidschichten durch Energieeintrag. Letztere Methode ist insbesondere von Interesse, wenn man die europäische Chemikalienverordnung REACH berücksichtigt.

Für das Projekt führte dies zur Vorentwicklung eines laser-basierten Oberflächenschutzsystems im Labormassstab als Machbarkeitsstudie. Diese fiel von Anfang an durch positive Ergebnisse auf und zeigt das zukünftige Potenzial dieser Technologie auf. Da der Reifegrad jedoch relativ niedrig ist im Vergleich zum Rührreißschweißen, wurde die Laser-Behandlung nicht mit der höchsten Priorität durch Airbus gesehen. Dies führte dazu, dass die höchste Priorität der lokalen Anodisation nach dem SAA-Verfahren zukam. Die Lasertechnologie wurde jedoch als zukunftsweisend bewertet mit der Aufforderung zu grundlegender Untersuchung dieser Thematik in der nahen Zukunft außerhalb dieses Forschungsprojekts. Somit liegt der Schwerpunkt dieses

Arbeitspakets bei der systematischen Untersuchung einer Schwefelsäureanodisation mittels lokaler Applikation

2.3.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die lokale Anodisation ist seit Jahren im Reparaturbereich fester Bestandteil und wird als sogenanntes Tamponverfahren bezeichnet. Lagen die Ursprünge anlagenbedingt bei sehr einfacher Applikation über wiederholtes Eintauchen und händischem Auftrag eines mit Behandlungselektrolyt getränkten Griffels und entsprechendem Elektrolyttropfverlust unter Verwendung von Auffangwannen stehen heute moderne Anlagen zur Verfügung, die elektrolytverlustfreies Arbeiten selbst über-Kopf gestatten.

Mit solch einer Anlage wurden die Versuche im Rahmen dieses Projekts durchgeführt. Die Anlage konnte bei der Airbus Division „Airbus Defence & Space“ genutzt werden. Da sich jedoch im Hinblick auf die zu behandelnden, meterlangen Schweißnähte eine händische Verwendung aus Qualitäts- und Reproduktionsgründen verbietet wurde bei der Airbus Group Innovations (AGI) von Anfang an eine semi-automatische Anodisationsanlage aufgeplant und dementsprechend eine Vorrichtung in Form eines X-Y-Tisches, der eine numerisch kontrollierte Verfahrbewegung des Behandlungsgriffels ermöglicht, aufgebaut. Somit steht eine 2-dimensionale, halb-automatische Verfahreinheit zur Verfügung mit der alle Einzelversuche bearbeitet wurden. Diese Art der Behandlung ist neu und hat eine spätere Aufskalierung auf eine 3-D-Kontur zum Ziel. Nur so können zukünftig unter Fertigungsbedingungen konkave und / oder konvexe Schweißnähte an Rumpfstrukturen behandelt werden. Ein Technologiereifegradreview (TRL) im Jahr 2014 bescheinigte dieser Art der Oberflächenbehandlung den Level „2“. Die FSW-Technologie steht im Vergleich hierzu bei Level „3“.

2.3.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Arbeitspaket 3 ist inhaltlich vernetzt:

Der Projektpartner und der industrielle Endanwender Airbus Operations definierten die Randbedingungen, die für die Entwicklung des entsprechenden Oberflächenschutz erforderlich sind. Ziel ist es die gesetzten Anforderungen zu erreichen, wie sie bei Airbus dem Stand der Technik in den aktuellen Flugzeugbaureihen entsprechen. Dies ist erforderlich um die Kompatibilität in der „final assembly line“ beizubehalten im Falle einer zukünftigen Integrierung des lokalen Anodisierprozesses in diese. Zeitlich nach der Definition wurde in regelmäßigen Arbeitsfortschrittsbesprechungen sowie streng formalen internen Reifegradreviews (Technological Readiness Prozess) der Status dieses Arbeitspakets erfasst und bei Bedarf für den nächsten Bearbeitungszeitraum angepasst.

Eine spätere Integration beim Projektpartner Fraunhofer IWS in das dortige, schienengeführte MUVAX Handhabungssystem ist geplant. Dies wird jedoch erst im Nachfolgeprojekt „NeWeFe“ umgesetzt werden. Die Zusammenarbeit mit dem Endanwender „Airbus Operations“ als auch dem Projektpartner „Fraunhofer IWS“ ist als offen und kooperativ zu beschreiben. Der Austausch geschah über gegenseitige Besuche als auch regelmäßig per Telefonkonferenz mit den Airbusstandorten Bremen und Hamburg.

2.3.6 Ergebnisse

- Nach Vorversuchen wurde der Laserparametersatz: 43A_10 kHz, 400 mm/s, 40µm Linienbreite, 2-fache Überfahrt ausgewählt (P2)
- Mit diesem konnte eine Schichtdicke von 2000 nm erzielt werden gegenüber 400 nm beim Standardparametersatz (P1)
- Die Oxidmorphologie ist bei beiden Parametern vergleichbar, d.h. es ist auch bei P2 eine offenporige Nanostruktur zu erzielen
- Die Oxidschicht ist in sich kompakt und haftet gut auf der Substratoberfläche
- Durch die Erhöhung der Oxidschichtdicke erhoffte man sich eine verbesserte Beständigkeit unter korrosiven Bedingungen. Im Salzsprühtest (EN-ISO 9227) konnte jedoch diese Verbesserung im lackierten Zustand nicht gefunden werden. Die Unterwanderung am Ritz erreicht auch mit der erhöhten Schichtdicke nicht die Akzeptanzkriterien
- Versuche die Korrosionsbeständigkeit mit Hilfe von Nachbehandlungen zu verbessern sind getestet worden und unter Arbeitspaket AP1.1 beschrieben.

Die Versuche zeigen, dass eine Laserbehandlung generell ein hohes Potenzial besitzt, um eine lokale, chemiefreie Schichtbildung und Strukturierung auf Aluminium zu erzeugen. Es sind jedoch systematische Versuche durchzuführen, die jedoch im Rahmen des Programms „RADICAL“ aus Zeitgründen nicht möglich sind. Airbus befürwortet eine weitere Untersuchung dieser erfolgversprechenden Technologie in einem separaten Forschungsprojekt.

Ergebnisse Lokalanodisation

Diverse Vorbehandlungen auf unplattiertem AA2024 wurden durchgeführt. Die Proben wurden im Anschluss lackiert und dann neben dem Haftungstest nach der Gitterschnittmethode einer Auslagerung in korrosiver Umgebung unterzogen. Dies sind der Salzsprühtest (NSS) und der Filiformtest (FFT).

In Tabelle 2.3-1 sind die Ergebnisse der Langzeittests dargestellt.

Die von Airbus gesetzten Anforderungen bezüglich Langzeitstabilität sind:

- Salzsprühtest 3000 Stunden, Unterwanderung < 1,25 mm
- Filiformtest 1000 Stunden, Unterwanderung < 2 mm

Diese können erreicht werden bei Anwendung von Schwefelsäureanodisation mittels Dalic-Verfahren.

Neu hinzugekommen ist die Verwendung einer geringeren Schichtdicke von ca. 3,5 µm im Gegensatz zu den bisherigen Proben mit 7µm Dicke. Der Grund für dünnere Schichten liegt in der Dicke der mit dem Referenzverfahren „TSA“ erzeugten Schichten, die Fertigungsstandard sind. Diese liegen zwischen 2 und 4 µm je nach Legierung. Im Sinne einer Taktzeitverkürzung bei der Fertigung wäre eine dünnere Schichtdicke aus Zeitgründen vorteilhaft, da der Prozess weniger Zeit beansprucht und weniger Elektrolyt verbraucht wird. Allerdings müssen auch bei dünneren Anodierschichten die Anforderungskriterien von Airbus zur Erreichung der Langzeitbeständigkeit von Airbus erfüllt werden.

Hier werden aus Reproduktionsgründen weitere Testläufe im Rahmen des Nachfolgerprojektes „NeWeFe“ erforderlich sein, um den Nachweis der Eignung dünnerer Schichten zu erbringen.

Der Arbeitsablauf zur Integration der Lokalanodisierung in die Oberflächenbehandlungslinie ist in Abbildung 2.3-2 schematisch dargestellt.

Tabelle 2.3-1: Übersicht der Langzeittests an lokal anodisiertem AA2024 unplattiert

	Oxide thickness	Oxide type	Paint	Tests						
			Primer / Topcoat	Results SST max. crevice after 1000h	Results SST max. crevice after 3000h	Results FFT max. length after 500h	Results FFT ** max. length after 1000h	Cross hatch test dry condition	Cross hatch test after 14 days water exposure	Local Anodising SAA
	V 1	Local Anodising SAA	37035A (LE Chromate)							
Substrate				[mm]		[mm]	[mm]	[GT]	[GT]	
AA2024 unclad	7 µm	Set 1	X				1 <input checked="" type="checkbox"/>	none	none	
	7 µm	Set 1	X					0 <input checked="" type="checkbox"/>	0 <input checked="" type="checkbox"/>	
	7 µm	Set 1	X					0 <input checked="" type="checkbox"/>	1 <input checked="" type="checkbox"/>	
	3.5 µm S-072 to S-074	Set 2	X					0*	0*	
	3.5 µm S-075	Set 2	X	0.5 <input checked="" type="checkbox"/>	2400h**	running				
	3.5 µm S-076	Set 2	X	0 <input checked="" type="checkbox"/>	2400h**	running				
	3.5 µm S-078	Set 2	X	0 <input checked="" type="checkbox"/>	2400h**	running				
	7 µm S-091 to S-093	Set 2	X					0*	0*	
	7 µm S-094	Set 2	X	0.5 <input checked="" type="checkbox"/>	2400h**	running				
	7 µm S-095	Set 2	X	0.5 <input checked="" type="checkbox"/>	2400h**	running				
7 µm S-096	Set 2	X	0.5 <input checked="" type="checkbox"/>	2400h**	running					

Acceptance criteria
SST: 3000 h, crevice < 1,25 mm
FFT: 1000 h, length < 2 mm

*GT okay but degree of blister formation is too high
** End of FFT (1000h): 27.11.2014

Substrate: AA 2024 unclad
Paint A: solvent-based, chromate containing
AKZO 37035 A // C21/100

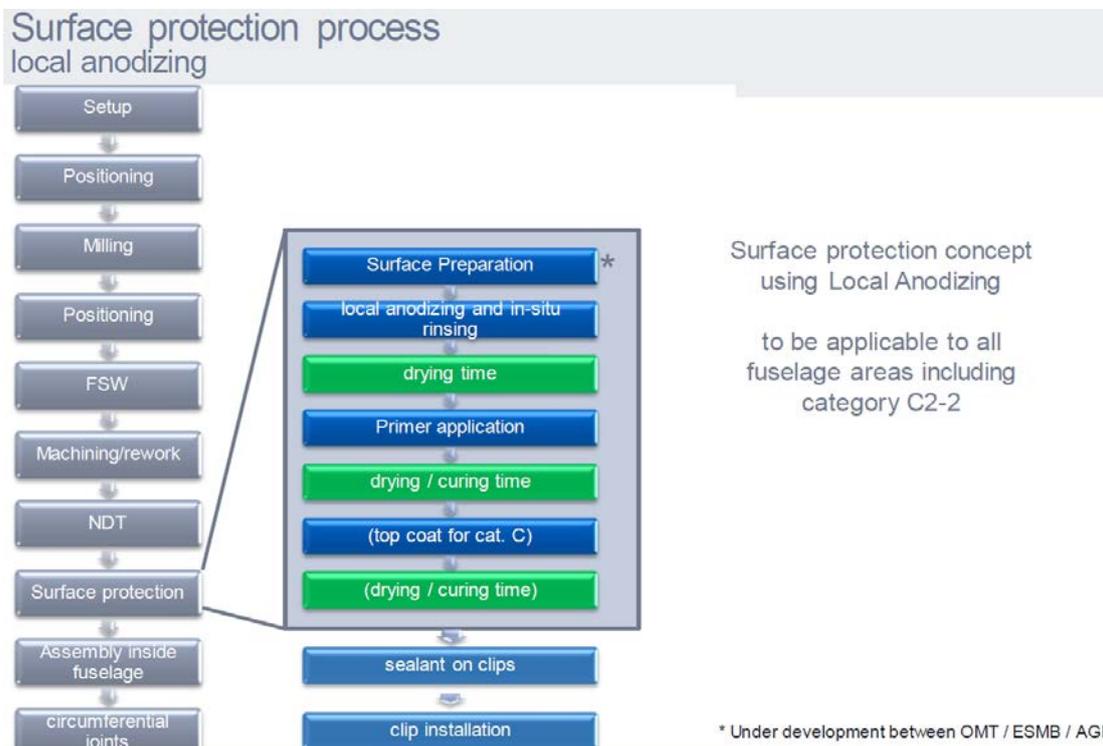


Abbildung 2.3-2: Arbeitsablauf zur Integration der Lokalanodisierung in bestehende Fertigungslinie des Oberflächenschutzes

Die Anwendbarkeit auf die verschiedenen stark korrosiv belasteten Bereiche am Flugzeugrumpf ist nachfolgender Abbildung 2.3-3 zu entnehmen.

Surface Protection for FSW in relation to environmental categories (ABP0078):

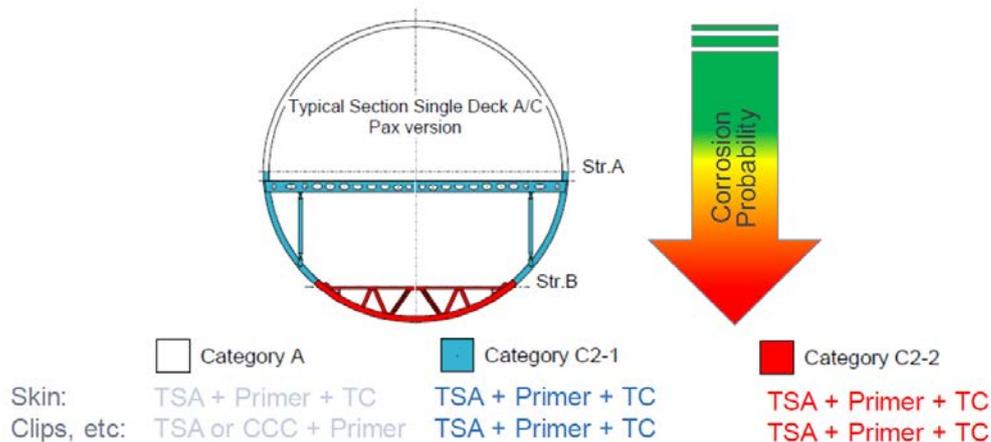


Abbildung 2.3-3: Korrosiv beanspruchte Bereich am Flugzeugrumpf

Hier ist insbesondere im örtlich stark beanspruchten Rumpfbereich C2-2 nur eine Anodisierschicht zulässig. Dies bedeutet eine Herausforderung für die lokal aufzubringende SAA-Schicht. Hier wird durch Versuche ermittelt werden wie hoch die Mindestschichtdicke der Lokalanodisierschicht sein muss, um das Anforderungsprofil bzgl. der von Airbus geforderten Langzeitstabilität gerecht zu werden.

Ergebnis Reifegradreview:

Am 18. November 2014 fand bei Airbus Bremen ein Reifegrad-Review (TRL=Technology Readiness Level) statt. Es ging um den TRL der Stufe 2. Dieses Review wurde erfolgreich bestanden und die TRL-Planung für 2015 ff beschlossen

Für das Jahr 2015 wird es im Oktober ein TRL 3-Review geben. Für 2016 wird TRL 4 avisiert. Dies ist aus Synchronisationsgründen wichtig, da das Rührreißschweißen (FSW) derzeit bei TRL3-4 liegt. Für eine Umsetzung im Sinne der Fertigung müssen beide Prozesse denselben Reifegrad besitzen.

Probleme beim Lokalanodisieren

In den Versuchen ergab sich das Problem der Blasenbildung, die auf den lackierten Blechen nach Wasserauslagerung auftrat (Abbildung 2.3-4).

Die Blasenbildung wird auf schlechte Spülung/Wässerung der Probenoberfläche zurückgeführt. Die Proben wurden erst nach durchgeführter Anodisierung mit Wasser großflächig abgespült. Dadurch hat der Elektrolyt vor der Spülung genügend Zeit, um in den Poren der Anodisierschicht zu verbleiben und dort anzutrocknen. Dadurch bleiben eingetrocknete Elektrolytreservoirs in den Poren zurück, die bei der Wasserauslagerung dann zu einer Blasenbildung führen.

Diese These wird derzeit im Nachfolgeprojekt „NeWeFe“ überprüft und durch geeignete Abhilfemaßnahmen korrigiert.

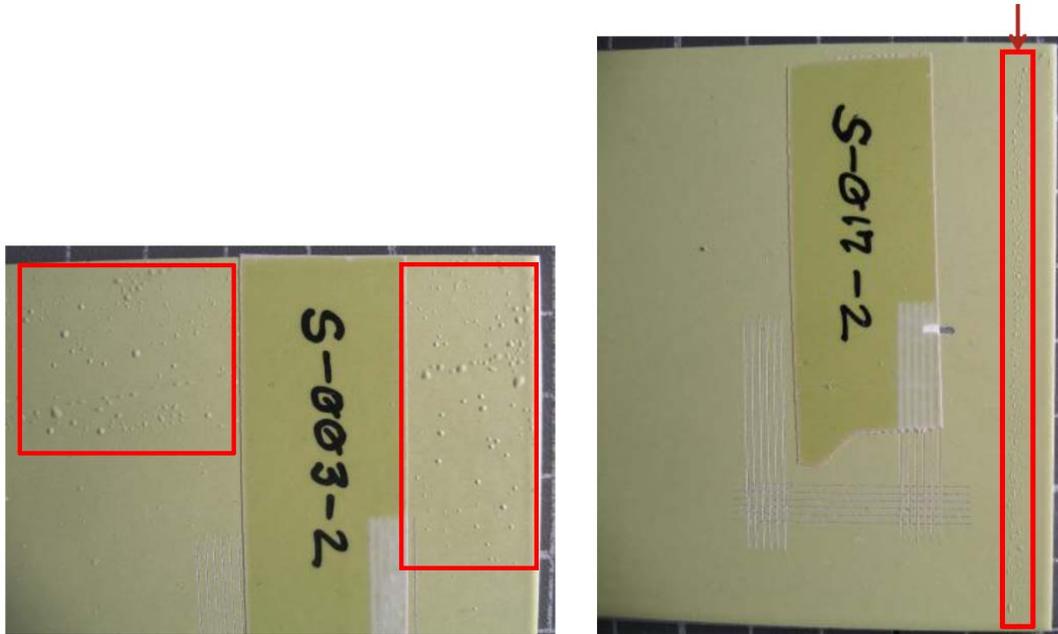


Abbildung 2.3-4: Blasenbildung an SAA lokalanodisiertem AA2024 unplattiert mit Lackaufbau nach 14 Tagen Wasserauslagerung

2.3.7 Zusammenfassung

Zunächst wurden geeignete Beschichtungsparameter für einen stabilen Anodisierprozess mittels SAA-Elektrolyten und unter Verwendung eines Dalic-Geräts erarbeitet. Diese elektrochemischen Parameter sind dann auf den semi-automatischen X-Y-Tisch übertragen worden, wodurch zusätzliche numerische Parameter wie die Überfahrgeschwindigkeit und die Zeilensprungbreite (Off-Set) hinzukamen.

Mit diesem erarbeiteten und optimierten Parametersatz konnte im Verlauf des Projektes die Eignung des lokalen Anodisationsverfahren an den Legierungen des Typs AlMgSc, sowie AA2024 clad/unclad nachgewiesen werden. Technologische Prüfkriterien sind die Lackhaftung und die Langzeitstabilitätsprüfung im Korrosionstest nach dem Salzsprüh- und Filiformverfahren. Für eine anodische Filmdicke von 7µm konnte das Airbusanforderungsprofil erreicht werden. In weiterer Untersuchung befindet sich im Rahmen des NeWeFe-Programms eine Schichtdicke von 3,5 µm, wie sie in etwa der Schichtdicke unter Anwendung eines TSA-Badanodisierprozesses entspricht. Die Arbeiten wurden noch im RADICAL-Projekt begonnen, konnten aber aus Zeitgründen nicht mehr abgeschlossen werden.

Erste erfolgreiche Laserbehandlungen zur Ausbildung oxydischer Schichten konnten erfolgreich, experimentell nachgewiesen werden. Eine Vertiefung der Versuche wurde aus Prioritätsgründen im Rahmen dieses Programms aufgegeben. Dies erfolgte in Abstimmung mit dem Endanwender „Airbus Operations“.

2.3.8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Inhalt der Arbeiten war neuartig im Hinblick auf die Aspekte Großbauteile, Anodisation von Schweißnähten und Nutzung eines 2-D Oberflächenbehandlungsportals. Ferner wird die lokale Oberflächenanodisation als sog. „enabling technology“ für den Fügeprozess „Rühr-Reib-Schweißen“ betrachtet. Letzterer bietet deutliche Kosteneinsparpotentiale in der Endmontage sowie eine Gewichtersparnis.

Insbesondere relativ lange Rührreibschweißnähte wie z.B. Längsnähte einer Sektion von 12 oder 16 Metern Länge sind deutlich kostengünstiger darzustellen als mehrreihige Nietungen. Der in der RADICAL Projektlaufzeit betriebene Aufwand ist angemessen, weil er kapazitäts- und risikoreduzierend in einem Laborbetrieb mit schlanker weil robotergestützter Anlagentechnik als Fernziel stattfinden wird. Hierdurch ist geringerer Personaleinsatz erforderlich, da Teilschritte automatisiert ablaufen können.

2.3.9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan

Es ist der Reifegrad TRL Stufe 2 von 9 im November 2014 attestiert worden und es werden höhere Reifegradstufen in den nächsten Jahren folgen. Im Gegensatz hierzu besitzt der FSW-Prozess derzeit die Reifestufe TRL 3. Dies bedeutet, dass der für eine Einführung unter Nutzbarmachung der lokalen Anodisation am Ende beide TRL-Prozesse synchronisiert werden müssen, um genutzt werden zu können. Die fertigenden Projektpartner PAG und Airbus Operations haben die Aktivitäten inhaltlich definiert und die Fortschritte begleitet.

Weiterführende Arbeiten sind Gegenstand des LuFo 5-1 Projektes NEWEFE.

Attraktiver wirtschaftlicher Nebeneffekt ist die Option des Technologietransfers in andere Branchen wie Eisenbahn- und Schiffbau. Die Airbus Group hat für die Ermöglichung solcher Geschäftsvorgänge mit der Airbus APWORKS GmbH in Ottobrunn eine 100% Tochterfirma gegründet, deren Geschäftsmodell genau darin besteht solche Technologien für andere Industriebranchen nutzbar zu machen. Siehe hierzu: <http://www.apworks.de/maerkte>

2.3.10 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Derzeit sind keine Informationen hierüber bekannt.

2.3.11 Veröffentlichungen, Vorträge

Keine

2.3.12 Literatur

Keine

2.4 AP3.2: Erhöhung Langzeitbeständigkeit durch Nachbehandlung

Autoren: D.P. Jonke, S. Nixon, H. Fietzek

2.4.1 Aufgabenstellung

Ziel des Arbeitspaketes ist es, die Langzeitbeständigkeit des Korrosionsschutzes von Anodierschichten durch eine Nachbehandlung mit lokal wie auch großflächig applizierbaren, dünnen Schichten zu verbessern, um eine Schutzwirkung, wie sie von herkömmlichen Chromsäureanodierschichten her bekannt sind, zu erzeugen.

2.4.2 Voraussetzungen

Zunächst mussten die unter Kapitel 2.3 anodisierten Proben mit dem optimierten Parametersatz erzeugt werden. Als Referenz dient der Badanodisationsprozess (TSA), wie er bei „Airbus Operations“ und in den Fertigungswerken von „PAG“ zum Einsatz kommt. Ein weiterer Satz Proben auf denen mittels Laserbehandlung eine oxydische Oberfläche erzeugt wurde kam ebenfalls zur Anwendung.

Auf allen 3 Probensätzen wurde in einem Nachfolgeprozess mittels Nachtauchen in unterschiedlichen Medien eine Einlagerung von verschiedenen Wirksubstanzen in die porigen Oberflächen versucht.

2.4.3 Planung und Ablauf

Die mittels Oxidschichten vorbereiteten Proben (siehe 2.4.2) wurden durch Tauchen in verschiedene Behandlungslösungen „funktionalisiert“ und an Luft getrocknet. Danach erfolgt eine Lackierung mit dem chromathaltigen Primer gefolgt vom Decklacksystem wie es bei „Airbus Operations“ in der Fertigung zum Einsatz kommt.

Die technologischen Prüfkriterien sind Lackhaftung (Gitterschnitt trocken/nass) sowie der Nachweis der Langzeitstabilität mittels Auslagerung in Klimakammern (Salzsprüh- und Filiformtest).

2.4.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Prinzip der Nachtauchverfahren ist abgeleitet aus Untersuchungen zur gezielten Verbesserung der Korrosionseigenschaften an Metallen durch Einlagerung und/oder Aufbringung von Schichten

Schichten, welche Korrosionsschutzinhibitoren enthalten. In unserem Falle soll die oxydische Schicht auf dem Aluminium als elektrische Barrierschicht wirken. Im Falle einer Verletzung sind solche Schichten jedoch schnell unwirksam und an der Verletzungsstelle kommt es zu verstärkter Auflösung des Grundmetalls. Um dem entgegen zu wirken wäre eine Einlagerung von Inhibitoren, die diesem Mechanismus entgegenwirken wünschenswert. Die poröse Barrierschicht erzeugt durch Anodisation bzw. Laserbehandlung ist durch ihre hohe spezifische Oberfläche gut zur Aufnahme von Wirkstoffen geeignet (Kapillaritätseffekt).

2.4.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Arbeitspaket 3 ist inhaltlich vernetzt:

Der Projektpartner und der industrielle Endanwender Airbus Operations definierten die Randbedingungen, die für die Entwicklung des entsprechenden Oberflächenschutz erforderlich sind. Ziel ist es die gesetzten Anforderungen zu erreichen, wie sie bei Airbus dem Stand der Technik in den aktuellen Flugzeugbaureihen entsprechen. Dies ist erforderlich um die Kompatibilität in der „final assembly line“ beizubehalten im Falle einer zukünftigen Integrierung des lokalen Anodisierprozesses in diese. Zeitlich nach der Definition wurde in regelmäßigen Arbeitsfortschrittsbesprechungen sowie streng formalen internen Reifegradreviews (Technological Readiness Prozess) der Status dieses Arbeitspakets erfasst und bei Bedarf für den nächsten Bearbeitungszeitraum angepasst. Die Ideen zur Auswahl geeigneter Nachtauchlösungen wurde intensiv mit dem Entwicklungsbereich der Airbus Operations in Bremen diskutiert und abgestimmt

2.4.6 Ergebnisse

Als Basis für die Nachtauchversuche wurden Oxidschichten verwendet, die nach folgenden Verfahren hergestellt wurden:

- TSA (Wein-/Schwefelsäureanodisation) im Badverfahren als Referenz nach Airbusvorschrift
- SAA (Schwefelsäureanodisation) aufgebracht im Lokalanodisationsverfahren (Tampon-Anodisation)
30 V; 2,5 A; 20 °C; 50 mm/s (derzeit optimaler Parameter siehe AP 3)
- Laserbehandlung
Parameter P1 und P2 (siehe AP 3)

Als Substratmaterial wurde Al 2024 unclad eingesetzt. Diese Legierung ist neben der neu entwickelten Al5028 (AlMgSc) für Airbus von Interesse, da man für Flugzeuge der bestehenden Baureihen die lokale Oberflächenvorbehandlung ebenfalls einsetzen möchte. Die unplattierte Variante des Al 2024 zeigt jedoch eine deutlich höhere Korrosionsanfälligkeit im Salzsprühtest (NSS) gegenüber den AlMgSc Legierungen (Typ 5028).

Als Nachtauchlösungen wurden Produkte aus folgenden Gruppen gewählt:

- Konversionsschichten
- Silan-/Sol-Gel-Schichten
- Korrosionsinhibitor

Es handelt sich dabei um folgende Handelsprodukte:

- Konversionsschichten: ChromitAl 650
- Silan-/Sol-Gel: Ardrex 1768, GPTMS, Socogel A104 und Wasserglas
- Korrosionsinhibitor: Halox 650

Nach dem Nachtauchen wurden die Proben mit zwei verschiedenen Lacksystemen – lösemittelbasiert und chromathaltig = Standardlacksystem sowie wasserbasiert und alternativ inhibiert (chromatfrei) = Alternative zum Fertigungsprozess – beschichtet.

Lackhaftung

Die Lackhaftung war für alle Oxidschichten mit applizierten Nachtauchlösungen im vorgegebenen Akzeptanzbereich (GT0 trocken, GT<2 nass) in Ordnung. Nur beim System „Halox 650“ und „ChromitAl 650“ wurden im Falle der Laservorbereitung ein Gitterschnittwert von 2 erreicht. Dieser ist nach Airbus-Standards inakzeptabel.

Korrosion

Zwischenergebnisse nach 500 Stunden zeigen im NSS (EN-ISO 9227) keinerlei Unterwanderung am Ritz und keine Korrosion/Blasenbildung in der Fläche.

Im Filiformtest (EN-ISO 3665) nach 500 Stunden kann das wasserbasierte, alternativ inhibierte Lacksystem die Akzeptanzkriterien nicht erfüllen.

Mit dem lösemittelbasierten, chromathaltigen Lack (Standardsystem der Airbuslackierung) zeigt die lokale Anodisation mit ChromitAl 650 Nachbehandlung die besten Ergebnisse mit 1,0 mm Unterwanderung am Ritz.

Die Laserbehandlung (Parameter P1, siehe AP 3) liegt mit allen Nachbehandlungen - außer Socogel A104 – im Rahmen des Akzeptanzkriteriums mit einer Fadenlänge unter 2mm Länge.

In Tabelle 2.4-1 sind die Ergebnisse der bisher getesteten Nachtauchsysteme dargestellt.

Tabelle 2.4-1: Einfluss der Nachtauchlösungen in Bezug auf das technologisches Anforderungsprofil

	Pretreatment		Oxide	Nachbehandlung										Paint		Tests						
	V1	TSA	Local Anodizing SAA	Konversion				Silane/Sol-Gel/Silikat						Primer / Topcoat	37035A (L/B/Cr-haltig)	Testergebnis SST max. Unterwanderung nach 500h	Testergebnis SST max. Unterwanderung nach 3000h	Testergebnis FFT max. Fadenlänge nach 500h	Testergebnis FFT max. Fadenlänge nach 1000h	Gitterschnitt vor Wasserauslagerung	Gitterschnitt nach Wasserauslagerung	
				1 - ChromitAl 650	2 - Alodine 5923+	3 - Coventya	4 - TIZr	5 - Airdrox 1788	6 - Coventya	7 - Oxilan 502 (?)	8 - GP TMS	9 - Boegel	10 - Socogel A104									11 - Wasserglas 1%
Substrate	X	X	X											X		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[GT]	[GT]	
	X	X	X	X										X		0		2,25		none	none	
	X	X	X						X					X						0	1	
	X			P1										X		0		2,5		0	1	
	X			P1	X									X		0		2,75		0	2	
	X			P1					X					X		0		3,75		0	1	
	X			P1						X				X		0		2		0	1	
	X			P1							X			X		0		3,5		0	1	
	X			P1										X		0		3		0	2	
	X			P2										X		0		2,5		none	none	
	AA2024 unclad	X	X	X	X										X		0		1		none	none
		X	X	X						X					X						0	0
		X	X	X											X						0	1
		X			P1										X		0		2,25		0	1
		X			P1	X									X		0		1,75		0	1
		X			P1					X					X		0		1,87		0	1
X				P1						X				X		0		1,5		0	0	
X				P1							X			X		0		2,25		0	0	
X				P1									X	X		0		1,5		0	1	
X				P2										X		0		2,5		none	none	

Die Anforderungen von Airbus an lackierte Systeme betragen für den Salzsprüh- bzw. den Filiformtest:

- Salzsprühtest (SST): 3000 h, Unterwanderung < 1,25 mm
- Filiformtest (FFT): 1000 h, Fadenlänge < 2 mm

2.4.1 Zusammenfassung

Mit den Verantwortlichen des Airbus Fertigungswerks Hamburg als auch mit der Entwicklungsabteilung bei Airbus Bremen wurde nach Vorstellung der Ergebnisse vereinbart, alle weiteren Nachtauchversuche, die noch anstehen, bis zum Projektende auszusetzen. Der Grund hierfür liegt in der bisher nicht nachweisbaren Verbesserung durch die gewählten, applizierten und in Korrosionstests ermittelten Ergebnisse. Vielmehr ist durch das Nachtauchen eine Verschlechterung der Langzeitstabilität zu beobachten gewesen. Eine mechanistische Erklärung dieses Verhaltens steht noch aus. Dies soll aber nicht zu vorschnellen Schlüssen führen, dass Nachtauchkonzepte generell ungeeignet sind im Hinblick auf eine Verbesserung der Langzeitstabilität. Auf anderen Gebieten der Vorbehandlung konnten nachweislich positive Ergebnisse erzielt werden. Im Rahmen des Programms „RADICAL“ bedarf es einer intensiveren Erforschung unter Einbezug weiterer chemischer Lösungssysteme. Dies wird auf das Nachfolgeprogramm „NeWeFe“ verschoben und daher im Programm „RADICAL“ nicht mehr nachverfolgt. Die eingestellten Aktivitäten des AP11 werden zugunsten des durch Airbus höher priorisierte Arbeitspaket AP30 aufgegeben, um dort schneller den durch Airbus geforderten technischen Reifegrad im Sinne einer Hochskalierung für die Umsetzung in die Fertigung zu erreichen.

2.4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Hier betritt man in Bezug auf Oxidschichten „Neuland“ im Flugzeugbau. Industriebranchen, wie z.B. die Automobilindustrie machen sich ähnliche Technologien für eisenhaltige Substratwerkstoffe zu Nutzen und setzen diese bereits serienmäßig mit Erfolg ein.

Daher ist eine Unterstützung hier im Falle des Flugzeugbaus erforderlich und sinnvoll.

2.4.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan

Die ersten Versuche zeigen, dass eine intensivere Erforschung auf dem Gebiet der Nachtauchlösungen für den Werkstoff Aluminium erforderlich ist. Dies ist sehr grundlagenorientiert und bedarf einer eigenen Untersuchung. Für die aktuelle Nutzung in einem Szenario zwischen den Reifegraden 2 bzw. 3 würden die Nachtauchprozesse eher mit „0“ bzw. „1“ zu bewerten sein. Daher wurde die Priorisierung in „RADICAL“ als gering eingestuft und die Versuchsdurchführung nach ersten Tastversuchen beendet, da diese eher zu einer Verschlechterung der Langzeitstabilität führten. Eine Nutzung bzw. Verwertung kann in diesem frühen Stadium noch nicht beurteilt werden.

2.4.4 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In Bezug auf die luftfahrttypischen Legierungen ist derzeit nichts bekannt.

2.4.5 Veröffentlichungen, Vorträge

Keine.

2.4.6 Literatur

Keine

2.5 AP4: Schnelle Schalenfertigung

Autor: H. Fietzek

2.5.1 Motivation und Ziele

Das Projekt befasst sich mit der Entwicklung alternativer Werkstoff- und Fertigungskonzepte für den metallischen Flugzeugrumpf.

Auf werkstofftechnischer Seite wird eine Prozessroute dargestellt, die eine kostengünstige Herstellung von Rumpfschalensegmenten mit Stringern aus der hochfesten Aluminium-Magnesium-Scandium Legierung (AlMgSc) erlaubt. Der Werkstoff soll, sowohl als Hautblech als auch als roll-geformter Stringer eingesetzt, zu einer deutlichen Verbesserung der Leistungsfähigkeit eines metallischen Flugzeugrumpfes beitragen. Hier wird untersucht ob die Produktionsschritte Umformen der Bleche und Aufkleben der Stringer, simultan in einem Herstellungsschritt möglich sind.

2.5.1.1 Motivation für das Hochtemperaturkleben von AlMgSc

Im Gegensatz zu den herkömmlich eingesetzten hochfesten Al-Legierungen wie z.B. A2024 kann das AlMgSc auf Temperaturen über 350°C erhitzt und umgeformt werden ohne seine mechanischen Eigenschaften zu verlieren.

Im AP 40 „Schnelle Schalenfertigung“ wird die herausragende Temperaturstabilität des AlMgSc ausgenutzt um eine Möglichkeit zur Optimierung der Herstellungsrouten für Hautbleche mit Stringern durch das Zusammenlegen der Fertigungsschritte „Umformen der Bleche“ und „Aufkleben der Stringer“ zu evaluieren.

Das Stringerkleben erfolgt aktuell mit Epoxidklebern, die bei maximal mit 180°C beaufschlagt werden dürfen. Diese erlauben somit nicht die thermische Prozessführung mit bei 325°C, wie sie das Kriechumformen von AlMgSc voraussetzt.

Vorversuche für die Rumpfschalenfertigung haben generell gezeigt das moderne Hochleistungsthermoplaste als Kleber bei den angepeilten 325°C fungieren können.

Wird ein geeigneter „Hochtemperaturkleber“, d.h. Thermoplast gefunden, könnte die gleichzeitige Nutzung von Temperatur und Zeit des Blechumformprozesses auch für die Klebung die Einsparung eines Fertigungsschrittes ermöglichen. Im AP 40 soll ein entsprechender Nachweis erbracht werden.

2.5.1.2 Ziele

Es ist beabsichtigt, in der Fertigung von Schalenbauteilen die zwei Prozesse Umformen und Stringerkleben gleichzeitig stattfinden zu lassen, um Fertigungszeit, Energie und Vorrichtungsaufwand zu sparen.

Ziel im AP40 ist die Bewertung der Machbarkeit der zeitlichen Kombination der zwei Fertigungsschritte Kriechumformen und Aufkleben von Stringern. Diese Prozesskombination, die als solche bisher nicht existiert und daher neue spezifische Randbedingungen hat, wird hier von Beginn an neu konzipiert.

Da das Kriechumformen Temperaturen um 325°C benötigt, und konventionelle Klebstoffe für strukturelle Klebungen bei nur bis 180°C ausgehärtet werden können, besteht die Herausforderung darin einen Kleber und die passende Klebevorbereitung für diesen Temperaturbereich zu finden. Folgende Teilziele wurden definiert:

- Identifikation eines geeigneten Hochleistungsthermoplasts der als Kleber bei den Umformbedingungen der AlMgSc Bleche fungiert
- Finden und Optimieren einer geeigneten Klebevorbereitung für AlMgSc
- Demonstration der Machbarkeit der Prozesskombination Kriechumformen und strukturelles Kleben im Labormaßstab

2.5.2 Planung und Vorgehensweise

2.5.2.1 Meilensteine

- M 4.1 12/2012 Die Entwicklung und Fertigung einer tauglichen Fertigungsvorrichtung für den Laborbetrieb ist abgeschlossen. Ein oder mehrere Thermoplastwerkstoffe sind als tauglich identifiziert. Eine geeignete Oberflächenvorbereitung für Stringer und Blech ist ermittelt.
- M 4.2 12/2013 Der kombinierte Kriechumform- & Klebevorgang ist reproduzierbar. Das Prozedere für eine lokale Optimierung in Folge ist bekannt.
- M 4.3 12/2014 Die Bewertung des optimierten Prozesses hinsichtlich notwendiger Randbedingungen, Eigenschaften und Kosten ist abgeschlossen.

2.5.2.2 Partner im Unterauftrag

Es waren keine Unteraufträge geplant.

2.5.3 Ergebnisse

2.5.3.1 Kleberscreening

Um mögliche Thermoplaste als Kleber zu identifizieren, wurde eine umfassende Recherche durchgeführt. Die Hauptauswahlkriterien waren: Schmelztemperatur > 300°C, Zersetzungstemperatur > 400°C und Dauergebrauchstemperatur > 180°C.

Tabelle 2.5-1 listet die Kandidaten mit ihren thermischen und mechanischen Eigenschaften auf, die das Anforderungsprofil am besten erfüllen.

Generell wird angenommen dass ein Kunststoff, der in dem Temperaturbereich um 325°C eine niedrigviskose Schmelze mit hoher Oberflächenspannung aufweist, die besten Voraussetzungen hat einen vorgegeben Klebespalt auszufüllen. Daher wurde die Kandidatenliste in Experimenten zur Bewertung des Verhaltens der Kunststoffschmelze in Bezug auf Viskosität, Benetzungsvermögen und Fließverhalten weiter eingegrenzt.

Tabelle 2.5-1: Ausgewählte Thermoplaste mit geeigneten thermischen Eigenschaften. Werte sind den Herstellerangaben entnommen.

Produkt	Glasübergangstemperatur T _g [°C]	Schmelztemperatur [°C]	Zersetzungstemperatur [°C]	Linearer Wärmeausdehnungs- koeffizient [$10^{-6} K^{-1}$]	Dauergebrauchstemperatur [°C]	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]
VICTREX® PEEK 450 PF (Pulver)	143	343	>400	45	-	160	3,7
VESTAKEEP® 2000FP (PEEK Pulver)	~150	340	>400	60	bis 260	100	3,7
VESTAKEEP® AR1056 (PEEK Pulver)	~150	340	>400	60	bis 260	100	3,7
<i>InChem Corporation</i> PKHP-200 (Folie)	92	-	>400	-	-	-	2,6
PPS (Folie)	90	300-320	>700	52	220	85	24
PPS-20% CFR (Granulat)	90	300-320	>700	15	220	180	17
PPS-40% GFV (Granulat)	90	300-320	>700	22-35	200-240	124-160	7,6-12
PEEK mit C-Fasern (Folie)	143	ca. 340	-	15	bis 260	180	18,5
Solvay PR-250 SRP (Folie)	168	343-349	-	-	-	152	6
Ultem1000B PEI (Folie)	217	340-415	>530	52	-	85-112	2,5-3,2

Da die meisten Thermoplaste nur in Pulverform erhältlich sind, wurden die Pulver in verschiedenen Dicken auf einer teflonbeschichteten Folie mit Variationen der Temperatur und Haltezeit aufgeschmolzen. Analog wurde mit den Thermoplasten in Folienform verfahren. Die Beobachtungen geben Aufschluss über die thermische Beständigkeit des Thermoplasts, sein Vermögen einen Klebspalt zu füllen und Luft zu verdrängen oder einzuschließen. Im gleichen Aufbau wurde das Benetzungsverhalten der Schmelzen auf Aluminiumblechen mit unterschiedlichen Klebevorbehandlungen getestet.

Abbildung 2.5-1 zeigt die Herstellung von definierten Pulverschichtdicken und aufgeschmolzene Proben auf der Teflonfolie und einen Aluminiumblech.

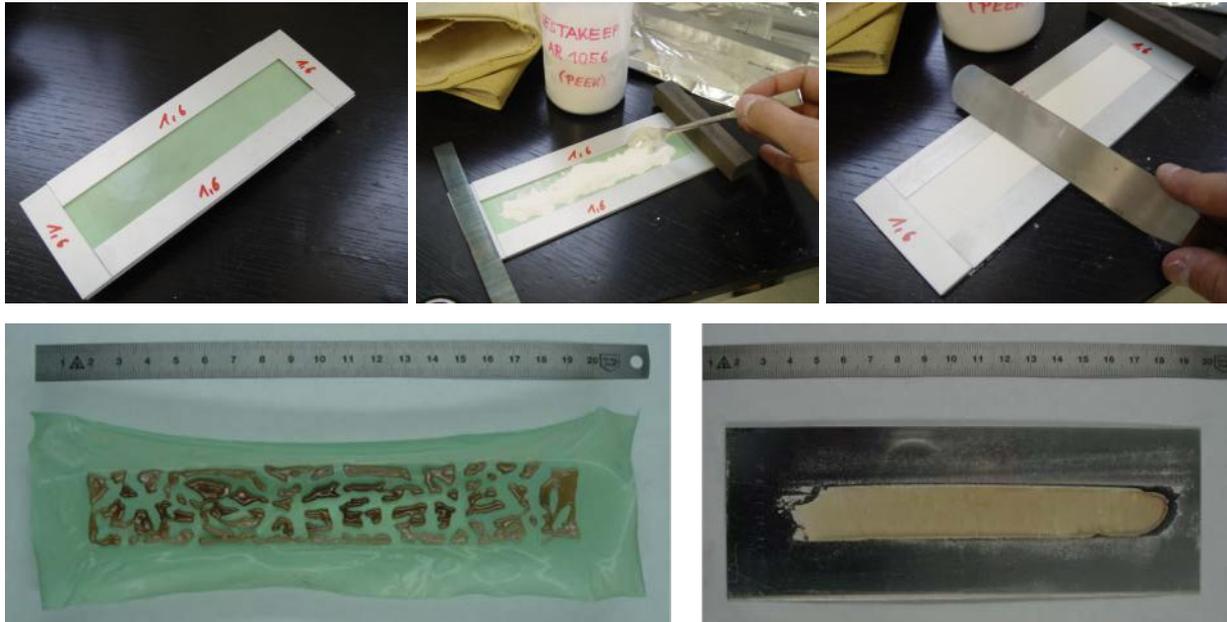


Abbildung 2.5-1: Oben: Herstellung von 1,6 mm dicken Pulverschichten zur Bestimmung von Viskosität, Fließ- und Benetzungsverhalten der Thermoplastschmelzen. Unten: Exemplarische Proben nach dem Aufschmelzen

Die PEEK Pulver und PPS, als verstärktes Granulat und reine Folie, zeigten die besten Ergebnisse. Beide haben das gewünschte Schmelzverhalten, bleiben im getesteten Temperaturbereich chemisch unverändert und zeigen positives Fließ- und Benetzungsverhalten.

Für die Applikation der PEEK-Pulver wurde versucht Schichten mittels thermisch Spritzen herzustellen. Gute Schichten erzielten jedoch speziell für thermisches Spritzen optimierte Pulver. Diese optimierten Pulver sind eigentlich dafür bestimmt glatte, porenfreie Überzüge zu erhalten und beinhalten daher Additive die das Fließverhalten beeinflussen. Wahrscheinlich sind diese Additive der Grund, dass die mit thermischem Spritzen applizierten Schichten in späteren Klebversuchen nicht zu zufriedenstellenden Klebefestigkeiten führten.

Das Resultat des Screenings ist das die unverstärkte PPS Folie die gestellten Anforderungen am besten erfüllt. Daneben hat PPS (hauptsächlich faserverstärkt) den Vorteil, dass es ein von Airbus zugelassener Werkstoff ist, der sich besonders durch Dimensionsstabilität über einen großen Temperaturbereich, Härte, Schlagfestigkeit und exzellente Beständigkeit gegen Chemikalien auszeichnet. Dazu zeigt er praktisch keine Feuchtigkeitsaufnahme und erfüllt durch seine inhärente Flammwidrigkeit die Brandschutzbestimmungen von Flugzeugen [1, 2]. Neben den guten Materialeigenschaften des PPS kann durch den Verstärkungfasergehalt der Wärmeausdehnungskoeffizient an den von Aluminiumlegierungen angepasst werden, wodurch der Aufbau thermischer Spannungen in der Klebung verhindert werden kann.

¹ „Airbus fliegt mit PPS“ Henning Küll, Carl Hanser Verlag, München, Jahrg. 92 (2002)

² <http://www.resinex.de/produkte/fortron.html>

2.5.3.2 Finden und Optimieren der Klebevorbehandlung und Prozessführung

Anforderungen an eine Klebevorbehandlung für AlMgSc ist eine bis > 325°C chemisch stabile, offenporige, gut haftende Schicht zu erzeugen. Die Oberflächenmorphologie soll ein mechanisch formschlüssiges Verkrallen der Thermoplastschmelzen ermöglichen und funktionelle Gruppen für die chemische Anbindung bereitstellen. Hier wurden typische galvanische Klebevorbehandlungsverfahren und das Laserstrukturieren auf ihre thermische Stabilität und Eignung überprüft.

Die galvanischen Vorbehandlungsverfahren sind Anodisieren im Phosphor- Schwefelsäuregemisch (PSA) und Wein- Schwefelsäuregemisch (TSA). In der Luftfahrt ist PSA die Standardklebevorbehandlung für Aluminiumlegierungen. TSA findet Verwendung als Vorbehandlung zum Lackieren und Klebungen auf TSA hätten den Vorteil einer einheitlichen Vorbehandlung für Kleben und Lackieren. AGI untersucht schon seit längerem Laserstrukturieren für Klebeanwendungen mit epoxidbasierten Klebstoffen und konnte schon damit schon hohe Klebefestigkeiten mit ausgezeichneter Langzeitstabilität darstellen. Gegenüber den galvanischen Badprozessen hat Laserstrukturieren den Vorteil, dass es lokal angewendet werden kann und keine Beschränkungen der Bauteilgröße durch Bäder existieren.

2.5.3.3 Thermische Stabilität der Klebevorbehandlungen

Im Vergleich zum Ausgangszustand wurde mittels physikalischer Oberflächenanalytik (REM, XPS, EDX, Goniometrie) die thermische Stabilität der Vorbehandlungen nach Auslagerung im Ofen bei 350°C untersucht. Keine der getesteten Oberflächen zeigte thermisch induzierte Degradationen.

2.5.3.4 Optimieren der Klebevorbehandlungen und Prozessführung

Die Oberflächenvorbehandlungen und die zum Kleben verwendete Pressung werden durch die resultierende Klebefestigkeit (Haftung) charakterisiert. Anpassung der Vorbehandlung auf den „Kleber“ PPS fand nur bei der Laserstrukturierung statt, da galvanisches PSA oder TSA bereits optimierte qualifizierte Prozesse sind, die nicht die Möglichkeit der Variation von Strukturgrößen bieten. Der Bereich der möglichen Parameter für die Laserstrukturierung wurde durch Topographiebetrachtung im REM und mit Stirnabzugsversuchen auf 3 Parametersätze eingegrenzt. Aus Mangel an AlMgSc-Blechen fanden Optimierungen auch auf AA2024 statt, welches sich jedoch in Bezug auf die Vorbehandlungen sehr ähnlich zu AlMgSc verhält.

Abbildung 2.5-2 gibt eine Übersicht der letzten Versuchsreihe zur Bestimmung der erreichten Haftungswerte der PPS-Klebungen in Stirnabzugs- und Scherzugversuchen wieder. Als Referenz dienen die zwei typischen Epoxidkleber für Strukturklebung in der Luftfahrt, FM73 und FM300.

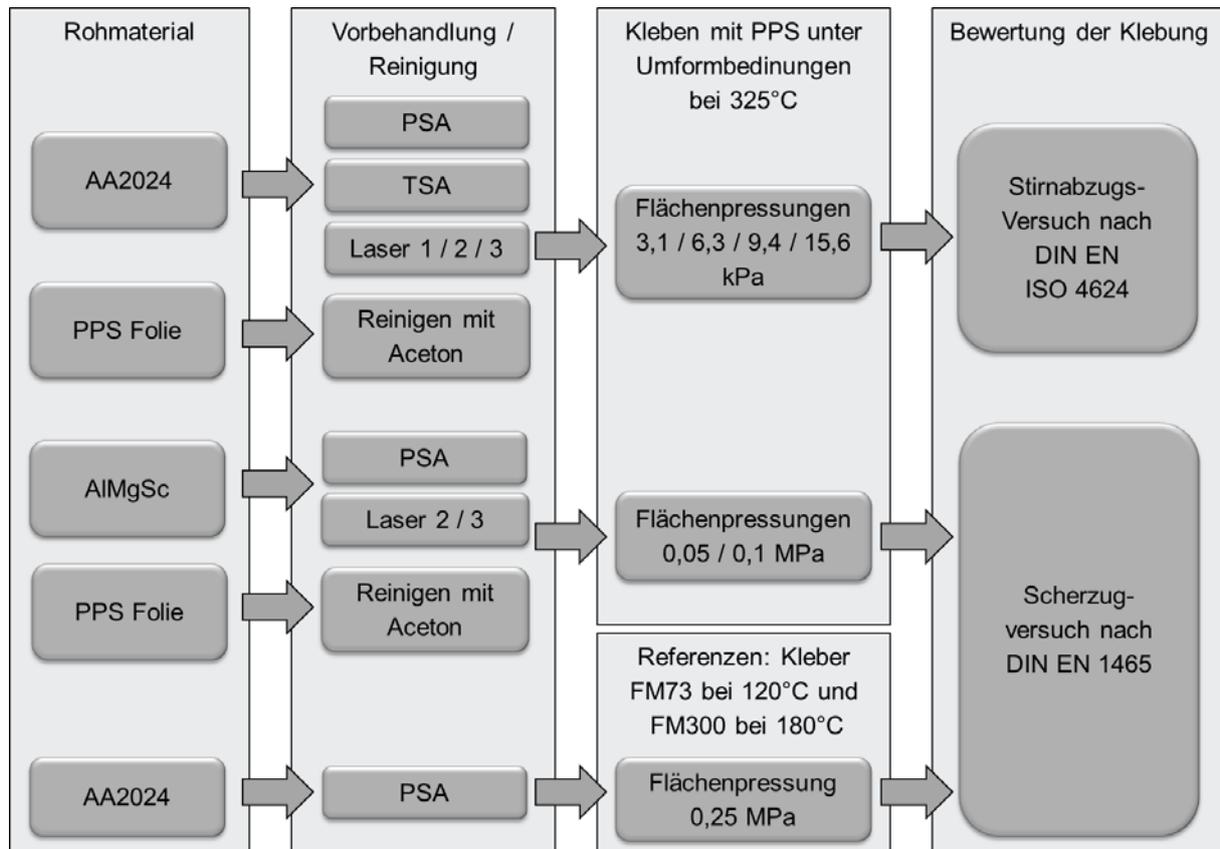


Abbildung 2.5-2 Versuchsmatrix für die Bewertung von Klebungen mit PPS und den Vergleich mit den Strukturklebern FM73 und FM300.

Im Stirnabzugsversuch wurden die Vorbehandlungen, die Parameter der Laservorbehandlung (Laser 1, 2 und 3) und die Pressungen beim Verkleben variiert. Anschließend wurden im Scherzugversuch die besten Vorbehandlungen mit den Referenzklebern FM73 und FM300, die nach Airbusvorschrift auf PSA bei 0,25 MPa und 120°C bzw. 180°C verklebt wurden, verglichen.

Die beim Kleben mit PPS verwendeten Pressungen sind die mit den jeweiligen Vorrichtungen realisierbaren Pressungen. Beschränkungen für die Gewichte ergaben sich aus den Abmaßen der zur Verfügung stehenden Öfen.

Abbildung 2.5-3 zeigt die für beide Probenformen verwendeten Klebevorrichtungen.

Die abschließende Bewertung der Klebungen erfolge im Zugscherversuch. Das Diagramm in Abbildung 2.5-4 stellt die Zugscherspannungen der besten PPS-Systeme den qualifizierten Referenzklebungen mit FM73 und FM300 gegenüber.

An den in Abbildung 2.5-5 dargestellten typischen Bruchflächen der mit PPS verklebten Scherzugproben ist überall 100% adhäsives Versagen zu erkennen und die Klebeflächen enthalten Blasen.

Die nicht dargestellten Bruchbilder der Referenzproben weisen ein 100% kohäsives Versagen auf. Dem zur Folge sind die gemessenen Zugscherspannungen die maximal mit den Strukturklebern FM300 und FM73 erreichbaren Werte.

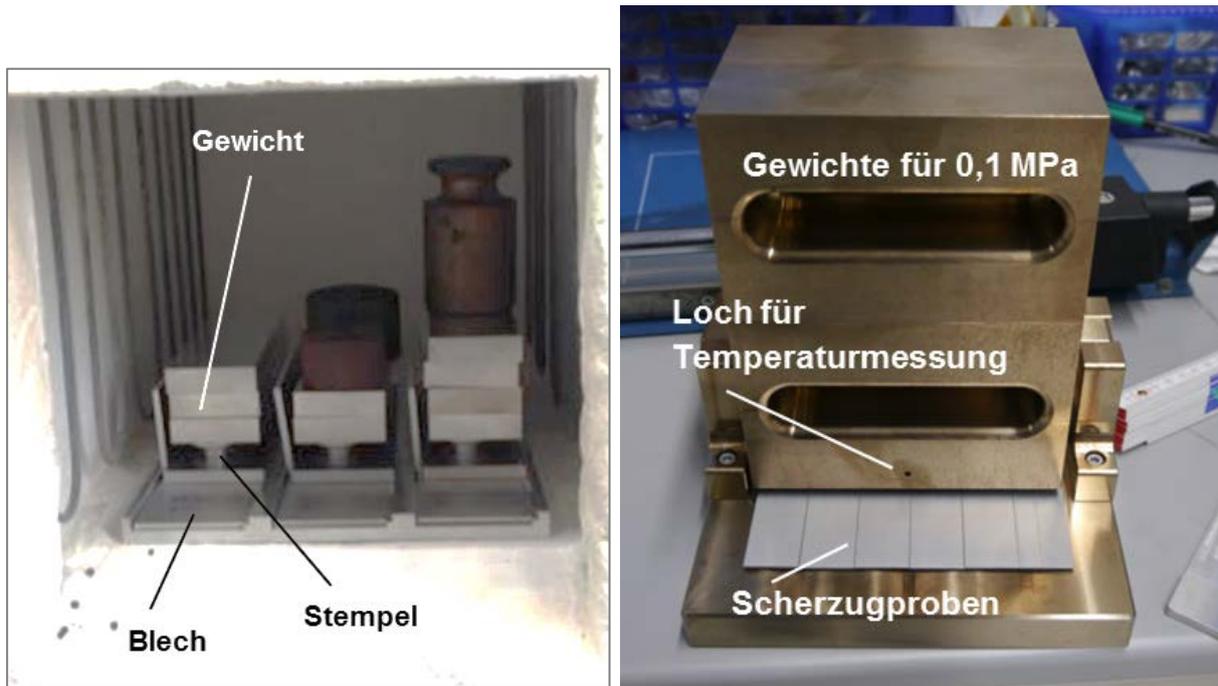


Abbildung 2.5-3 Links: Stirnabzugsproben in Positioniervorrichtung mit Gewichten beschwert im Ofen.
Rechts: Vorrichtung für das Verkleben der Schervzugproben mit Gewichten für 0,1 MPa.

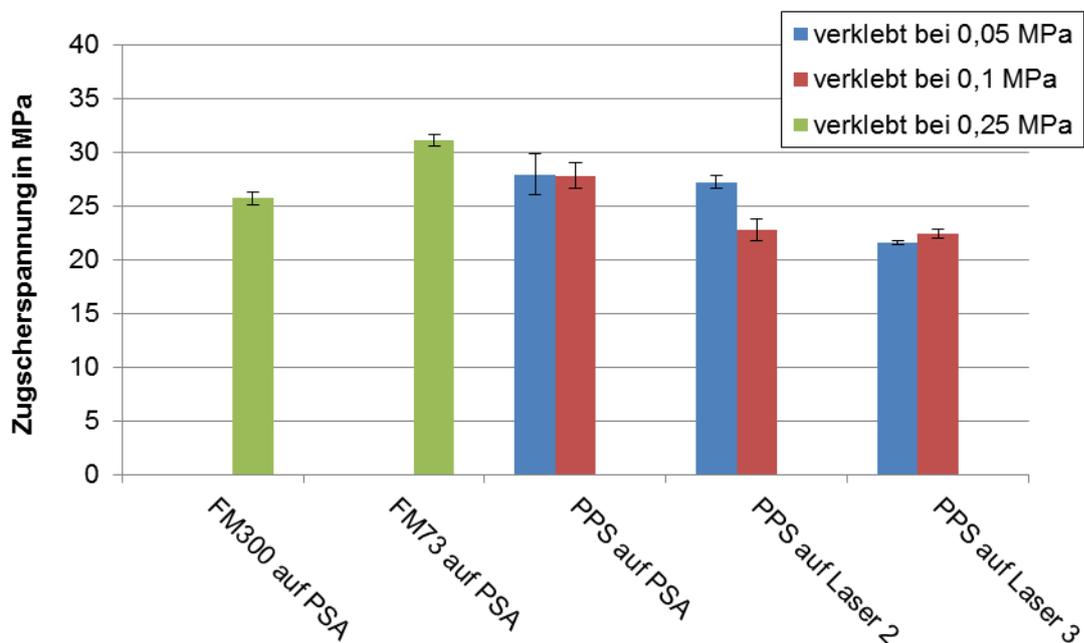


Abbildung 2.5-4 Gemessene Zugscherspannungen

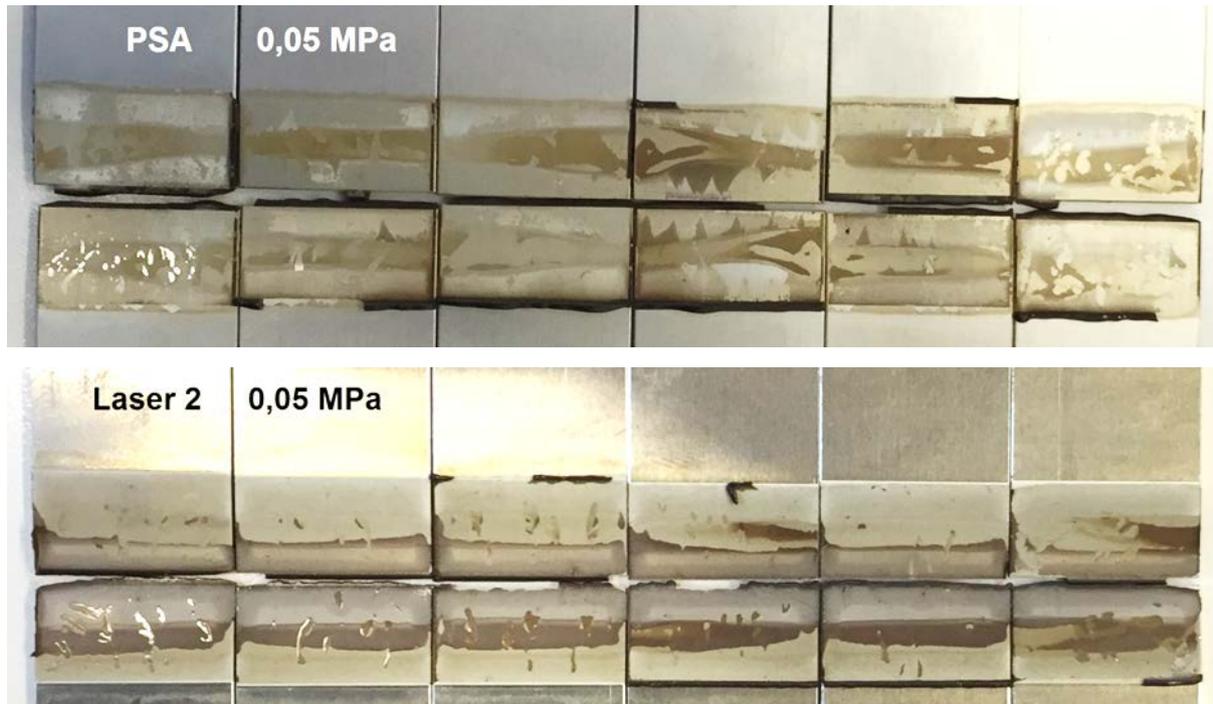


Abbildung 2.5-5 Bruchflächen der Scherzugproben mit PPS auf PSA und Laser 2 verklebt bei 0,05 MPa

Die Klebepressung hat im getesteten Bereich keinen nachweisbaren Einfluss auf die erreichten Spannungswerte.

Die PPS-Klebung auf dem mit PSA behandeltem AlMgSc ordnet sich mit Maximalwerten von 28 MPa zwischen den Epoxidklebern FM300 (26 MPa) und FM73 (32 MPa) ein. Das bedeutet dass die Klebung mit PPS mit einem adhäsiven Bruchbild bessere Werte erreicht als der Strukturkleber FM300 und beinahe so gute Werte wie der FM73, die komplett kohäsiv brechen.

Die Zugscherspannung von PPS auf der Vorbehandlung Laser 2, verklebt bei 0,05 MPa, liegt mit 27 MPa ebenfalls höher als die Werte des FM300.

Da PPS adhäsiv und die Strukturkleber kohäsiv – kohäsiv bedeutet die Haftung ist höher als die Zugfestigkeit des Klebermaterials - versagen, können bei PPS-Klebungen durch Weiterentwicklung der Klebvorbehandlung noch deutliche Steigerungen der Haftung erreicht werden.

2.5.3.5 Demonstration der Prozesskombination Kriechumformen und Kleben

Die Machbarkeit der Prozesskombination Kriechumformen bei 325°C und gleichzeitiges Kleben wurde an einem 150 mm langen Stringer aus Aluminium 2024, der auf ein AlMgSc Blech geklebt wurde demonstriert. Beide Teile wurden in einem Arbeitsschritt umgeformt und gleichzeitig verbunden. Abbildung 2.5-6 zeigt den Stringer auf dem umgeformten Blech und die Umformvorrichtung (Grundplatte mit gefrästem Radius und in den Radius passenden Stempel). Der Bogen zwischen Bodenplatte und Stempel der Umformvorrichtung beschreibt einen Kreis mit $R = 643$ mm.

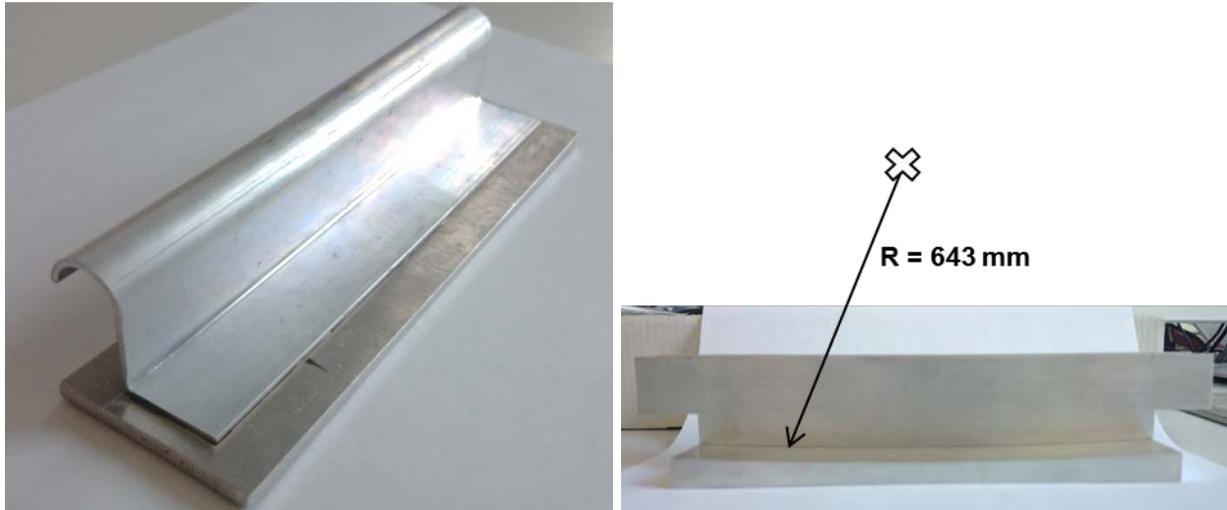


Abbildung 2.5-6: Links: Demonstrator Stringer auf Blech.
Rechts: Umformvorrichtung zum Kriechumformen und gleichzeitigem Kleben bei 325°C.

Zwischen Grundplatte und Stempel der Umformvorrichtung wurden die laserbehandelte Platte, darauf die PPS Folie und dann der Stringer und gelegt und im Ofen bei 325°C und 0,05 MPa Pressung umgeformt und gleichzeitig verklebt (Aufwärmen von RT auf 325°C = 4 h / Haltezeit 2 h / Abkühlen auf ca. 100°C = 4 h).

Abbildung 2.5-7 ist ein Foto des Demonstrators nach dem Umform- Klebevorgang. Obwohl für den Versuch der Stringer nur in AA 2024 verfügbar war, konnte der Prozess erfolgreich demonstriert werden. Die für den Umformprozess sehr geringe Pressung von 0,05 MPa führte zu einer Verformung der Platte und des Stringers, wobei der Fuß des Stringers etwas mehr als das Profil verformt wurde. Der Thermoplast ist gleichmäßig im Klebespalten verlaufen.

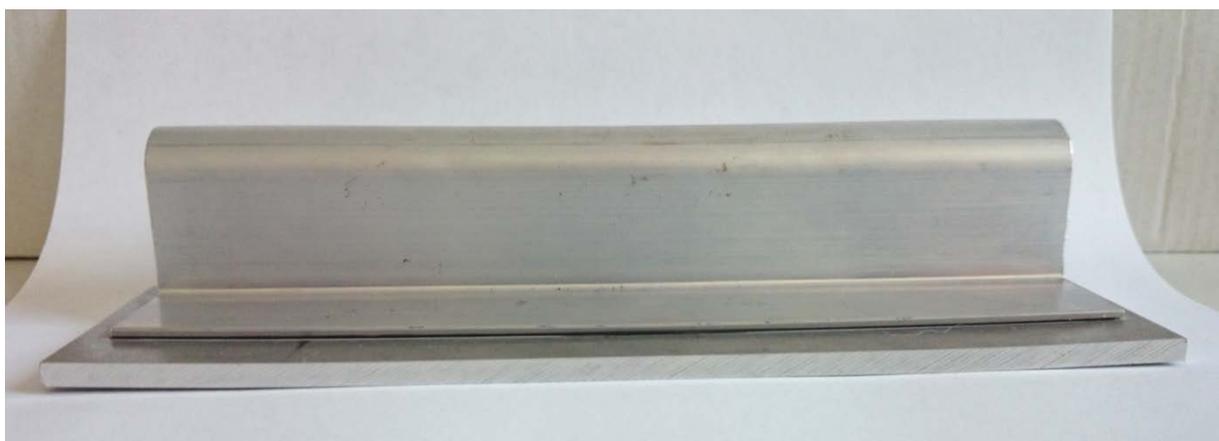


Abbildung 2.5-7: Umgeformt und gleichzeitig verklebter Demonstrator einer Klebeverbindung eines Stringers auf einem Flugzeugrumpffpanel.



Abbildung 2.5-8: Bruchflächen der Stringerprobe nach dem Trennen

Die Form der gebogenen Stringerprobe lässt keine objektive Messung der Haftung zu, aber subjektiv wird die Klebung als sehr stabil angesehen, da das Trennen der Probe erst nach mehrmaligem Ansetzen mit einem Stemmeisen und Hammerschlägen gelang, wobei sich die gesamte Probe verbogen hat. Wie bei den Zugscherproben ist das Versagensbild adhäsiv, jedoch finden sich im Großteil der Klebefläche keine Blasen. In den Bereichen mit Blasen ist die Schichtdicke des PPS deutlich dünner als in den merkmalsfreien Bereichen, was darauf hindeutet dass die Höhe des Klebspalts ein wichtiger Parameter für erfolgreiche Klebungen ist.

Nachdem hier die Machbarkeit der Prozesskombination Kriechumformen und gleichzeitiges Verkleben mit einem Thermoplast erfolgreich nachgewiesen wurde, beschäftigen sich die nach dem Projektende weiterführenden Arbeiten mit der Umsetzung der Verbindungstechnik auf größere Bauteile, die Entwicklung der notwendigen Positionier- und Spannvorrichtungen und der Abklärung aller mit dem Up-Scaling verbundener Problemstellungen.

2.5.4 Zusammenfassung

Im Gegensatz zu den herkömmlich eingesetzten hochfesten Al-Legierungen wie z.B. A2024 kann das AlMgSc auf Temperaturen über 350°C erhitzt und umgeformt werden ohne seine mechanischen Eigenschaften zu verlieren. Im AP 40 „Schnelle Schalenfertigung“ wird die herausragende Temperaturstabilität des AlMgSc ausgenutzt, um eine Möglichkeit zur Optimierung der Herstellungsrouten für Hautbleche mit Stringern durch das Zusammenlegen der Fertigungsschritte „Umformen der Bleche durch Relaxationsumformen bei ca. 300°C“ und „Aufkleben der Stringer“ zu evaluieren. Die Herausforderung besteht darin einen Klebstoff zu finden der bei Temperaturen um 300°C ausgehärtet werden kann, da die aktuell verwendeten Epoxidkleber nur mit maximal 180°C beaufschlagt werden dürfen. Das Kleberscreening identifizierte den Thermoplast PPS als möglichen „Hochtemperaturkleber“. Als Klebevorbehandlung der Blech- und

Stringerproben wurden die qualifizierten galvanischen Verfahren und Laserstrukturierung untersucht. Nach Optimierung der Prozessparameter konnten mit PPS auf den Vorbehandlungen Phosphor-Schwefelsäureanodisieren (PSA) und Laserstrukturierung im Scherzugversuch Klebefestigkeiten in der Größenordnung der zugelassenen Strukturkleber FM300 und FM73 auf PSA erreicht werden. Die Prozesskombination Umformen mit simultanem Stringerkleben wurde abschließend im Labormaßstab demonstriert.

2.5.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Um den Vorteil der geringeren Dichte von AlMgSc gegenüber AA2024 und die damit verbundene Treibstoffeinsparung zu einem annehmbaren Preis anbieten zu können, muss der höhere Preis der AlMgSc-Legierung teilweise durch Einsparungen in der Produktion kompensiert werden. Der Ansatz im AP40 war neuartig und notwendig, um die theoretisch mögliche Zusammenlegung der zwei Produktionsschritte Blechumformen und Stringerkleben, und damit das Einsparungspotential in Bezug auf Prozesszeiten und Energieverbrauch abzuschätzen. Die Untersuchungen waren angemessen, da im Labormaßstab mit stark vereinfachten Standardproben gearbeitet wurde.

2.5.6 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan

Das Kleben mit Thermoplasten, und besonders mit PPS, ist in vielen Gebieten des Flugzeugbaus von Interesse, da lösbare Klebungen mit hoher Temperaturbeständigkeit erzeugt werden können. Voraussetzung für gute Klebungen ist immer die Klebevorbereitung. Die hier für PPS weiterentwickelte Laserbehandlung kann ebenfalls mit den hier nicht betrachteten faserverstärkte PPS-Varianten eingesetzt werden. Aufgrund der guten Projektergebnisse und der engen Zusammenarbeit im Konsortium unternimmt der fertigende Partner PAG Versuche den Konstruktionswerkstoff faserverstärktes PPS mit Titan zu verkleben. Durch die im Projekt gesammelte Erfahrung konnte AGI die auf AA2024 und AlMgSc optimierte Laserbehandlung ebenfalls für Titan anbieten.

2.5.7 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die untersuchte Zusammenlegung der Prozessschritte Umformen von AlMgSc-Blechen und simultanes Stringerkleben in gleicher Prozesswärme ist einzigartig, da diese Anwendung sehr speziell auf den Fertigungsprozess von Flugzeugrümpfen abgestimmt und auch nur mit der relativ neuartigen AlMgSc-Legierung möglich ist, die kurz vor der Kommerzialisierung steht.

2.5.8 Veröffentlichungen, Vorträge

Keine

2.5.9 Literatur

Keine

2.6 AP5.1: Aufdornprozess für „one-step-assembly“

Autor: E.D. Reese

2.6.1 Aufgabenstellung

Aufgabe dieses Arbeitspaketes war die Weiterentwicklung eines Aufdornwerkzeuges (Abbildung 2.6-1) zur industriellen Reife, mit welchem die Ermüdungsfestigkeit von Montagebohrungen in Flugzeugstrukturen verbessert und ein einstufiges Montagekonzept („one-step-assembly“) - für die aktuell notwendige mehrstufige Montage - realisiert werden sollte. Die generelle Funktionsweise des Werkzeuges konnte anhand der im Vorfeld zu diesem Vorhaben durchgeführten Studien nachgewiesen werden. Für einen industriellen Einsatz sind aber Robustheit und Langlebigkeit des Werkzeuges maßgebend. Je mehr Bohrungen (> 5.000 Bohrungen) mit einem Werkzeug aufgedornt werden können, desto größer ist bei den Fertigungskosten das Einsparungspotential.

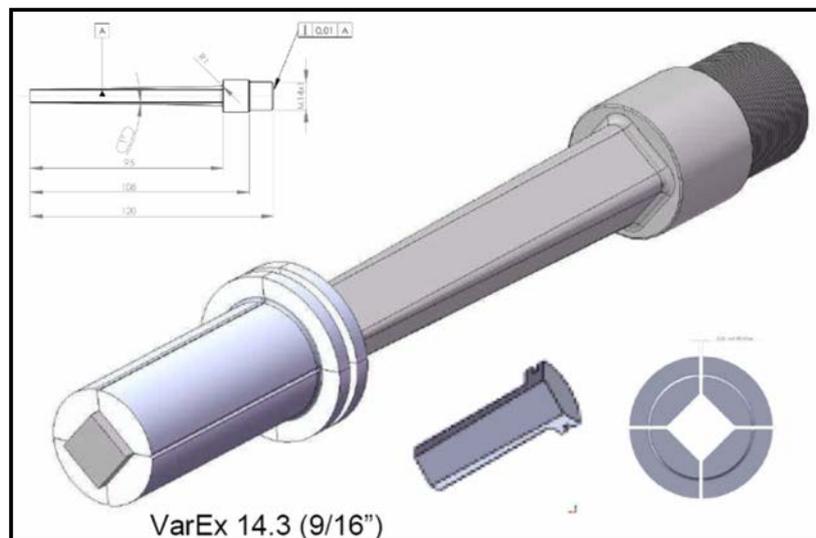


Abbildung 2.6-1: Schematische Darstellung des Aufdornwerkzeuges

Aufgaben im Vorhaben waren:

- die Optimierung der Werkzeuggeometrie in Verbindung mit einer geeigneten Werkstoffauswahl,
- die Minimierung von Reibung und Verschleiß durch optimale Gestaltung der Funktionsflächen mittels geeigneter Beschichtung,
- Anbindung an die Airbus-Infrastruktur, idealerweise für einen 1:1-Austausch des vorhandenen Werkzeuges.

2.6.2 Voraussetzungen

Das Aufdornen von Montagebohrungen ist ein etablierter Prozess zur Einbringung von Druckeigenanspannungen; dadurch wird die Ermüdungsfestigkeit verbessert. Diese Methode wird seit

vielen Jahren im Hause Airbus eingesetzt. Mit der Einführung neuer, hochfester Aluminiumlegierungen (z.B. 7xxx-Serie) hat sich gezeigt, dass mit der konventionellen Methode bei diesen Werkstoffen - vermutlich auf Grund der starken Anisotropie der Mikrostruktur - eine homogene Verformung nicht möglich war und es schon bei geringen Aufweitgraden zur Rissbildung kam. Bei AGI (ehemals: EADS IW) wurde daraufhin ein alternatives Verfahren entwickelt, mit dem eine gleichförmige Aufweitung über die gesamte Plattendicke erzielt werden konnte, ohne dass eine Schädigung des Materials (Rissbildung) eintrat. Dieses Verfahren bot zudem weitere Vorteile, unter anderem auch einen deutlich geringeren „volcanoe-Effekt“ (Wulstbildung in der Randzone), weshalb die Herstellung von z.B. Überlappverbindungen in einem einstufigen Fertigungsprozess realisierbar schien.

2.6.3 Planung und Ablauf

Mit Hilfe der Finite-Element-Methode sollte die Belastung des Werkzeuges (u.a. kritische Spannungen) analysiert und eine optimale Geometrie definiert werden. Mit Blick auf eine lange Funktionsdauer (Betriebsdauer) sollten geeignete Werkstoffe für Dorn und Hülse ausgewählt werden. Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten sollten Aufschluss über die ideale Werkstoffpaarung bzw. Oberflächenbeschichtung liefern. Letztlich war die Konstruktion des Werkzeugkopfes für die Anbindung und den Einsatz in der Montage zu optimieren.

2.6.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Aufdornen von Montagebohrungen zur Verbesserung der Ermüdungseigenschaften von Verbindungen ist nicht neu. Konventionell werden seit vielen Jahren Methoden wie das „split-sleeve-“, oder das „split-mandrel-Verfahren“ eingesetzt. In Zusammenhang mit der Anwendung dieser Fertigungsverfahren auf neue Aluminiumlegierungen mit ausgeprägt orthotropen Eigenschaften wurden die Grenzen dieser Methoden deutlich. Auf der Suche nach alternativen Möglichkeiten, den Effekt der Steigerung der Ermüdungsfestigkeit über das Einbringen von Druckeigenstressungen auch in den neuen Legierungen nutzen zu können, sind in der Vergangenheit Airbus-intern Entwicklungsarbeiten durchgeführt worden, die nun im Rahmen des Förderprogrammes weiter vorangetrieben werden sollen.

2.6.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Arbeiten sollten mit den Firmen MATFEM und KERN Micro- und Feinwerktechnik durchgeführt werden. Das Ingenieurbüro MATFEM sollte mittels der Finite-Element-Methode die Belastungssituation am Werkzeug analysieren. Die Firma KERN war für die Fertigung des Werkzeuges vorgesehen.

2.6.6 Ergebnisse

2.6.6.1 Optimierung der Werkzeuggeometrie

Die bisher gewählte Werkzeuggeometrie hatte sich im Laborversuch bewährt. Für den industriellen Einsatz waren die Abmessungen im Hinblick auf die zu erwartenden Beanspruchungen wie die maximal zu übertragenden Kräfte zu optimieren. Aufbauend auf den bisherigen Entwicklungsstand wurde daher in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro MATFEM, München, die

Belastungssituation am Werkzeug anhand von Finite-Element-Simulationen analysiert (Abbildung 2.6-2).

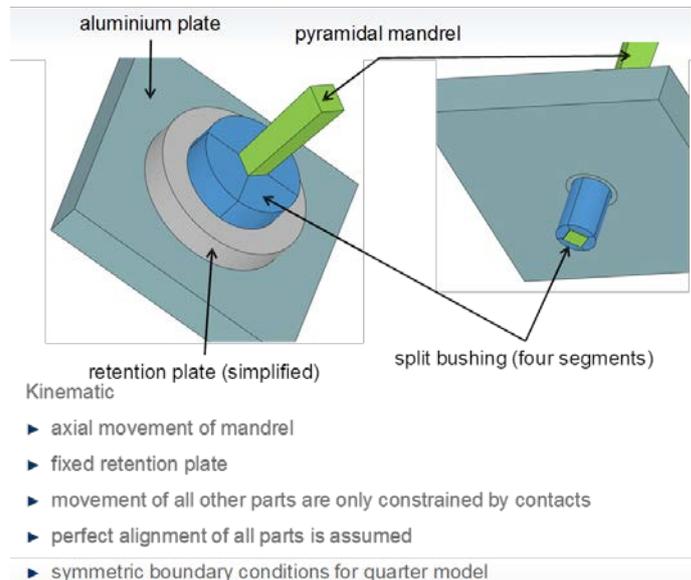


Abbildung 2.6-2: Analyse der Belastungssituation am Werkzeug mit Hilfe der FEM.

Am Beispiel eines typischen Durchmessers für eine Montagebohrung, wie er überwiegend in der Fertigung von Flugzeugstrukturen zur Anwendung kommt, wurden folgende Parameter betrachtet:

- der Winkel am Dorn bezüglich des Einflusses auf die Größe der axialen Last,
- der minimale Dorndurchmesser bzw. –querschnitt hinsichtlich der maximal ertragbaren Drucklast,
- der Radius im Übergang von den Funktionsflächen zu dem Flansch.

Danach ist der dünnste Querschnitt der Segmente auch der kritischste Bereich. Der Querschnitt kann vergrößert werden durch:

- Reduzierung des Dornquerschnitts
- Reduzierung des Winkels
- Modifizierung des Übergangsradius

Das Lastniveau kann angepasst werden durch:

- Verringerung des Winkels
- Verringerung der Reibung zwischen Dorn und Hülsensegmenten

Anhand der konkreten Werte aus der Simulation wurden die bisherigen geometrischen Abmessungen modifiziert und eine auf die zu erwartenden Lasten abgestimmte Werkzeuggeometrie festgelegt.

2.6.6.2 Werkstoffwahl

Kriterien für die Werkstoffauswahl von Dorn und Hülsensegmenten waren zunächst eine ausreichende Festigkeit bei genügender Duktilität, um die Lasten übertragen zu können. Zum anderen war die Beschaffenheit der Funktionsflächen so zu wählen, dass die Werte für Reibung und Verschleiß so niedrig wie möglich lagen. Für den Dorn wurde ein Hartmetall-Werkstoff hoher Druckfestigkeit, für die Hülsensegmente wurde eine hochfeste Nickel-Kobalt-Legierung gewählt. Die Funktionsflächen wurden mit einer mehrere Mikrometer dicken Schutzschicht versehen. Um Reibbeiwert und Verschleiß zu minimieren, wurde das System mit einem speziellen Luftfahrt-Schmierstoff gefettet.

2.6.6.3 Kapsel

Im Gegensatz zu den konventionellen Aufdornwerkzeugen „split-sleeve“ und „split-mandrel“ ist der Aufweitgrad bei dem VarEx-Werkzeug für einen gegebenen Bohrungsdurchmesser in Grenzen einstellbar. Dies hat den Vorteil, dass Abweichungen von einem nominell vorgegebenen Aufweitgrad – z.B. auf Grund von Bohrungstoleranzen oder Verschleiß am Aufdornwerkzeug - kompensiert werden können. In dem hier verfolgten Lösungsansatz wird die Dorn-Hülsen-Kombination des VarEx-Werkzeug in einer Kapsel gelagert, mit deren Hilfe der Verfahrensweg des Dorns kontrolliert und so die Aufweitung gesteuert werden kann. Aus Experimenten ist bekannt, dass die Elemente „Dorn“ und „Hülse“ speziell montiert und gelagert sein müssen, um einen verschleißarmen und störungsfreien Betrieb zu ermöglichen und zu gewährleisten. Es wurde eine entsprechende Vorrichtung entwickelt und konstruiert, die im Wesentlichen die Anforderungen an (a) Feineinstellung des gewünschten Aufweitgrades, (b) Lastübertragung, (c) Schmierung der Funktionsflächen, (d) Anbindung an der Kraftquelle bei (e) möglichst niedrigem Gewicht erfüllt, da das Gerät für den Handbetrieb geeignet sein soll.

2.6.7 Änderung im Arbeitspaket

Auf Grund der Vorteile des alternativen Verfahrens, insbesondere der erwarteten hohen Einsparungen bei den Fertigungskosten, und um einen zeitnahen Einsatz des Werkzeugs zu ermöglichen, entschied Airbus, die Industrialisierung des Werkzeugs einem Zulieferer zu übertragen. Die Entwicklungsarbeiten bei Airbus Group Innovations im Rahmen dieses Vorhabens wurden daraufhin eingestellt. (siehe auch Änderungsantrag).

2.7 AP5.2: Einfluss der Anodisierung auf das Ermüdungsverhalten von AlMgSc Ko8542

Autoren: T. Hack

2.7.1 Motivation und Ziele

In Vorversuchen wurde festgestellt, dass durch Anodisierung das Ermüdungsverhalten bei der AlMgSc-Legierung Ko8542 stärker herabgesetzt wird als bei der Referenzlegierung AA2024 plattiert.

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde ein neues Versuchsprogramm aufgelegt, das die Ursachen der Beeinträchtigung des Ermüdungsverhaltens näher eingrenzen und zur weiteren Klärung der Ursachen beitragen sollte.

2.7.1.1 Motivation

Die Anodisierverfahren Tartaric Sulfuric Acid Anodising (TSA) und Phosphoric Sulfuric Anodising (PSA) beeinflussen das Ermüdungsverhalten von Aluminiumbauteilen.

Die Beeinträchtigung der Ermüdungsfestigkeit der AlMgSc-Legierung Ko8542H116 ist offensichtlich wesentlich stärker ist als bei der Standardlegierung AA2024. Dieser Effekt ist insbesondere im relevanten Bereich von 10⁵ Lastwechseln der Wöhlerkurve zu erkennen. Weiterhin wurde festgestellt, dass bei Vorbehandlung nur mit Chemischer Konversionsbehandlung (ohne chemische Reinigung, nur in Verbindung mit mechanischem Schleifen) das Ermüdungsverhalten der AlMgSc-Legierung nicht beeinträchtigt wird (Airbus Operations Bericht Nr. X53RP1409600).

Da der Einsatzbereich der AlMgSc-Legierung in der Flugzeugstruktur durch die Erniedrigung der Ermüdungseigenschaften erheblich eingeschränkt wäre, ist es notwendig für die Abschätzung des Einsatzpotentials des Werkstoffes die Ursachen dieses Verhaltens näher zu untersuchen damit mögliche Abhilfen aufgezeigt werden können.

2.7.1.2 Ziele

Das Ziel der Arbeiten im Jahr 3 des AP50 war die Analyse des Ermüdungsverhaltens der AlMgSc-Legierung Ko8542 in Abhängigkeit der einzelnen Teilschritte der Vorbehandlungskette. Die Ergebnisse sollen einen wesentlichen als Beitrag zur Klärung der Ursachen des Ermüdungsabfalls liefern. Das Versuchsprogramm soll Aufschluss geben inwieweit Reinigung, Beizbehandlung, Anodisierbehandlung oder die resultierende Anodisierschicht selbst für die Beeinträchtigung ausschlaggebend sind.

2.7.2 Planung und Vorgehensweise

Es wurden Ermüdungsversuche an Proben mit verschiedenen Vorbehandlungen durchgeführt und Wöhlerkurven mit Schwerpunkt im Bereich um 10⁵ Lastwechsel erstellt. Die Darstellung des Einflusses der Oberflächenbehandlung auf die Zeitfestigkeit erfolgte über die Bestimmung des Verhältnisses des Airbus Fatigue Index ("AFI"). Darunter versteht man die Netto-Oberspannung der 50%-Line bei 10⁵ Lastwechseln.

Aus dem Verhältnis des AFI im Zustand mit Oberflächenbehandlung ($AFI_{(mit)}$) bezogen auf den Zustand ohne Oberflächenbehandlung ($AFI_{(ref)}$) ermittelt man den Airbus Fatigue Index – Knock-Down Faktor (AFI-KFD). Für den $AFI_{(ref)}$ wurde bei der Legierung Ko8542 der Airbus Fatigue Index der Behandlungsserie 0 (nur alkoholisch entfettet) herangezogen. Beim Werkstoff AA2024 wurde als Referenz ein entsprechender Wert aus dem Airbus Operations Versuchsprogramm (Bericht Nr. X53RP1409600) verwendet.

Der Airbus Fatigue Index – Knock Down Faktor (AFI-KFD) wird bestimmt:

$$AFI\text{-KFD} = AFI_{(mit)} / AFI_{(ref)}$$

Weitere Untersuchungen zur Auswertung beinhalten Fraktographie mittels Lichtmikroskop und Rasterelektronenmikroskop sowie metallographische Auswertung.

2.7.2.1 Untersuchte Werkstoffe und Probenformen

Untersucht wurde die AlMgSc-Legierung Ko8542 H116 mit der Lot-Nr. 450560 und als Referenzmaterial diente die Legierung AA2024 T351 plattiert. Beide Werkstoffe lagen in einer Plattendicke von ca. 3,2 mm vor.

2.7.3 Ermüdungsversuche

Die Ermüdungsversuche wurden EN6072 an gekerbten Proben Kt 2.3 („Open hole specimens with the T-type geometry“, siehe Abbildung 2.7-1.) mit der Resonanzprüfmaschine Type Mikrotoron Fa. RUMUL durchgeführt

Prüfbedingungen

Test Standard:	EN 6072:2011
Kraftmessdose:	24 kN
Testfrequenz:	105-110 Hz
Spannungsverhältnis	R=0.1
Probenorientierung:	T-L

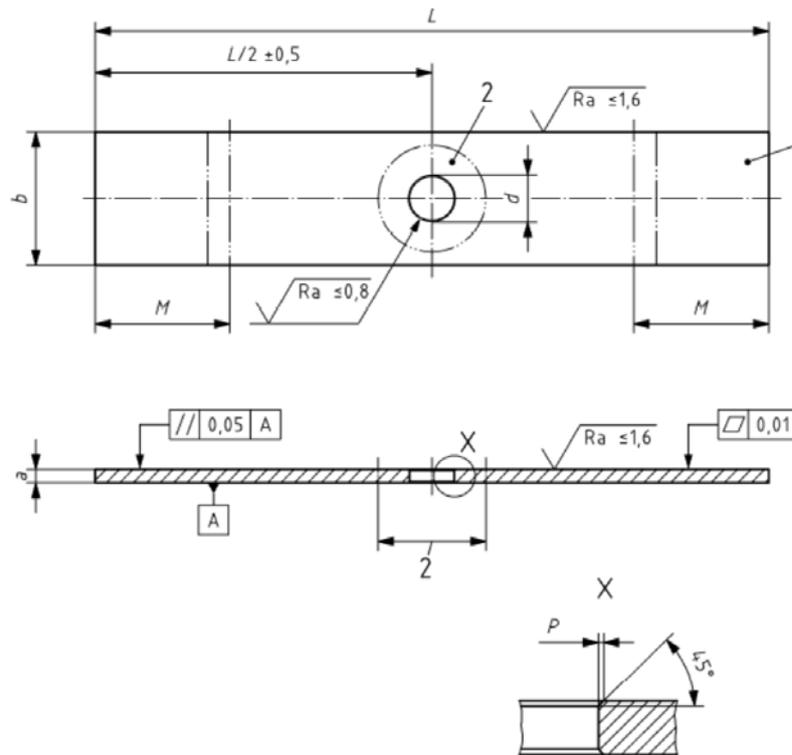


Abbildung 2.7-1: Probenform für Ermüdungsversuche, L=200mm, b=30 mm, d=10 mm, a=3,2mm

Ziel der Versuchsdurchführung war es, Probenversagen im Zeitfestigkeitsbereich von $10^4 - 10^6$ Lastwechseln zu erhalten, um den interessanten Zeitfestigkeitsbereich von 10^5 Lastwechseln möglichst gut beschreiben zu können. Die Analyse der Ermüdungsversuche erfolgte nach der Weibullauswertung gemäß HSB. Der Einfluss der Vorbehandlung wurde über die Bestimmung der Knock Down Faktoren ermittelt.

2.7.3.1 Probenvorbereitung

Für Ermüdungsversuche an der Legierung Ko8542 (Legierung Nummer 1) wurden 8 Probenserien hergestellt. Für die Legierung AA2024 plattiert (Legierung Nummer 2) wurden 2 Probenserien hergestellt, die nur jeweils den Standardprozess für TSA und PSA Behandlung repräsentieren (Tabelle 2.7-1).

Tabelle 2.7-1 Probennomenklatur und Vorbehandlungsserien (n = lfd. Nr 1- 8)

Proben Nr	Werkstoff	Behandlungsserie	
1.0.n	Ko8542 H116	Serie 0	Entfetten mit Isopropylalkohol
1.1.n	Ko8542 H116	Serie 1	Serie 0 + Alkalisches Entfetten
1.2.n	Ko8542 H116	Serie 2	Serie 1 + Alkalisches Beizen
1.3.n	Ko8542 H116	Serie 3	Serie 2 + Saure Dekapierung
1.4.n	Ko8542 H116	Serie 4	Serie 3 + Weinsäure-/Schwefelsäure Anodisieren (TSA)
1.5.n	Ko8542 H116	Serie 5	Serie 3 + Phosphorsäure Anodisieren (PSA)

1.6.n	Ko8542 H116	Serie 6	Serie 1 + TSA („Sole TSA“)
1.7.n	Ko8542 H116	Serie 7	Serie 1 + PSA („Sole PSA“)
2.4.n	AA2024T351 pl.	Serie 4	Serie 3 Weinsäure-/Schwefelsäure Anodisieren (TSA)
2.5.n	AA2024T351 pl.	Serie 5	Serie 3 + Phosphorsäure Anodisieren (PSA)

Zwei Probenserien (Serie 6 und Serie 7) von Anodisierungen an Ko8542 enthalten als Vorbehandlung nur die Reinigungsschritte (Alkoholische Entfettung und Alkalische Reinigen). Daneben wurden weitere Probenserien hergestellt, die schrittweise die einzelnen Reinigungs- und Beizprozesse der Standardbehandlung abbilden. In Abstimmung mit Airbus Operation wurde für beide Anodisierungen die gleiche Beizprozedur verwendet (Abbildung 2.7-2). Abweichend von der AIPI 02-01-003 wurde daher bei TSA die alkalische Beizbehandlung mit P3 Almecco 51 vorgenommen. Für PSA wurden die Behandlungen gemäß AIPI 02-01-006 für PSA durchgeführt.

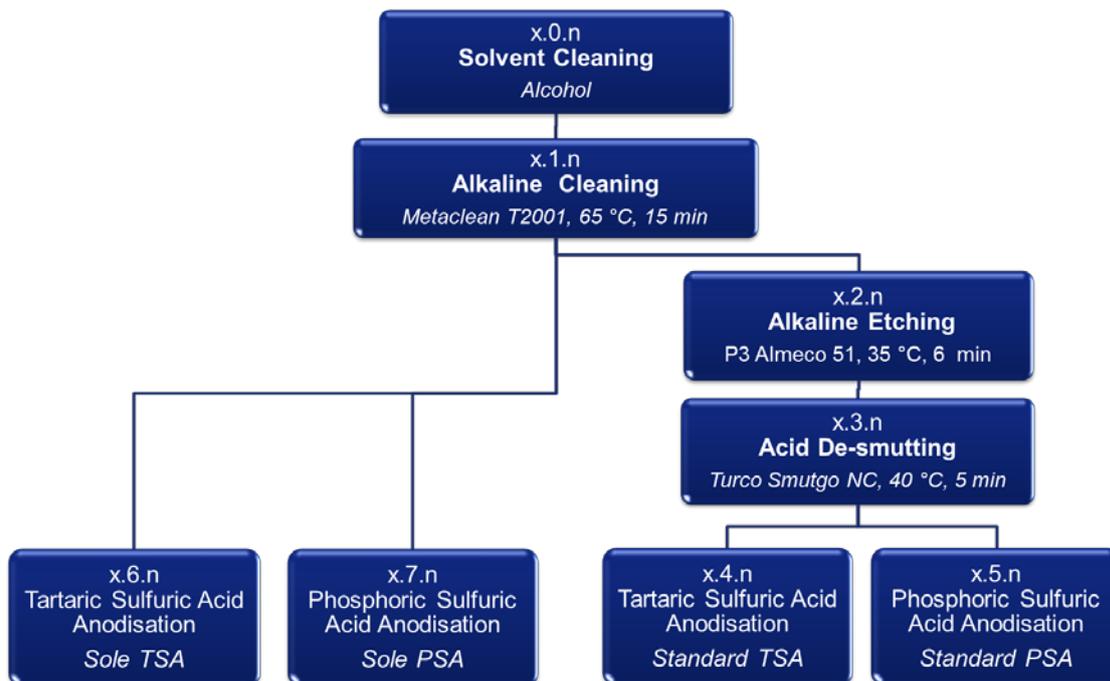


Abbildung 2.7-2: Oberflächenbehandlung der Ko8542 Proben (x = 1, n = lfd. Probennummer))

Für das Alkalische Beizen wurde ein neues Bad angesetzt und die Beizrate mit 0,9 µm/min ermittelt. Das Soll der Beizrate liegt bei 0,5 – 1µm/min.

Meilensteine

M 5.x Thema war ursprünglich nicht in der Planung enthalten.

2.7.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es waren keine Unteraufträge geplant.

2.7.5 Ergebnisse

2.7.5.1 Ermüdungsversuche

Die Ermüdungsversuche haben für Ko8542 einen starken Einfluss der Vorbehandlung auf das Ermüdungsverhalten. Für die Standardanodisierung stehen KDF-Werten von 0,88 bis 0,93 bei AA2024T351 sehr niedrige Werte von 0,62 bis 0,68 bei Ko8542 entgegen. Der Abfall der Ermüdungsfestigkeit ist im Falle der PSA-Behandlung etwas weniger stark ausgeprägt.

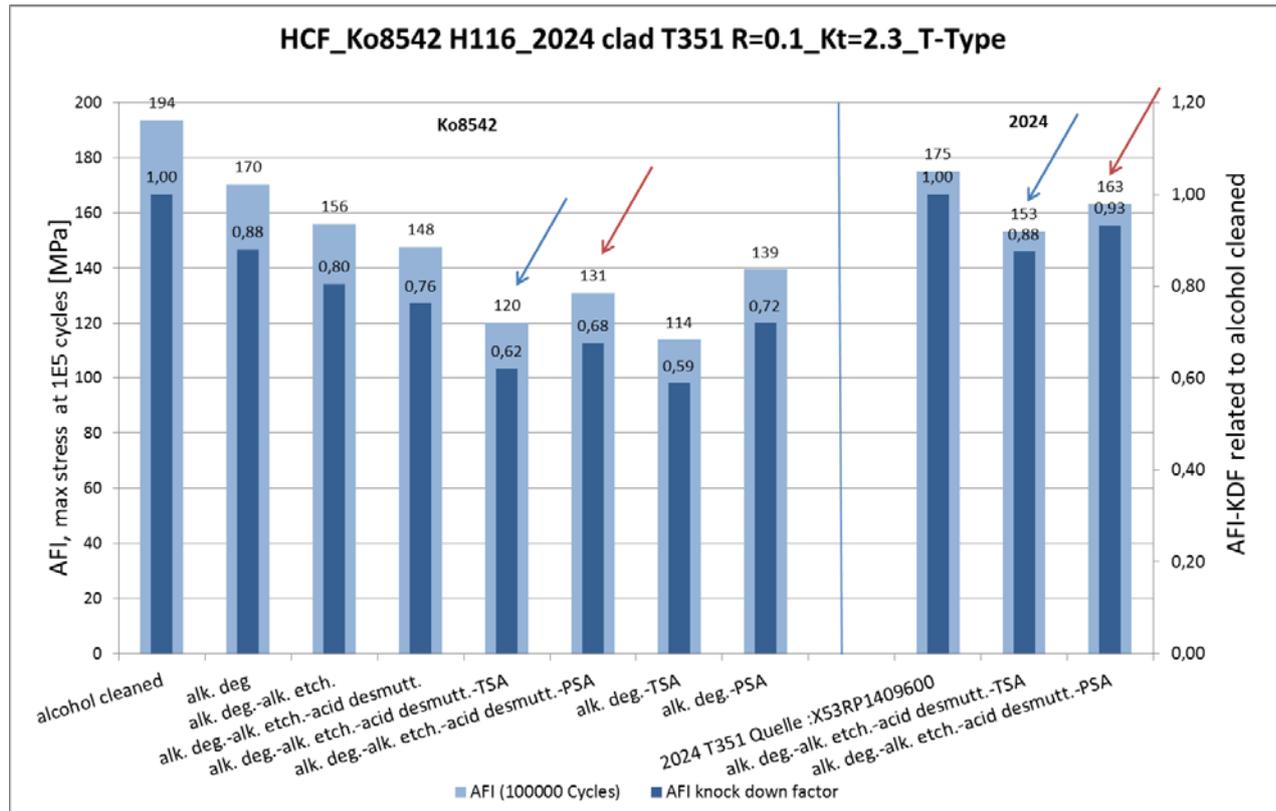


Abbildung 2.7-3: Ermüdungsergebnisse Ko8542 und AA2024 plattiert

Ein beachtlicher Abfall des AFI kann bei Ko8542 bereits nach dem Alkalischen Reinigen ermittelt werden (vgl. Übergang Serie 0 => Serie 1). Ein weiterer etwas moderater Abfall wird nach dem Alkalische Beizen erhalten. Das zusätzliche Saure Beizen wirkt sich nur noch wenig aus. Der anschließende Abfall durch den eigentlichen Anodisierprozess ist aber wiederum stärker ausgeprägt.

HCF_Ko8542 H116_R=0.1_Kt=2.3_T-Type

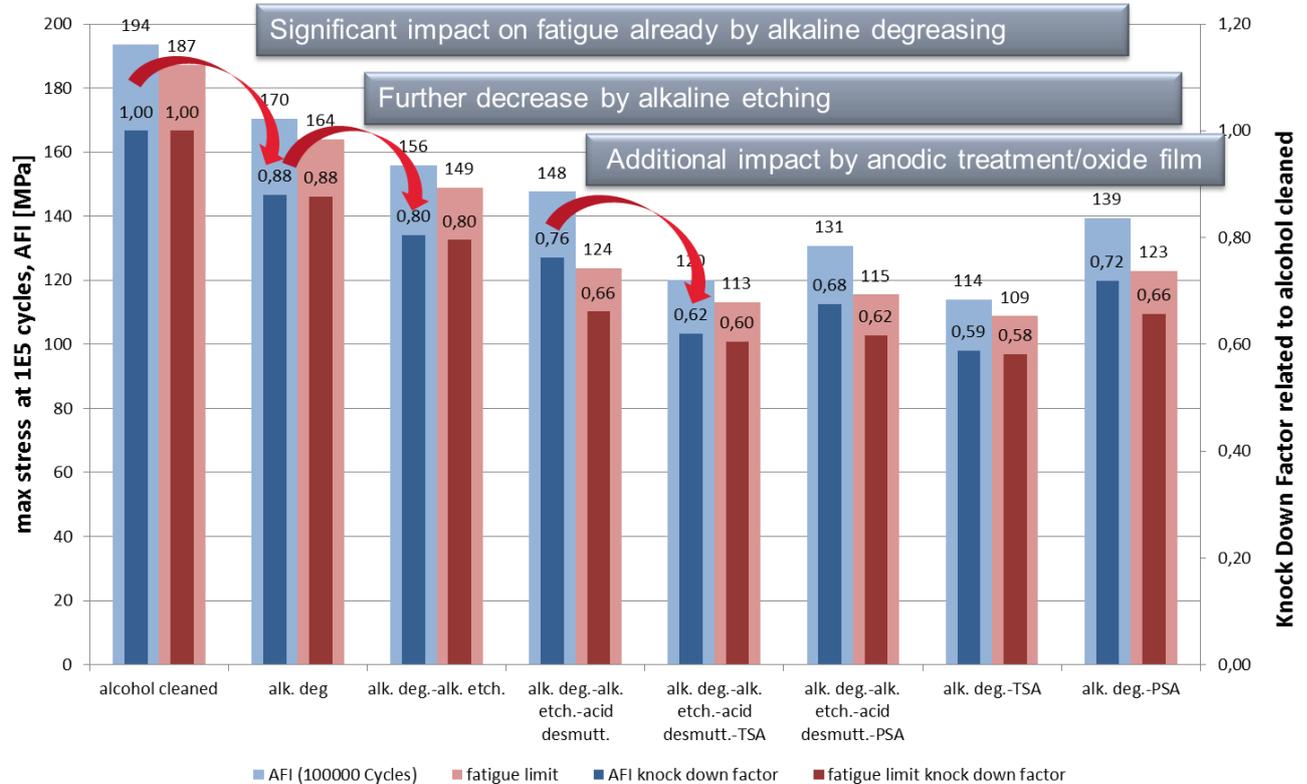


Abbildung 2.7-4: Ermüdungsergebnisse Ko8542

2.7.5.2 Mikroskopie und Fraktographie

Es können generell Al (Mg,Mn), Al (Sc, ..), und Al(Fe, Mn) Phasen im EDX erkannt werden (Abbildung 2.7-5). Für die rissauslösenden Korrosionspits sind primär die Al-Fe Phasen verantwortlich. Als Beispiel ist hierfür die Bruchfläche der Probe 1.1.8 dargestellt. Hier ist die Phase nicht komplett herausgelöst und im EDX kann Eisen nachgewiesen werden (Abbildung 2.7-6, Abbildung 2.7-7). Die Pittingtiefe wird durch die Größe der intermetallischen Phasen bestimmt und liegt in der Größenordnung von ca. 15 µm.

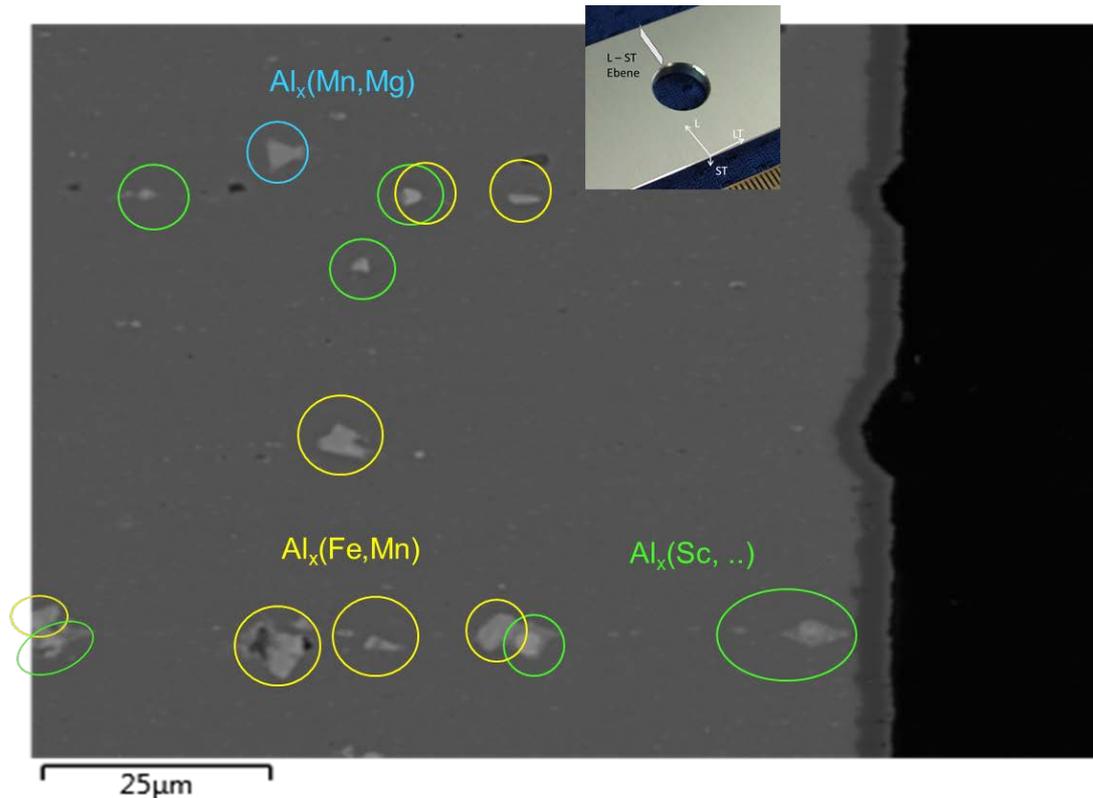


Abbildung 2.7-5: Identifikation der Intermetallischen Phasen, Probe 1.4.11 ohne Ermüdung, Standard TSA-Behandlung, L-ST Schliffebene

In der fraktographischen Auswertung kann man deutlich erkennen, dass in der Regel die Ermüdungsrisse von Löchern ausgehen, die während des chemischen Angriffs der Vorbehandlung durch mikrogalvanische Effekte zwischen Matrix und intermetallischen Phasen erzeugt werden.

Die Anzahl und Größe der Pits scheinen sich nicht signifikant zwischen den Zuständen nur gebeizt und gebeizt plus TSA bzw. PSA zu verändern (Abbildung 2.7-10, obere Reihe). Der weitere Abfall des AFI zwischen Beizen und Anodisieren dürfte daher auch auf die Eigenschaften des Oxides zurückzuführen zu sein. Diesen Befund untermauert auch die Tatsache, dass die TSA und PSA Behandlungen, auch unter Ausschluss der Beizschritte 3 und 4 AFI-Knock Down Faktoren in der gleichen Größenordnung haben wie die Standardbehandlungen. Die Abfälle sind bei TSA stärker ausgeprägt als bei PSA.

Die Morphologie der TSA Schicht kann sich offensichtlich ähnlich negativ auf das Ermüdungsverhalten auswirken wie bei den Proben mit vorhergehender Beizbehandlung und damit verbundener höherer Lochtiefe bzw. Lochhäufigkeit. In den Fällen ohne Beizbehandlung ist die mechanisch verformte Walzoberfläche noch nicht entfernt worden. Diese verfestigte Zone, die auch Walzriefen enthält, könnte sich auch noch beschleunigend auf die Rissinitiierung auswirken (Abbildung 2.7-8, Abbildung 2.7-9).

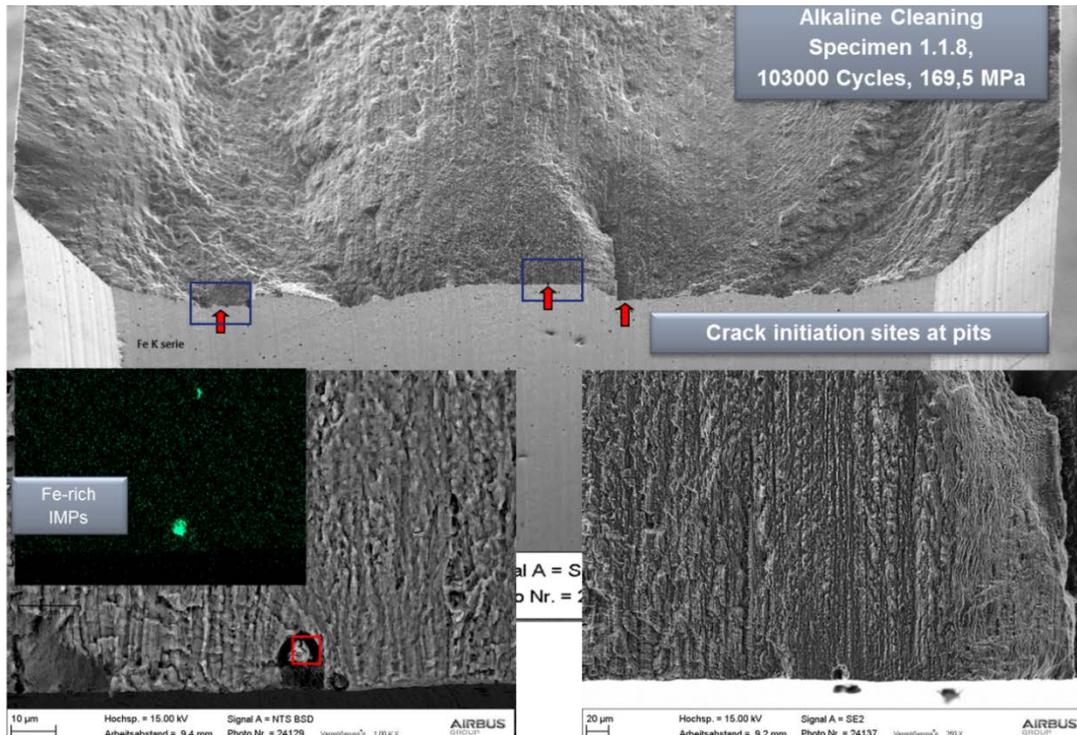


Abbildung 2.7-6: Rissinitiierung an Pits, Ko8542, Probe 1.1.8 , nach Alkalischem Reinigen, Fe-Nachweis

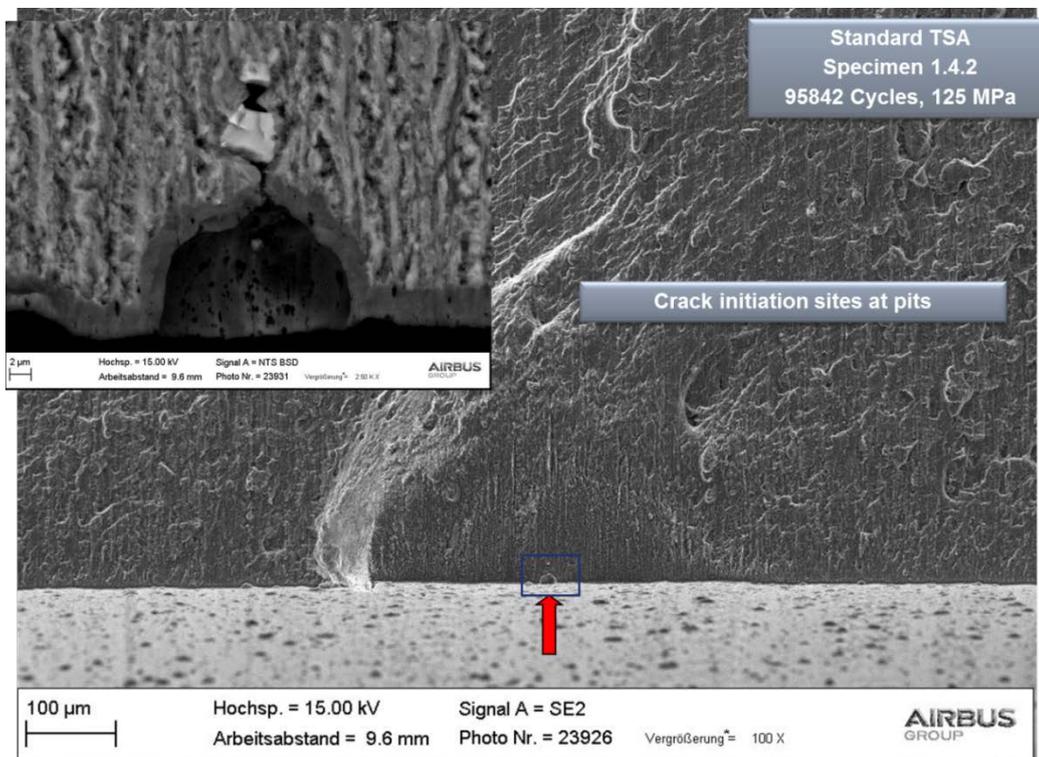


Abbildung 2.7-7: Rissinitiierung an Pits, Ko8542, Probe 1.4.2, Standard Anodisierung

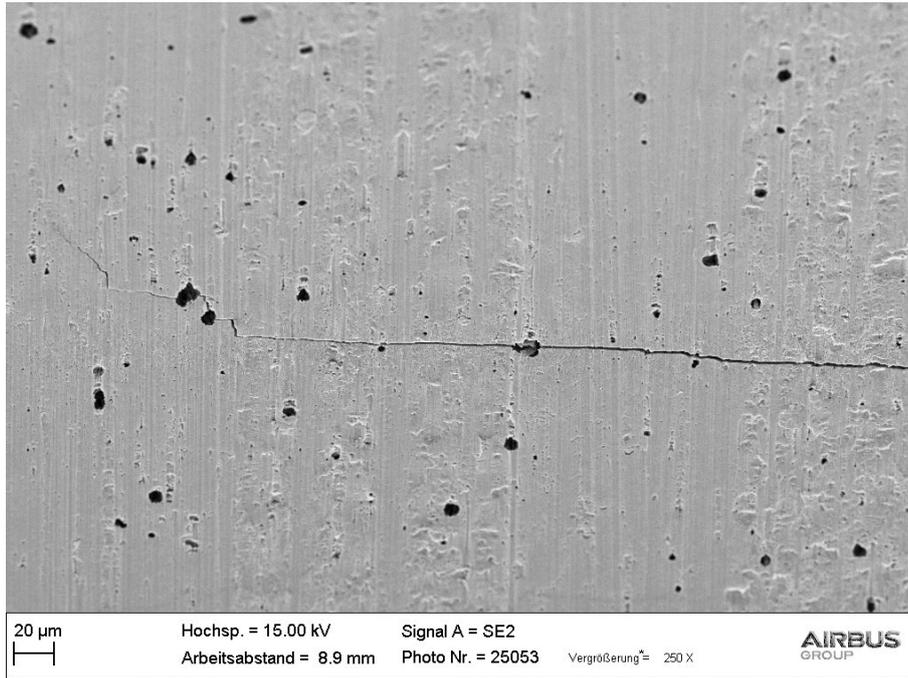


Abbildung 2.7-8: Rissinitiierung/-verlauf entlang von Pits, Ko8542, Probe 1.1.8, Sole PSA

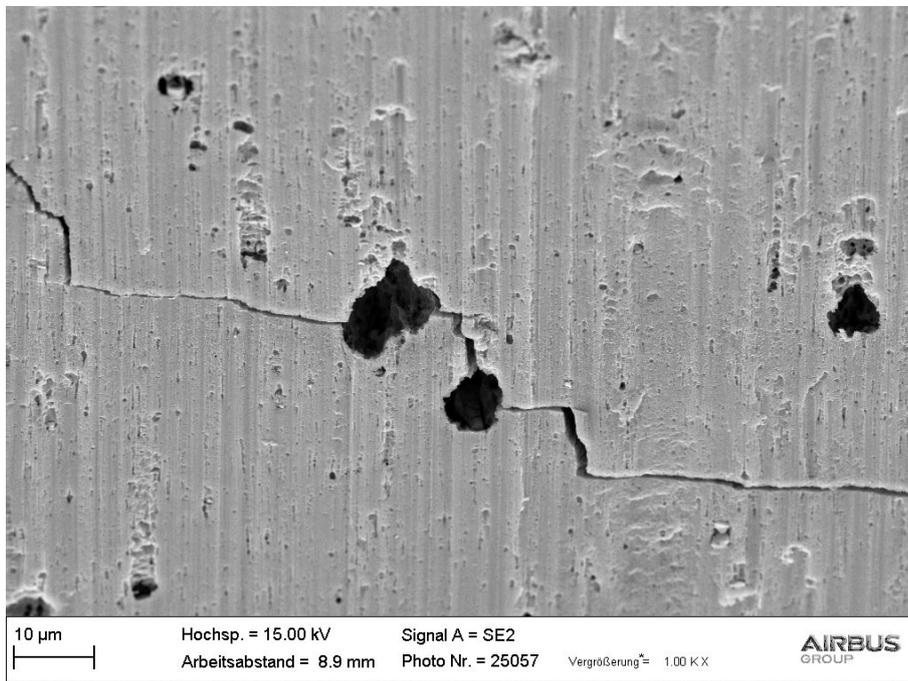
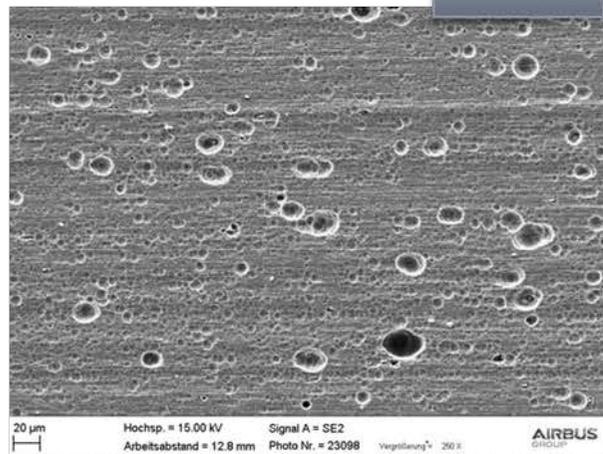


Abbildung 2.7-9: Rissinitiierung/-verlauf entlang von Pits und Riefen, Ko8542, Probe 1.1.8, Sole PSA

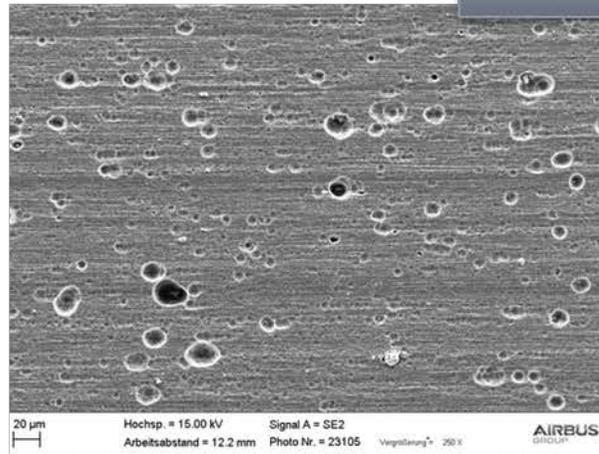
1.3 Nach Dekapierung

KDF 0.76



1.4 Std TSA

KDF 0.62



1.5 Std PSA

KDF 0.68

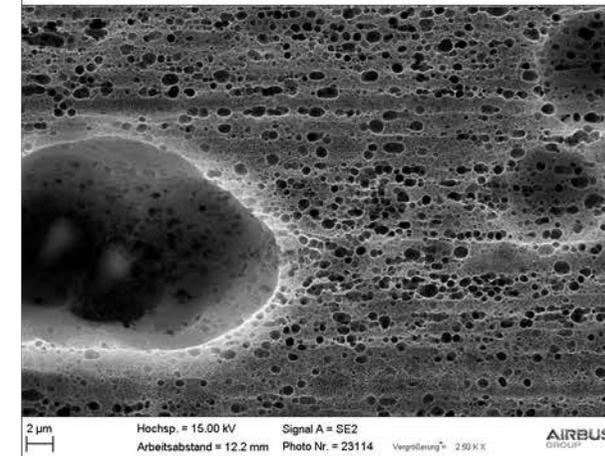
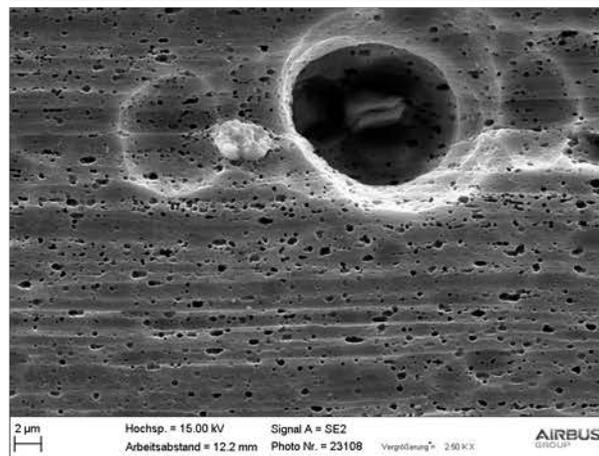
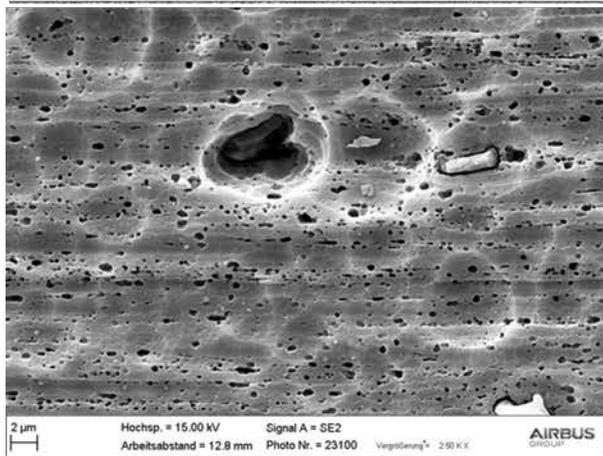
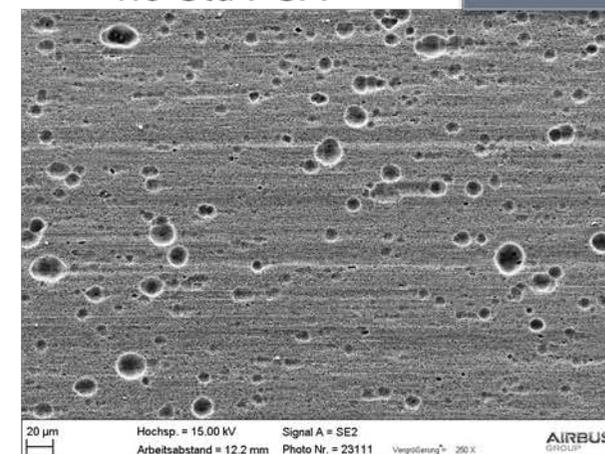
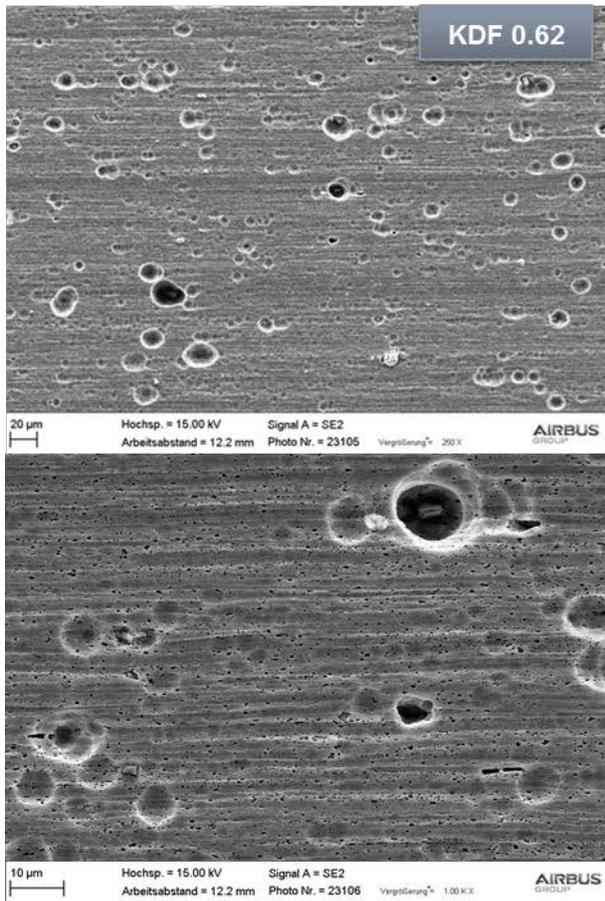


Abbildung 2.7-10: Oberflächenmorphologie in der Bohrung, verschiedene Vorbehandlungen, Ko8542, nach Dekapierung, Standard TSA, Standard PSA

1.4 Standard TSA



1.6 alk. clean. + TSA

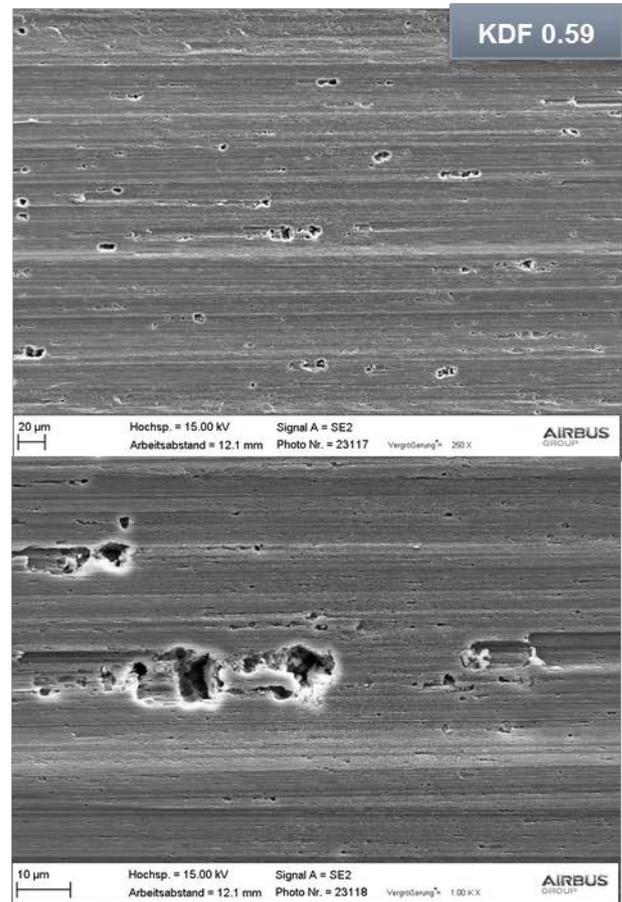


Abbildung 2.7-11: Oberflächenmorphologie in der Bohrungen, Vergleich Standard TSA mit Nur Reinigen plus TSA

Abbildung 2.7-11 zeigt den Vergleich der Oberflächenmorphologie nach Anodisierung mit Beizschritten (linke Spalte) und ohne Beizschritte (rechte Spalte). Bei den unbeizten Proben erkennt man noch die ausgeprägte Oberflächenstruktur aus dem Walzprozess, die bei der Standardbehandlung durch den Beizabtrag vor der Anodisierung abgetragen wurde. Es ist deutlich sichtbar, dass die Häufigkeit und Tiefe der Pits bei der Standard TSA-Behandlung höher ist. Beide Behandlungen zeigen aber in den Ermüdungsversuchen ähnliche Einbußen der Zeitfestigkeit bei 10^5 Lastwechseln.

2.7.5.3 Metallographische Auswertung der Ermüdungsproben

An den Ermüdungsproben der 8 verschiedenen oberflächenbehandelten Varianten der Legierung KO8542 wurden Mikroschliffe (Flachschliffe) in L - LT Ausrichtung (Abbildung 2.7-12) angefertigt. Die Oberflächen in der Bohrung wurden hinsichtlich maximaler Muldentiefe und Anzahl der Angriffe ausgewertet. Die Ergebnisse sind im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 2.7-13) dargestellt.

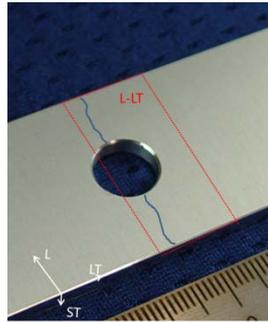


Abbildung 2.7-12: Metallographische Untersuchung, Schlifflage

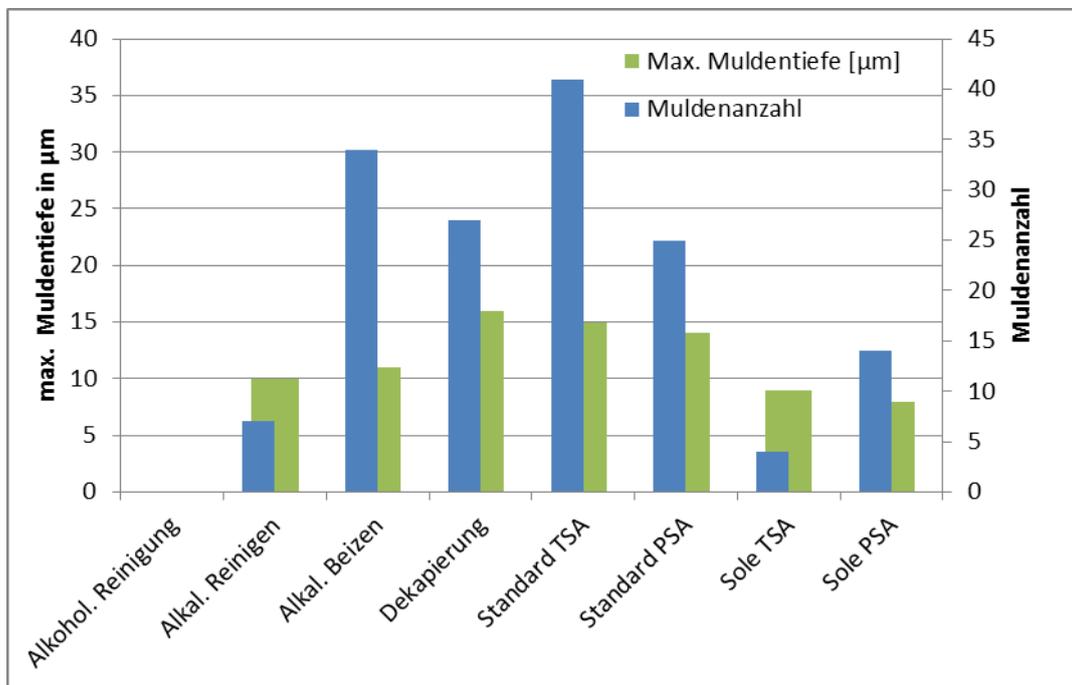


Abbildung 2.7-13: Metallographische Auswertung der Muldenbildung nach Oberflächenbehandlung

Die Quantitative Auswertung kann zwar aufgrund der geringen statistischen Sicherheit nur tendenzielle Aussagen liefern, aber dennoch werden die obigen Beobachtungen aus der oberflächenmorphologischen Analyse hier auch mit den wenigen Daten aus der Metallographie erhärtet.

Trotz der wesentlich geringeren Anzahl und Ausprägung der Oberflächendefekte in der Bohrung der nicht gebeizten TSA und PSA Proben der Legierung Ko8542 werden die gleichen Abfälle in der Zeitfestigkeit festgestellt. Die maximale Muldentiefe liegt bei den Standardanodisierungsprozessen höher als bei Eliminierung der Beizprozesse vor der Anodisierung (Abbildung 2.7-14 bis Abbildung 2.7-17).

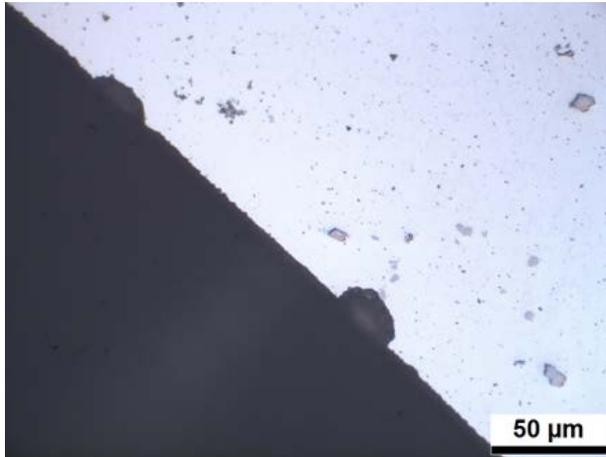


Abbildung 2.7-14: Probe 1.4.2, Standard TSA,

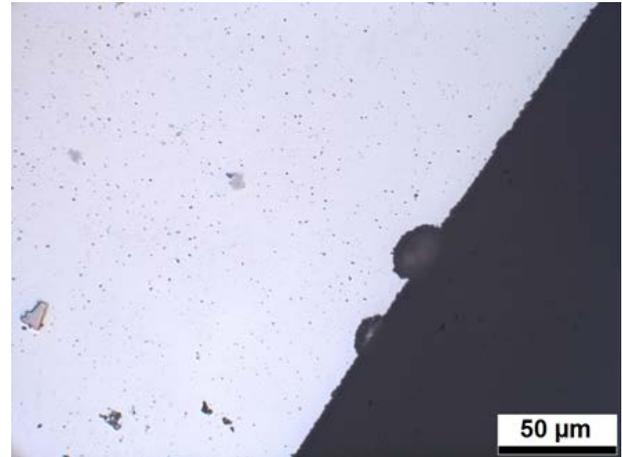


Abbildung 2.7-15: Probe 1.5.9, Standard PSA



Abbildung 2.7-16: Probe 1.6.2, Sole TSA

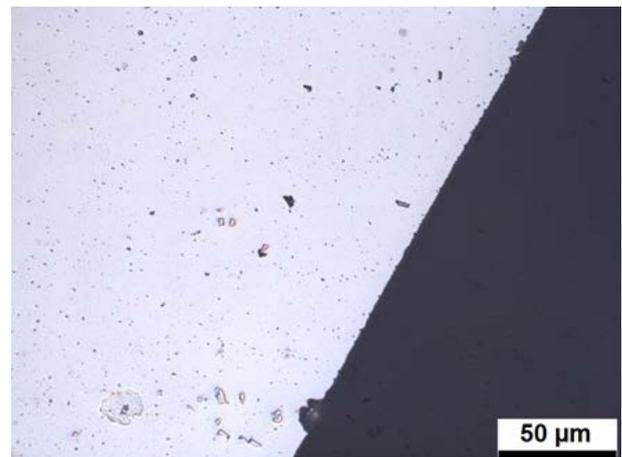


Abbildung 2.7-17: Probe 1.7.3, Sole PSA

2.7.6 Zusammenfassung

Die Beeinträchtigung des Ermüdungsverhaltens durch Anodisierung (TSA und PSA) ist bei der Legierung Ko8542 wesentlich höher als bei der Standardlegierung AA2024 plattiert.

Die Mikrostruktur der Legierung Ko8542 enthält edle intermetallische Phasen die in Vorbehandlungsprozessen über mikrogalvanische Effekte Löcher und Mulden erzeugt. Primär läuft die Pitbildung über Auflösung der die Phasen umgebenden Aluminiummatrix und endet schließlich mit dem Herausfallen der edleren Phasen. Hauptsächlich sind hierfür die Fe-haltigen Phasen verantwortlich. Da Distanzen zwischen den Phasen groß sind und keine zusammenhängenden Cluster und Pfade entstehen, bestimmt die Größe der intermetallischen Phase an der Oberfläche auch die Muldentiefe. Diese Mulden sind in der Regel rissauslösend im Ermüdungsversuch und beeinflussen zudem den Rissverlauf an der Oberfläche. Die Anzahl und Tiefe der Mulden korreliert nicht immer mit dem AFI-Knock Down Faktor. Trotz der geringeren Anzahl und Häu-

figkeit der Oberflächendefekte bei den Anodisiervarianten ohne Beizbehandlung wurden ähnliche Beeinträchtigungen beim AFI-Knock-Down Faktor gefunden. Daraus wird abgeleitet, dass die Anodisierung (Prozess, Oxideigenschaften) bei der Legierung Ko8542 auch maßgeblich für die Erniedrigung der Zeitfestigkeit mitverantwortlich ist.

Der Einfluss auf das Ermüdungsverhalten ist generell bei der PSA-Behandlung etwas geringer als bei TSA. Durch das Untersuchungsprogramm konnte gezeigt werden, dass für die Bewertung des Einflusses der Anodisierbehandlung auf das Ermüdungsverhalten von K08542 die Morphologie und sonstigen Auswirkungen der Oxidschicht eine große Bedeutung haben. Die geringen Knock Down Faktoren und damit stärkere Reduktionen der Zeitfestigkeiten sind auf eine Überlagerung von Lochgeometrieeffekten und Oxideigenschaften zurückzuführen. Inwiefern sich bei den Sole TSA/PSA Proben die noch nicht entfernte oberflächennahe Verformungszone und Walzriefenstruktur auswirken, konnte in diesem Versuchsprogramm nicht bewertet, sollte aber nicht außer Acht gelassen werden.

Um das Ermüdungsverhalten besser zu verstehen sind daher weitere Untersuchungen erforderlich, wie z.B. die Bestimmung des Einflusses der Oxidschichtdicke auf das Ermüdungsverhalten in Verbindung mit Versuchen an nur mechanisch gereinigten, polierten Proben. Für die Praxis wäre es sicherlich hilfreich, den Fe-Gehalt der Legierung weiter zu senken um die Lochbildung bei der Vorbehandlung und Anodisierung zu minimieren.

2.7.7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Kenntnis des Ermüdungsverhaltens nach Vorbehandlung und Anodisierung ist ein wesentliches Kriterium für das Einsatzspektrum der AlMgSc-Werkstoffe. Die Ergebnisse der Arbeiten im Rahmen des AP50 haben gezeigt, dass sowohl bei der chemischen Reinigung als auch während der Anodisierung Oberflächenangriffe erzeugt werden können, die für die Rissinitiierung und Beeinträchtigung der Zeitfestigkeit ausschlaggebend sind.

2.7.8 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertungsplan

Im Rahmen des APs wurden mikrogalvanische Korrosionseffekte während Reinigung und Anodisierung zwischen spezifische intermetallische Phasen und der Matrix als ursächlich für den Ermüdungsabfall nachgewiesen. Es können Empfehlungen für mikrostrukturelle Verbesserungen des Werkstoffes abgeleitet werden.

2.7.9 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Keiner.

2.7.10 Veröffentlichungen, Vorträge

Keine.

2.7.11 Literatur

Keine.

3 Weitere Informationen

3.1 Zahlenmäßiger Nachweis

Verwendungsnachweis		
<p>Zahlenmäßiger Nachweis gem. Nr. 19.3 NKBF 98 für die Zeit vom 01.01.2012 bis 31.03.2015 zum Zuwendungsbescheid des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie vom 12.12.2011 Förderkennzeichen: 20W1111F Zuwendungsempfänger: AIRBUS DEFENCE AND SPACE GMBH Thema des Vorhabens: „Verbundprojekt: Radikal neue Werkstoffe und Fertigungsverfahren für den metallischen Flugzeugrumpf (RADIKAL)“</p>		
1. Nachkalkulation der gesamten Selbstkosten		
1.1 Position	Gesamtvorkalkulation (€)	Gesamtnachkalkulation (€) ¹⁾
0813 Material	112.500,00	65.737,15
0823 FE-Fremdleistungen	32.500,00	28.856,00
0837 Personalkosten	2.496.000,00	2.682.500,78
0838 Reisekosten	10.000,00	9.727,97
0847 Abschreibungen auf vorhaben- spezifische Anlagen	0,00	0,00
0848 Abschreibungen auf sonstige ge- nutzte Anlagen des FE-Bereichs	0,00	0,00
0850 sonstige unmittelbare Vorhaben- kosten	100.000,00	25.512,86
0855 Summe unmittelbare Vorhaben- kosten (Pos. 0813 – 0850)	2.751.000,00	2.812.334,76
0856 Kosten innerbetrieblicher Leistungen	0,00	0,00
0860 Verwaltungskosten	217.000,00	149.854,14
0881 gesamte Selbstkosten des Vorhabens (Summe Pos. 0855 – 0860)	2.968.000,00	2.962.188,90
<p>1.2 Pauschalierte Kostenabrechnung gem. Nr. 5.6 NKBF 98: <input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein Bei pauschalierter Abrechnung sind die Anlagen 1 bis 3 Bestandteil des Verwendungsnachweises. Die Vorlage der Stundennachweise (Anhang 1) entfällt aber ggf. bei Verzicht auf Anforderung aufgrund einer Regelung im Zuwendungsbescheid.</p>		
BMBF-Vordr. 0640a/09.05		

Eine detaillierte Aufstellung ist dem abschließenden Kostennachweis zu entnehmen.

4 Dokumentation

- Zwischenbericht 01 - Zeitraum: 01.01.2012 – 30.06.2012
- Zwischenbericht 02 - Zeitraum: 01.07.2012 – 31.12.2012
- Zwischenbericht 03 - Zeitraum: 01.01.2013 – 30.06.2013
- Zwischenbericht 04 - Zeitraum: 01.07.2013 – 31.12.2013
- Zwischenbericht 05 - Zeitraum: 01.01.2014 – 30.06.2014
- Zwischenbericht 06 - Zeitraum: 01.07.2014 – 31.12.2014