

Art des Dokuments: **Abschlussbericht**

Verfasser:

Fortkamp, Kai

Titel:

**INPRO – Industrialisierung zukünftiger Prozesse
im Flugzeugbau**

Datum:

09.10.2015

Der Inhalt dieser Unterlage ist geistiges Eigentum der Premium AEROTEC GmbH. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie gefördert. Außerhalb der Regelungen des Zuwendungsbescheides ist eine Weitergabe an Dritte sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts an Dritte nicht gestattet, soweit nicht vorher schriftlich von der Premium AEROTEC GmbH zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte für den Fall der Patenterteilung oder Gebrauchsmuster-Eintragung vorbehalten.

The content of this document is the intellectual property of Premium AEROTEC GmbH. The responsibility for the content of this publication rests with the author. The project which forms the basis for this report is endorsed and funded by the Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Apart from the user rights contained in the notification concerning the allocation of funds, copying of this document, and disclosure to third parties and the use of the contents thereof, are forbidden without prior written consent by Premium AEROTEC GmbH. Offenders are liable to the payment of damages. All rights are reserved in the event of the grant of a patent or the registration of a utility model or design.



Title: **INPRO – Industrialisierung zukünftiger Prozesse im Flugzeugbau**

Zuwendungsgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
 Verbundbezeichnung: ECO - Wirtschaftlicher Metallrumpf Generation Best ECO Mix
 Förderkennzeichen: 20W1111D
 Vorhaben: INPRO – Industrialisierung zukünftiger Prozesse im Flugzeugbau
 Vertragsdatum: 12.12.2011
 Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2012 – 31.03.2015

Zuwendungsempfänger: Premium AEROTEC GmbH

Dok-Nr: INPRO20122015
 Datum: 31.08.2015
 Verfasser: Fortkamp, Kai
 Project-Struktur-Plan-Nr: T-X-00000027

Zusammenfassung:

Das Projekt INPRO (**I**ndustrialisierung zukünftiger **P**rozesse im Flugzeugbau) hat die effektive Ausnutzung der Performance der neuen Aluminiumlegierungen AlMgSc und AlCuLi durch weitere Industriearbeitung der damit verbundenen Fertigungstechnologien zum Ziel. Dabei setzt INPRO konsequent die bisherigen Entwicklungsarbeiten im Bereich des Relaxationsumformen, Reibrührschweißen und dem automatisierten Ablegen von FML mit dem Ziel der Manufacturing Readiness fort. Das Vorhaben INPRO ist dabei in den von Airbus geführten Verbund ECO (Wirtschaftlicher Metallrumpf Generation Best ECO Mix) eingebettet und eng mit dem federführenden Vorhaben NEXXT verbunden.

Stichworte:

Relaxationsumformen, Tooling, Toleranzen, AlMgSc, FSW, Reibrührschweißen, AlMgSc, automatisierte Clipmontage, FML, Demonstrator LuFo IV, 4. Call

Archivierungsempfehlung der Fachabteilung unter „Know-how“ – aspekten (unabhängig von vertraglichen Vereinbarungen): 10 Jahre

	Projektleiter	Technologiemanagement
Abteilung		
Name		
Datum		
Unterschrift		

Inhalt

1	Zusammenfassung	5
1.1	Aufgabenstellung	5
1.2	Planung, Ablauf und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
1.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand	8
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
2	Ergebnisbericht	12
2.1	Erzielte Ergebnisse	12
2.1.1	TAII 10 – Relaxationsumformen	12
2.1.2	TAII 20 – Reibrührschweißen	31
2.1.3	TAII 30 – Fibre Metal Laminate	39
2.1.4	TAII 40 – Montage.....	48
2.2	Voraussichtlicher Nutzen.....	53
2.3	Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei Dritten.....	54
2.4	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: INPRO Projektstrukturplan.....	7
Abbildung 2: Aufbau einer konventionellen Rumpfstruktur.....	8
Abbildung 3: Fertigungskette für geschweißte Rumpfstrukturen	9
Abbildung 4: Ursprünglicher TRL5-Demonstrator	12
Abbildung 5: A- Ausschnitts- und F- Fullscaledemonstratoren.....	13
Abbildung 6: Hautfeld10 Vorrichtung in der Konstruktion und Fertigungsprozess.....	14
Abbildung 7: Regelungsaufbau.....	15
Abbildung 8: Konzept Niederhalter	15
Abbildung 9: Sealframe Eckausrüstung.....	16
Abbildung 10: Prinzipielle Einbaulage der Niederhaltermodule.....	16
Abbildung 11: Erste Möglichkeit vom Abstand des Bauteilrands zur Gewindebohrung.....	16
Abbildung 12: Zweite Möglichkeit vom Abstand des Bauteilrands zur Gewindebohrung.....	17
Abbildung 13: Optionale Niederhalterschiene.....	17
Abbildung 14: Heizmatten	17
Abbildung 15: Auflegen der Heizmatten	18
Abbildung 16: Ablauf Relaxation Demonstrator - 1	18
Abbildung 17: Ablauf Relaxation Demonstratoren - 2	19
Abbildung 18: Vergleich F9 – Simulation mit Beule versus Realimperfektion.....	21
Abbildung 19: Simulationsergebnis F10 Worstcase-Bauteil mit 16 Stringern	22
Abbildung 20: Demonstrator F10 Worstcase-Bauteil mit 16 Stringern	23
Abbildung 21: Strategie Bauteilverkleinerung und Kalteinformen.....	23
Abbildung 22: Relaxationsumformen – Einlegeversuche (kalt) > Geometrieinfluss.....	24
Abbildung 23: Erfolgreiche Umformung Hautfeldausschnitt A9E(H) im Ofen	24
Abbildung 24: Identifiziertes Niederhalterkonzept.....	25
Abbildung 25: Erfolgreiche Simulation HF10 – mit Niederhalter.....	25
Abbildung 26: Abwicklung in die Ebene.....	26

Abbildung 27: A5 Abweichung Außenkontur x,y – stark verbessert	27
Abbildung 28: A1 Rückfederung z	27
Abbildung 29: Fertigung des 2D-Hautfelds für Demonstrator F10 inkl. Stringer	28
Abbildung 30: Konturabweichung Demonstrator F10.....	28
Abbildung 31: Rückfederung Demonstrator F10.....	29
Abbildung 32: Definition Geometriefaktor MKU	29
Abbildung 33: Prozesskette (Pre-/ Post Relaxationsumformen).....	30
Abbildung 34: Auszug Industrialisierungskonzept.....	31
Abbildung 35: Prozessvisualisierung	31
Abbildung 36: Darstellung der Nahtgeometrie	32
Abbildung 37: Darstellung Mouse-Hole Clip	32
Abbildung 38: Dreiseiten- Fräser	33
Abbildung 39: Darstellung lokaler Oberflächenschutz.....	34
Abbildung 40: Online/ Offline QS.....	34
Abbildung 41: Darstellung flexibles Werkzeug zur Bauteilfixierung	35
Abbildung 42: Darstellung FSW Heftnaht	35
Abbildung 43: Biegeproben KO8542	36
Abbildung 44: Prozessablauf eines FSW geschweißten Bauteils	36
Abbildung 45: <i>Demonstrator 1 ca. 2000mm x 1200mm</i>	37
Abbildung 46: Beplanktes Hautfeld mit jeweiliger Blechstärke	38
Abbildung 47: Fertigstellung der zwei Hautfeldsegmente	38
Abbildung 46: AlMgSc Blech mit FSW Naht, LBW geschweißte Stringer und Integralspanten	39
Abbildung 48: Überblick vom entwickelten Endeffektor zum automatisierten Ablagen von Glasfaser-Prepreg.....	40
Abbildung 49: Der Endeffektor nach dem Zusammenbau (links) und beim Ablageprozess (rechts).....	41
Abbildung 50: Verschiedene Testendeffektor in den Versionen a) und b).....	41
Abbildung 51: Dünnblechhandler (Endeffektor) mit der Abmessung 2m x 1m.	42

Abbildung 52: Ablegeversuche in eine zylindrische 2x2 LKV (a) und Ablegegenauigkeit der Bleche (b).....	42
Abbildung 53: Nahtausprägungen: Flash (links), raue Nahtunterseite (mitte), gut (rechts)....	44
Abbildung 54: Probe 1109 A-A nach PSA und Darstellung der Probenpositionen	44
Abbildung 55: Bruch- und Oberflächenmorphologie: AlMgSc (links, mitte), AA2024 (rechts)	44
Abbildung 56: PSA Oxidwachstum in Hinterschneidungen: AlMgSc (links), AA2024 (rechts)	45
Abbildung 57: Versuchslayout im Roboterversuchsfeld der Premium AEROTEC in Varel. ...	45
Abbildung 58: FML-Aufbau.....	46
Abbildung 59: Aufnahme der Dünnbleche von der Bereitstellung (links) und Ablage in die LKV (rechts).	46
Abbildung 60: Endeffektoren zur Handhabung des Aluminiumbleches (links) und zur Ablage des Glasfaser-Prepregs (rechts).....	47
Abbildung 61: Ablage des zylindrischen Demonstrator-Bauteils	47
Abbildung 62: Ausgehärtetes (links) und abgelegtes Demo-Bauteil (rechts) in der Vorrichtung	48
Abbildung 63: Endeffektor zum Einbringen der Bohrungen	49
Abbildung 64: Einbringung einer ClipStringer-Bohrung.....	51
Abbildung 65: Konturvorrichtung	51
Abbildung 66: TCP	52
Abbildung 67: Spante können an vollautomatisch montierten Clips aufgenommen werden ..	53

1 Zusammenfassung

Das Projekt INPRO (*Industrialisierung zukünftiger Prozesse* im Flugzeugbau) hat die effektive Ausnutzung der Performance der neuen Aluminiumlegierungen AlMgSc und AlCuLi durch weitere Industrialisierung der damit verbundenen Fertigungstechnologien zum Ziel. Dabei setzt INPRO konsequent die bisherigen Entwicklungsarbeiten im Bereich des Relaxationsumformen, Reibrührschweißen und dem automatisierten Ablegen von FML mit dem Ziel der Manufacturing Readiness fort. Gemeinsam mit dem beim Verbundpartner Airbus geführten Vorhaben NEXXT (New Modular Conception for Metallic Structures of Next Generation Fuselage (Best ECO-Mix)) sollen die Aktivitäten in INPRO dazu beitragen, eine gewichts- und kostenoptimierte Rumpfstruktur für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge zu realisieren. Das Vorhaben INPRO ist dabei in den von Airbus geführten Verbund ECO (Wirtschaftlicher Metallrumpf Generation Best ECO Mix) eingebettet und eng mit dem federführenden Vorhaben NEXXT verbunden.

Im Rahmen des hier vorliegenden Abschlussberichtes wird der allgemeine Stand der erzielten Ergebnisse des Vorhabens INPRO in der Projektlaufzeit dargelegt.

Die im Projekt INPRO gewonnenen Ergebnisse werden zum Teil an den LuFo V-1 Folgeverbund INNOMET (Innovativer Metallrumpf 2017) transferiert in dem Premium AEROTEC GmbH als Unterauftragnehmer im Airbus Vorhaben METALICA (Metallic Innovative Concepts for Airbus Fuselage Structures) mitarbeitet. Zudem erfolgt eine Verwendung von Ergebnissen aus dem Projekt INPRO im geplanten LuFo V-2 Vorhaben AUTOGLARE.

1.1 Aufgabenstellung

Die Arbeiten innerhalb des Verbundes INPRO fokussierten sich auf Industrialisierungsentwicklungen im Bereich der Rumpfstruktur. Hierbei wurde das Ziel verfolgt, zukunftsweisende Metalltechnologien für eine neue Generation Metallrumpf für Flugzeuge im Bereich der Kurz- und Mittelstreckenklasse (A30X und A320NEO) zu beherrschen und den Nachweis für die Industrialisierbarkeit bzw. Umsetzbarkeit dieser Technologien in die Fertigung zu liefern. Schwerpunkt hierbei waren die Industrialisierung der Relaxationsumformtechnologie sowie des Reibrührschweißprozesses für die Fertigung von Rumpfstrukturen, unter Berücksichtigung der Legierungssysteme AlMgSc und AlCuLi. Zudem wurden die FML-Fertigungsprozesse für zukünftige Schalenkonzepte auf Basis weiterer Automatisierungsansätze erweitert. Parallel wurden für Rumpfschalen neuester Generation innerhalb der Montagebereiche neue Konzepte entwickelt.

Das Projekt PREMO konzentrierte sich dabei auf folgende Entwicklungen:

Relaxationsumformen

- *Entwicklung eines Tooling- und Abdichtkonzepts für das Relaxationsumformen anhand des Hautfeld 10, Sektion 17, A318*
- *Entwicklung des Prozessfensters für das Relaxationsumformen hinsichtlich Temperatur, Zeit und Ofendruck*
- *Analyse der Bauteilgeometrie wie Lage, Spring Back, Kontur anhand von Demonstratoren*

FSW

- *Bewertung von Nahtgeometrien für die Anwendung von FSW an Hautfeld-Längsnähten*
- *Entwicklung einer Frässtrategie für die Nahtkantenvorbereitung*
- *Entwicklung von Qualitätssicherungssystemen zur Detektion von möglichen Defekten*
- *Aufbau eines flexiblen Toolingkonzepts für die Fixierung der Hautfelder während des FSW Prozesses*
- *Validierung anhand von Coupons und Demonstratoren*

Fibre Metal Laminates

- *Entwicklung von Systemen zum automatisierten Ablegen von FML Hautfeldern, insbesondere Prepreg und Al-Dünnschichten*
- *Definition von Prozessfenstern für die autom. FML Herstellung*
- *Analyse des Oberflächenschutzes auf FSW geschweißten Dünnschichten (auch AlMgSc)*
- *Aufbau des Designs von Coupons und Demonstratoren*

Montage

- *Entwicklung und Optimierung des Prozessabfolge zur autom. Integration von Clips in Hautfeldschalen*
- *Entwicklung von Konzepten für die Tür- und Torrahmenmontage*

1.2 Planung, Ablauf und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben INPRO wurde gemäß dem Bewilligungsbescheid am 01.04.2012 begonnen. In Absprache mit dem Verbundführer Airbus wurde am 06.06.2012 das Kick-Off zum Projekt INPRO durchgeführt. Innerhalb des Kick-Off-Meetings und der konstituierenden Sitzung am 06.06.2012 wurde das Projekt nochmals allen zuarbeitenden Fachbereichen der Premium Aerotec, Instituten, KMU's, Verbund- und Industriepartnern dezidiert dargelegt. Das offizielle Kick-Off des Verbundes ECO erfolgte am 13.06.12 mit allen Verbundpartnern unter der Federführung von Airbus.

Gemäß dem INPRO Projektantrag stellt sich der Projektstrukturbaum, wie in Abbildung 1 beschrieben, dar.

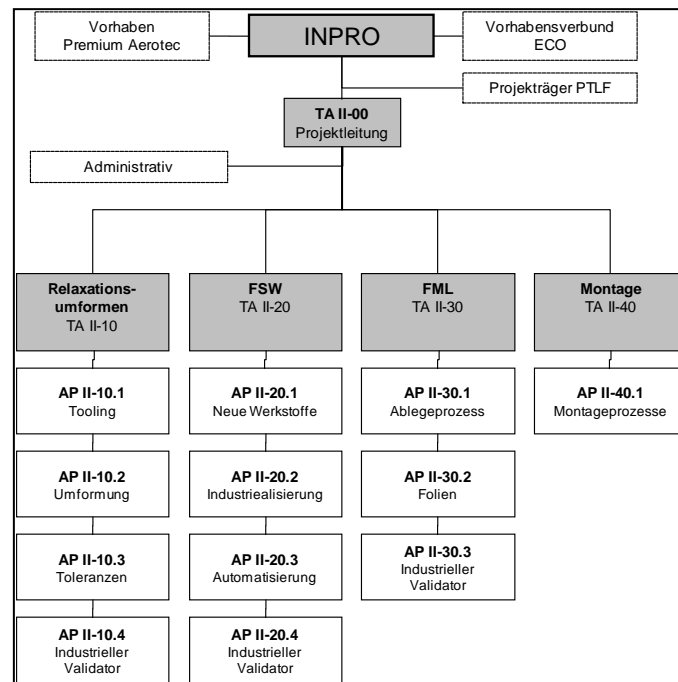


Abbildung 1: INPRO Projektstrukturplan

Während des Vorhabens erfolgte insbesondere eine enge Zusammenarbeit mit den Partnern Airbus (Projekt NEXXT) zu den Themen Relaxationsumformen von AIMgSc, FSW von Hautfeldern und FML Prozess sowie dem DLR (Projekt MTEXT) zu den Inhalten FSW von Dünnblechen und FML Aufbauten mit AIMgSc. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse wird im Kapitel 2.1 „Erzielte Ergebnisse“ dargelegt.

Mit dem Verlauf des Projekts hat sich gezeigt, dass eine Anpassung des Arbeitsplanes erforderlich ist. Dies war auf technische Projekterkenntnisse sowie auf die dem Projektträger bekannte Ressourcenthematik bei der Premium AEROTEC GmbH zurückzuführen. Die Änderungsplanung ging mit einer Projektmittelreduzierung einher. Die Arbeitsplanänderung ergab sich in den Teilaufgaben TA10, TA20, TA30 und TA40.

In der Teilaufgabe TA10 – Relaxationsumformen stand der Nachweis der Machbarkeit des Relaxationsumformens im Vordergrund. Die Machbarkeit der Umformung von komplexen Hautfeldern mit geschweißten Stringern konnte zum Projektende nachgewiesen werden. Die Optimierung der Prozessparameter sowie die Entwicklung von alternativen Aufheizmethoden konnte daher nicht im Projekt INPRO durchgeführt werden. In der Teilaufgabe TA20 – FSW lag der Schwerpunkt neben der FSW Prozessentwicklung, auf der Entwicklung einer flexiblen Vakuumspannvorrichtung für das Schweißen. Aufgrund des Ausfalls der FSW Anlage konnten geplante Versuche nicht rechtzeitig durchgeführt werden. Daher wurde die Entwicklung und Fertigung der flexiblen Vorrichtung im Projekt INPRO nicht fortgesetzt. Stattdessen erfolgt die Prozessentwicklung anhand vorhandener Vorrichtungen. Im Rahmen der Teilaufgabe TA30 – FML stellte sich heraus, dass der geplante Demonstrator Hautfeld 10, Sektion 17 A318 nicht ohne das Vorformen von Dünnblechen hergestellt werden konnte. Dies ist auf die Größe des Demonstrators und die starke Sphärizität zurückzuführen. Stattdessen wurde der Nachweis des automatisierten Ablegens anhand von zwei kleinere Demonstratoren demonstriert, die das Vorformen von Dünnblechen nicht erfordern. In der Teilaufgabe TA40 – Montage hat die Anpassung der Airbus Strategie hinzu der Entwicklung von Flugzeugderivaten dazu geführt, dass die Entwicklung von Montagekonzepten für Tür- und Torrahmen für

neue Flugzeigrümpfe nicht fortgesetzt wurde. Stattdessen wurde der Schwerpunkt innerhalb von INPRO auf die Montagekonzepte und automatisierte Integration von Clips gelegt.

Die Arbeitsplanänderung und Mittelreduzierung wurde im Vorfeld mit dem Projektträger abgestimmt und ihm offiziell mit dem Änderungsantrag vom 22.10.2014 angezeigt. Die Bewilligung durch den Projektträger erfolgte mit dem Änderungsbescheid vom 16.12.2014. Das Vorhaben INPRO wurde zum 31.03.2015 beendet.

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Bisherige Bauweisen für Flugzeigrumpfstrukturen sind überwiegend geprägt durch Einsatz konventioneller Aluminium-Legierungen und den Füge-technologien Nieten und Kleben (Abbildung 2).

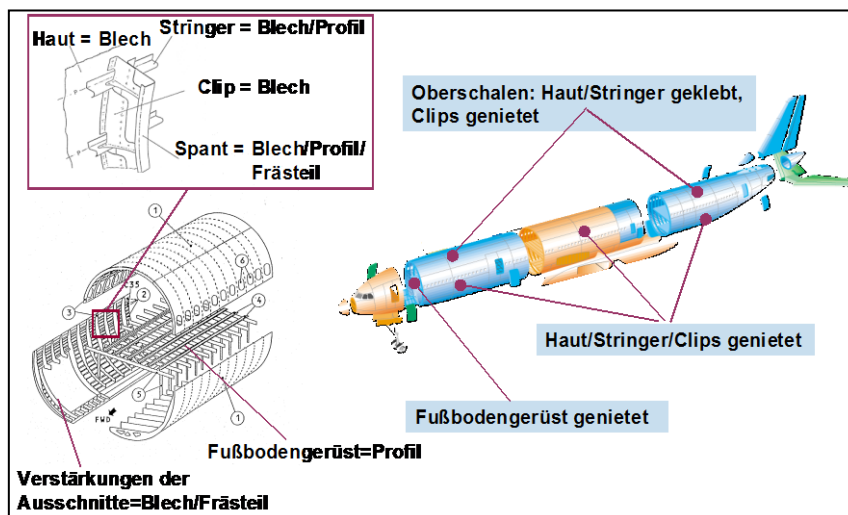


Abbildung 2: Aufbau einer konventionellen Rumpfstruktur

Im Flugzeugbau für Kurz- und Mittelstrecken werden nach wie vor traditionelle metallische Werkstoffen aus den Werkstoffgruppen AA2xxx (z. B. AA2024) oder AA7xxx (z. B. AA7075) im Bereich der Rumpfstruktur eingesetzt. Daneben haben in den vergangenen Jahren auch AlMgSi-Basislegierungen wie AA6056 Einzug in die Serienfertigung gefunden, die gegenüber bisherigen AlCu-Legierungen u. a. eine bessere Eignung für das Schmelzschweißen aufweisen [Hüg02, Röt05, Ost07, Sne02]. Neben den rein metallischen Werkstoffsystemen haben sich aber auch faserverstärkte Metalle (GLARE®) im Flugzeugbau etabliert, die sich u.a. durch ihr Damage-Toleranz-Verhalten auszeichnen [Ver02]. Aus der konsequenten Ausnutzung der jeweiligen Performance der verschiedenen Werkstoffe resultiert bereits heute ein Materialmix, der einerseits durch belastungsgerechte Werkstoffauswahl definiert wird und andererseits auch wirtschaftlichen Zwängen folgen muss. Neu entwickelte Werkstoffe mit reduzierter Dichte und erweitertem Spektrum von anwendbaren Fertigungstechnologien wie AlMgSc- oder AlCuLi sind zwar heute bereits weit entwickelt, haben aber bisher keinen Einzug in die Serienfertigung für Rumpfstrukturen gehalten [Spa09]. Dies ist dabei weniger auf den Entwicklungsstand der Legierungen als solches zurückzuführen, als vielmehr auf

den bisher erreichten Reifegrad der mit diesen Werkstoffen nutzbaren Fertigungstechnologien [Spa09].

Faserverstärkte Metall-Laminare werden seit langem erfolgreich in der Serienfertigung von einfach oder zweifach gekrümmten Strukturbauteilen für den Rumpf angewendet [Ver02]. Dem entsprechend haben auch die damit verbundenen Fertigungstechnologien einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Hierzu gehört neben dem für die Metallfolien eingesetzten Werkstoff (AA2024) auch die für die Herstellung von FML-Blechen notwendige Autoklav-Technik [Ver02]. Ein teil- oder gar vollautomatisierter Ablegeprozess für die Metallfolien oder das Glasfasergewebe ist aber auch für diese Technologie noch nicht in der Serienfertigung verfügbar. Darüber hinaus werden auch Folien der neuen Werkstoffe AlMgSc und AlCuLi noch nicht für diese Technologie genutzt. Letzteres wurde vor allem durch den Umstand bedingt, dass Folien aus diesen Werkstoffen bisher nicht in ausreichender Produktionsmenge am Markt verfügbar waren.

Für die Umformung von metallischen Halbzeugen sind das Rollformen für einfach gekrümmte und das Streckziehen für zweifach gekrümmte Bauteile wichtiger Bestandteil heutiger Fertigungsprozesse für Rumpfstrukturen (Abbildung 3). Für diese Prozesse wird sowohl die Umformung von Legierungen wie die AA2024 beherrscht, als auch von neueren Legierungen wie die AA6056 bzw. AA6156. Dabei beschränkt sich die Anwendung dieser Prozesse auf die Weiterverarbeitung von Halbzeugen (Bleche). Entwicklungsarbeiten für die neuen Werkstoffe AlCuLi haben bisher lediglich gezeigt, dass diese Prozesse auch für Halbzeuge dieser Legierungssysteme nutzbar sind [Kre08]. Im Gegensatz dazu kann das Streckziehen aufgrund des geringen Formänderungsvermögens nicht mehr bei naturharten Legierungen wie AlMgSc angewendet werden [Spa09]. Derartige Werkstoffe ermöglichen jedoch die Anwendung von Technologien, die bisher im Flugzeugbau wenig bis gar nicht zum Einsatz gekommen sind. Hierzu zählt u. a. das Relaxationsumformen.

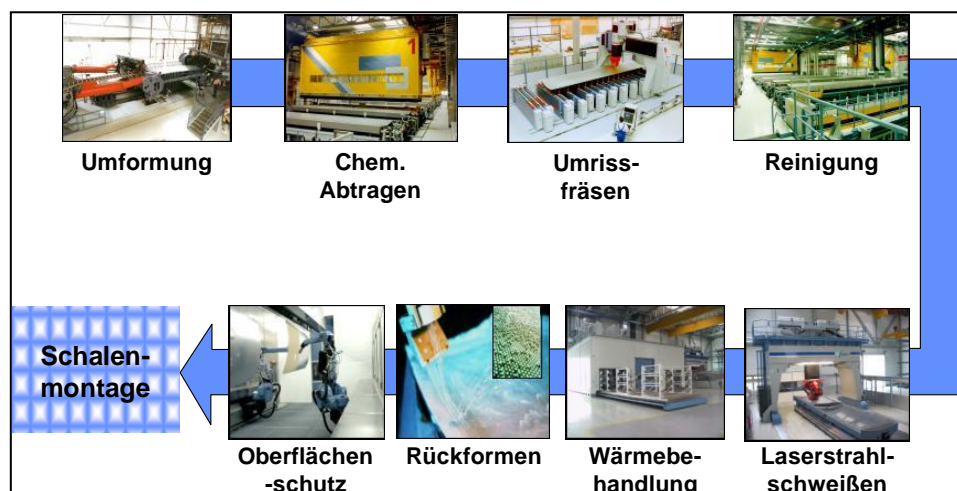


Abbildung 3: Fertigungskette für geschweißte Rumpfstrukturen

Die Kombination von Bauteilen aus verschiedenen Werkstoffen macht den Einsatz von angepassten Fügeverfahren unabdingbar. Neben den konventionellen Nietverfahren, die im Flugzeugbau für die Verbindung von Stringern und Clips zu Hautfelder sowie zwischen Clips bzw. Schubkämmen und Spanten seit langem angewendet werden, haben sich in den vergangenen Jahren auch neue Verbindungstechnologien wie das Laserstrahlschweißen in der Serienfertigung etabliert [Koc06, Kro05, Sum02]. Für andere Fügeverfahren wie den Reibrührschweißen (FSW) sind hingegen die für den Serieneinsatz notwendigen Entwicklungsschritte bisher noch nicht ganzheitlich vollzogen worden [Mon09]. Hingegen wurde das Nieten im Bereich der Vorfertigung und der Montage von Strukturbauteilen für den Rumpf inzwischen in vielen Bereichen vollständig automatisiert. Dieser Prozess beinhaltet sowohl das Bohren der für das Nieten notwendigen Löcher bis hin zu der Qualitätsprüfung der gesetzten Niete.

Zusammenfassend sind die Fertigungstechnologien, die für die heute eingesetzten Werkstoffe verfügbar sind, weitgehend beherrscht, deren Potenzial jedoch noch nicht in allen Belangen vollständig ausgeschöpft ist. So fehlt bislang z. B. ein teilautomatisierter Ablegeprozess für FML. Um das Potenzial von neuen, dichterereduzierten Werkstoffen ganzheitlich auszuschöpfen und damit deren Gewichtsvorteil voll nutzen zu können, muss konsequenterweise auch über neue Bauweisen nachgedacht werden, die sich aus den neu anwendbaren Fertigungstechnologien ableiten lassen. Dabei dürfen die Bauweisen jedoch nicht losgelöst von den jeweiligen Technologien entwickelt werden. Um neben dem Gewichtsvorteil auch eine wirtschaftlich tragbare Fertigung der Bauweisen gewährleisten zu können, müssen vielmehr an die jeweilige Fertigungstechnologie angepasste Bauweisen entwickelt werden.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Folgenden werden die Verbundpartner als auch die Unterauftragnehmer aufgeführt.

TAII 10 – Relaxationsumformen

- Airbus Group Innovations (Ottobrunn)
- DLR – Institut für Werkstoffforschung (Köln)
- IWT – Stiftung Institut für Werkstofftechnik (Bremen)
- MATFEM – Consulting in den Bereichen Materialwissenschaften und Finite Elemente Simulation (München)
- Optron GmbH - Garbsen

TAII 20 – Reibrührschweißen

- Airbus Group (Bremen)
- DLR – Institut für Werkstoffforschung (Köln)
- BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH (Bremen)
- BROETJE Automation GmbH (Wiefelstede)
- Helmholtz-Zentrum-Geesthacht – Zentrum für Material und Küstenforschung (Geesthacht)

- IWT – Stiftung Institut für Werkstofftechnik (Bremen)

TAII 30 – Fibre Metal Laminates

- Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM (Bremen)
- Airbus Group (Bremen)
- DLR – Institut für Werkstoffforschung (Köln)

TAII 40 – Montage

- WZL Aachen GmbH (Aachen)

2 Ergebnisbericht

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 TAI 10 – Relaxationsumformen

APII 10.1 – Tooling

Diese Teilaufgabe befasst sich mit der Entwicklung und dem Aufbau eines seriennahen Toolings für das Relaxationsumformen. Das Ziel der Teilaufgabe TAI-10 besteht darin, eine Fertigungslösung für das Relaxationsumformen zu entwickeln, das Spannkonzeppte, QS-System und Oberflächenschutztechnologie beinhaltet. Übergeordnetes Ziel ist eine reduzierte Fertigungszeit im Vergleich zu der Referenz-Prozesskette im Flugzeugbau. Dafür soll ein investitionsreifes Anlagenkonzept bereitgestellt werden und Fertigungs- sowie Industrialisierungskonzepte entwickelt werden. Die Forschungsergebnisse sollen in die Fertigung eines industriellen Validatorbauteils fließen, um den TRL 5 Nachweis für den Prozess des Relaxationsumformens zu erlangen.

AlMgSc lässt sich bei Temperaturen über 300 °C aufgrund geringer verbleibender Dehngrenze mit relativ geringem Kraftaufwand und Rückfederungsgrad umformen. Da sich der Werkstoff durch bestimmte Eigenschaften für den Einsatz im Luftfahrtbereich eignet, soll dieses Verhalten zur Herstellung flächiger Beplankungsbleche genutzt werden. Die Umformung ist eine Kombination aus Relaxationsumformen, überlagert von Kriecheffekten in einigen Bauteilbereichen. Es handelt sich hierbei um ein neues Fertigungsverfahren, welches noch nicht in der Serienproduktion von Bauteilen zum Einsatz kommt. Zu Projektbeginn waren nur wenige Erfahrungen aus ersten Versuchen vorhanden. Entsprechend hoch war der zu leistende Entwicklungsaufwand. Im Airbus-Projekt MERGE sowie im Premium AEROTEC Projekt PROMET und PREMO wurden entsprechende Vorarbeiten geleistet, auf denen das Projekt INPRO aufsetzt.

Innerhalb des Vorhabens INPRO ist der Nachweis der TRL 5 Anforderungen, [PAG12¹] und [PAG12²], am industriellen Validator angestrebt.

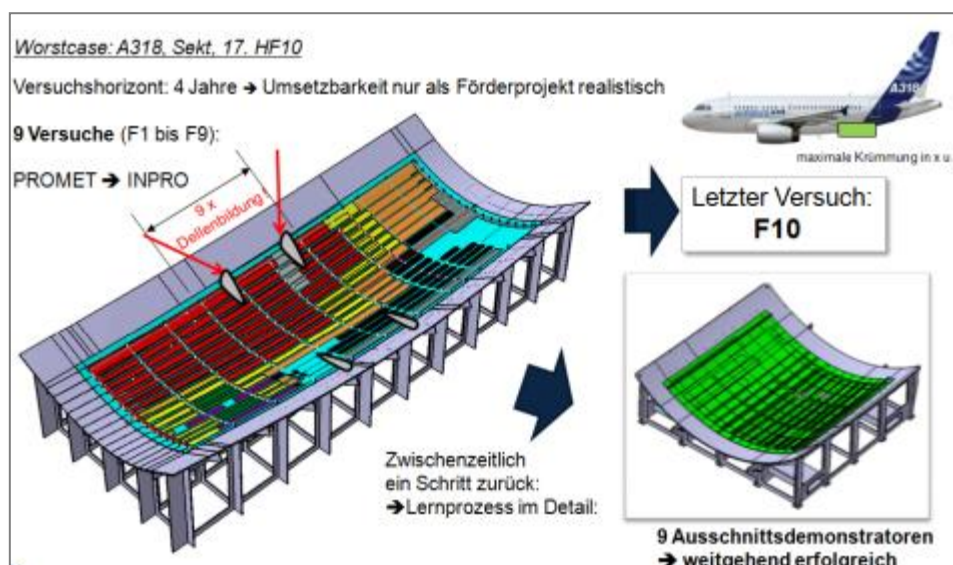


Abbildung 4: Ursprünglicher TRL5-Demonstrator

Als Basis der FEM wurde bereits in Vorprojekten ein Simulationstool entwickelt, das auf der Standard-Umformsoftware ABAQUS aufsetzt, wobei innerhalb von INPRO erhebliche und notwendige Erweiterungen zur Erlangung einer nachweislich guten Vorhersagequalität einfließen. Mathematische Simulationsuntersuchungen ermöglichten signifikante Erkenntnisse zur Prozessführung. Erste Materialeigenschaftsuntersuchungsergebnisse zeigen die ausreichende Stauchungsfähigkeit der Ko8542 Legierung bei Relaxationstemperatur. Vier gefertigte Ausschnittsdemonstratoren des Worstcase-Hautfeldes dokumentieren die industrielle Anwendbarkeit des Umformverfahrens mit und ohne Stringer und Pockets bei geringem Umformfaktor; mit dem Fünften gelang der Nachweis konturnaher 2D-Vorfertigung ohne Konturnacharbeit, während der Sechste eine energetisch sparsame Aufheizung nur in Verbindung mit einer völlig neu zu konzipierenden Vorrichtung erkennen lässt. Für den 1:1 Versuch des A320-Hautfeld 10 ist ein neues Demonstrator-Tool konstruiert worden. Der erste damit innerhalb INPRO erzeugte Fullscale Demonstrator F9 als Worstcase-Bauteil ließ trotz zwei Stringer als Niederhalter eine starke Abhängigkeit von Walzwelligkeiten erkennen – und beulte. Nicht erfolgreich waren der Versuch 6b zur beschleunigten Aufheizzeit, wie auch eine zusätzliche Haltephase zur besseren Einförmung. Die Folge war eine Strategieänderung durch Airbus, die ein neues, geometrisch einfacheres TRL5-Bauteil ohne Einsatz von Niederhaltern bei Kalteinförmung bestimmte: Hautfeld 3 (Airbus-Projekt METALICA). Eine positive Simulationsprognose ermutigte bei vollem und wirtschaftlichem Stringerbesatz einschließlich der beiden äußersten Stringer zur erneuten und letzten INPRO Ofenumformung des ursprünglichen Bauteils F10 – mit Erfolg. Während keinerlei Beulen zu erkennen waren, zeigte das 2D-vorgefertigte 2x5,5 m große Bauteil nach der Relaxationsumformung mit lediglich 1 mm Konturabweichung zum 3D-Soll incl. Stringer eine hervorragende Maßeinhaltung bei nur 3 mm Rückfederung [IWT15¹].

Versuch	Pocket	Stringer	Inversion	elektrisch	
A1					✓
A2	x				✓
A3		x			✓
A4	x	x			✓
A5			x		✓
A6a/6b	x/o			x/x	✗
F9		(x)	x		✗
EQ+EL					✓
A9E(H)					✓
F10		x	x		✓




Abbildung 5: A- Ausschnitts- und F- Fullscaledemonstratoren

Somit können das Abwicklungsmodell, das Simulationsmodell und das eigentliche Ofenprozessfenster für Bauteile mit Stringern als validiert gelten. Im Wechsel zwischen Simulation

und Versuch konnte der Ofenprozess umformtechnisch optimiert werden. Das stufeneinformende sog. Relaxkriechen gilt dabei als leistungsfähiger als das kalteinformende Standard-Relaxieren. Zur Findung der Umformgrenzen wurden die Einflussgrößen auf die Umformung – ergänzt durch Einlegeversuche und einen weiteren Ausschnittsdemonstrator A9 - empirisch bestimmt und flossen in die Definition des Formfaktors ein, der eine befriedigende und schnelle Vorhersage zur Umformbarkeit liefert. Für das Worstcase-Bauteil ohne Stringer wurde ein Niederhalterkonzept umformtechnisch erfolgreich – ohne Beulen - simulativ verifiziert. Weitere Niederhalterkonzepte wurden konzipiert und vorkonstruiert.

Die erforderlichen Toolings im Prozess konnten im wesentlichen in 3 Gruppen aufgeteilt werden. Die Randbedingungen waren: „safety first“ und die erforderliche Ofeneinsatzzeit von 10h bei 315°C.

- Formgebendes Tool (Matrize)
- Vakuumreglung und Dichtungen
- Niederhalter

Für den Nachweis der Machbarkeit war ein 1:1 Tool unabdingbar. Als Kontur mit der größten Krümmung / Sphärizität wurde aus der Sektion 17 A320 das Hautfeld 10 ausgewählt. Entsprechend wurde das Relaxationsumformtool für das Hautfeld 10 entwickelt, konstruiert und gefertigt. In Abbildung 6 ist das Umformtool im Designstatus, Fertigungsstatus sowie im anschließenden Einsatz dargestellt.

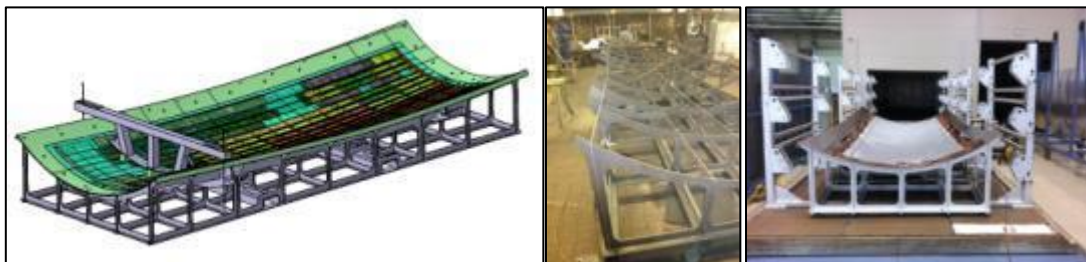


Abbildung 6: Hautfeld10 Vorrichtung in der Konstruktion und Fertigungsprozess

Vakuumregelung und Dichtungen

Der Aufbau der Regelung zur Einstellung der Prozessparameter Zeit und Druck, ist in der Abbildung 7 dargestellt. In Abhängigkeit von der Temperatur war bei den Versuchen der Prozessdruck zu steuern. Wie sich gezeigt hat, muss die Pumpe eine Auflösung von ± 1 mbar erreichen können.

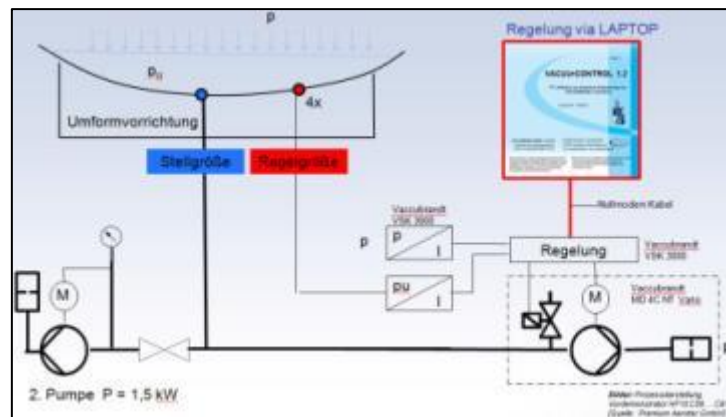


Abbildung 7: Regelaufbau

Für die Abdichtung des Bauteils zur Vorrichtung wurde zunächst ein temperaturbeständiges Dichtband sowie Folie eingesetzt.

Niederhalter mit integrierter Dichtung (Sealframe).

Während des Relaxationsprozess konnten Relativbewegungen zwischen dem Bauteil und der Vorrichtung beobachtet werden. Daher war es bei der Entwicklung des Niederhalters erforderlich, diese Bewegung des Bauteils zuzulassen. Wie in Abbildung 8 dargestellt, konnte die mit einer 2-Arm Kinematik realisiert werden. Zudem wurde hier die Dichtung mit integriert.

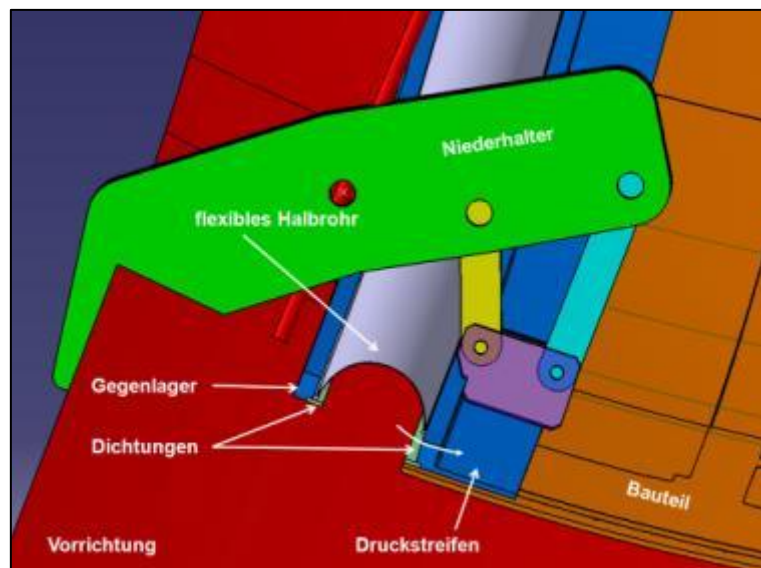


Abbildung 8: Konzept Niederhalter

An den Eckstoßpunkten wurden Dichtkörper aufgesetzt. In Abbildung 9 sind die großen Abstände an der Stirnseite des Bauteils dargestellt, die einen Übergangsbereich vom Halbrohr zur Vorrichtung erfordern.

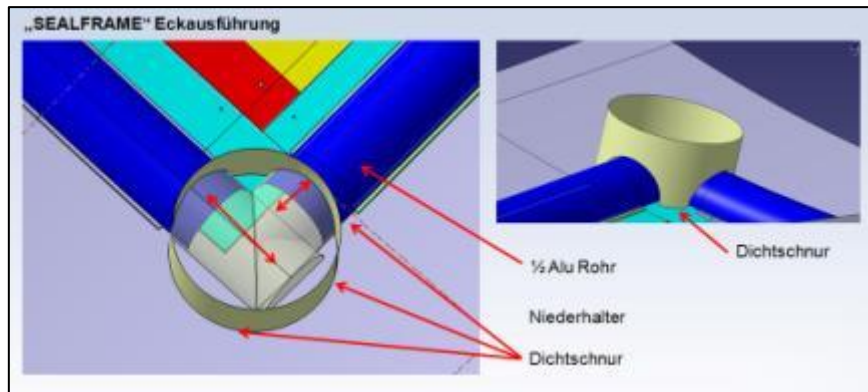


Abbildung 9: Sealframe Eckausrüstung

Neben dem Niederhalterkonzept mit integrierter Dichtung wurde ein Weiteres, vereinfachtes Konzept untersucht. Dabei wurde auf die Modulbauweise, das Multitooling, sowie auf eine kompaktere Bauweise gesetzt. Letzteres auch, damit der Niederhalter auch unter der Vakuumfolie eingesetzt werden kann. In der Abbildung 10 sind die Niederhaltermodule in ihrer prinzipiellen Einbaulage im 1:1 Demonstrator dargestellt. Über montierbare Niederhalterschienen kann die Niederhalterkraft linienförmig auf das Bauteil übertragen werden (siehe Abbildung 9).

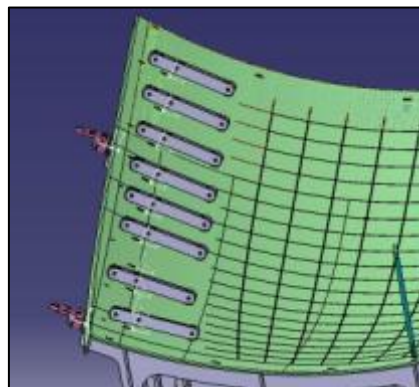


Abbildung 10: Prinzipielle Einbaulage der Niederhaltermodule

Die unterschiedlichen Abstände des Bauteilrands zur Gewindebohrung in den Vorrichtungen können realisiert werden (Abbildung 11 und Abbildung 12). Dem Bauteil wird ermöglicht, sich unter dem Niederhalter zu bewegen. Optional ist noch eine Niederhalterschiene montierbar (Abbildung 13).

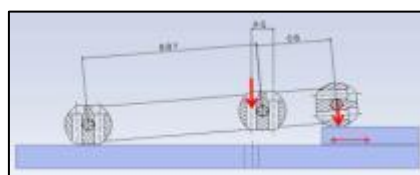


Abbildung 11: Erste Möglichkeit vom Abstand des Bauteilrands zur Gewindebohrung



Abbildung 12: Zweite Möglichkeit vom Abstand des Bauteilrands zur Gewindebohrung



Abbildung 13: Optionale Niederhalterschiene

Aufheizung mit Heizmatten

Es wurden Versuche zur Aufheizung des Bauteils mittels elektrischen Heizmatten durchgeführt. Die Verwendung von Infrarotstrahlung als Wärmequelle stellte sich nicht als geeignet heraus. Die Vorteile der Heizmatten sind hauptsächlich in der Energieersparnis (bedingt durch das Aufheizen mit Bauteilkontakt), sowie einer wesentlich höheren Aufheizrate und einer einfachen Handhabung zu sehen (Abbildung 14).

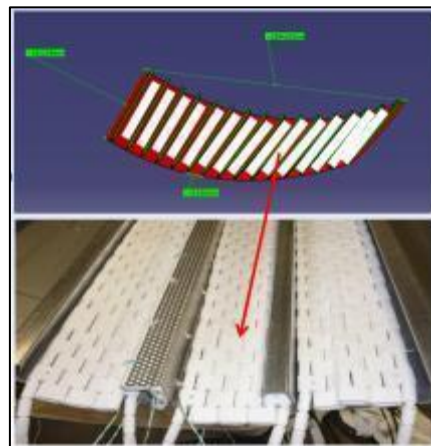


Abbildung 14: Heizmatten

Insgesamt wurden zwei Versuche zur Erwärmung des Bauteils mit Heizmatten durchgeführt (Abbildung 15). Zur Isolierung der Vorrichtung wurde deshalb in die Soll-Kontur der Vorrichtung ein Calcium-Silikat-Faserpapier eingelegt. Die Dicke wurde aufgrund des Offsetfehlers mit 6mm bestimmt. Probleme machte dabei das einlegen des Bauteils. Durch das Eigengewicht, sowie durch das vorverformendes Bauteils entstand eine Relativbewegung der Bauteilkanten zur Vorrichtungs Oberfläche. Dadurch wurde das Faserpapier zusammengestaucht. Aufgrund der zu schwachen Wärmedämmung ist zuviel der Wärme in die Vorrichtung abgeflossen.

Für einen eventuellen Serienprozess sollte das Deckblech der Vorrichtung von unten beheizt werden, oder die Wärmedämmung (Bsp.: „Dotherm 600“) in eine einfache Vorrichtung bringen und dann die Kontur heraus fräsen.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass die Anwendung grundsätzlich möglich ist und den Vorteil der optischen Prozesskontrolle bei guter Energieeffizienz bietet. Verbesserungspotential für eine Serienanwendung sind in der Modularisierung der Heizelemente im Tool zu sehen, um nicht prinzipiell für jede Vorrichtung eigene Heizelemente vorsehen zu müssen. Auf die Oberseite des Bauteil können die Glühmatten der entsprechenden Stringerform angepasst und mit Wärmedämmung konfektioniert werden.



Abbildung 15: Auflegen der Heizmatten

APII 10.2 – Umformung

Der Umformprozess wurde in seinen Grundelementen bereits im Vorprojekt PROMET und PREMO entwickelt entsprechend der Übergabematrix, jedoch innerhalb von INPRO wurde der Prozess konkretisiert und weiter detailliert.

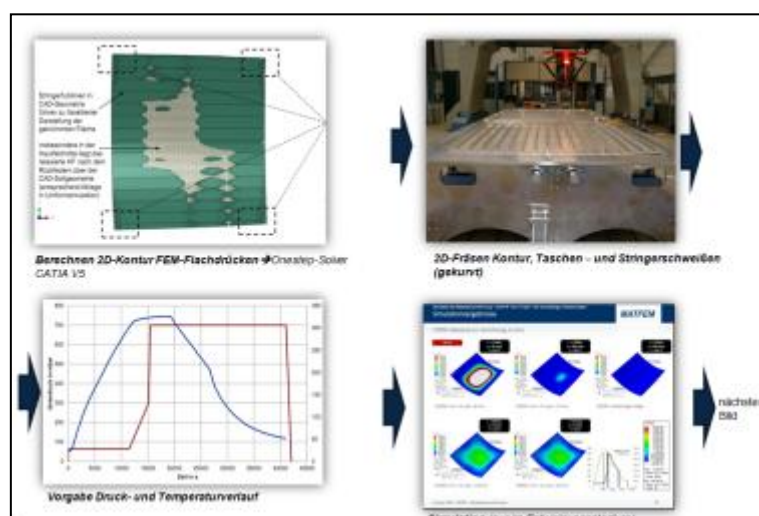


Abbildung 16: Ablauf Relaxation Demonstrator - 1



Abbildung 17: Ablauf Relaxation Demonstratoren - 2

Die beiden vorgestellten Bilder zeigen dabei ein relatives Fertigungsoptimum, das sich auf die prädestinierte und wirtschaftlichere Fertigung mit Stringer bezieht. Grundsätzlich gilt dieser Prozess auch für Hautfelder ohne Stringer, deren vereinfachter Fertigungsprozess zu einem etwas anderen Optimum führen kann; so empfiehlt sich bei Stringern mit einer Hautfeldfixierung von Fest- und Langloch zu arbeiten, sowohl vor, als auch während und ggf. auch nach der Relaxation. Diese befinden sich an Bauteillaschen, mittig angeflanscht an den Stirnseiten, das Festloch an der umformkritischeren Bauteilseite. Ausgeführt wurden diese über den gesamten Stirnseitenbereich, was Abdichtvorteile, aber umformtechnische Nachteile (je länger, desto schwieriger) und wirtschaftliche Nachteile besitzt (Lappen können hinterher manuell ohne NC-Prozess abgetrennt werden).

Das Bauteil wird mit Hilfen von Traversen innerhalb unkritischer Grenzen elastisch voreingeformt und mittels einer dünnen Polyimidfolie und einer Dichtschnur am Rand abgedichtet. Sofern keine Stringer aufgeschweißt sind, ist auch eine Gesamtfolie empfehlenswert, die entsprechend Beobachtungen eine gleichmäßigere Druckverteilung erzeugt. Nach dem Vakuumaufbau wird maximal bis zum Aufheizdruck angesaugt (bei Kalteinformung bis zum Enddruck). Für die extrem gekrümmte Geometrie des Worstcase-Bauteils besitzen die Stringer nicht nur wirtschaftliche Vorteile, sondern erfüllen gleichzeitig eine unbedingt erforderliche Niederhalterfunktion. Die Versuche innerhalb des Projekts PROMET zeigten, dass Bauteile ohne Stringer oder mit alternativen Dopplern jedes Mal gebeult haben – erst recht mit Pockets, die als Imperfektion wirken.

Zunächst galt es jedoch die Prozessfenster für den eigentlichen Umformprozess zu finden, die Druck- und Temperaturverläufe. Diese konnten mit den Versuchen zu den Ausschnittsdemonstratoren sowie des Fullscale-Demonstrators kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Aus den bisherigen Versuchen und den Simulationen zum Relaxationsumformprozess innerhalb des Projekts INPRO ließen sich eine Reihe von wesentlichen Rahmenbedingungen ableiten. So durfte der letzte Druckanstieg nicht zu spät einsetzen, um genug Zeit für die Endrelaxation zu gewährleisten, die ein zu großes Rückfedern vermeiden sollte. Die ursprünglich konzipierte 2. und letzte Druckrampe erwies sich beim gemischten Relaxations- und Kriechprozess (hier ‚Relaxkriechen‘) als unnötig, zumal auch beim Worstcase-Bauteil

zum Ende der ersten Druckrampe in der Mitte des temperaturmaximalen Relaxationsplateaus bereits volle Bauteilanlage bei 300 mbar erreicht wurde und eine weitere Drucksteigerung damit keine Reduzierung der Rückfederung versprach. Da dieser Druckwert bereits für das geometrische Worstcase-Bauteil mit der Dicke 4,4 mm galt, markierte er die erforderliche Obergrenze für die Fertigung ähnlicher Hautfelder. Wesentlich war jedoch das Einhalten der relativ niedrigen Obergrenze beim Aufheizdruck, dessen Überschreiten eine prompte Beulung nach sich zog – das Bauteil wurde dabei in eine geometrische Form gezwungen, die zu Druckspannungen oberhalb der Beulspannung führte und erst nach einer gewissen Kriechzeit erhöht werden durfte, wenn es aufgrund des Temperatureinflusses reif dafür war. Dabei ist der kritischste Zeitpunkt der, bei dem durch den Temperaturanstieg das E-Modul abfällt, bevor die Relaxation begonnen hat. Das ist im Allgemeinen bei 180-220°C. Der Versagensdruck in dieser Phase wurde für unser Extrembauteil F9 mit 70 mbar berechnet und der Aufheizdruck mit 55 mbar limitiert, während die Versuche F9 und F10 sogar nur mit 40 mbar gefahren wurden. Der maximale Aufheizdruck war für dünne, große Bauteile dabei noch deutlich geringer, wie die Simulationen zeigten. Allerdings war auch seine Untergrenze in der Form limitiert, als dass bei zu geringem Druck zu wenig Relaxationsarbeit geleistet wurde und die kritische Phase sich zu höheren Temperaturen verschob – und den Prozess zeitlich zu sehr dehnte– auf Kosten von Wirtschaftlichkeit und zunehmenden Dichtungsproblemen.

Das Finden und Optimieren des bauteilspezifischen Prozessfensters war jedoch nur im ständigen Abgleich mit den entsprechenden Simulationen möglich, die durch Betrachtung der berechneten Zustandsgrößen ein Verständnis der Einflussgrößen und stattfindenden Prozesse ermöglichten. Dazu musste das Simulationstool erheblich weiterentwickelt werden, dessen Ergebnisse bei Projektanfang noch erhebliche Diskrepanzen zu den Versuchen zeigten, insbesondere bei der Rückfederung mit Stringern. Bereits innerhalb des Projekts PROMET waren ausgeprägt anisotrope Werkstoffeigenschaften für AlMgSc gefunden worden, die die Genauigkeit einer isotropen Simulation hinterfragten. Es erfolgte daher schwerpunktmäßig die Ermittlung von Werkstoffkennwerten für die Legierung Ko8542 aus Druck-, Schichtstauch-, Relaxations- und Kriechversuchen seitens Airbus Group Innovations (vorher nur Ko8242). Nach Abschluss aller Versuche stand eine vollständige Materialkarte zur Verfügung, um den Relaxationsumformprozess hinreichend genau in der Prozesssimulation abbilden zu können. Dabei wurde anfänglich beunruhigend für eine Temperatur von 325°C und eine Druckspannung in LT-Richtung von 22 MPa nach 4 h: instabiles Kriechen 3 infolge auftretender Scherbänder gefunden. Diese Erscheinung tritt jedoch erst ab 4 % Stauchung auf, während für den Worstcase-Demonstrator in der Simulation lediglich 1,5% Stauchung ermittelt wurde. Eine Prozessgrenze konnte für diese Beanspruchung ausgeschlossen werden. Für das Versagen der Worstcase-Versuche musste es eine andere Erklärung geben.

Der schrittweise Erkenntnisaufbau – primär über den Zwischenschritt der Ausschnittsdemonstratoren – ist in [MATFEM13¹] - [MATFEM13⁸] simulativ prognostiziert, reflektiert und dokumentiert. Das Simulationsmodell wurde dabei systematisch weiterentwickelt (Orthogonalität, benutzerdefiniertes Kriechmodell UCREEP, Relaxation bereits ab 100°C, Temperaturdehnungen, Reibung). Alle Ausschnittsdemonstratoren konnten erfolgreich umgeformt werden (Ausnahme 6b aufgrund Aufheizungleichförmigkeiten). Das galt sowohl für Glattbleche als auch Bleche mit aufgeschweißten Stringern und Pockets, die kostengünstig zweidimensional vor dem Relaxationsumformen eingebracht werden konnten. Während die Stringer als Niederhalter die Umformung begünstigen, indem sie die Beulung zu höheren Umformgraden verschieben, sind Taschen, insbesondere am Randbereich, extrem destabilisierende, imperfekte Einflussgrößen, die nur im deutlich unterkritischen Umformbereich eingesetzt werden sollten.

Identifiziert wurde ein neues Dichtband, das eine höhere Klebekraft und größere Temperaturresistenz besaß. Kühlung und Backup-Pumpensystem wurden erprobt und bei späteren Versuchen wieder aufgegeben. Zur Vermeidung von Kratzern wurde ein Silikon-Glasgewebe eingesetzt. Bei Stringerbesatz entstand bei 325°C bereits eine galvanische Zelle (ohne Flüssigkeit) und entlang der Fußlinien setzte sich eine nicht näher untersuchte Aluminiumkorrosionslinie ab, die jedoch sehr einfach durch ein darunter längslaufendes Tape aus Polyimid vermieden werden konnte und so gleichzeitig Kratzer am Bauteil verhindert wurden. Festgestellt wurde ein Autoabdichtungseffekt, der mit der Einfeldung des Hautfelds einhergeht und eine temporäre Trennung zwischen Anzeige- und Ansaugdruck bedingt. Dieser Autoabdichtungseffekt war von der Ausnahme eines gezielt erwünschten und herbeigeführten Mehrkammersystem unerwünscht und konnte durch ein in die Vorrichtung über die Absaug- und Messbohrungen hinweg eingefrästes Netz (Grid) und auch Glasgewebe vermieden bzw. abgeschwächt werden, indem die Druckverteilung gleichmäßiger gestaltet wurde.

Entsprechend den Erfolgen wurde erneut der Fullscaledemonstratorversuch F9 mit zwei Stringern als Niederhalter in Angriff genommen und zunächst simuliert [MATFEM14⁴]. Infolge mathematischer Konvergenzprobleme entstanden zunächst nicht eindeutige Ergebnisse, die aber mit einer Reduzierung des Druckniveaus und einem smarteren Verlauf gelöst werden konnten und zu einer positiven Prognose führten [MATFEM14⁵]. Jedoch beulte das Hautfeld im Hardwareversuch erneut. Die Schadensanalyse ließ schnell Imperfektionen – Walzwelligkeiten - in den Fokus des Verdachts geraten, zumal die beiden Stringer an zweitäußerster Position und nicht außen am Ort des maximalen Wirkmechanismus positioniert waren (im Fall der äußersten Position kann die Längsnaht jedoch nicht mehr genietet, sondern muss FSW-gefügt werden). Die Überprüfung des Simulationsmodells incl. Materialdaten zeigte eher konservative Ansätze und bot keine Erklärung für die Abweichung zwischen Simulations- und Versuchsergebnis. Für die Simulation war allerdings nur eine Standardwalzwelligkeit unterstellt worden, zumal diesem Parameter bis dato kein besonderer Einfluss beigegeben wurde. Um diesen näher zu betrachten, wurden die seitens IWT/VEW aufgenommenen Messdaten des Bauteils nach dem Schweißen der Stringer / vor Relaxation aufbereitet und entsprechend in das Simulationsprogramm übernommen. Die neue Simulation zeigte nunmehr ein völlig entgegengesetztes Ergebnis zur vorherigen Simulation und es ergab sich ebenfalls eine Beulenbildung [MATFEM14⁷].

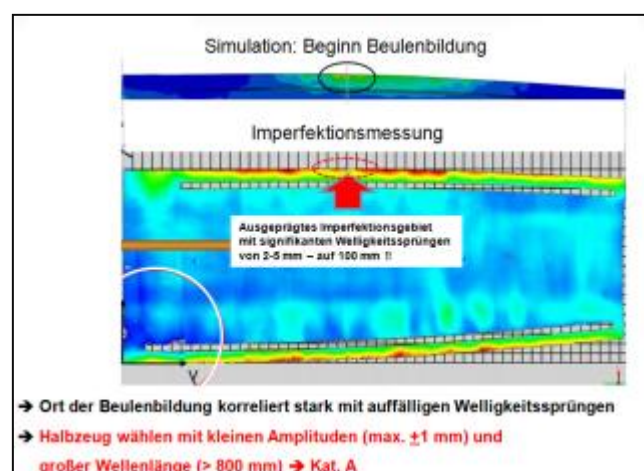


Abbildung 18: Vergleich F9 – Simulation mit Beule versus Realimperfektion

Die genaue Betrachtung des Schadensmechanismus der Simulation zeigte eine lokale Konzentration der Störung – wohl primär durch geringe Wellenlänge aber auch durch Amplitudenhöhe. Entsprechend wurden die restlichen Bleche bezüglich ihrer Walzwelligkeit charakterisiert und kategorisiert in A, B, C, (D). Dabei stellte C den noch zulässigen Grenzwert dar, der allerdings auf die Wellenlänge nicht ausreichend Bezug nahm. Eine Simulation des umformenergetischen Zustands spiegelte den realen Verlauf wider und stellte die frühe Beulung dar, bevor die Umformung überhaupt erst merkbar begann [MATFEM14⁸]. Als erste Maßnahme zur Prozessdesensibilisierung wurde eine zusätzliche Temperaturhaltephase simulativ untersucht – mit ebenfalls negativem Ergebnis [MATFEM14⁹]. Sobald die knickhafte Welligkeit sich entfalten konnte, war eine Beule unvermeidbar – es sei denn, es erfolgte eine Glättung durch Stringer/Niederhalter.

Als vielversprechendste Lösung für einen letzten Demonstrator F10 verblieb die Umformung eines Panels auf dem alle Stringer geschweißt werden sollten. Zunächst galt es den Versuch zu simulieren. Im konservativen Ansatz wurde die gemessene und mittelstarke Imperfektion des Versuchs F9 unterstellt. Die Simulation prognostiziert ein positives Ergebnis [MATFEM14¹⁰].

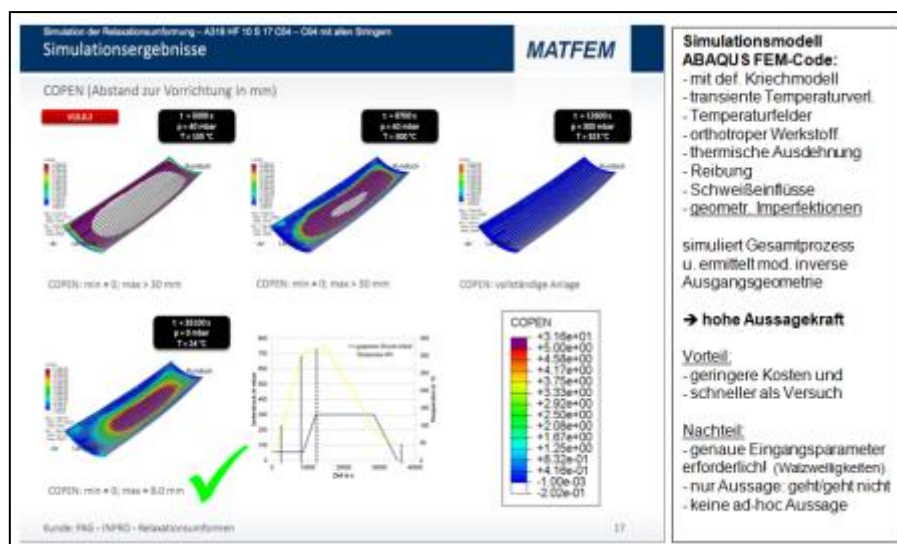


Abbildung 19: Simulationsergebnis F10 Worstcase-Bauteil mit 16 Stringern

Eine absichernde Studie zur Netzfeinheit zeigte keinen signifikanten Einfluss zur Ausbeulung von Stringern [MATFEM15¹] und bestätigte das angewandte Modell. Das zwischenzeitlich hergestellte Hautfeld zeigte herstellungsbedingt 400 mm zu kurze Stringer im sphärischen Bereich; eine interpretierende Studie [MATFEM15²] der bereits erstellten Simulation prognostizierte jedoch einen vernachlässigbaren Einfluss infolge geringer Druckspannungen im Außenbereich.

Die Relaxation des Demonstrators F10 wurde durchgeführt; verwendet wurde ein Blech aus der Kategorie A. Die Einhaltung der Prozessfensters wurde anhand der Dokumentation der Prozessparameter sichergestellt.

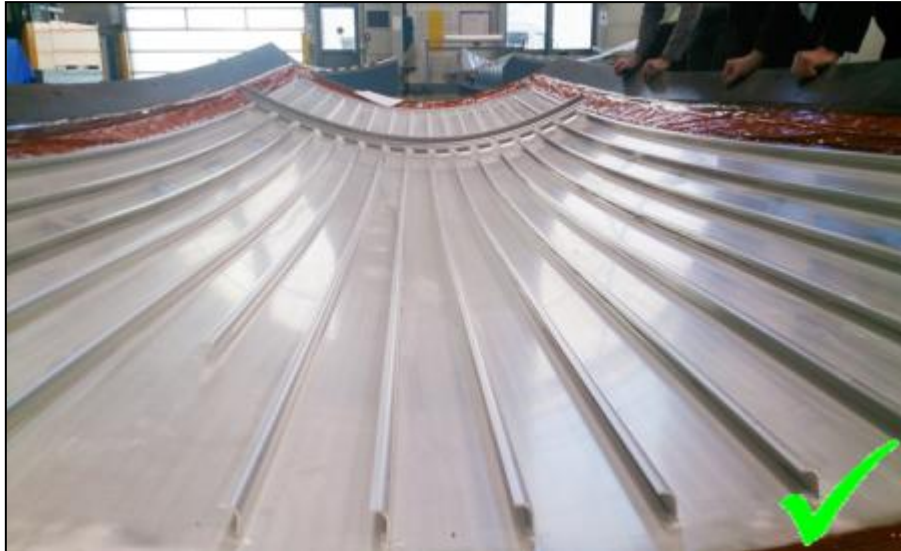


Abbildung 20: Demonstrator F10 Worstcase-Bauteil mit 16 Stringern

Die Umformung des Worstcase-Bauteils gelang problemlos. Ein Unterleggewebe wurde nicht verwendet. Ein Spant konnte spaltlos eingepasst werden. Das Projektziel wurde damit erreicht. Gleichzeitig konnte die Qualität des Simulationstools als ausgesprochen gut bewertet werden; von wesentlicher Bedeutung stellte sich jedoch die Qualität der Eingangsparameter heraus, die es genau zu beschreiben galt.

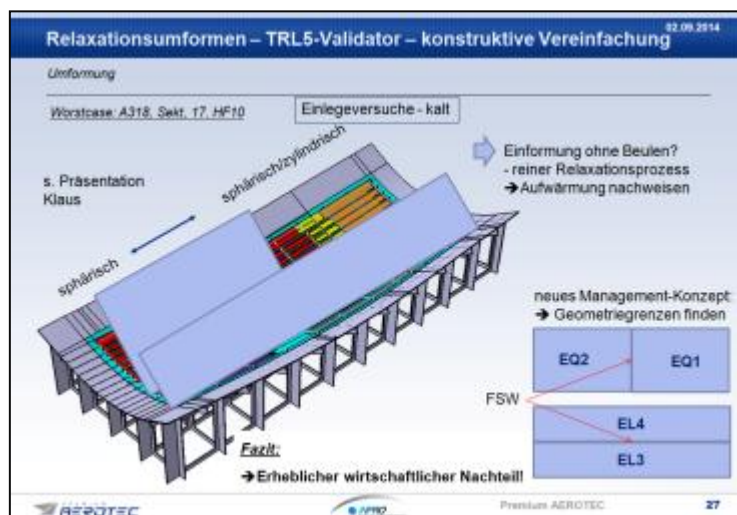


Abbildung 21: Strategie Bauteilverkleinerung und Kalteinformen

Zur besseren Charakterisierung des Umformgrads von Bauteilen wurde diverse Einlegeversuche von Belchen in die Vorrichtung bei Raumtemperatur durchgeführt.

Dazu werden die Hautfelder in die Vorrichtung eingelegt, um dann im Ofen relaxationsumgeformt zu werden (bisher: gemischtes ‚Relaxkriechen‘ mit stufenweiser Einformung als leistungsfähigere Sonderform des Relaxationsumformens). Es wurde ein Umformgrad definiert, der die Geometriekomplexität des Bauteils widerspiegelt; gleichzeitig galt es aber auch die Grenze für eine erfolgreiche Kalteinformung zu finden. Dazu wurden als erste die in Abbil-

dung 21 beschriebenen Bauteile bei Raumtemperatur in der Vorrichtung eingeformt, um zunächst die primären Geometrieinflussgrößen zu finden.

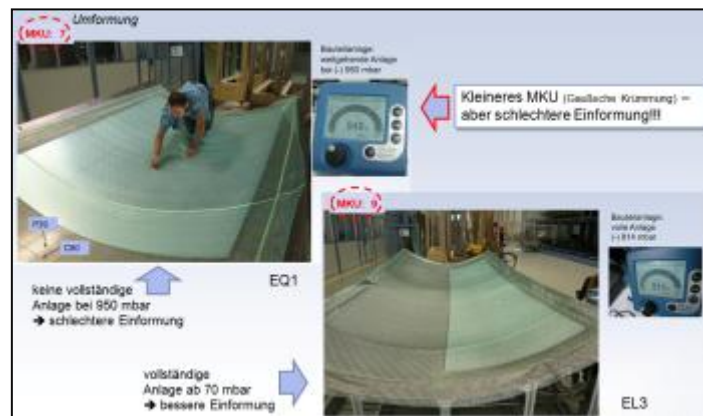


Abbildung 22: Relaxationsumformen – Einlegeversuche (kalt) > Geometrieinfluss

Es wurden diverse Einlegeversuche in der Hautfeld 10 Vorrichtung bei Raumtemperatur durchgeführt. Dabei wurden jeweils die Breite, Länge oder Dicke der Bleche variiert. Durch die Veränderung der Position des Bleches in der Vorrichtung konnte gleichzeitig die Auswirkung auf unterschiedliche Bauteilgeometrien untersucht werden. Zudem wurden Walzwelligkeiten betrachtet und die Ergebnisse empirisch fixiert.

Im Abschlussversuch A9E wurde überdies die Länge des Blechs so weit reduziert, bis es gerade nicht mehr (elastisch) beulte. Dieses unterkritische Blech wurde anschließend im Ofen bei 325°C relaxationsumgeformt. Dieses sehr wichtige Versuchsergebnis war positiv und validierte die bis dahin unbestätigte These: ‚was bei Raumtemperatur beulenfrei eingeformt werden kann, kann auch im Ofen umgeformt werden‘.

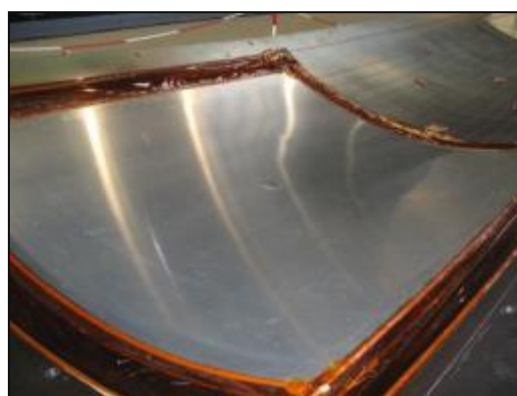


Abbildung 23: Erfolgreiche Umformung Hautfeldausschnitt A9E(H) im Ofen

Um die Kritikalitätsgrenze bei Hautfeldern ohne Stringer zu erhöhen, existiert die charakteristische Lösung eines Niederhalters. Dieser wurde bereits früh konzipiert [MATFEM/IUL13¹] und überdies Skalierungsmodelle für Kleinversuche erarbeitet [MATFEM/IUL13²].

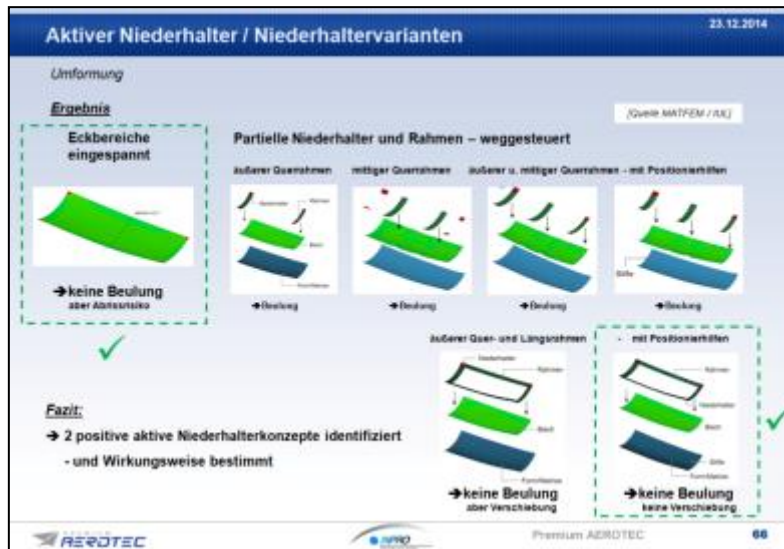


Abbildung 24: Identifiziertes Niederhalterkonzept

Das Konzept wurde nunmehr simulativ untersucht [MATFEM/IUL15³]. Mit dem unveränderten erfolgreichen Simulationsmodell zum Demonstrator F10 wurde die Umformung des Bauteils ohne Stringer nochmal unter Berücksichtigung einer Niederhalters simuliert. Der Niederhalter wurde dabei umlaufend mit 2mm Abstand zum Bauteil positioniert.

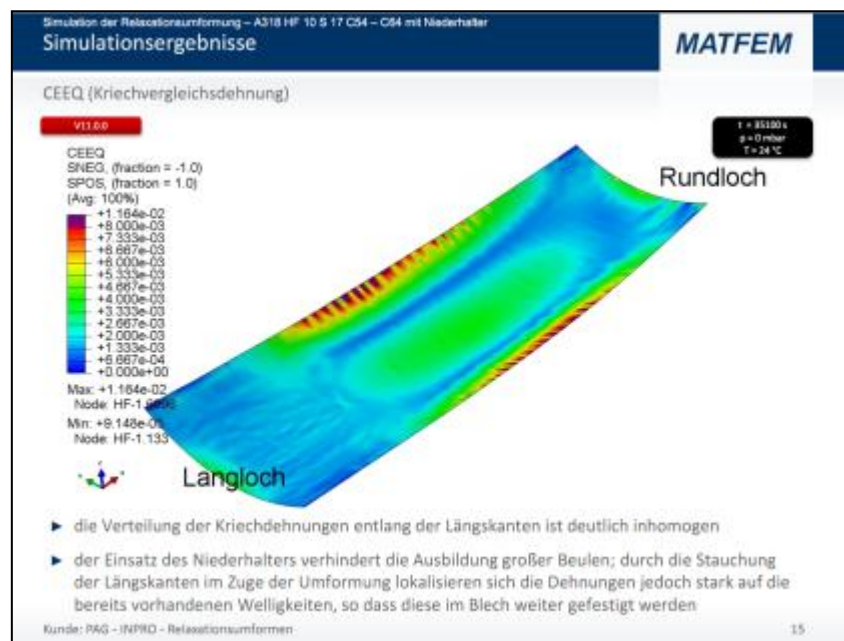


Abbildung 25: Erfolgreiche Simulation HF10 – mit Niederhalter

Das Simulationsergebnis war bedingt positiv zu bewerten, da zwar keine Beulen entstanden sind, jedoch sehr hohe Kräfte wirkten (rund 9 to) und die Imperfektionen sich zu Riffelungen verfestigen. Aus dieser Erkenntnis empfahl es sich, die Untersuchung mit minimalem Freigang oder mit einem kraftgesteuerten Niederhalters zu wiederholen, der allerdings bei unerwünschtem und zunehmendem Tiefzieheffekt einer Endkonturfertigung entgegenläuft – und keine reibungsbedingte Fixierung aufweisen sollte (s. Tooling 10.1).

APII 10.3 –Toleranzen

Während im APII 10.2 Umformung primär auf die Fragestellung bearbeitet wurde, ob eine Umformung ohne Beulung machbar ist, wurden im APII 10.3 Toleranzen die Umformgenauigkeiten untersucht. Dabei sind insbesondere die Toleranzen in x- und y-Richtung sowie in z-Richtung (Spring back) von Bedeutung.

Für die Konturerzeugung ist es prinzipiell möglich, das Bauteil mit Übermaß zu fertigen und dann das Übermaß nach der Umformung abzufräsen (Praxis beim Streckziehen). Im Rahmen dieser Untersuchung war es jedoch das Ziel, das Bauteil zweidimensional endgeometrienah zu fertigen und dann umzuformen. Das setzt jedoch eine Abwicklung vom definierten 3D-Soll in das 2D voraus – die sog. inverse Geometrie. Dabei wird der unbekannte Relaxationseinfluss als klein angenommen und zunächst vernachlässigt. Aus Gründen des Pragmatismus für den vorliegenden Anwendungsfall wurde die Abwicklung zunächst mit Hilfe von CATIA-V5 erstellt.

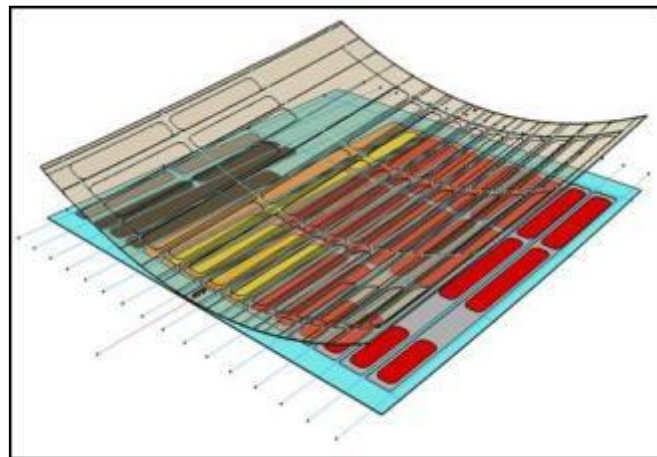


Abbildung 26: Abwicklung in die Ebene

Die Ausschnittsdemonstratoren A1 bis A4 wurden optisch mit Messmarken vermessen: die Messergebnisse [IWT13¹] - [IWT13⁴] dokumentierten, dass bei A3 und A4 keine Stringerverkippungen beim Relaxationsumformen auftraten. Die Messungen zeigten allerdings in die x- und y-Richtung nahezu identische sichelförmige Abweichungen vom CAD-Soll. In der Konsequenz wurde mit Hilfe der FEM ABAQUS von MATFEM das iPND-Verfahren entwickelt. Dabei wird die 2D-Bauteilgeometrie mit Hilfe des kaltelastischen Flachdrückens [AIRBUS/MATFEM13¹], ausgehend vom 3D-Soll, berechnet. Das kann alternativ auch durch einen am Markt erhältlichen CATIA-V5 kompatiblen und praktikablen Onestep-Solver von FTI erfolgen, wie eine Untersuchung [PAG13¹] zeigte – allerdings mit zusätzlichen Abweichungen (> 0,5 mm). Die Ausschnittsdemonstratoren 1-4 besitzen alle dasselbe Konturblech, unterscheiden sich jedoch durch Stringer und Taschen, weisen untereinander in der Kontur – bestätigt durch Zusatzmessungen – nur Unterschiede im mm-Bereich primär Längsrichtung auf. Es konnten keine lokale Verzerrungen der Kontur, Stringer oder Pocket festgestellt werden. Daraus ergibt sich, dass die Stringer und Pockets nur einen geringen Einfluss auf die inverse Geometrie des Bauteils haben aber diese bei der Abwicklung jedoch prinzipiell zu berücksichtigen sind – insbesondere bei Bauteilen, die Endkonturnah gefertigt werden.

Mit Hilfe des iPND-Verfahrens wurde der Ausschnittsdemonstrator A5 invers berechnet und gefertigt. Der Ausschnittsdemonstrator A5 besaß jedoch nur noch eine Restabweichung von 2 mm pro Seite [IWT14¹], bestätigt durch eine Streifenlichtprojektionsmessung von VEW; die Abweichung ist vermutlich primär entstanden durch eine einmalig beobachtete Material-schrumpfung. Damit galt die iPND-Methode als validiert.

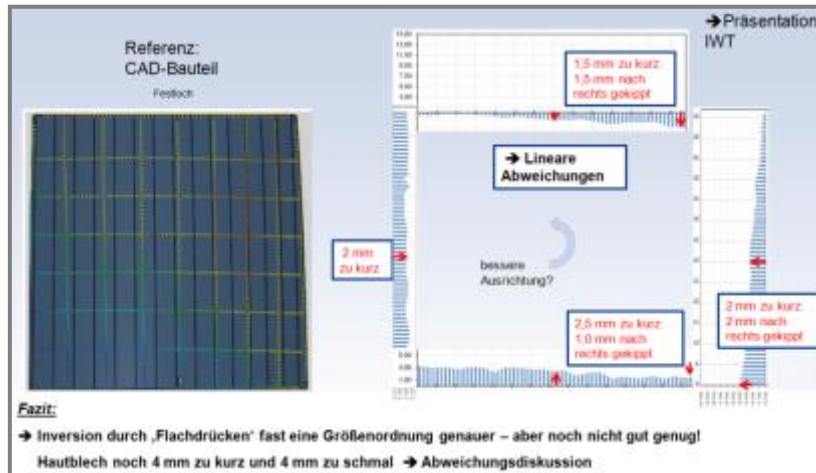


Abbildung 27: A5 Abweichung Außenkontur x,y – stark verbessert

Zusätzlich wurden noch Rückfederungs- und Reibeinflüsse als Ursache für Geometrieabweichungen in der Simulation untersucht [MATFEM14¹] u. [MATFEM14²], jedoch aufgrund des geringen Einflusses auf die Abweichung in x- und y-Richtung verworfen. Einer Weiteren durchgeführten Studie für Ausschnittsdemonstrator A7 [MATFEM14³] zur Folge, besitzt der vernachlässigte Relaxationsanteil 0,5 mm Ungenauigkeit; dieser könnte jedoch durch die genäherte Berücksichtigung des plastischen Umformanteils infolge der Umformtemperatur weiter reduziert werden.



Abbildung 28: A1 Rückfederung z

Die Rückfederung aller 5 Ausschnittsdemonstratoren war unabhängig von den Stringern und Taschen sehr ähnlich und betrug nach manueller Messung gegenüber der Vorrichtung zwi-

schen 1-2 mm, nach fotogrammetrischer Messung versus CAD 2,5 mm - und nach Simulation 2,5 mm. Nunmehr wurde das Fullscale-Hautfeld F10 mit Hilfe der iPND-Methode 2D invers geometrisch bestimmt. Das Hautfeld wurde nach diesen Daten umrissgefräst und die Stringer anschließend entsprechend inverser Programmierkurven laserstrahlgeschweißt; dabei konnten die eindimensional gefertigten Stringer zweidimensional (ohne Modifikation) von der Schweißanlage gefügt werden (gegenwärtig werden die Stringer für die Streckziehleche dreidimensional hergestellt).

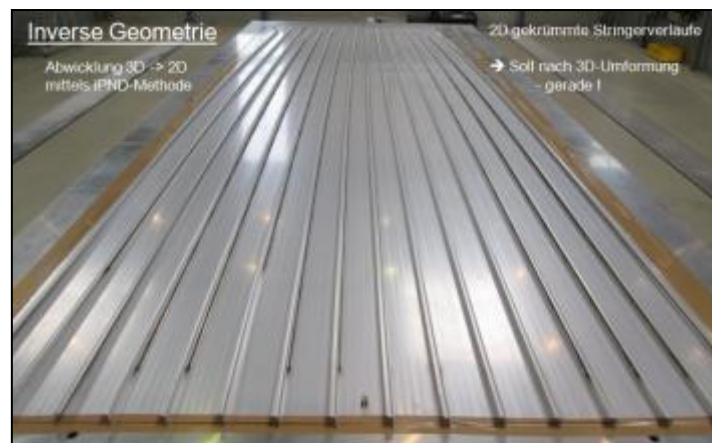


Abbildung 29: Fertigung des 2D-Hautfelds für Demonstrator F10 inkl. Stringer

Die Vermessung des erfolgreich umgeformten Demonstrators F10 erfolgte mittels Lasertracker [IWT/VEW]. Die Ergebnisse zeigen für die x- und y-Richtung eine ausgezeichnete Übereinstimmung.

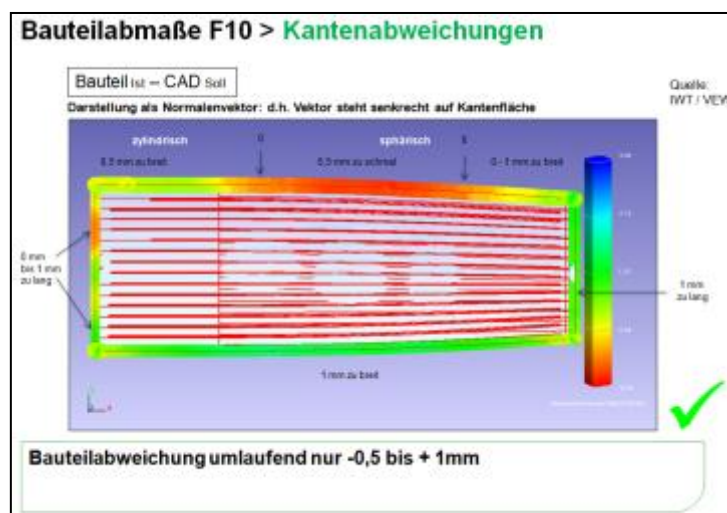


Abbildung 30: Konturabweichung Demonstrator F10

Die Abweichung ist trotz dreifacher Länge zum Ausschnittsdemonstrator A5 nur halb so groß. Die Messung des Bauteils in z-Richtung ergab eine Abweichung von 3 mm.

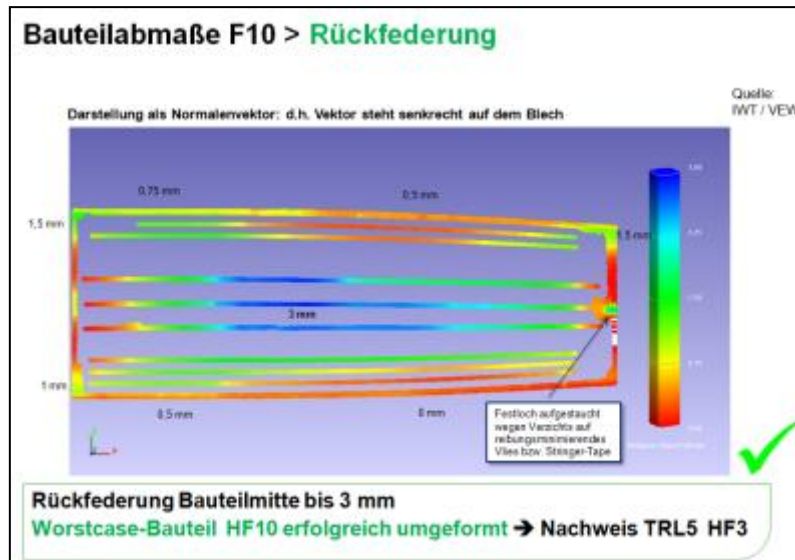


Abbildung 31: Rückfederung Demonstrator F10

Zur Bestimmung des maximalen Umformgrades wurde der primäre Krümmungseinfluss über das Produkt der Gaußschen Krümmungen in x- und y-Richtung (s. Tooling 10.1) als korrigierter MKU Faktor definiert.

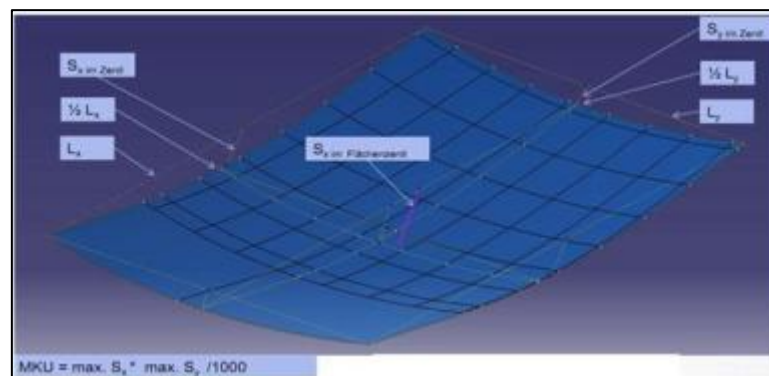


Abbildung 32: Definition Geometriefaktor MKU

Die bereits beschriebenen Versuchsreihen wurden mit 25 Blechen unterschiedlicher Länge, Breite und Dicke durchgeführt und gezielt die Umformgrenze bei Einlegeversuchen bei Raumtemperatur ermittelt. Die Kritikalitätsgrenze oberhalb derer das Blech beim Kalteinlegen beult, konnte in Bezug zur empirisch ermittelten Formel recht eindeutig bestimmt werden. Die Auswertungen zeigten eine wünschenswerte Herabsetzung der Kritikalitätsgrenze mit wachsender Blechdicke und deutlich schwächer dem Längen/Breiten-Verhältnis. Stark risikoe erhöhend zeigten sich die Walzimperfectionen mit 70% Kritikalitätserhöhung, die durch Pockets noch übertroffen werden dürften (A6b). Kleiner – aber nicht vernachlässigbar ist der Reibungseinfluss Alu/Stahl bis zu 20% und der der Randabdichtung mit 25%. Begünstigend erwiesen sich der Einsatz von Glasfaser(gleit)gewebe und Gesamtfolie zwischen Bauteil und Vorrichtung. Vor allem (partielle) dickere Niederhalterbleche verschoben die Beulgrenze auf 4,5 und im Worstcase-Versuch F10 mit den Niederhalter-Stringern und leistungsfähigerem Relaxkriechen sogar auf über 7,5. Anschließend wurde eine Excel-Versuchsdatei mit allen Versuchen, Daten und Formfaktor angelegt.

APII 10.4 – Industrieller Validator

Werden die Vor- und Nachgelagerten Prozesse zum Relaxationsumformen mit betrachtet, wird schnell ersichtlich, dass Bauteile mit Pockets und ohne Stringern lediglich bis zum Formfaktor 1 zweidimensional umgeformt werden können, was einen deutlichen Einfluss auf die Prozesskette ausübt. Um Kosten und Gewicht einzusparen, sollten Stringer – sofern geschweißt vorgesehen – zweidimensional vor dem Umformen aufgeschweißt werden (Pre-Relaxationsumformen), so wie es bei der Demonstratorenfertigung realisiert wurde. Die Pockets sollten aus Gründen der Gewichtseinsparung allerdings erst nach dem Schweißen eingebracht werden - entweder 2D (mit Kostenvorteil) oder 3D (mit Umformungsvorteil). Als stark determinierende weitere Randbedingung konnte festgestellt werden, dass fast jedes Bauteil einen funktionsbedingten Durchbruch mit hoher Genauigkeitsanforderung benötigt - und es galt mit Hilfe einer Umformsimulation die Frage zu beantworten, ob der Durchbruch bereits zweidimensional eingebracht werden könnte. Die Simulation des definierten Demonstrators A8 zeigt [MATFEM14⁶], dass der Fräsprozess nach der Umformung (Post-Relaxation) stattfinden sollte – der Gesamtfräsloop also 3D entsprechend Lösung 6.

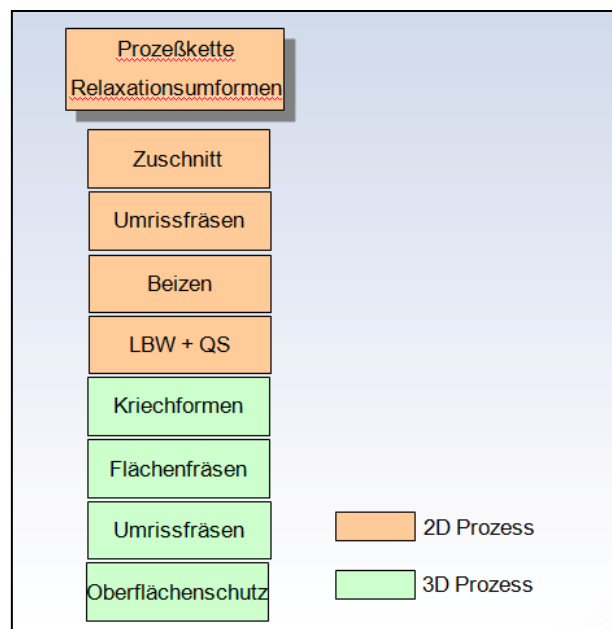


Abbildung 33: Prozesskette (Pre-/ Post Relaxationsumformen)

Als zusätzliche Untersuchung wurde das Relaxationsumformen bei einer vergleichsweise geringeren (185°C) Temperatur simuliert. Das Ergebnis [MATFEM14¹¹] zeigt eine 20-fach größere Rückfederung im Vergleich zu der Umformung bei 325°C. Die Reduktion der Temperatur ist daher keine Option.

Anhand des TRL-Fragenkatalogs wurde die Bewertung des Industrialisierungskonzept vorgenommen. Bereits während der Umformversuche konnte das ein großer Teil des „key equipment“ für das Relaxationsumformen definiert werden. Die Komponenten wie Ofen und Umformvorrichtung sind als wesentliches Equipment für den Fertigungsprozess zu benennen. Das erforderliches Equipment wie Vorrichtungen zum Bauteilhandling, Kran oder Vorformtool gehören zum erweiterten „key equipment“.

MR_4 Industrial Concept

Menu 3.10 Identification of suitable processes, development and FAI, modification needs with related FCIM level of investment

Assessment of production process related with tooling and equipment

Process	Process – Tooling/ Equipment
Mould positioning	Mould, crane
Sheet loading	Vacuum supported handling device
Vacuum bagging	/
Sheet pre forming	Pre forming jig , vacuum pump
Oven loading/ unloading	Crane
Oven cycle	Oven
Unload formed sheet	Vacuum supported handling device
Mould cleaning	Device for manual cleaning


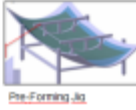





Abbildung 34: Auszug Industrialisierungskonzept

Zur Vorbereitung eines investitionsreifen Lastenhefts wurden entlang der Umformprozesskette die Prozesse detailliert und visualisiert. Der genaue Prozessablauf konnte in Zusammenarbeit mit dem Airbus Engineering, Materials& Processes und Design festgelegt und definiert werden. Dieses Prozess- und Anlagenkonzept dient als Vorlage für eine spätere Umsetzung und Investition in diesen Prozess. Im Rahmen der weiteren Entwicklung und Way Forward zum TRL6, ist dieses Lastenheft weiter zu spezifizieren und detaillieren.

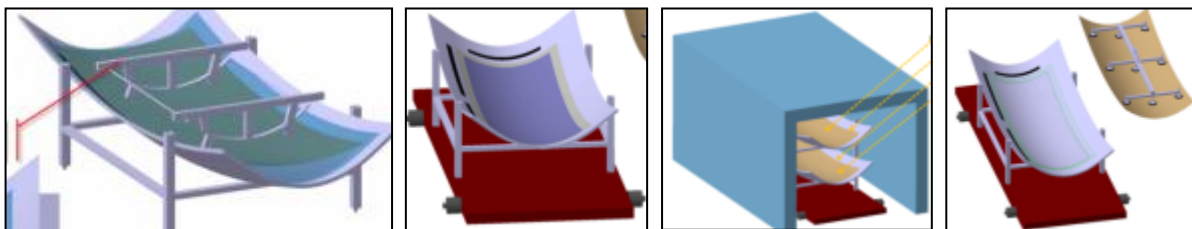


Abbildung 35: Prozessvisualisierung

Die Untersuchung des Design to Cost/ Design to Manufacture hat ergeben, das gemäß dem von Airbus vorgegebenem Perimeter: kein neues Design für die Bauteile zu erstellen, zunächst keine Designänderung anzunehmen ist. Dennoch können durch die Möglichkeit von Designanpassungen auch Kostenreduktionen in der Prozesskette erzielt werden. Dieses spiegelt sich insbesondere im Bereich Fräsoperationen, wie auch die Fertigung des Full-Scale Demonstrators Hautfeld 10 Sekt. 17 A318 gezeigt hat.

2.1.2 TAI 20 – Reibrührschweißen

APII 20.1 – Neue Werkstoffe

Im Rahmen des Projekts INPRO wurde der Prozess Friction Stir Welding, für Längsnähte an Flugzeugstrukturen, insbesondere FSW Nähte auf Schalenbebene untersucht. Zunächst galt es Prozessparameter zu ermitteln um, diese anschließend anhand von Demonstratoren zu

validieren. Zu Beginn wurden Proben geschweißt und hinsichtlich ihrer Eigenschaften charakterisiert.

Es wurden unterschiedliche Nahtgeometrien verglichen. Dazu wurden zum Einen Bleche betrachtet, bei denen nur die Blech Oberseite vor dem Schweißen mechanisch befräst wurde. Weiterhin wurden Nahtgeometrien betrachtet, bei denen zusätzlich auch die Blechunterseite befräst wurde. Da für den FSW Prozess hohe Genauigkeitsanforderungen an den Schweißnahtbereich gestellt werden, wurden im Folgenden Probenkörper betrachtet bei denen sowohl die Ober- und Unterseite befräst wurden. Zudem spielt die Parallelität und Planheit der Bauteilkante eine wichtige Rolle. Daher war auch die Bauteilstirnseite zu befräsen (weitere Details zur Nahtvorbereitung (Fräsprozess): siehe APII 20.2- Industrialisierung).

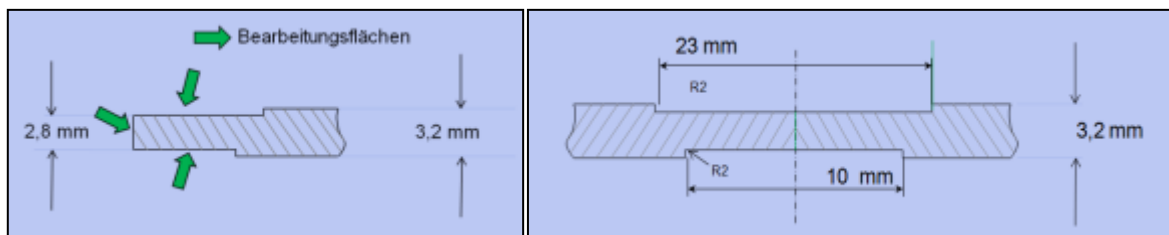


Abbildung 36: Darstellung der Nahtgeometrie

Durch die FSW Naht ergeben sich auch für die anschließende Montage von Einzelteilen einige Änderungen. Insbesondere im Nahtbereich ist die Geometrie der Clips neu zu definieren. Hierzu wurden unterschiedliche Geometrien bewertet. Für den FSW Demonstrator (siehe APII 20.4 – Industrieller Validator) wurde eine Clipgeometrie definiert, wie sie für den Demonstrator anwendbar ist.

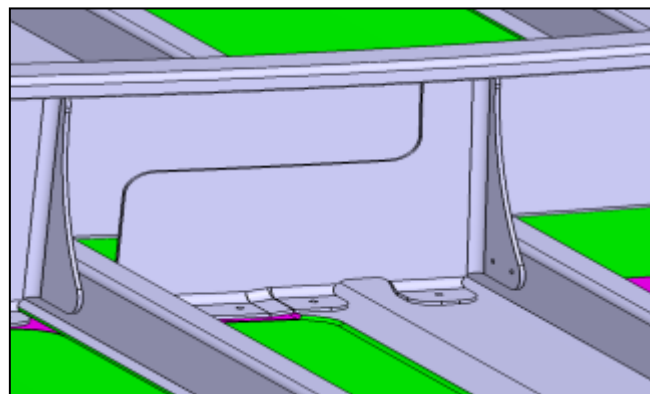


Abbildung 37: Darstellung Mouse-Hole Clip

Die Beschreibung der Entwicklung zum Qualitätssicherungssystem sowie zum lokalen Oberflächenschutz ist unter APII 20.2 – Industrialisierung dargestellt.

APII 20.2 – Industrialisierung

Fräsprozess

Für die Nutzung des FSW Prozesses im Flugzeugbau, speziell im Bereich der Schalenfertigung, ist es unerlässlich die Fügeflächen der zuverschweißenden Bauteile aufgrund der Einzelteiltoleranz und der Konturgenauigkeit im Vorfeld mechanisch zu bearbeiten. Aufgrund der bei einigen Legierungen vorkommenden Plattierschichten aus Reinalluminium, müssen diese ebenfalls vor dem Schweißprozess beseitigt werden. Diese Randbedingungen erfordern eine auf den Prozess abgestimmte Frässtrategie die im Folgenden erläutert wird.

1. Positionieren der Einzelteile auf die entsprechende Vorrichtung mittels Absteckstifte
2. Erzeugung des Vakuums
3. Positionieren der Vorrichtung auf der Schweißanlage
4. Die beiden Vorrichtungen die sich innerhalb eines Systems quer zur Schweißnaht zueinander -bzw. voneinander weg -verschieben lassen, werden auf Abstand zueinander gebracht, so dass eine Bearbeitung der zu verschweißenden Fügekannte erfolgen kann.
5. Fräsen der Fügeflächen inkl. Beseitigung der Plattierschicht
6. Nach dem Reinigen der Flächen (Beseitigung der Späne) werden die Bauteile mittels der beweglichen Vorrichtungsteile, spaltlos zueinander positioniert.

Um die Flächen mit genauer Toleranz und kostengünstig herstellen zu können, wurde im Rahmen des Projektes ein sogenannter Dreiseitenfräser gemeinsam mit der Firma Walter entwickelt. Die bisher durchgeführten Fräsversuche sind vielversprechend und haben gute Ergebnisse gezeigt. Dadurch, dass beim Einsatz des Dreiseiten-Fräasers drei Bauteilkanten parallel in Bearbeitung sind, stellt die Verwendung dieses Fräasers insbesondere ein Verbesserung der Prozesszeit dar.



Abbildung 38: Dreiseiten- Fräser

Lokaler Oberflächenschutz

Wie im Vorfeld beschrieben, wird bei der Nahtvorbereitung die Bauteilkante mechanisch befräst. Anschließend an das FSW Schweißen ist nur in diesem Bereich der Oberflächenschutz aufzubringen. Im Rahmen des ECO Verbundes wurde von dem Verbundpartner Airbus Group Innovation ein badunabhängigen Oberflächenschutzprozess entwickelt. Im Gegensatz zum derzeitigen Anodisationsprozess bei dem das gesamte Bauteil in einem

Anodisationsbad behandelt wird, kann der neue Prozess lokal, auf der FSW Naht eingesetzt werden. Dieser Anodisationsprozess bildet die Basis für den anschließenden Oberflächenschutz.

Bei Airbus Group Innovation wurden verschiedene Verfahren für den lokalen Oberflächenschutz untersucht. Der Schwerpunkt der Arbeit innerhalb von INPRO wurde auf die Bewertung dieser Verfahren hinsichtlich Industrialisierbarkeit gelegt.

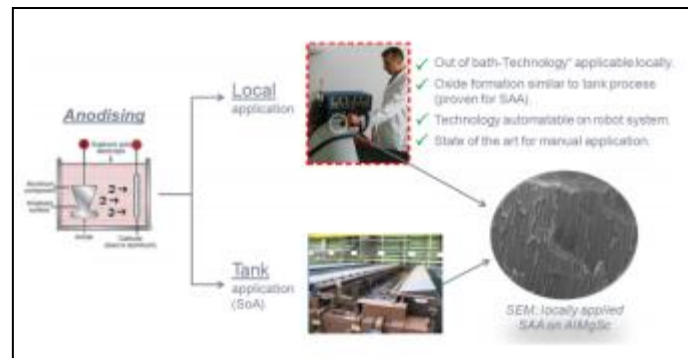


Abbildung 39: Darstellung lokaler Oberflächenschutz

Qualitätssicherungskonzept

Im Rahmen der Bewertung der FSW Prozess Industrialisierung ist es erforderlich ein industrietaugliches Qualitätssicherungskonzept darzustellen. QS-Aufwendungen sind oftmals ein sehr hoher Kostenfaktor, so dass schon zu Beginn der Untersuchung neuer Fertigungsverfahren, ein Konzept entwickelt werden muss, das sowohl alle notwendigen Qualitätskriterien berücksichtigt als auch wenig zeitintensiv ist.

Das im Rahmen diese Projektes weiterentwickelte Konzept basiert auf der Auswertung, überwiegend automatisiert abrufbarer Onlineparameter und einer Sichtprüfung. Nach entsprechendem dauerhaften Qualitätsnachweis der Schweißqualität erfolgen die Offlineprüfungen nur noch im Ausnahmefall wenn einer der abgerufenen Parameter außerhalb der zulässigen Toleranzen ist.

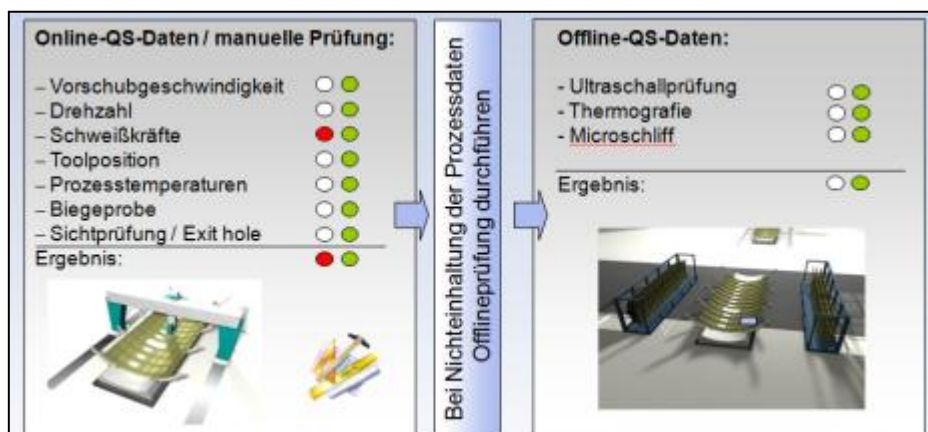


Abbildung 40: Online/ Offline QS

Schweißvorrichtung/ Werkzeugkonzepte

Die Vorrichtung, die für den FSW Prozess erforderlich ist, ist im allgemeinen eine starre Vorrichtung die entsprechend des Prozesses, große Druck –und Querkräfte aufnehmen muss. Der Nachteil dieser stabilen Vorrichtung ist, dass sie sehr unflexibel ist. Bei Hautfeldern die eine sphärische Kontur aufweisen, würde für jede Schale, eine eigene Vorrichtung benötigt werden. Um Beschaffungs-, -Lager –und Logistikkosten einzusparen, wurde gemeinsam mit der Firma Brötje ein Vorrichtungskonzept entwickelt, welches auf der Saugertechnologie basiert. Hierbei wird die zur Aufnahme der Hautfelder erforderliche Kontur durch flexibel, in der Höhe einstellbarer, Zylinder erzeugt. Das obere Ende der Zylinder ist mit einem Vakuumfeld versehen und dient sowohl der Konturgebung als auch der Befestigung und somit zur Aufnahme der entstehenden Querkräfte. Durch die von PAG entwickelten Heftnähte werden die Querkräfte die auf die Sauger wirken erheblich reduziert.

Die senkrechten Prozesskräfte werden wie bei der starren Form über das sogenannte Backing aufgenommen.

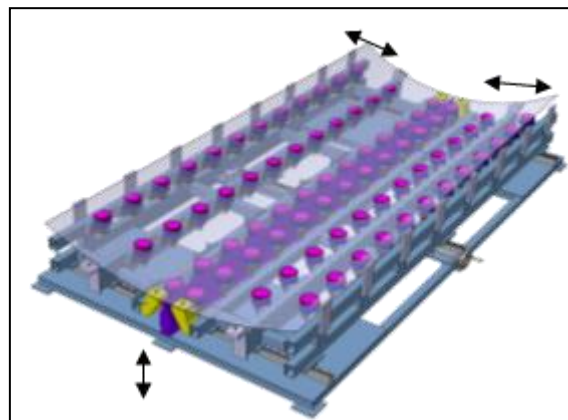


Abbildung 41: Darstellung flexibles Werkzeug zur Bauteilfixierung

Die Vorrichtung besteht aus zwei Teilen die jeweils ein Hautfeld konturgetreu aufnehmen kann. Durch die Erzeugung eines Vakuums an den Saugern werden die Hautfelder während der Kantenbearbeitung und während des Schweißens in Soll-Lage gehalten. Zur Realisierung der Kantenbearbeitung, kann die Vorrichtung quer zur Längsachse auseinander gefahren werden, das Backing kann nach unten gefahren werden. Mittels der dargestellten Heftnaht, siehe Abbildung 42, werden die entstehenden Querkräfte aufgefangen.



Abbildung 42: Darstellung FSW Heftnaht

Die unterschiedlichen Konzepte und Schweißstrategien zur Nahtvorbereitung, Nahtgeometrien und Werkzeugen wurden anhand von diversen FSW Coupons getestet und anschließend einer Qualitätssicherung unterzogen. Die Ultraschallauswertungen wurden in vielen Fällen bei Airbus in Bremen durchgeführt. Schliffbilder, Zugversuche und Biegeproben wurden beim Helmholtz - Zentrum in Geesthacht aufgebaut und ausgewertet.

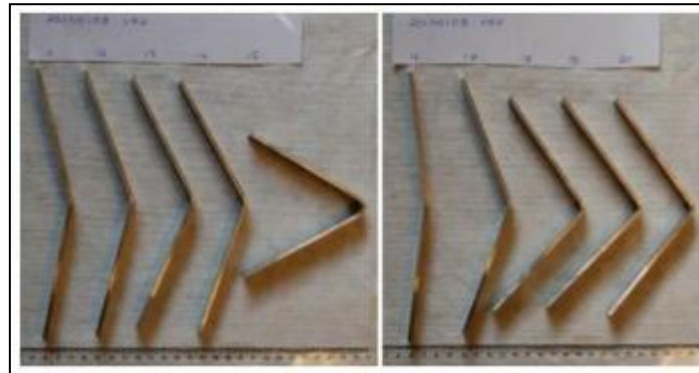


Abbildung 43: Biegeproben KO8542

APII 20.3 – Automatisierung

Im Rahmen des Projekts INPRO erfolgte die Aufnahme von Schweißversuchen an der FSW Schweißanlage bei Premium AEROTEC GmbH in Nordenham. In Zusammenarbeit mit Airbus wurden zu Beginn diverse Anlagen- und Programmieroptimierungen vorgenommen. Anhand verschiedener Coupons und Demonstratoren wurde die Anlagentechnik validiert und eine Prozessabfolge definiert. Dabei wurden auch die dem FSW vor- und nachgelagerten Prozesse wie Bauteilfixierung, Nahtkantenvorbereitung, NDT und Applikation lokaler Oberflächenschutz berücksichtigt. Anschließend wurden verschiedene Prozesskettenvarianten vom Einzelteil bis hin zur montierten Schale aufgebaut.



Abbildung 44: Prozessablauf eines FSW geschweißten Bauteils

Dabei wird der FSW Prozess primär dazu eingesetzt, zwei Hautfelder miteinander zu verbinden, so dass die derzeit aufwendig genietete Längsnaht mit einer gewichtsoptimierten Technologie hergestellt wird. Abhängig von der Herstellungsart bzw. von der Konfiguration der zu

verbindenden Hautfelder wird es geringfügige Unterschiede in der Prozesskette geben. Als Beispiel für einen Prozessablauf wurde hier eine Schale gewählt, die zum Einen ein Hautfeld mit laserstrahlgeschweißten Stringern und zum Anderen ein Hautfeld mit genieteten Stringern enthält.

AII 20.4 – Industrieller Validator

Im Rahmen des Projektes wurden zur Validierung verschiedene Demonstratoren geschweißt, jeder der Demonstratoren galt der Validierung eines bestimmten Teilprozesses.

Demonstrator 1:

Der Demonstrator aus dem Material 6013 basiert auf der zylindrischen Geometrie der Sektion 14 des A330. Zunächst wurden zweimal zwei Bleche mit einer Quernaht verbunden, die beiden entstandenen Bleche wurden im Anschluss mit einer Längsnaht verbunden. Ziel dieses Demonstrator war es, die 3D Fähigkeit in einer industriellen Umgebung darzustellen, dieses konnte eindrucksvoll mit der realisierten Quer- und Längsnaht erfolgen.

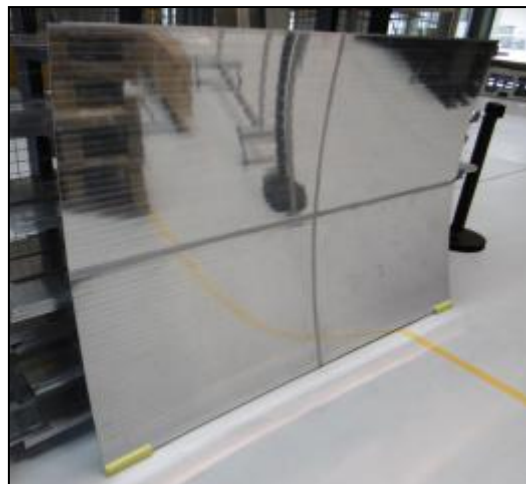


Abbildung 45: **Demonstrator 1 ca. 2000mm x 1200mm**

Demonstrator 2:

Der Demonstrator 2 aus der Legierung 6013 und der Geometrie der Sektion 17 des sphärischen Bereichs der A318 besteht aus 2 Beplankungsblechen. Zum einen aus einem Teil des Hautblechs 10 mit einer Blechstärke von 4,4mm und zum anderen aus einem Teil des Hautblechs 13 mit einer Blechstärke von 6mm. Beide Hautfelder sind mit Stringern und Clips ausgerüstet. Das im Flugzeugbau gängige Montagekonzept sieht vor, dass die konturgebenden Spante zum Hautfeld über die Auffädelbohrungen im Clip aufgenommen werden. Üblich ist es, dass ein Spant über zwei Bleche reicht und somit über die Clips beider Hautfelder aufgenommen werden muss. Dieses bedeutet, dass die Hautfelder bzw. die D – Bohrungen beider Hautfelder die Genauigkeit von $\pm 0,2$ mm zueinander haben müssen. Ziel des Demonstrators war es, anhand der Montage des Spants die FSW Schweißgenauigkeit nachzu-

weisen. Die Abbildung 46 zeigt die Konstruktion der zwei Hautfelder, die mittels FSW verbunden werden.

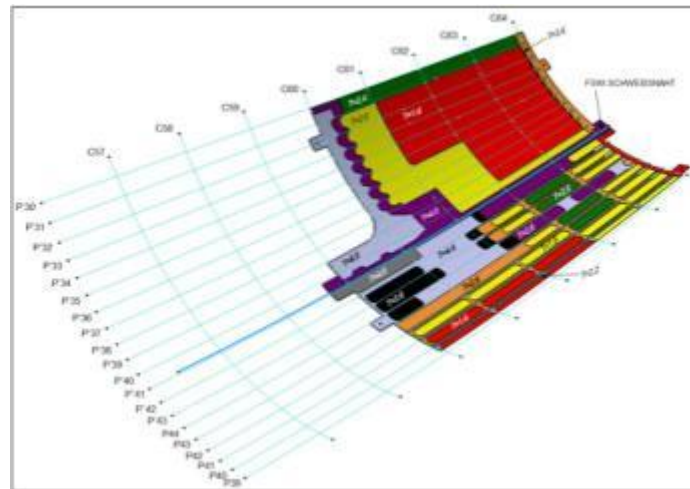


Abbildung 46: Beplanktes Hautfeld mit jeweiliger Blechstärke

Die Abbildung 47 zeigt die beiden einzelnen Hautfeldelemente, die jeweils streckgezogen wurden. Anschließend wurden auf dem Hautfeld 10 die Stringer LBW geschweißt. Auf dem Hautfeld 13 wurden die Stringer genietet. Weiterhin wurden Clips auf den Hautfeldern montiert. Aufgrund von Verzögerungen durch den Ausfall der FSW Anlage konnten die beiden Hautfelder nicht mehr innerhalb der INPRO Projektlaufzeit verschweißt werden. Sobald der Betrieb an der FSW Anlage wieder aufgenommen werden kann, erfolgt das Fertigstellen des Demonstrators.



Abbildung 47: Fertigstellung der zwei Hautfeldsegmente

Demonstrator 3

Wie im Änderungsantrag beschrieben wurde, konnte der Demonstrator 3 nicht mehr gefertigt werden. Dies ist auch die geänderte Vorgehensweise hinsichtlich der Flexiblen Vorrichtung zurückzuführen.

Demonstrator 4:

Der Demonstrator 4 aus AlMgSc weist die Geometrie der Sektion 17 im sphärischen Bereich des A318 auf. Die Ausgangskonstruktion hierbei ist konturgleich mit dem Demonstrator A5 (aus dem Projekt INPRO Relaxationsumformen). Die P- und C-Linien allerdings ohne Kompensationsfaktor ergeben sich aus der Simulation des Relaxationsumformverfahrens der Firma MATFEM von dem Demonstrator A7 (aus dem Projekt INPRO Relaxationsumformen). Insgesamt besteht der Demonstrator aus 2 ebenen Beplankungsblechen der Blechstärke 4,6 mm und Schweißstringern die mittels des Laserstrahlschweißens aufgebracht wurden. Nach dem Relaxationsumformverfahren wurde die Schale mit Integralspanten (aus dem Premium AEROTEC GmbH Projekt INNOFLEX) ausgerüstet.

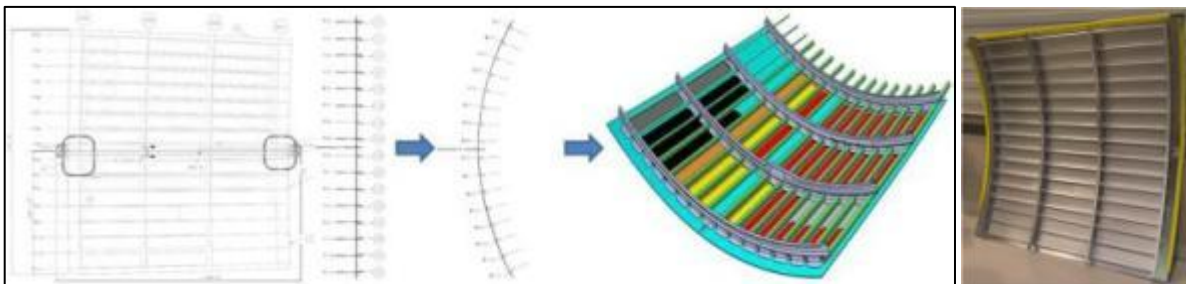


Abbildung 48: AlMgSc Blech mit FSW Naht, LBW geschweißte Stringer und Integralspanten

Die Untersuchung der Design-to-Cost Aspekte hat ergeben, dass die wesentlichen Vorteile des FSW im Bereich der Reduzierung des Bauteilgewichts liegen. Da eine hohe Anforderung an die Genauigkeit der Bauteile gestellt sowie nur kleine Defekte zugelassen werden dürfen, können auch beim FSW Prozess nur geringe Toleranzen akzeptiert werden. Genau deshalb sind aber kostenintensive Maßnahmen, wie z. B. positionsgenaue Rüsttools und ein stabiler Prozess unerlässlich um den Genauigkeitsanforderungen zu genügen.

2.1.3 TAlI 30 – Fibre Metal Laminate

AP II-30.1: Ablegeprozess

Automatisiertes Ablegen von Glasfaser-Prepreg

Als Basis der Entwicklungen eines automatisierten Ablegeprozesses für Glasfaser-Prepreg wurde der bestehende Endeffektor zum Ablegen des Glasfaser-Prepreg genutzt, der im vorangegangenen Forschungsprojekt intensiv entwickelt worden ist. Hierzu wurden die Beschaffenheit des bestehenden Endeffektors analysiert und die Möglichkeiten einer Funktionserweiterung hinsichtlich Ablege- und Automatisierungspotential und realer Bauteilverhältnisse betrachtet. Daher wurden in Vortests die Funktionsfähigkeit getestet und das Potential zur Erhöhung des Automatisierungsniveaus erarbeitet. Zudem wurde untersucht, in wie weit eine Vergrößerung der Ablegebreite eine Optimierung der Ablegeleistung eines solchen Ablegekopfes erhöhen kann.

Folglich wurden folgende Herausforderungen angenommen, um Glasfaser-Prepreg automatisiert laminieren zu können. Dazu wurde der bestehende Endeffektor für Prepregbreiten von 230 mm für eine höhere Effizienz auf 460 mm skaliert. Zudem sollten auch die stärksten

Krümmungen eines Single Aisle-Hautfeldes abgebildet werden können. Folglich musste ein individuell einstellbares Drapiersystem entwickelt und umgesetzt werden.

Zudem musste das Ablegen in beliebigen Breiten zwischen 100mm und 460mm und Formen von gerade bis krümmungsbedingten parallelförmigen Geometrien ermöglicht werden. Hierzu wurden entsprechende automatisiert gesteuerte Schneideinheiten am Endeffektor appliziert. Als weitere Forderung sollte die Ablage in beliebiger Richtung und Lage innerhalb der Vorrichtung erfüllt werden. Die entsprechenden Konzepte und Entwicklungen sind im Überblick in Abbildung 49 dargestellt.

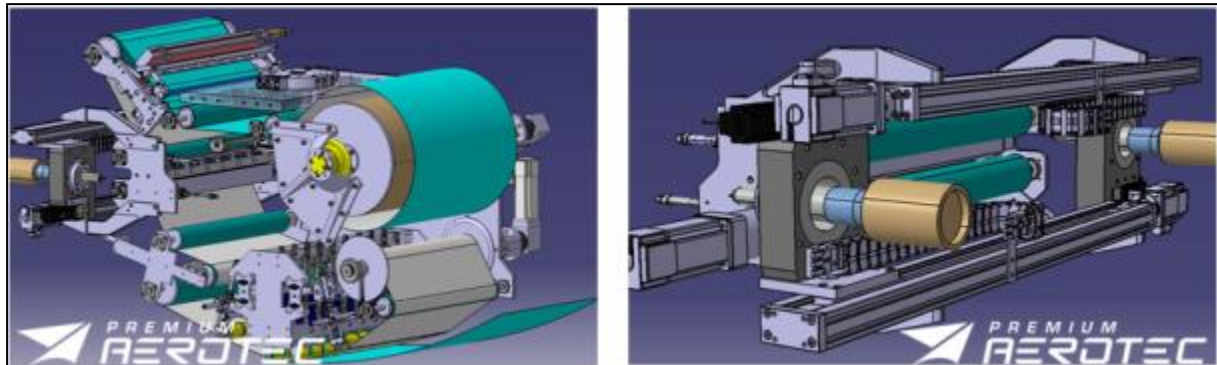


Abbildung 49: Überblick vom entwickelten Endeffektor zum automatisierten Ablegen von Glasfaser-Prepreg

Entsprechend wurden zur Umsetzung des Endeffektors einige Neuerungen und Entwicklungen im neuen Ablegekopf implementiert. Hierzu gehörte die Neukonstruktion eines Ablegekopfes mit den Funktionen des bestehenden, modularer Aufbau für einfachen Austausch der Komponenten mit der Möglichkeit fortwährenden Modifikationen. Zudem wurde ein Ionisierungssystem zur definierten Tack-Einstellung eingesetzt. Dies verhilft besonders bei unterschiedlichen Klebeeigenschaften des Glasfaser-Prepregs zu möglichst gleichbleibenden Ablegebedingungen im automatisierten Ablegeprozess.

Für den Rand- und Längsbeschnitt wurden zwei unabhängig voneinander einstellbare ultraschallangeregte Klingen am Ablegekopf angebracht. Sie können die geforderten Geometrien an den Ablegebahnen erzeugen, um die einfach und doppelt gekrümmten Bahnen ablegen zu können. Die erreichbare Genauigkeit beim Schneiden spielt dabei eine bedeutende Rolle. Da während des Ablegeprozesses diverse Prepreg Bahnen nebeneinander abgelegt werden, muss neben der Roboterpositioniergenauigkeit auch auf die Schneidgenauigkeit geachtet werden. Die Prepreg Bahnen dürfen sich nur wenige Zehntelmillimeter überlappen. Hinsichtlich der komplexen Geometrien bedarf es zudem einer flexiblen Drapiereinheit, die eine Ablage von Radien bis zu $R=1600$ mm ermöglichen können. Dies sind die max. Radien im Zielanwendungsgebietes der A320-Familie. Anhand der Demonstratoren wurde das Toleranzkonzept validiert.

Zur Erhöhung der Ablagequantität musste zudem die Ablagegeschwindigkeit erhöht werden. Dies erfolgt bei einem automatisierten Prozess durch die Verbindung von Hardware und Software. In den Versuchen konnte eine Ablagegeschwindigkeit von bis zu 6 m/s nachgewiesen werden. In Abbildung 50 wird der zusammengebaute Endeffektor (links) beim Ablegeprozess (rechts) gezeigt.



Abbildung 50: Der Endeffektor nach dem Zusammenbau (links) und beim Ablageprozess (rechts)

Im Rahmen des Projektes sind eine große Zahl von Versuchen mit dem Ablegekopf durchgeführt worden. Hierbei sind Ablegeversuche hinsichtlich der Ablegegenauigkeit und –geschwindigkeit durchgeführt worden. Zudem sind verschiedene Versuche auch mit den Schneideeinheiten und der Drapiereinheiten gemacht worden. Letztlich zeigt sich der Endeffektor als idealer Ablegekopf zum Ablegen von Prepreg für GLARE-Bauteile.

AP II-30.2: Folien

Automatisiertes Dünnblechhandling

Im Rahmen der Entwicklung eines automatisierten Dünnblechhandlingendeffektors (Folien) sind zunächst der vorhandene Prozess der FML-Fertigung analysiert und auf ihr Automatisierungspotential hin betrachtet worden. Dabei wurde der Schwerpunkt zunächst auf nicht FSW geschweißte Al-Dünnbleche gelegt. In verschiedenen Vortests wurden Handhabungskomponenten auf ihre Einsetzbarkeit überprüft und in Automatisierungskonzepten eingearbeitet. Die Konzepte mit dem höchsten Potential wurden dann in Vordemonstratoren realisiert und getestet. Unter anderem erfolgten Test der Endeffektoren, wie sie in Abbildung 51 dargestellt sind.

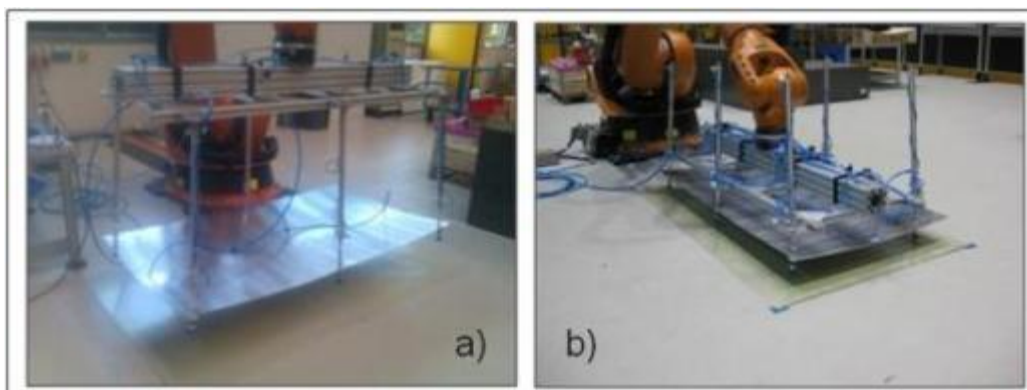


Abbildung 51: Verschiedene Testendeffektor in den Versionen a) und b).

Mit den Ergebnissen aus diesen Erprobungen wurden weitere detailliertere Konzepte erarbeitet. Ziel dieser Konzepte war es, einen Endeffektor zu entwickeln, der sowohl Dünnbleche

in eine zylindrische Laminier-Klebe-Vorrichtung (LKV) als auch in eine sphärisch-gekrümmte LKV ablegen kann. Die Flexibilität des Endeffektors nimmt einen hohen Stellenwert ein, da nahezu jedes Dünnsblech eine andere Zielposition aufweist und somit einen variierenden Krümmungszustand zur Folge hat. Die ausgewählte Geometrien bestehen aus einer zylindrischen Geometrie des A380 und aus sphärischen Teilen des A320.

Die Umsetzung des Konzeptes ist in Abbildung 52 dargestellt. Dieses Konzept besteht u.a. aus Unterdruckgreifelementen, welche die Dünnsbleche ansaugen und von der Bereitstellung der Bleche anheben, und aus verschiedenen Linearaktoren, welche die Krümmung auf die die gewünschte Zielgeometrie (zylindrische oder sphärische Krümmung) einstellen.



Abbildung 52: Dünnsblechhandler (Endeffektor) mit der Abmessung 2m x 1m.

Erste Tests (vgl. Abbildung 53) haben gezeigt, dass die Ablegegenauigkeit des Handlingsystems bei ca. ± 1 mm beträgt und somit die Ablegegenauigkeit der Dünnsbleche von ± 2 mm in zylindrischen bzw. ± 3 mm in sphärischen Bereichen der LKV einhält.

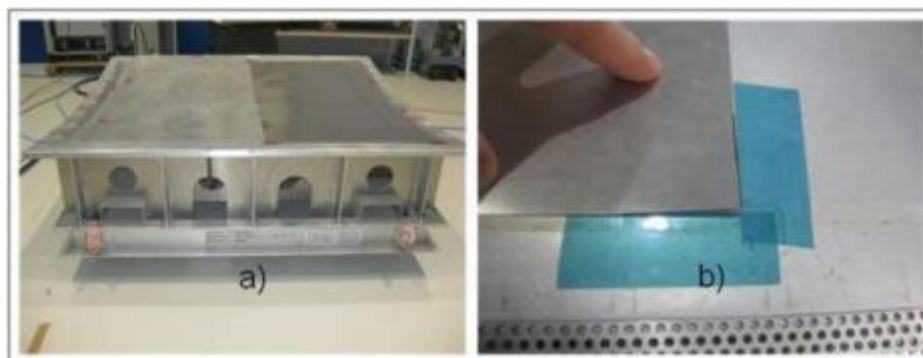


Abbildung 53: Ablegeversuche in eine zylindrische 2x2 LKV (a) und Ablegegenauigkeit der Bleche (b).

Die Programmierung des Endeffektors, des Roboters und der Steuerung bzw. des Gesamtprozesses wurde daraufhin weiter verfeinert, um eine automatisierte Handhabung der Bleche zu ermöglichen und einen ganzen Vordemonstrator (vgl. AP II 30.3) aufzubauen. Hierzu wurden die CAD Daten der Bauteile (Dünnsbleche) analysiert und ihre Sollposition im FML-Aufbau festgelegt. Diese Positionskordinaten werden an das Robotersystem übermittelt, um

dort von der Steuerung verarbeitet zu werden und den automatisierten Prozess ablaufen zu lassen.

Mit der entwickelten Steuerung und dem Handhabungssystem ist es möglich, alle ausgewählten Dünobleche des FML-Aufbaus vollständig automatisiert mit einer Genauigkeit von ca. ± 1 mm abzulegen. Auch das Handling von FSW geschweißten Blechen wurde untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass die leicht erhöhte Welligkeit von geschweißten Blechen nur einen kleinen Einfluss auf das Handling der Bleche hat. Im weiteren Vorgehen galt es, die Kooperation der beiden Handhabungssysteme (Prepreg Ablegen und Dünoblechhandling) zu ermöglichen um eine möglichst gute Interaktion beim Herstellen des Demonstrators zwischen den beiden Endeffektoren zu realisieren (vgl. AP II-30.3).

Oberflächenschutz von FSW Nähten an Al Dünoblechen

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden Aluminium Dünobleche, hinsichtlich einer Materialänderung von AA2024 zu AA5028 (AlMgSc Legierung) unter der Einbindung der neuen Technologie des FSW Schweißens, genauer untersucht. Der Vorteil des FSW Schweißens von Al Dünoblechen für GLARE Lamine besteht darin, dass dadurch die Anzahl der Splice reduziert werden kann. Insbesondere im zylindrischen Bereich des Bauteils konnte durch geschweißte Al-Dünobleche eine erhebliche Reduktion der Splice gezeigt werden. Dies ermöglicht eine weitere Gewichtsreduktion des Bauteils.

Der Fokus der Arbeiten lag auf der generellen Eignung für eine Anwendung im GLARE-Verbund im Hinblick auf die erforderliche Oberflächenvorbehandlung (PSA: Phosphor-Schwefelsäure-Anodisieren). Dazu wurden Oberflächenuntersuchungen an FSW geschweißten AlMgSc und AA2024 Dünoblechen sowie am ungetriebenen (keine FSW Naht) AlMgSc Material durchgeführt. Für diese Untersuchungen wurden jeweils Bleche (0,4 mm) beider Aluminium Legierungen mit verschiedenen Parametern verschweißt. Die Schweißparameter haben einen Einfluss auf die Ausprägung der FSW Naht z.B. Flash. Das FSW Schweißen der Proben wurden vom Verbundpartner DLR durchgeführt, das Aufbringen der PSA Schicht erfolgte mit dem Serienprozess bei Premium AEROTEC GmbH in Nordenham. Die Schlift- und REM-Untersuchungen an den PSA anodisierten Blechen sind am Fraunhofer IFAM in Bremen durchgeführt worden. In Tabelle 1 sind die Bezeichnungen der Proben aufgeführt.

Material	Bezeichnung Testblech	FSW Naht Ausprägung	Proben bezeichnung
AlMgSc 0,4 mm	BL1055fsw	Flash	1055 A-A
	BL1061fsw	Senkung ohne Flash	1061 A-A
	BL1063fsw	gut	1063 A-A
	BL1055	-	1055 B-B
AA2024 0,4 mm	BL1105.17	Flash	1105 A-A
	BL1112.17	gut	1112 A-A
	BL1109.17	Raue Nahtunterseite	1109 A-A

Tabelle 1: Übersicht der Proben für Oberflächenuntersuchungen

Die folgenden Abbildungen zeigen die unterschiedlichen Ausprägungen der FSW Nähte (siehe Tabelle 1).

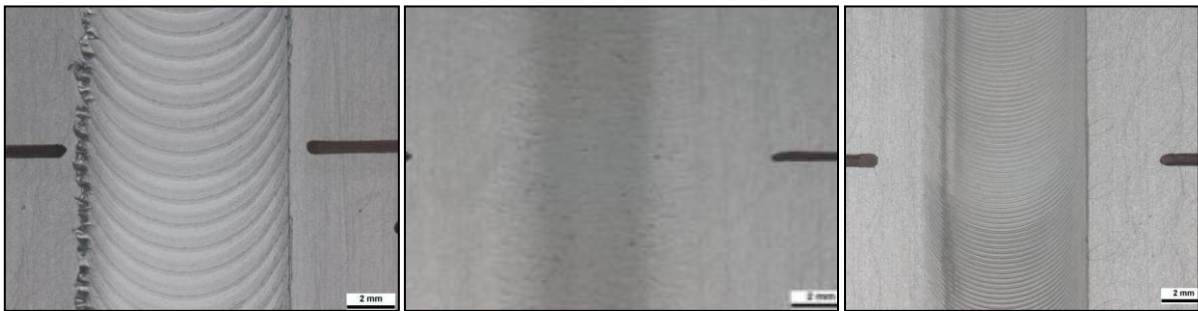


Abbildung 54: Nahtausprägungen: Flash (links), raue Nahtunterseite (mitte), gut (rechts)

Bei allen Proben wurde die Oberflächen- und die Bruchmorphologie der PSA Schicht (an Schnitt A-A bzw. B-B) mittels REM untersucht und die Schichtdicke der Oxidschicht ermittelt. In Abbildung 55 ist als Beispiel die Probe 1109 A-A und die Probenpositionen dargestellt.



Abbildung 55: Probe 1109 A-A nach PSA und Darstellung der Probenpositionen

Die Untersuchungen zeigen auf der FSW Naht und an dem Grundmaterial eine geschlossene PSA Schicht mit einer guten Anbindung der Anodierschicht ans Material. Schichtdickenmessungen zeigen eine relativ große Schichtdicke zwischen 4,5-5,5 μm bei AlMgSc im Gegensatz zu 1,3-2,4 μm bei AA2024. Alle Proben wurden innerhalb der gleichen Charge anodisiert. In Abbildung 56 sind repräsentative Ausprägungen der PSA Schicht von den untersuchten AlMgSc und AA2024 Proben dargestellt.

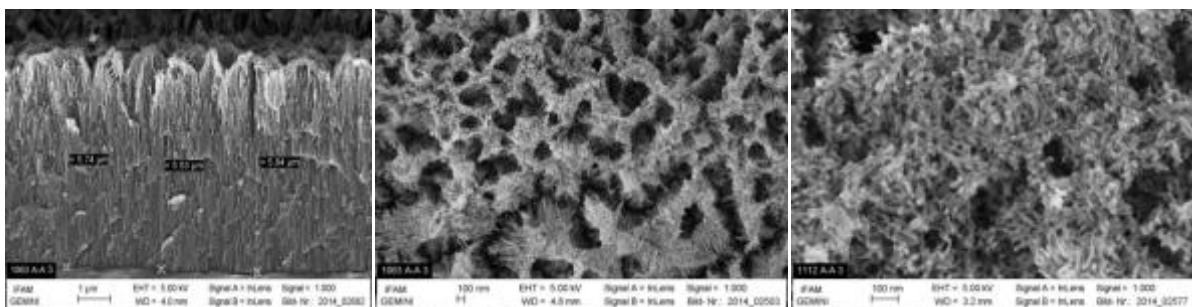


Abbildung 56: Bruch- und Oberflächenmorphologie: AlMgSc (links, mitte), AA2024 (rechts)

Bei AlMgSc zeigt die Oberflächenmorphologie eine übergeordnete Struktur und ein ‚Stäbchenwachstum‘ sowie teilweise eine Porenbildung. Die Oberflächenmorphologie der

AA2024 Proben ist ungeordnet, ein ‚Stäbchenwachstum‘ ist hier nur teilweise ausgeprägt. Bei der vorliegenden Oberflächenmorphologie können gute Klebeigenschaften erwarten werden. Diese müssen durch entsprechende Versuche (z.B. Schältest) verifiziert werden. Die Schliff- und REM-Bilder zeigen ein PSA Oxidwachstum an Hinterschneidungen und Rissen bei beiden Materialien (Abbildung 57).

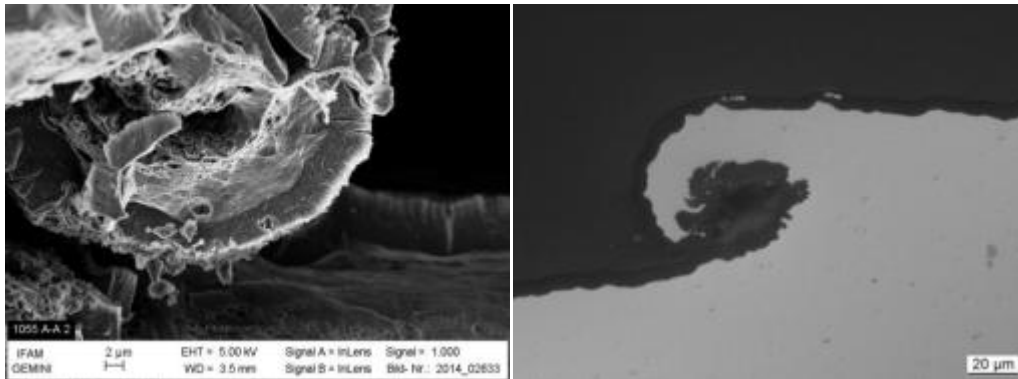


Abbildung 57: PSA Oxidwachstum in Hinterschneidungen: AIMgSc (links), AA2024 (rechts)

Für die Klebeigenschaften sind Ausprägungen wie beispielsweise ein Flash als nachteilig einzustufen und müssen vermieden werden. Eine Verbesserung der FSW Naht ist daher erforderlich.

AP II-30.3: Industrieller Validator

Nach Einzelerprobung der in AP II-30.1 und AP II-30.2 beschriebenen Endeffektoren (Prepreg Ableger und Dünnblechhandler) galt es, diese beiden Systeme zusammenzuführen, um in einen (teil-)automatisierten Prozess einen industriellen Validator herzustellen. Hierzu wurde im Roboterversuchsfeld bei Premium AEROTEC GmbH in Varel ein Versuchslayout erstellt (vgl. Abbildung 58).

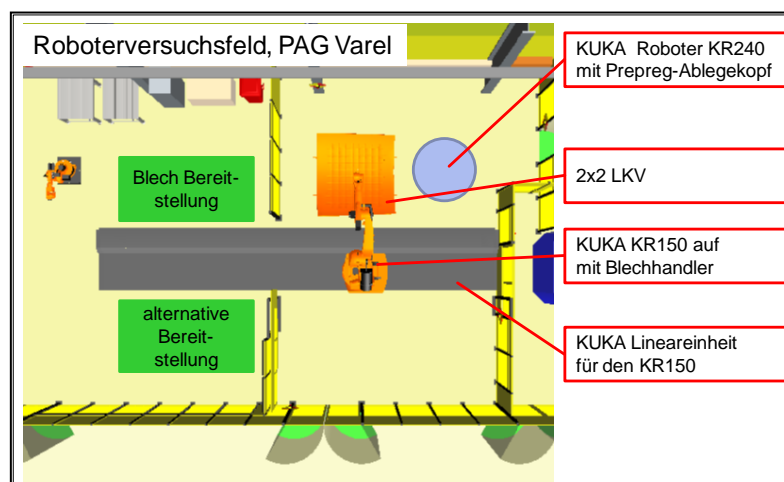


Abbildung 58: Versuchslayout im Roboterversuchsfeld der Premium AEROTEC in Varel.

Das abzulegende Bauteil hat die Abmessungen 1650x1650 und ist exemplarisch in Abbildung 59 dargestellt. Es besteht aus insgesamt 5 Schichten Dünnsblechen (insgesamt 16 Dünnsbleche) und 8 Schichten Prepreg (0° und 90° mit einer Gesamtfläche von ca. 11 m²). Zusätzlich wurden in einem manuellen Prozess Klebefilmschichten eingebracht. Dieser Prozess sollte innerhalb dieses Projektes noch nicht automatisiert werden.

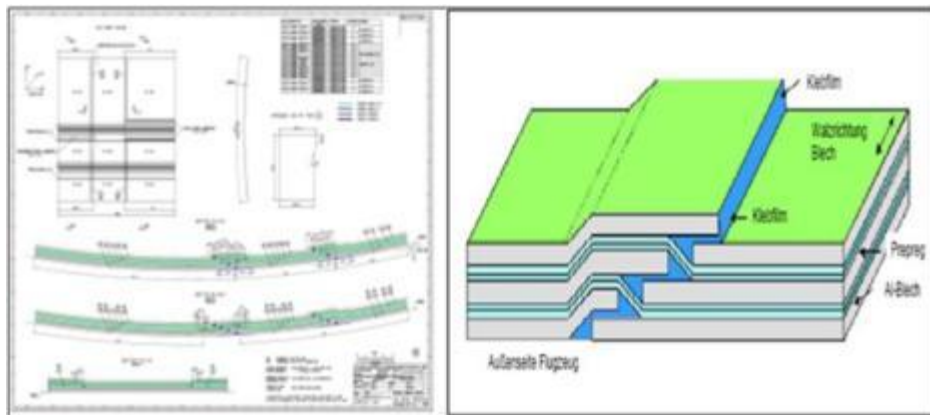


Abbildung 59: FML-Aufbau.

Der FML-Aufbau wurde in einem teilautomatisierten Prozess hergestellt. In Abbildung 60 ist zu sehen, wie die Bleche automatisch von der Bereitstellung aufgenommen, vorgekrümmt und in die Zielposition eingelegt werden. Hierbei ist zu bemerken, dass die Bleche auf dem Bereitstellungstisch an eine definierte Position gelegt wurden. Ein automatisches Vermessungssystem ist noch nicht integriert. Die Berechnung der notwendigen Bewegungen zur Zielposition erfolgte in automatisiert im Steuerungssystem. Hier wurden lediglich die Zielpositionsdaten aus der Zeichnung bereitgestellt.

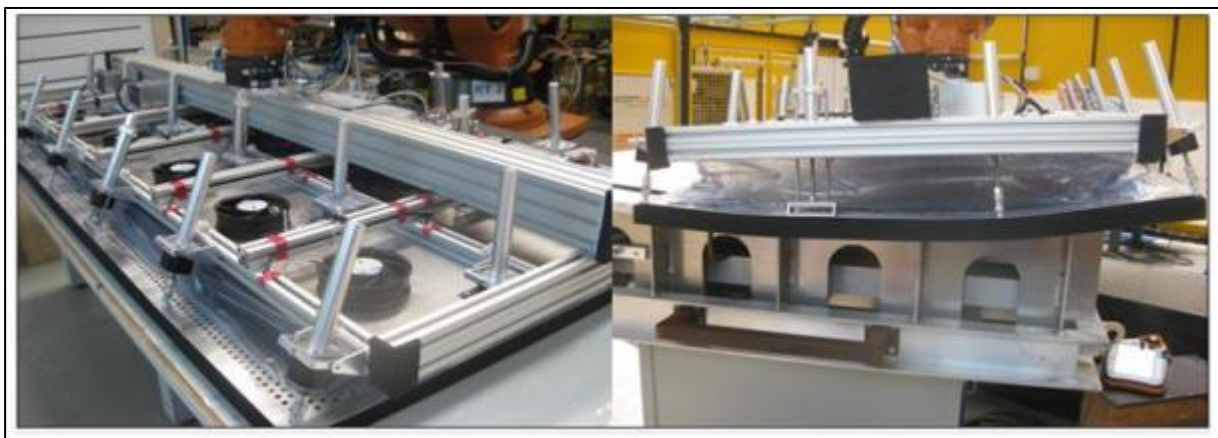


Abbildung 60: Aufnahme der Dünnsbleche von der Bereitstellung (links) und Ablage in die LKV (rechts).

In Abbildung 61 werden die jeweiligen Endeffektoren dargestellt. Der Ablegeprozess für die Aluminium-Dünnsbleche ist mit dem Endeffektor im Bild links dargestellt. Der automatisierte Prozess für die Bleche verläuft den Anforderungen entsprechend gut. Der Ablegeprozess des Prepreg-Ablegers ist im Bild rechts dargestellt. Hier werden Versuche zum automatisierten Ablegen des Prepreg in einer zylindrischen Vorrichtung dargestellt.

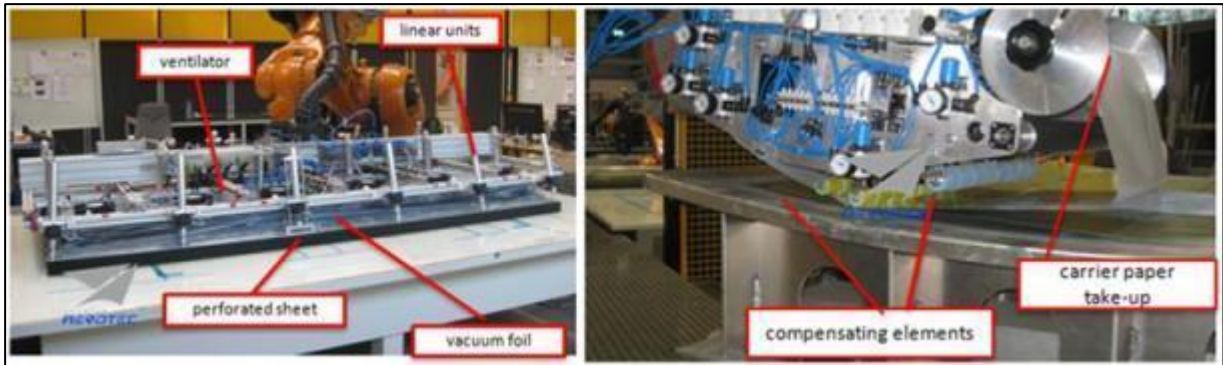


Abbildung 61: Endeffektoren zur Handhabung des Aluminiumbleches (links) und zur Ablage des Glasfaser-Prepregs (rechts)

Zur Abbildung des automatisierten Ablageprozesses wurde ein zylindrisches Demonstratorbauteil in einer entsprechenden Vorrichtung abgelegt. Hierbei wurde die erfolgreiche Ablage eines designten Demonstratorbauteils aus dem zylindrischen Bereich eines A380 Hautfeldes durchgeführt. Das Bauteil ist nach neuen Airbus-Design-Principles abgelegt worden. Hierbei wurden möglichst viele der aufgestellten Herausforderungen beim Hautfeld-aufbau (unterschiedliche Splicetypen, verschieden breite Prepreglagen, besondere Blechgeometrien) berücksichtigt und erfolgreich erfüllt. Mögliche Designoptimierungen zur Reduktion der Fertigungskosten (Design to cost) wurden nur am Rande betrachtet, da der Schwerpunkt auf der Validierung des Technologie anhand des 2x2m Demonstrators gelegt wurde. Dennoch konnte bereits gezeigt werden, dass durch die Reduzierung der Anzahl von Splicen, auch mit einer Reduzierung von Fertigungsaufwänden zu rechnen ist.

Der notwendige Klebefilm wurde manuell abgelegt, da hierzu noch kein relevanter Endeffektor vorliegt. In Abbildung 62 kann der Prozess des Ablegens des Demonstrators in verschiedenen Phasen erkannt werden. Nach den erfolgten Versuchen zum automatisierten Ablegen des Demonstrator-Bauteils wurde das Optimierungspotenzial für weitere Entwicklungen erkannt und wird für weitere Demonstratoren umgesetzt und getestet.

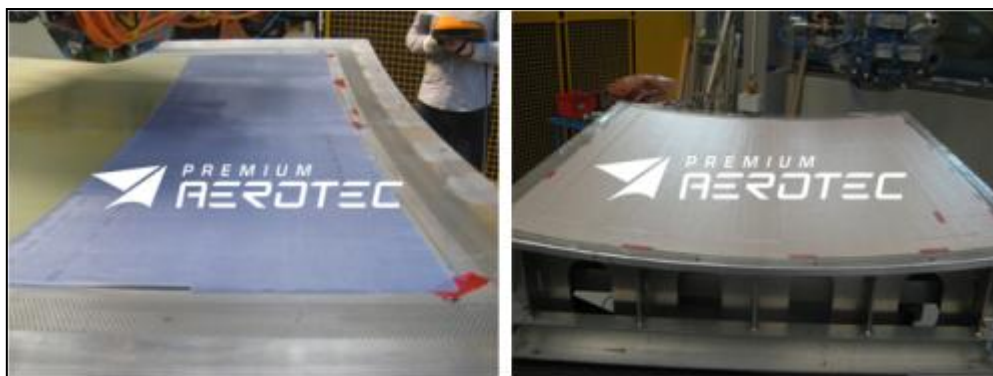


Abbildung 62: Ablage des zylindrischen Demonstrator-Bauteils

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die entwickelten Endeffektoren die automatisierte Ablage des Demonstratorbauteils im Technologiezentrum Varel der Premium AEROTEC GmbH ermöglichen können. Zudem konnte ein koordinierter Prozessablauf zwischen Prepregableger (KR240 mit Prepreg EE) und Blechableger (KR150 mit Blech EE)

durchgeführt werden. Hierzu bedurfte es einer umfangreichen Entwicklung einer abgestimmten Steuerung nicht nur der Endeffektoren, sondern auch der beiden Roboter mittels einer übergeordneten Steuerung des Gesamtsystems.

Somit kann festgestellt werden, dass es zu einer erfolgreichen technischen Umsetzung des Teilprozesses der Hautfeldfertigung gekommen ist. Das abgelegte Bauteil ist in Abbildung 63 rechts dargestellt. Im Bild links ist das Demonstrator-Bauteil ausgehärtet zu sehen.

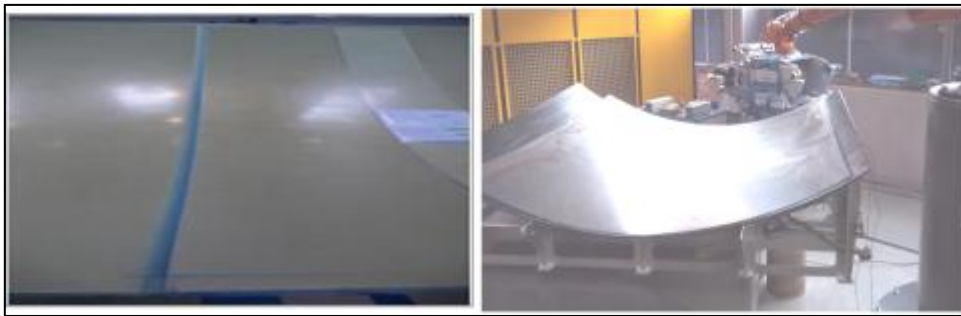


Abbildung 63: Ausgehärtetes (links) und abgelegtes Demo-Bauteil (rechts) in der Vorrichtung

Der FML-Aufbau wurde nach dem Ablegen in Varel bei der Premium AEROTEC GmbH in Nordenham in einem Autoklaven ausgehärtet. Das ausgehärtete FML-Aufbau ist in Abbildung 63 dargestellt.

Für einen vollautomatisierten Prozess sind noch weitere Schritte notwendig. U.a. ist die Aufbringung des Klebefilms noch nicht automatisiert. Desweiteren benötigt der Blechhandler ein Messsystem, welches die Position des Bleches auf dem Bereitstellungstisch erkennt und der übergeordneten Steuerung übermittelt. Weitere Herausforderung ist die Einstellung der Klebrigkeit des Prepregs. Dies hat einen großen Einfluss auf die Ablegbarkeit des Materials. Bei zu hoher bzw. zu geringer Klebrigkeit bleibt das Material am Prepreg-Ableger haften bzw. verrutscht innerhalb der LKV und kann nicht korrekt abgelegt werden.

2.1.4 TAIL 40 – Montage

APII 40.1 – Montagekonzepte

Tür- und Torrahmenmontage

Ziel des Arbeitspaketes APII 40.1 war es, die Auswirkungen von neuen Schalendesigns (Relaxationsumgeformt, FSW Längsnaht, GLARE Laminat) auf die Tür- und Torrahmenmontage zu untersuchen. Daher wurden zunächst das Montagekonzept für die derzeitige Single Aisle Türrahmenmontage analysiert. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass insbesondere durch FSW Nähte, dessen Position mittig in einer Tür bzw. Tor liegen, Abweichungen nur in einem sehr geringen Maß toleriert werden können. Verzüge an Schalen, die durch das FSW Schweißen hervorgerufen werden, können die Montage von Tür- und Torrahmen erschweren. In einem geringen Maß kann der Türrahmen, der eine große Eigensteifigkeit besitzt, eine Korrektur der Schalenverformung vornehmen. Auswirkungen von Schalen, die

Relaxationsumgeformt wurden bzw., aus GLARE bestehen, konnten derzeit nicht identifiziert werden.

Entwicklung der autom. Clipmontage

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollte das im Vorgängerprojekt entwickelte Clipmontagekonzepte optimiert sowie die Interaktion der einzelnen Montagekomponenten validiert werden. Mit der Optimierung des Zusammenspiels der Endeffektoren sollte die Durchlaufzeit zur Montage der Clips reduziert werden.

Der Endeffektor für das Einbringen der Spantfädelbohrungen (im folgenden D-Bohrung genannt) und ClipStringer-Bohrungen wurde am Roboter montiert und über ein Werkzeugwechselmodul der Fa. Zimmer an den Kuka-Roboter KR150, welcher auch die Clips setzt, angebunden. Daraufhin erfolgte die Programmierung und Inbetriebnahme des Endeffektors sowie erste Testläufe, um die Funktionalität sicherzustellen. Während der Tests zur adaptiven Roboterkontrolle (siehe unten), wurden ClipStringer und D-Bohrungen eingebracht und simultan die Ablaufsteuerung des Endeffektors optimiert.

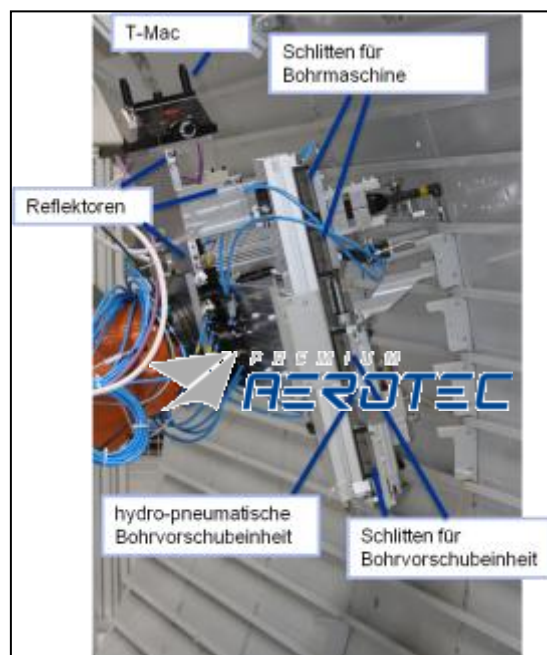


Abbildung 64: Endeffektor zum Einbringen der Bohrungen

Das Vakuumspannsystem zur lokalen Herstellung der Hautfeldsollkontur an den zu bearbeitenden Spantstationen wurde weiterentwickelt, konstruiert und montiert. Das Hautfeld konnte somit für die nachfolgenden Tests eingerichtet werden.

Das Aktivieren des Hautfelds sowie der Clip-Fügeflächen ist vor dem Auftrag des Dichtmittels erforderlich. Dazu sind die Fügeflächen mit dem Aktivator zu benetzen. Das entwickelte Handhabungsgerät für den mit Aktivator getränktem Filz wurde dazu entlang der Fügefläche gestrichen. Das Aktivieren erfolgte mit dem Handhabungsgerät zunächst noch manuell. Bevor anschließend der Clip am Hautfeld positioniert wurde, war auf dem Clipfuß das Dichtmit-

tel zu applizieren. Dazu wurde die Dichtmittelkartusche in luftdruckbetriebenen Dosiereinheit eingebracht. Die Ansteuerung erfolgte manuell über die Druckluftsteuerung. Nachdem der Clip unter der Dosiereinheit positioniert wurde, erfolgte der Dichtmittelauftrag nicht flächig, sondern als Dichtmittelraupe in Halbmondform.

Zum Thema adaptive Roboterkontrolle wurden beide LaserTracker Systeme der Fa. Leica, der AT401 mit 3 Reflektoren und der AT901 mit T-Mac getestet und verglichen. Es wurde die Funktionsfähigkeit sichergestellt sowie die Prozesszeiten und die erreichbare Genauigkeit ermittelt. Weitere Tests gaben Aufschluss über die Möglichkeit, beim AT401 die Messzeit zu reduzieren, indem im zweiten Regelschritt statt einer 6D-Messung eine 3D-Messung (lediglich 1 Target wurde gemessen) durchgeführt wurde. Außerdem wurde getestet, ob es ausreichend lediglich vor dem Einfädeln zu regeln und nicht noch einmal vor der endgültigen Montageposition, bzw. ob der Roboter aufgrund der Relativbewegung in diesem kleinen Bereich Positionsabweichungen aufweist. Wesentliche Arbeiten für o.g. Tests waren die Einmessung und Abstimmung der Systeme Hautfeld, Roboter, LaserTracker, Endeffektoren und T-Mac zueinander. Mit Hilfe der Messsoftware SpatialAnalyzer konnten mittels BestFit-Transformationen, Ebenen und Punktkonstruktionen, Koordinatensystemgenerierung usw. alle Systeme zueinander gemessen und bestimmt werden, sowie z.B. dem Roboter die Position des Hautfelds mitgeteilt werden. Ein weiteres wichtiges Werkzeug war die Hand-Auge-Kalibrierung des WZL Aachen (Matlab-Script) zur Bestimmung der Position des T-Macs am Roboter (und somit des Endeffektors) in Relation zum LaserTracker.

Die Funktionsfähigkeit konnte sichergestellt werden. Die ClipStringer- und D-Bohrungen konnten mit ausreichender Qualität eingebracht werden. Der Endeffektor ist kompakt genug, um den Stringerhinterschnitt zu umgehen und nicht mit bereits montierten Clips zu kollidieren. Die Funktion der Anpassung des Endeffektors an die jeweilige Bohrsituation über die servo-elektrische Lineareinheit konnte nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu konnte die Funktion des in den Bohrvorschub integrierten Gegenhalters für die Bauteilklemmung, mit dem Ziel, keinen zusätzlichen Aktuator zu benötigen und somit ausreichende Kompaktheit zu erreichen, nur teilweise validiert werden. Es war eine Zwangsführung oder anderweitige Synchronisierung erforderlich, da die relative schwere hydro-pneumatische Bohrvorschubeinheit im senkrechten Zustand (also beim Einbringen der ClipStringer-Bohrungen) mit dem daran angebracht Gegenhalter erst zugestellt wird, sobald der Gegenhalter auf der Seite der Winkelbohrmaschine über die Feder genügend Gegenkraft aufbringt, sodass sich die Bohrvorschubeinheit daran hochziehen kann. Dies führte zu langen Prozesszeiten. Möglich ist eine Zustellung im Eilgang bis kurz bevor der Gegenhalter der Bohrvorschubeinheit in Eingriff ist und der Bohrer schneidet. Dies ist über die zeitliche Ansteuerung des Stop-/Eilgangventils einstellbar. Optimale Bohrprozessparameter müssen aus bestehenden Serienanlagen übertragen werden. Die Sicherstellung der Winkellage des Clips über einen zusätzlichen Greifer während die ClipStringer-Bohrungen eingebracht werden, konnte validiert werden. Aufgrund des Spiels in der Nietpassung konnte bei den getesteten Clips jedoch keine Verbesserung der Winkellage festgestellt werden, da der Winkel im Clipfuß sehr genau dem theoretischen Maß entsprach. Eine Verbesserung der Winkellage ist erst bei Clips, welche im Winkelmaß des Fußes (mehr als 2° Abweichung) deutlich schlechter sind, zu erwarten.



Abbildung 65: Einbringung einer ClipStringer-Bohrung

Das Vakuumspannsystem zur lokalen Herstellung der Hautfeldsollkontur an den zu bearbeitenden Spantstationen wurde weiterentwickelt. Die Einstellung der konturaufnehmenden Sauger erfolgte dann mittels Gewindestangen mit Feingewinde, statt dem Verschieben von Aluprofilen über Nutensteine per Hand. Über Adapterplatten mit kreisbogenförmigen Langlöchern können die Sauger senkrecht zum Hautfeld ausgerichtet werden. Das Hautfeld konnte nun lokal eingemessen per AT901-LaserTracker und T-Probe (manuelles Tastgerät zur Erfassung von Punkten) – auf unter $\pm 0,4$ mm Toleranz in Kontur gebracht werden. Damit ließen sich die Clips anhand der offline programmierten CAD-Sollkoordinaten einfädeln und montieren.



Abbildung 66: Konturvorrichtung

Für die adaptive Roboterkontrolle musste des Weiteren der TCP (Tool Center Point) vom Endeffektor 3 per LaserTracker eingemessen werden. In der Messsoftware SpatialAnalyzer wurde in Relation zum Roboterflansch ein Koordinatensystem (KOS) erzeugt, sodass die Offset-Werte des neuen TCPs (auf der Bohrachse, mittig zwischen den bauteilklemmenden Gegenhaltern) zum Standard-Tool-KOS („Flange“-KOS, zentral im Roboterflansch liegend) dem Roboter vorgegeben werden konnten. Per Hand-Auge-Kalibrierung wurde die Position zwischen LaserTracker und den Endeffektoren über einen T-Mac (Target für 6D-Messungen) bestimmt. Da der T-Mac direkt mit dem Roboterflansch verbunden ist (noch vor dem Werkzeugwechsler), wird er nicht mit gewechselt, sodass beide Endeffektoren über das gleiche System geregelt werden konnten, ohne zusätzlichen Einrichtaufwand und ohne zweiten T-Mac.



Abbildung 67: TCP

Beide Systeme, AT401 mit 3 Reflektoren und AT901 mit T-Mac, wurden getestet und verglichen. Die geforderte Genauigkeit konnte bei beiden Systemen erreicht werden. Beim AT401 sind jedoch bei beiden Regelschritten 6D-Messungen erforderlich, eine 3D-Messung im zweiten Schritt weist eine Positionsabweichung von $> 0,3$ mm auf. Die Ursache hierfür ist die unbekannt orientierte, bzw. minimale Abweichung von der Sollorientierung. Mit der Messung eines Punktes am Endeffektor, welcher nicht direkt im TCP liegen kann, entsteht aufgrund der Winkelabweichung und des Abstands eine falsche Berechnung der TCP-Position. Eine ausreichend geringe Prozesszeit erzielte nur der AT901 in Kombination mit dem T-Mac. Festgestellt wurde außerdem, dass die Stegfläche der Clips, also die C-Lage innerhalb der geforderten Toleranz von $\pm 0,2$ mm liegt. Für das Einbringen der ClipStringer-Bohrungen wird der Endeffektor um 90° geschwenkt. Damit kann der T-Mac vom LaserTracker nicht mehr erfasst werden, da der T-Mac einen Sichtbereich von max. $\pm 45^\circ$ um seine Normalenrichtung bietet. Zur Erweiterung des Sichtfelds bietet die Fa. Leica einen sogenannten T-Frame (gleiches Funktionsprinzip wie T-Mac) an. Weiterhin haben die Tests gezeigt, dass die D-Bohrungen anhand der CAD-Sollwerte so eingebracht werden konnten, dass sich der Spant über die an dieser Stelle eingesetzten Niete aufnehmen lässt. Die Funktionsfähigkeit der automatischen Clipmontagestation wurde final sichergestellt.



Abbildung 68: Spante können an vollautomatisch montierten Clips aufgenommen werden

Anschließend wurde eine Investitionsabschätzung vorgenommen sowie eine Wirtschaftlichkeitsrechnung durchgeführt.

2.2 Voraussichtlicher Nutzen

TAII 10 - Relaxationsumformen

- Einsatz des Relaxationsumformprozesses für die Umformung von sphärischen Hautfeldern aus der AlMgSc Legierung
- Reduktion des Bauteilgewichts durch die Verwendung der AlMgSc Legierung
- Verkürzte Durchlaufzeit aufgrund einer verkürzten Prozesskette
- Reduktion der Energiekosten durch alternative Aufheizmethoden

TAII 20 – Friction Stir Welding

- Entwicklung und Optimierung von FSW-Naht Geometrien für eine bessere Schweißnahtqualität
- Einsatz von innovativen Werkzeugkonzepten zur Reduktion der Durchlaufzeit und Fertigungskosten

- Entwicklung von Qualitätssicherungsverfahren und Oberflächenschutzverfahren zum Erlangen einer guten Bauteilqualität
- Entwicklung von flexiblen Bauteilspannkonzepten zur Reduktion von Toolingkosten

TAII 30 – Fibre Metal Laminates

- Prozessentwicklung für das automatisierte Herstellen von GLARE Hautfeldern
- Entwicklung der Endeffektoren zum Ablegen von Prepreg und Al-Blechen
- Einsatz von FSW geschweißten Blechen zur Reduzierung der Anzahl von Splicen bzw. Bauteilgewicht
- Untersuchung der Oberflächen von FSW Nähten nach der Bonding-Vorbehandlung für die Bewertung der Einsatzfähigkeit des FSW für GLARE Laminates

TAII 40 - Montage

- Einsatz von Tür- und Torrahmenmontagekonzepten für den Einsatz bei hohen Fertigungskadenzen
- Entwicklung des autom. Clip-Montageprozesses zur Reduktion von Fertigungskosten und Durchlaufzeit.

2.3 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei Dritten

Deutliche Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens konnten bei den Verbundpartnern in den jeweiligen Verbundprojekten erzielt werden. Genannt werden Themenbereiche mit Schnittstellen zum Projekt INPRO.

- NEXXT (New Modular Conception for Metallic Structures of Next Generation Fuselage; Airbus)
Themenschwerpunkte: Engineering für Relaxationsumformprozess, Simulation, Materialentwicklung, Umformprozessknowhow, FSW Design, lokaler Oberflächenschutz
- MTEXT (Manufacturing and Testing for next Generation Metallic Fuselage Structures; DLR)
Themenschwerpunkte: Entwicklung FSW Nahtgeometrie für Tailored Welded Blanks, FSW Prozess Know-How für GLARE Dünobleche, Charakterisierung von GALRE Laminaten mit FSW geschweißten Dünobelchen; Simulation des Rissfortschritts bei FSW geschweißten Bauteilen
- RADICAL (Radikal neue Werkstoffe und Fertigungsverfahren für den metallischen Rumpf; Airbus Group Innovation)
Themenschwerpunkte: Charakterisierung der AlMgSc Legierung für die Prozessentwicklung Relaxationsumformen, Entwicklung von Verfahren für den lokalen Oberflächenschutz nach dem FSW Prozess

Die Ergebnisdarstellung kann hierbei jeweils den entsprechenden Abschlussberichten der Projektpartner entnommen werden.

In Zusammenarbeit mit Unterauftragnehmern wurden im Vorhaben INPRO folgende Erkenntnisgewinne erzielt.

MATFEM Consulting, München	Simulation des Relaxationsumformprozesses, Abwicklung der 2D Bauteilgeometrie
Optron GmbH, Garbsen	Versuche zur Aufheizung von Bauteilen mittels Infrarot
BIBA GmbH, Bremen	Bewertung der Infrastruktur- und Prozesskette des FSW
IWT Stiftungs-Institut für Werkstofftechnik, Bremen	Analyse von Prozessen hinsichtlich der Verzugspotentiale
HZG Helmholtz-Zentrum, Geesthacht	Werkstoffprüfung von FSW geschweißten Proben
Fraunhofer IFAM, Bremen	Charakterisierung von Al-Bleichen mit FSW Naht
WZL Werkzeugmaschinenlabor Aachen	Entwicklung von Messsystemen zur adaptiven Roboterkontrolle
Broetje Automation GmbH, Wiefelstede	Entwicklung flexiblen Rüstvorrichtungen für den FSW Prozess

2.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Im Rahmen des Forschungsprojektes INPRO erfolgten keine Veröffentlichungen. Dies wird dadurch begründet, dass die geleisteten Grundlagenarbeiten in das Airbus Folgeprojekt METALICA im Verbund INNOMET einfließen. Es wurden zudem keine Patente angemeldet.