

# Abschlussbericht

des

geförderten Forschungsvorhabens

**NewTech**

(**New** Assembly Concept and **Tech**nology for Metallic Structures of  
Next Generation Fuselage)



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 20W1111E

Laufzeit: 2012 – 2015

	Datum	Name	Abteilung	Unterschrift
<b>Verfasser:</b>	28.08.2015	R. Becker L. Reichardt B. Selk E. Yip	RCOE RCOE2 RCOE2 RCOE2	

## INHALTSANGABE

<b>1</b>	<b>GESAMTZIEL UND AUFGABEN DES PROJEKTS .....</b>	<b>1-3</b>
1.1	Einleitung.....	1-3
1.2	Zielsetzung .....	1-4
<b>2</b>	<b>PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS.....</b>	<b>2-6</b>
2.1	Zeitplan .....	2-6
2.2	Projektstrukturplan .....	2-7
2.3	Zahlenmäßiger Nachweis .....	2-8
<b>3</b>	<b>STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK.....</b>	<b>3-9</b>
3.1	Stand der Technik Metallrumpf .....	3-9
3.2	Einsatz der Schweißtechnologie als Fügemethode in der Luftfahrt.....	3-12
<b>4</b>	<b>ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN.....</b>	<b>4-13</b>
<b>5</b>	<b>WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ERGEBNISSE.....</b>	<b>5-14</b>
5.1	TA00 Projektleitung.....	5-14
5.2	TA10 FSW Technologie.....	5-15
5.2.1	AP10.1 Distorsion Engineering – Messen des Verzuges.....	5-15
5.2.2	AP10.2 Distorsion Engineering – Analyse der Verzugsergebnisse.....	5-18
5.2.3	AP10.3 Herstellung von Verzugspalten mittels FSW Technologie .....	5-25
5.2.4	AP10.4 Friction Plug Welding (FPW) .....	5-25
5.2.5	AP10.5 Prozesssicherheit .....	5-34
5.3	TA20 Komponenten .....	5-38
5.3.1	AP20.1 Kostenanalyse.....	5-40
5.3.2	AP20.2 Toleranzsystem .....	5-42
5.3.3	AP20.3 Bauweise / Neue Konzepte .....	5-42
5.3.4	AP20.4 Design / Simulation.....	5-42
5.3.5	AP20.5 Qualitätssicherung.....	5-43

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 1-1
----------------------------	-----------------------------	--	----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

<b>5.4</b>	<b>TA30 MCA-Assembly / Concept .....</b>	<b>5-46</b>
5.4.1	AP30.1 2D/3D Spanntechnik.....	5-46
5.4.2	AP30.2 Fügestellendesign MCA.....	5-53
5.4.3	AP30.3 MCA Fertigungs- und Montagetechnik.....	5-57
5.4.4	AP30.4 Oberflächenschutz.....	5-67
5.4.5	AP30.5 MCA Validator .....	5-68
<b>6</b>	<b>NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>6-70</b>
<b>7</b>	<b>BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT BEI ANDEREN STELLEN .....</b>	<b>7-70</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>8-71</b>

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 1-2
----------------------------	-----------------------------	--	----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

# **1 GESAMTZIEL UND AUFGABEN DES PROJEKTS**

## **1.1 Einleitung**

In der Luftfahrtindustrie tragen sowohl wirtschaftliche Treiber als auch gesetzliche Forderungen immer wieder die technologischen Weiterentwicklungen voran. Mit dem zunehmenden Wettbewerb zwischen der Metall- und CFK-Technologie, ist in den letzten Jahren ein weiterer Treiber hinzugekommen. Obwohl die CFK-Technologie langfristig immer mehr Anwendungsgebiete bei Rumpf- und Strukturkomponenten einnehmen wird, ist keinesfalls sicher, ob sich die CFK-Technologie vollständig durchsetzen kann. Immer entscheidender werden daher die noch offenen Fragestellungen nach dem tatsächlichen Gewichtsvorteil oder auch der fertigungstechnischen Umsetzung der geforderten, hohen Stückzahlen. Dabei machen gerade die geforderten Kadenzen die Metalltechnologie wieder interessant, da bereits durch bestehende Fertigungsprozesse und Montagekonzepte eine hohe Kadenz erreicht werden kann. Neben den fertigungstechnischen Anforderungen stehen derzeit auch die prognostizierten Treibstoffeinsparungen für das Marktsegment der Kurzstreckenflugzeuge nicht ohne weiteres in Relation zu den höheren Herstellungskosten für die CFK Bauweise.

Es ist daher gerade im Marktsegment der Kurzstreckenflugzeuge wie z. B. einem Nachfolger der Airbus A320 bzw. Boeing B737 zu erwarten, dass metallische Rumpf- und Strukturkomponenten weiterhin bevorzugt werden, wenn noch ungenutzte Potenziale zur Kosten- und Gewichtseinsparung realisiert werden können. Der bereits heute hohe Auftragsbestand von Flugzeugen mit metallischem Rumpf erfordert daher eine langfristige Stärkung, vor allem auf dem Gebiet der Fertigungsverfahren und der Montagekonzepte. Aus heutiger Sicht ist es daher zwingend erforderlich, die Technologien für metallische Bauweisen weiter voranzutreiben und somit die darin bestehenden Potenziale vollends auszuschöpfen. Die zurzeit zunehmende Verschiebung des Entwicklungsfokus zu Ungunsten der Metalltechnologien, trägt jedoch dazu bei, dass notwendige technologische Entwicklungsschritte für metallische Konzepte nicht vollzogen werden können. Bereits in der Vergangenheit wurde oft bewiesen, dass metallische Leichtbauwerkstoffe durch neue Technologien oder neue Werkstoffentwicklungen für integrale Rumpfstrukturen nach wie vor ein großes Potenzial zur Reduktion von Kosten und Gewicht bieten. Durch gezielte Nutzung der Vorteile und Realisierung der Verbesserungspotenziale kann die Konkurrenzfähigkeit metallischer Rumpfstrukturen nicht nur erhalten bleiben, sondern weiter ausgebaut werden. Aufgrund der Eignung metallischer Bauweisen für den Kurzstreckenbereich und der Markterwartungen in diesem Bereich ist langfristig eine nachhaltige Verbesserung der wirtschaftlichen Situation der Flugzeug-Zulieferindustrie zu erwarten.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 1-3
----------------------------	-----------------------------	--	----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

## 1.2 Zielsetzung

Da der derzeitige Schwerpunkt der R&T Strukturentwicklung bei Airbus in der CFK Technologie liegt, werden verstärkt die Tier 1 Supplier von Airbus mit in die Entwicklung neuer Technologien einbezogen. Daher findet eine enge Abstimmung zwischen den Supplier und Airbus statt. Das Vorhaben NEWTECH zielt darauf ab, neue technologische Lösungsansätze metallischer Bauweisen sowie Fertigungs-, und Montagetechnologien aufzusetzen. Verstärkt werden im Vorhaben NEWTECH die von Airbus vorgegebenen Strategien zum „metallischen Rumpf“ behandelt. Somit war das Hauptziel des Forschungsprojektes NEWTECH die Weiterentwicklung der FSW-Fügetechnologie, um eine konkurrenzfähige Herstellung metallischer Rumpf- und Strukturkomponenten für die Zukunft sicherzustellen. Durch die Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern aus Industrie und Forschung sollte eine Steigerung des Technologiereifegrades erreicht werden. Neben der Ausarbeitung von Konzepten für eine Prozessoptimierung, sollten neue Fertigungs- und Montagekonzepte eingeführt werden.

Übergeordnetes Ziel des Vorhabens ist die Industrialisierung und Automatisierung des Rührreibschweißprozesses für die Fertigung sowie Montage von Rumpfstrukturen. Dafür wurden die folgenden Hauptziele für das Vorhaben NEWTECH formuliert.

- Einsatz der FSW Fügetechnologie unter Verwendung der aktuell üblichen Luftfahrtlegierungen wie z. B. Al 2xxx und Al 7xxx sowie neuen Legierungen (AlMgSc und AlCuLi)
- Untersuchung von neuen notwendigen Reparaturkonzepten
- Entwicklung von Toleranzkonzepten für das Fügen großer Rumpfstrukturen
- Entwicklung und Anwendung von notwendigen qualitätssichernden Maßnahmen
- Untersuchung von möglichen Kosten- und Gewichtseinsparpotentialen gegenüber dem konventionellen Nietprozess
- Tool- und Spanntechnikentwicklung für die Montage von Rumpfstrukturen
- Untersuchung von geeigneten FSW-Anlagenkonzepten

All diese Untersuchungen sind somit die Grundlage für den Ausbau der vorhandenen standortspezifischen Kernkompetenzen und eine Integration der FSW-Technologie in die Zukunftsprojekte der RUAG am Standort Oberpfaffenhofen im Bereich des Flugzeugstrukturbaus. Damit sollte das Ziel einer gesamtheitlichen Prozessgestaltung erreicht werden, mit der die

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 1-4
----------------------------	-----------------------------	--	----------------------

Zuverlässigkeit erhöht und die Life-Cycle-Kosten reduziert werden können. Die dabei erlangten Erkenntnisse und Ergebnisse können in wesentlichen Elementen auch auf andere Anwendungsbereiche übertragen werden.

Während des Projektverlaufs wurden die erarbeiteten Ergebnisse in Anlehnung an die Stufen der **Technology-Readiness-Level (TRL)** Bewertung aus dem Hause Airbus beurteilt (Abbildung 1-1). Mit Hilfe dieses Bewertungsschemas konnte eine klare Aussage bezüglich des technologischen Reifegrads des jeweiligen Prozesses gemacht werden.

Airbus TRL	Discover		Understand	Adapt		Validate	Deploy
EADS TRL	1	2	3	4	5	6	7
Airbus Structures  <b>Technology Readiness Assessment (TRA)</b>	-Screening of new materials and technologies / processes  -Identification of new available M&P	- State of the Art (internal and external Airbus)  - Identification of potential applications on A/C  - Material and technologies selection	- Level 1 of testing approach: coupons tests based based on reference loads  - First manufacturing trials  - Materials characterisation	- Level 2 of testing approach: basic design principal, structural nodes testing based on reference loads  - Complex manufacturing trials (representative of A/C specific geometry)  - First industrial processes approach	- Level 3 of testing approach: specimen, sub-components tests based on A/C geometry and loads  - Identification of industrial processes & development needs  - Technology implementation	- Level 4 of testing approach: components tests based on A/C geometry and loads (-> technology validation)  - Development of industrial means  - First material qualification approach	- Level 5 of testing approach: A/C program testing  -Final material qualification

**Abbildung 1-1: TRL-Bewertungsmatrix [Quelle: Airbus]**

NEWTECH trägt damit zu den übergeordneten Zielen des Luftfahrt-Forschungsprogramms insbesondere hinsichtlich der Merkmale „Effiziente Luftfahrzeuge“ im Bereich Struktur und Bauweisen bei.

## 2 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

### 2.1 Zeitplan

In Abbildung 2-1 ist der Zeitplan für die wesentlichen Arbeitsschritte und Aktivitäten des Vorhabens NEWTECH dargestellt. Die ebenfalls dargestellten Meilensteine beschreiben den Fortschritt der unterschiedlichen Technologieentwicklungen. Ziel des Teilvorhabens NEWTECH war das Erreichen eines Technologie-Level von mindestens TRL5 in den Bereichen des Component-Assembly und der Sektionsvormontage (Barrel-Pre-Assembly) sowie von TRL6 in im Bereich der Komponenten und des Sub-Assembly. Die Meilensteine sind innerhalb des Verbundes ECO insbesondere mit den Projekten NEXXT und FUTURE abgestimmt.

Die Laufzeit des Vorhabens betrug drei Jahre im Zeitraum von Anfang 2012 bis Ende März 2015.

Arbeitspakete	Jahr 1 / 2012				Jahr 2 / 2013				Jahr 3 / 2014				Jahr 4 / 2015				
	1Q	2Q	3Q	4Q													
Verbundprojekt ECO Projekt New Tech			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
TA00 Projektleitung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
TA10 FSW Technologie			■	■	■	■	■	■	■								
AP10.1			■	■	■	■	■	■	■								
AP10.2			■	■	■	■	■	■	■								
AP10.3			■	■	■	■	■	■	■								
AP10.4			■	■	■	■	■	■	■								
AP10.5			■	■	■	■	■	■	■			■	■				
TA20 Komponenten			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP20.1			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP20.2			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP20.3			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP20.4			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP20.5			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
TA30 MCA Konzept					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP30.1					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP30.2					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP30.3					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP30.4					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP30.5					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Transfer																	
FSW Roboter Zelle Projekt ASSYMET	■	■	■	■		■	■	■	■								

**Abbildung 2-1: Projektzeitplan NEWTECH (Stand 2015)**

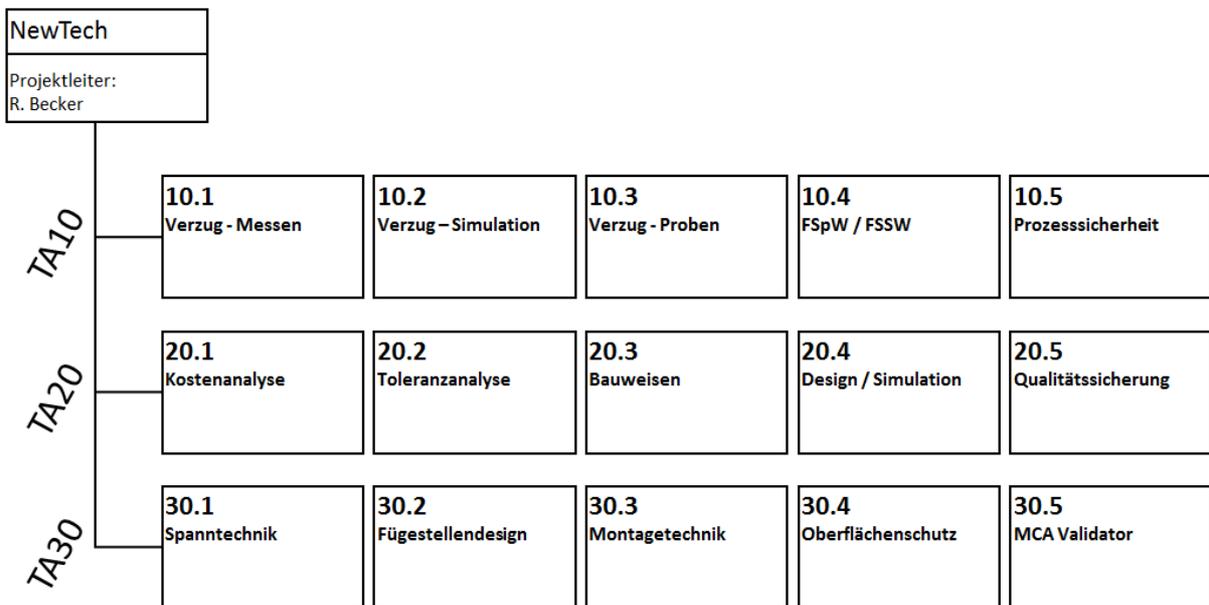
<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 2-6
----------------------------	-----------------------------	--	----------------------

## 2.2 Projektstrukturplan

Das Vorhaben NEWTECH ist in den Verbund ECO eingebunden. Der entsprechende Projektstrukturplan von ECO wird in dem Airbus Förderantrag „ECO Wirtschaftlicher Metallrumpf Generation Best-ECO-Mix“ beschrieben. Für das Vorhaben NEWTECH ist die Gliederung des Projektstrukturplans wie folgt:

- FSW Technologie (TA-10)
- Komponenten (TA-20)
- MCA Konzept (TA-30)

Die definierten Arbeitspakete (AP) der Teilaufgaben (TA) können dem Projektstrukturplan aus Abbildung 2-2, entnommen werden.



**Abbildung 2-2: Projektstrukturplan NEWTECH (Stand 2015)**

### 2.3 Zahlenmäßiger Nachweis

In Tabelle 2-1 ist die Aufschlüsselung in die wichtigsten Positionen relativ dargestellt.

Pos.	Beschreibung	Relatives Budget [%]
813	Material	12
823	FE-Fremdleistungen	33
837	Personalkosten	53
838	Reisekosten	1
850	Sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	1

**Tabelle 2-1: Projektkostenplanung NEWTECH (Stand 2015)**

### 3 STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

#### 3.1 Stand der Technik Metallrumpf

Bisherige Bauweisen für Flugzeugrumpfstrukturen sind überwiegend geprägt durch den Einsatz konventioneller Aluminiumlegierungen und die Füge-technologien Nieten und Kleben.

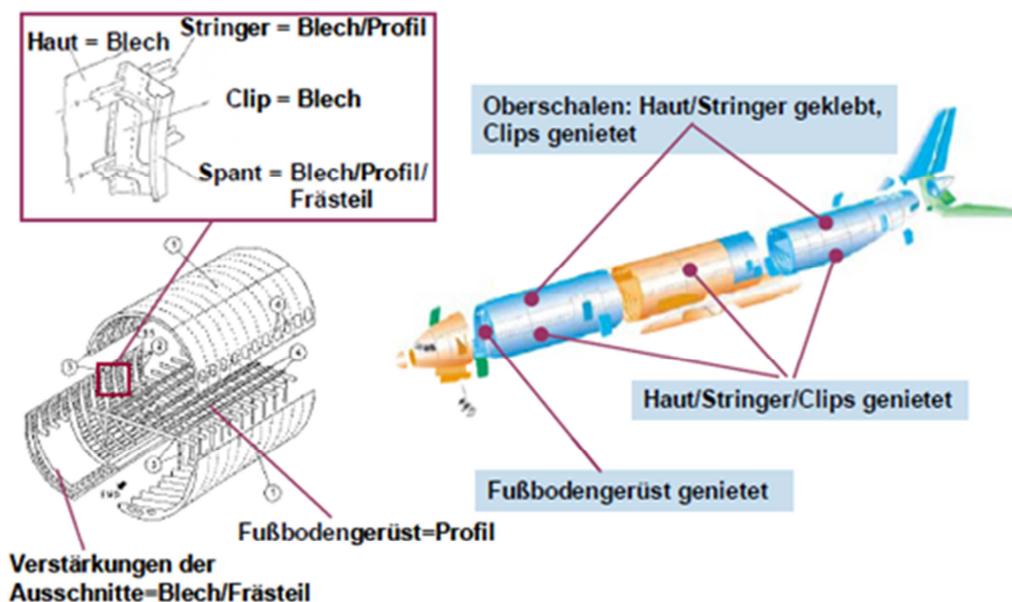
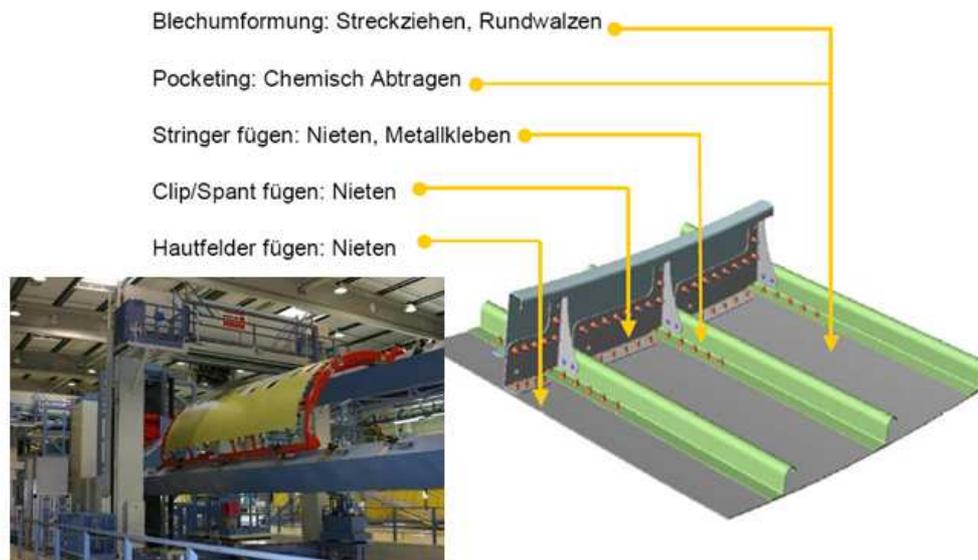


Abbildung 3-1: Aufbau einer konventionellen Rumpfstruktur [Quelle: Airbus]

Haut-Stringer-Verbindungen, Haut-Clip-Verbindungen und Clip-Spant-Verbindungen werden für Unter- und Seitenschalen überwiegend mit Niet-Technologien hergestellt. Kleben wird hauptsächlich bei Haut-Stringer-Verbindungen und beim Fügen von Haut-Dopplern im Oberschalenbereich eingesetzt. Fußbodengerüste sowie der Rahmen an Ausschnitten für Türen und Frachttore werden ausschließlich mittels Niet-Technologien verbunden (siehe Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2).

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 3-9
---------------------	----------------------	---	---------------



**Abbildung 3-2: Konventionelle Fertigungstechnologien für Rumpfschalen**

Die Einführung neuer Werkstoffe und Technologien für metallische Rumpfstrukturen wurde bereits in den vergangenen Jahren erfolgreich begonnen. So werden z. B. bei der RUAG Aerospace Structures GmbH in Oberpfaffenhofen, Automatisierungskonzepte für Niet-Technologien ständig verbessert und neue Konzepte entwickelt. Es wurden Roboter aus der Automobilfertigung für den Einsatz in der Flugzeugstrukturmontage adaptiert (Abbildung 3-3) und erfolgreich im Fertigungsprozess eingesetzt.



**Abbildung 3-3: Vollautomatische Fertigungszelle mit Nietroboter**

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 3-10
---------------------	----------------------	---	----------------

Ebenfalls wurden neue Prozesse in der Montage bzw. der Fertigung („Lean Manufacturing“) erarbeitet und umgesetzt. Bei RUAG Aerospace Structures am Standort in Oberpfaffenhofen befinden sich derzeit zwei selbst entwickelte und aktive Fließfertigungsstraßen, eine für die Sektion 19.1 der Airbus 320 Familie und eine zweite für die Aft Fuselage der Bombardier CRJ - Familie.

Die Auslegung der sehr komplex beanspruchten Struktur eines Flugzeugumpfes erfolgt im Wesentlichen unter Berücksichtigung folgender Hauptkriterien (Abbildung 3-4):

- Statische Lasten
- Ermüdungs- und Schadenstoleranz-Kriterien
- Medien- und Korrosionsbeständigkeit

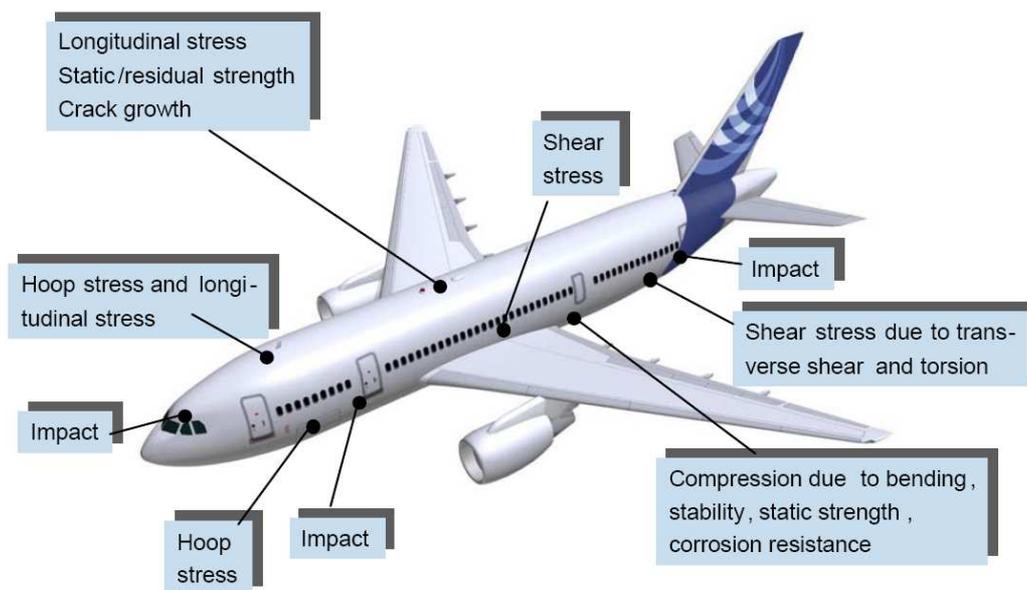


Abbildung 3-4: Beanspruchung und Auslegungskriterien für einen Flugzeugumpf [Quelle: Airbus]

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 3-11
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

### **3.2 Einsatz der Schweißtechnologie als Fügemethode in der Luftfahrt**

In der jüngeren Geschichte der Luftfahrt und des Flugzeugstrukturbaus findet die Anwendung von Schweißtechnologien als Fügemethode zunehmend Einsatz. Das Laser-Beam-Welding-Verfahren (LBW) zum Beispiel wird bereits bei Airbus erfolgreich bei den Flugzeugmodellen A318, A340 und A380 in der Serienproduktion angewendet. Die LBW-Technologie, welche auf einem Schmelzschweißprozess basiert, hat jedoch zum Nachteil, dass die in der Luftfahrt üblichen hochfesten Aluminiumlegierungen 7xxx und die weitverbreiteten und etablierten Legierungen 2xxx aufgrund der Spannungsrissempfindlichkeit nach dem Schmelzschweißprozess nicht ohne weiteres angewendet werden können. Aufgrund dessen beschränkt sich die Anwendbarkeit des LBW-Fügeprozesses in der Luftfahrt auf die Aluminiumlegierungen 5xxx und 6xxx, welche im Vergleich zu den 7xxx und 2xxx eine geringere Festigkeit aufweisen.

Im Gegensatz hierzu steht das Friction-Stir-Welding-Verfahren (FSW) als alternative Schweißfügetechnologie. Dieses Verfahren unterscheidet sich vor allem darin, dass die Fügepartner in einem Temperaturbereich unterhalb des Soliduspunktes durch mechanisches „Verrühren“ der jeweiligen Fügepartner gefügt werden. Dieser Unterschied ermöglicht es deshalb nicht schmelzschweißgeeignete Aluminiumlegierungen wie die 7xxx und 2xxx durch einen Schweißprozess zu fügen. Diese Eigenschaft des FSW-Verfahrens ist einer der Hauptgründe, der diese Fügemethode sehr attraktiv für die Luftfahrtindustrie macht. In der industriellen Umsetzung bei großen Flugzeugen findet diese Technologie zunehmend an Bedeutung, beispielsweise wird die Fußbodenstruktur des Airbus Militärtransporters A400M damit gefügt. Das bedeutendste Beispiel und Meilenstein einer erfolgreichen Anwendung in der Serienproduktion in der Luftfahrt ist heute jedoch der Business-Jet „Eclipse 500“. Bei der Rumpfmontage werden hier insgesamt mehrere Meter FSW-Nähte der Rumpfstruktur gefügt.

Anhand der heutigen Anwendungsbeispiele in der Luftfahrt konnte ein Gewichts- und Kosteneinsparpotenzial gezeigt werden. In der Luftfahrt stellen diese Fertigungsverfahren in der metallischen Flugzeugstrukturfertigung deshalb eine Schlüsseltechnologie im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit in der Zukunft dar.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 3-12
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

#### **4 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN**

Die Arbeiten der RUAG Aerospace Structures GmbH wurden in Zusammenarbeit mit geeigneten Unterauftragnehmern ergänzt und gemeinsam durchgeführt. In Tabelle 4-1 ist eine tabellarische Übersicht der beteiligten Unterauftragnehmer im Rahmen des Forschungsprojektes NEWTECH dargestellt.

<b>Firma</b>	<b>Arbeitsinhalt</b>
GKSS/HZG	Ermittlung von Material Kennwerten und Prozessparameter, Qualitätssicherung und Fertigungsfehler
Technische Universität München (TUM)	Robotersteifigkeitsvermessung (KUKA KR500MT) und Entwicklung des FSW-Endeffektors
EADS-IW	Entwicklung eines Delta-N-Werkzeugs für T-Stoßnahtgeometrie
Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)	Steifigkeitsuntersuchung Industrieroboter
SLV-GSI	Durchführung und Analyse von Friction Plug Welding als Endlochkonzept
Rücker	Thermische Simulation FSW
Provenion	Entwicklung Prozessüberwachung

**Tabelle 4-1: NEWTECH Unterauftragnehmer und Arbeitsinhalte**

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

## **5 WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHE ERGEBNISSE**

### **5.1 TA00 Projektleitung**

In der Teilaufgabe „Projektleitung“ wurde die interne und externe Koordination, sowie die Projektbegleitung wahrgenommen. Dadurch ergaben sich Schnittstellen zu den Verbundpartnern sowie zu den Unterauftragnehmern. Dies beinhaltete die Teilnahme und Mitwirkung an den technischen Besprechungen sowie die Berichterstattung und Dokumentation. Außerdem wurden in dieser TA übergeordnete Arbeiten zur Betreuung der weiteren TA übernommen. Im Wesentlichen umfassten die Tätigkeiten der Projektleitung folgende Aufgaben:

- Überwachung der Kosten- und Zeitplanung während der gesamten Projektlaufzeit
- Auswahl und Materialbeschaffung für Coupon- und Komponentenversuche
- Planung der Coupon- und Komponentenversuche
- Koordination bei Abstimmung des Demonstrators

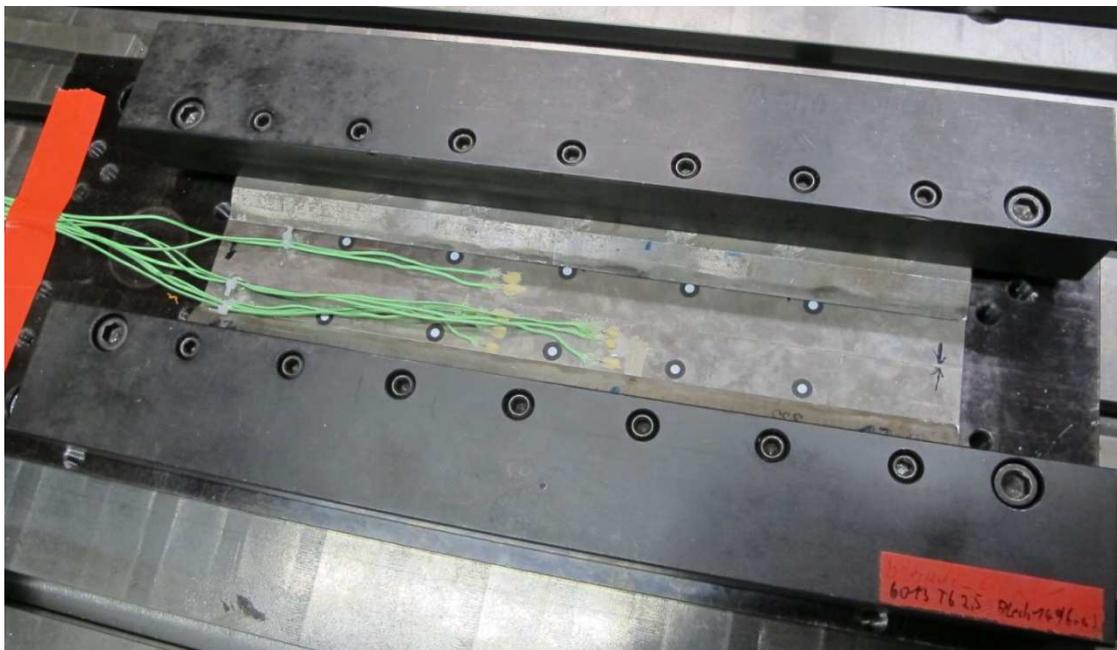
<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-14
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

## 5.2 TA10 FSW Technologie

### 5.2.1 AP10.1 Distorsion Engineering – Messen des Verzuges

Durch die Verlängerung des Projekts ASSYMET im Verbund KOMET, kam es zu einer zeitlichen und thematischen Überlappung. Die Vorhaben im Bereich Verzugproben und -messung liefen alle im Rahmen von ASSYMET. Für die genaue Beschreibung der Versuchsdurchführung sowie die Auswertung sei an dieser Stelle auf den Abschlussbericht des Projekts ASSYMET verwiesen. Zusammenfassend sind in Tabelle 5-1 die maßgebenden Ergebnisse und Erkenntnisse der Couponprobenserie zusammengefasst dargestellt. In Abbildung 5-1 ist der Versuchsaufbau der Couponversuche abgebildet.

In diesem umfangreichen Couponprobenprogramm wurde der Einfluss der verwendeten FSW-Parameter auf den Verzug ermittelt. Die Verzugsauswertung erfolgte mittels der optischen Photogrammetrie. Zusätzlich zur Verzugsuntersuchung wurden mit dem Couponprobenprogramm notwendige Randbedingungen ermittelt, wie die erforderliche Spannkraft, das zulässige Spaltmaß und die Temperaturverteilung in den Probeblechen während des Schweißprozesses.



**Abbildung 5-1: Versuchsaufbau – Couponblech mit Thermoelementen und Photogrammetriemarken**

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-15
---------------------	----------------------	---	----------------

Parametervariation	Ziel	Ergebnisse/Erkenntnisse
Referenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definition Referenzparameter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Referenzparametersatz durch mehrere Testschweißungen definiert. Auswahlkriterium Nahtqualität Unter- und Oberseite</li> <li>- Referenzparameter: Prozesskraft = 6 kN; Vorschub 200 mm/min; Drehzahl = 1200 U/min für Material 2024 T3 mit t = 3 mm</li> </ul>
Backingmaterial/Untertelge (3 Variationen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einfluss des Backingmaterials und der thermischen Isolierung auf den Verzug</li> <li>- Bestimmen der Prozessparameter für jedes Backingmaterial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verzug (bei konstant gehaltenen Schweißparametern) bei isolierendem Bremsbelag am höchsten und bei Titan am geringsten. Bei Stahl in der Mitte.</li> <li>- Bei Stahl und Titan Parametersatz gleich Referenz anwendbar. Bei Bremsbelag Halbierung der Drehzahl möglich/notwendig → geringerer Leistungseintrag</li> <li>- Bei Bremsbelag längere Vorlaufstrecke notwendig bis stationärer Schweißprozess erreicht wird.</li> </ul>
Spannkraft (3 Variationen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einfluss der Spannkraft auf den Verzug</li> <li>- Notwendige Mindestspannkraft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verzug steigt bei Reduktion der Spannkraft</li> <li>- Bei einem Anzugsmoment von 5 Nm war ein Rutschen der Couponbleche zu beobachten.</li> <li>- Empfehlung: Notwendige Mindestspannkraft bei 10 Nm Anzugsmoment der Spanschrauben. Mit Geometrie des Versuchsaufbaus entspricht dies einer konstanten Flächenpressung von ca. 1,5 MPa ( 100 N/mm )</li> </ul>
Spannabstand (3 Variationen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einfluss des Spannabstands auf den Verzug</li> <li>- Maximal zulässiger Spannabstand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kein Einfluss des Spannabstandes auf den Verzug zu erkennen. Höchster getesteter Spannabstand 80 mm.</li> <li>- Höchster getesteter Spannabstand von 80mm liefert gute Nahtergebnisse.</li> </ul>

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-16
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

Parametervariation	Ziel	Ergebnisse/Erkenntnisse
Vorschub/Drehzahl (3 Variationen)	- Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit/ Drehzahl auf den Verzug	- Bei höherer Vorschubgeschw./Drehzahl größerer Verzug zu erkennen. - Bei Vorschub = 300 mm/min und Drehzahl = 2200 U/min FSW Naht nicht akzeptabel.
Spaltmaß (3 Variationen)	- Einfluss Spaltmaß auf den Verzug - Maximal zulässiger Spalt	- Kein signifikanter Einfluss des Spaltmaßes auf den Verzug zu erkennen. - Ab Spalt > 0,3 mm Naht nicht akzeptabel. Ausbildung von LOP bzw. Nahtoberflächen Fehlstellen/Tunnel. - Empfehlung: Toleranzsystem für Bauteile +/- 0,1 mm. Nomineller konstruktiver Spalt bei FSW Fügebauteilen s = 0,2 mm
Prozesskraft (3 Variationen)	- Erforderlich Prozesskraft	- Minimal erforderliche Prozesskraft >= 5 kN. Bei 2024 T3 der Blechdicke t = 3 mm Fehler auf Nahtoberseite bei Prozesskraft < 5 kN.

**Tabelle 5-1: Ergebnisse Couponversuchsprogramm**

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-17
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

## **5.2.2 AP10.2 Distorsion Engineering – Analyse der Verzugsergebnisse**

### **5.2.2.1 Einleitung**

In diesem Arbeitspaket wurde eine numerische Simulation (Finite-Elemente-Methode) des FSW entwickelt, die insbesondere die Vorhersage von Bauteilverzug zum Ziel hatte. Um einen Vergleich der Ergebnisse mit Versuchsdaten und schließlich eine Validierung der Simulation zu ermöglichen, wurde als Inhalt der Simulation eine typische Coupon-Probe ausgewählt. Dies bot zusätzlich den Vorteil, die Simulation am Anfang der Entwicklung in ihrer Komplexität zu begrenzen.

Wesentlich für die Implementierung der Simulation und die Erzeugung von konkreten Ergebnissen ist die Kenntnis der Randbedingungen. Als wichtigste sind dabei die Temperaturverteilung und der Wärmehaushalt des FSW zu nennen. Versuche und Messungen zur Bestimmung der für die Simulation relevanten Randbedingungen wurden parallel zur eigentlichen Entwicklung der Simulation durchgeführt und hier ebenfalls beschrieben.

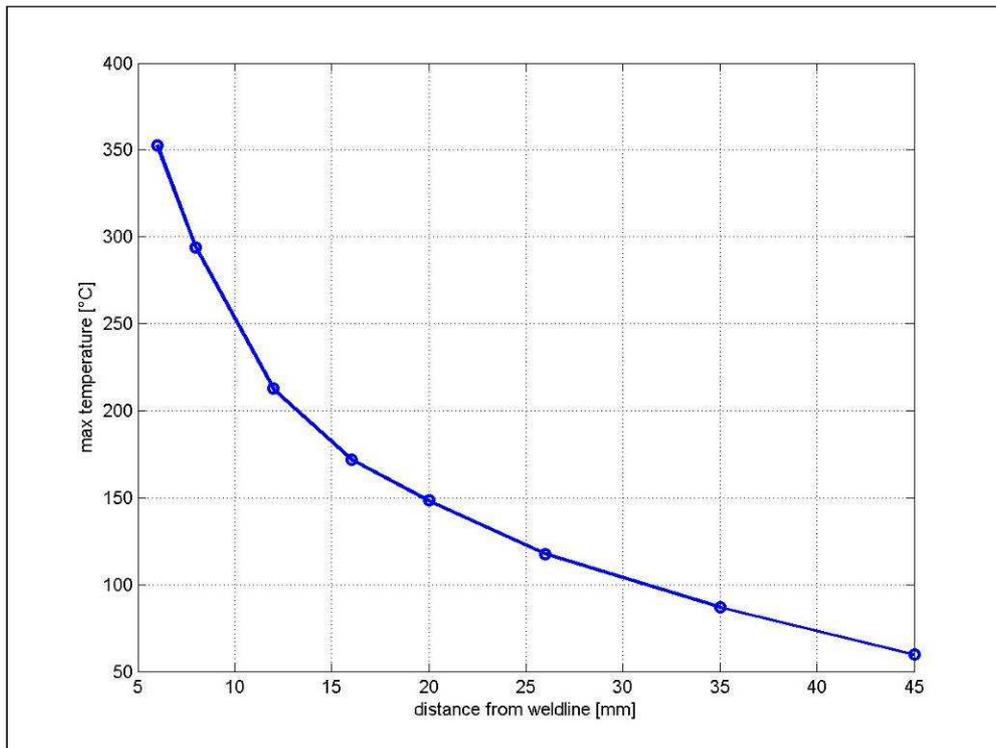
### **5.2.2.2 Experimentelle Bestimmung des Temperaturfeldes**

Wesentlicher Faktor für den Bauteilverzug, sind die Thermalspannungen, welche sich durch das veränderliche Temperaturfeld ergeben, das durch das FSW im Bauteil erzeugt wird. Zur taktilen Temperaturmessung wurden Thermoelemente vom Typ K aufgrund ihrer guten Verfügbarkeit, geringen Kosten, robusten Anwendbarkeit und geeignetem Messbereich gewählt. Die Kontaktierung mit dem Bauteil erfolgte durch Einbetten der Thermoelementspitze in eine Bohrung im Bauteil mit einem hochtemperaturbeständigen Keramikklebstoff. Die Temperaturverteilung über die Dicke der Bauteile kann aufgrund ihrer geringen Stärke von 3 mm vernachlässigt werden. In einer Messreihe wurden 5 Schweißungen mit instrumentierten Proben mit je 8 bzw. 16 Thermoelementen durchgeführt, um insbesondere den lateralen Gradienten des stationären Temperaturfeldes zu ermitteln. Als Schweißparameter kamen die in Tabelle 5-2 gezeigten Werte zur Anwendung. Als Ergebnis ergibt sich die (maximale) Temperatur im Abstand von der Schweißnaht, wie in Abbildung 5-2 gezeigt.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-18
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

Werkzeug	
Anstellwinkel	2 °
Schulterdurchmesser	12 mm
Pindurchmesser	5 mm
Pinnlänge	3,4 mm
Pinauszug	2,9 mm
Vorschubgeschwindigkeit	200 mm min <sup>-1</sup>
Drehzahl	1200 min <sup>-1</sup>
Vertikalkraft	6 kN
Spalt	0,2 mm

**Tabelle 5-2: Parameter für Temperaturmessung**



**Abbildung 5-2: Maximaltemperatur im Abstand zur Schweißnaht**

### 5.2.2.3 Simulation: Beschreibung

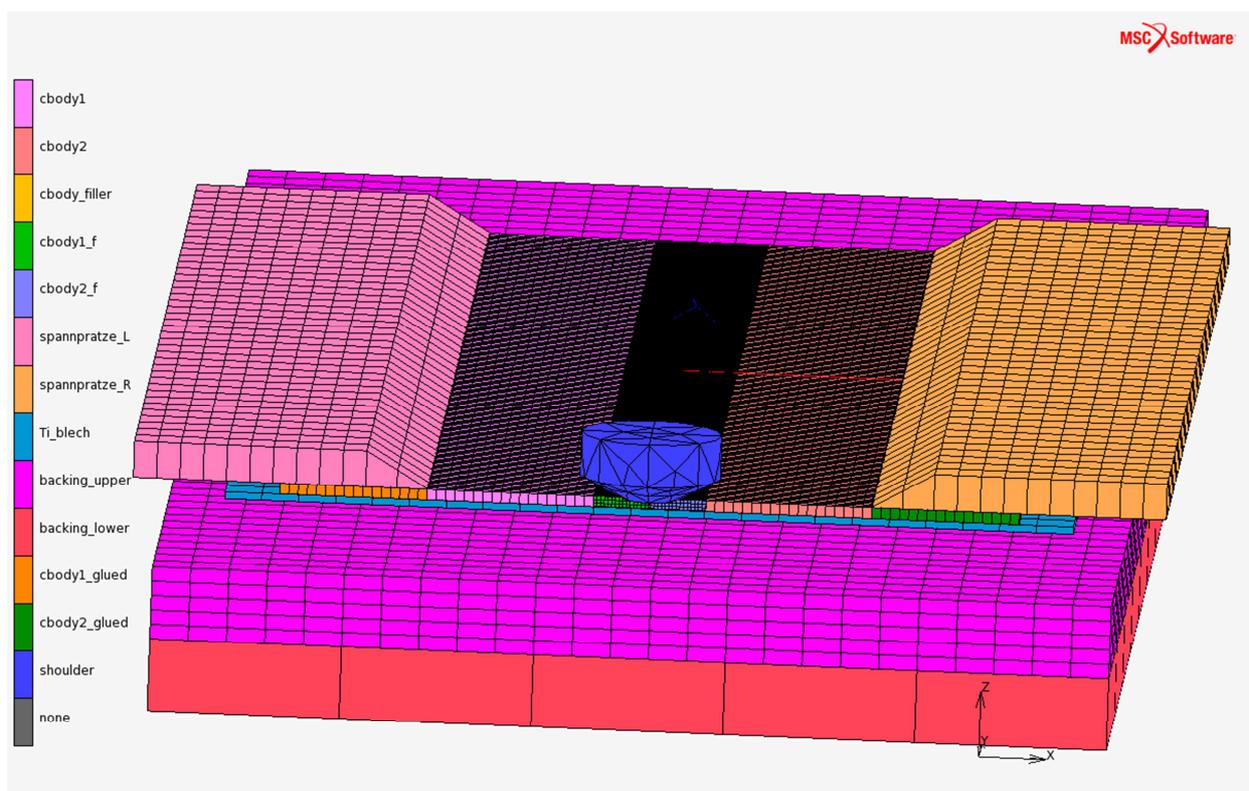
Zur Durchführung des Simulationsvorhabens wurde das Programmpaket Marc/Mentat von MSC Software in der Version 2012 genutzt. Die nichtlineare thermo-mechanische Analyse berücksichtigt nichtlineares Materialverhalten, thermale Vorgänge sowie die Kopplung mit dem mechanischen Verhalten (Wärmedehnung).

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-19
---------------------	----------------------	---	----------------

Das Modell umfasst nach mehreren Entwicklungsschritten eine Idealisierung der folgenden Komponenten größtenteils durch hexagonale Volumenelemente 1. Ordnung.

- Spanntisch
- Grundplatte / Backing
- Titan-Unterlegblech
- Werkstück
- Spanneisen
- Werkzeug (Schulter)

Die Netze der Komponenten sind dabei unabhängig und ihre Interaktion wird durch Kontaktbedingungen definiert.



**Abbildung 5-3: Vernetzung der Komponenten**

Der Schweißvorgang an sich wird durch die Kombination einer bewegten Wärmequelle und „Füll“-Elementen idealisiert. Letztere sind zunächst inaktiv und werden abhängig von der Position des Schweißpunktes aktiviert, um die zwei unabhängigen Netze der Bauteile (thermisch und mechanisch) zu verbinden.

Folgende Materialeigenschaften werden im Modell berücksichtigt:

- Elasto-plastisches Materialverhalten (für das Werkstück)
- Wärmedehnung (für das Werkstück)
- temperaturabhängige Wärmekapazität

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-20
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

	<h1>Forschungsprojekt</h1> <h2>NewTech</h2>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	---	--

- temperaturabhängige Wärmeleitung

Folgende thermische Randbedingungen werden in der Simulation angewendet:

- Bewegte Wärmequelle mit konstanter Leistung
- Wärmeabfuhr durch natürliche Konvektion an den Außenflächen
- Wärmeabfuhr über das Werkzeug (modelliert als Konvektion)

Kontaktbedingungen definieren die mechanische Interaktion der Bauteile untereinander.

Als weitere Zwischenbedingung sind von den Grundmaterialien abweichende Werte für die Wärmeübergänge zwischen den Komponenten bzw. Netzen festgelegt.

Das Werkzeug (nur Schulter) ist durch ein eigenes Netz repräsentiert, um einerseits eine Wärmeübertragung durch das Werkzeug zu erlauben und andererseits den mechanischen Effekt der Schulter auf das Werkstück abzubilden. Durch eine initiale leichte Durchdringung von Netzen der Schulter und des Werkstücks zusammen mit einer Kontaktbedingung, wird eine nahezu konstante vertikale Kraft eingestellt, die die Schulter während des Schweißens auf das Werkstück ausübt.

Die Simulation ist in drei Lastfälle aufgeteilt, um den Schweißprozess und den resultierenden Verzug simulieren zu können.

1. Lastfall: Dieser beinhaltet den Schweißvorgang mit bewegter Wärmequelle und Verbindung der Bleche mittels „Füll“-Elementen. Die gewählten Randbedingungen bilden die feste Einspannung der Bleche.
2. Lastfall: Wie auch im Versuch geschieht nach dem Schweißen eine Abkühlung ohne dass die Einspannung direkt gelöst wird.
3. Lastfall: Nach dem Abkühlen bzw. Vergleichsmäßigen der Temperatur werden im letzten Schritt alle Randbedingungen die die Einspannung repräsentieren aufgehoben. Das Werkstück kann dadurch die zuvor unterdrückten Verformungen ausbilden.

#### 5.2.2.4 Simulation: Anwendung

Mit dem entwickelten numerischen Modell wurden in verschiedenen Detaillierungsstufen Untersuchungen zum Einfluss der einzelnen Modellparameter gemacht, um die Sensitivität der Parameter auf die Simulationsergebnisse zu ermitteln und damit auch die Anforderungen an die Genauigkeit ihrer Werte zu bestimmen. Eine wichtige Erkenntnis war in diesem Zusammenhang die Bedeutung des Wärmeübergangs zwischen den Bauteilen, insbesondere zwischen dem Werkstück und der Unterlage. Es besteht ein großer Einfluss auf die Wärmeabfuhr und damit die Temperaturverteilung im Werkstück bei gleichzeitiger großer Schwierigkeit, genaue Werte zu definieren. Es sind nur wenig Daten aus zugänglichen Quellen verfügbar und die

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-21
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

Übergangskoeffizienten lassen sich nicht auf einfache Weise im Versuch bestimmen. Hinzu kommt eine starke Abhängigkeit von Parametern wie Kontaktdruck und Oberflächenbeschaffenheit.

Insgesamt wurde außerdem festgestellt, dass eine unzureichende Kenntnis des gesamten Energiehaushaltes der FSW-Prozesses besteht, die auch in der Literatur nicht vollständig bzw. eindeutig beantwortet werden. Weitere Versuche wurden durchgeführt, um bestehende Kenntnislücken zu schließen, auf die hier allerdings nicht näher eingegangen wird.

Im Weiteren wurden die Erkenntnisse über die Abhängigkeiten der Modellparameter dazu genutzt, eine Korrelation der Ergebnisse der Simulation mit den Versuchsergebnissen zu erreichen, wobei insbesondere die Übereinstimmung der Temperaturfelder angestrebt wurde. In Abbildung 5-4 ist das Ergebnis dieser Abstimmung dargestellt. Sie zeigt die Maximaltemperaturen von zwei Modellvarianten sowie aus Versuchen über die Werkstückbreite. Besonders nahe der Schweißnaht liegen die Simulationsergebnisse im Bereich der Genauigkeit der Messung. Zum Rand des Werkstücks weichen die Simulationsergebnisse etwas stärker von den Messwerten ab.

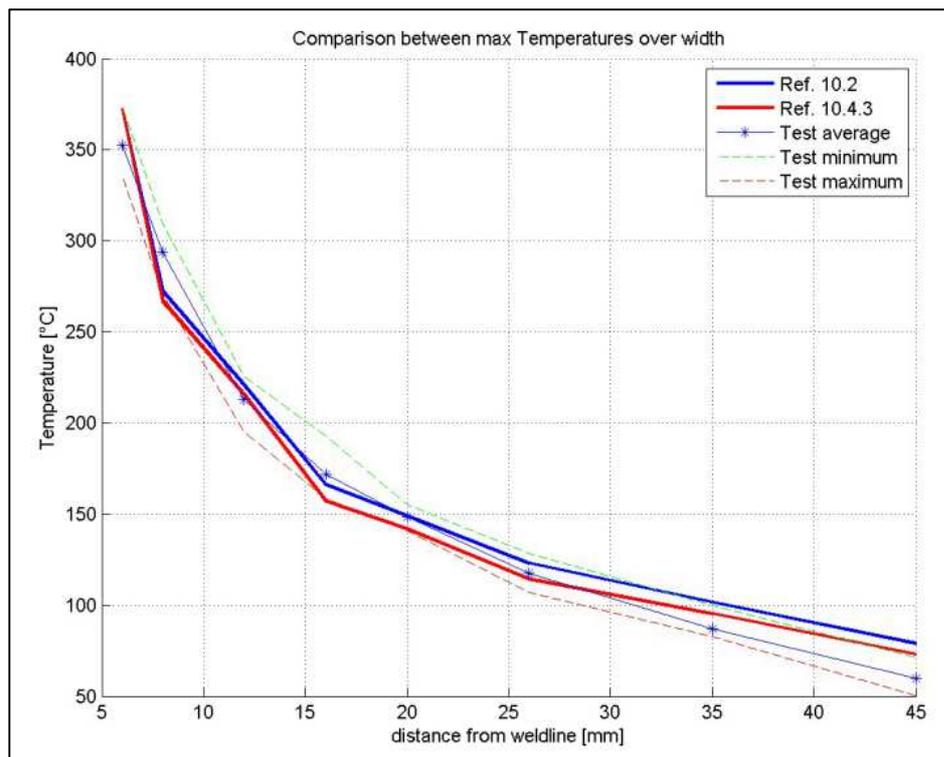


Abbildung 5-4: Maximaltemperatur über Werkstückbreite aus Simulation und Versuchen

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-22
---------------------	----------------------	---	----------------

Die Simulation wurde schließlich dazu genutzt, Verformungen (Verzug) sowie Eigenspannungen des Werkstücks durch den Schweißvorgang zu bestimmen. Bei Betrachtung der Verformung des Werkstücks zeigt sich grundsätzlich die aus Versuchen beobachtete Sattelform des Verzuges. Allerdings konnte die Simulation nicht die bei Versuchen/Proben beobachtete Quantität des Verzuges nachbilden und liefert Verformungen die um 2 Größenordnungen unterhalb der real beobachteten Werte liegen. In Abbildung 5-5 ist exemplarisch eine Auswertung von Eigenspannungen im Werkstück aus der Simulation gezeigt, wobei die für das FSW typische M-Form (Längseigenspannungen) zu erkennen ist. Die Quereigenspannung ist wie erwartet insignifikant gegenüber der Längseigenspannung. Die Ergebnisse wurden dazu genutzt um Anforderungen (Haltekräfte) für die Weiterentwicklung von Spannkonzepenten zu definieren.

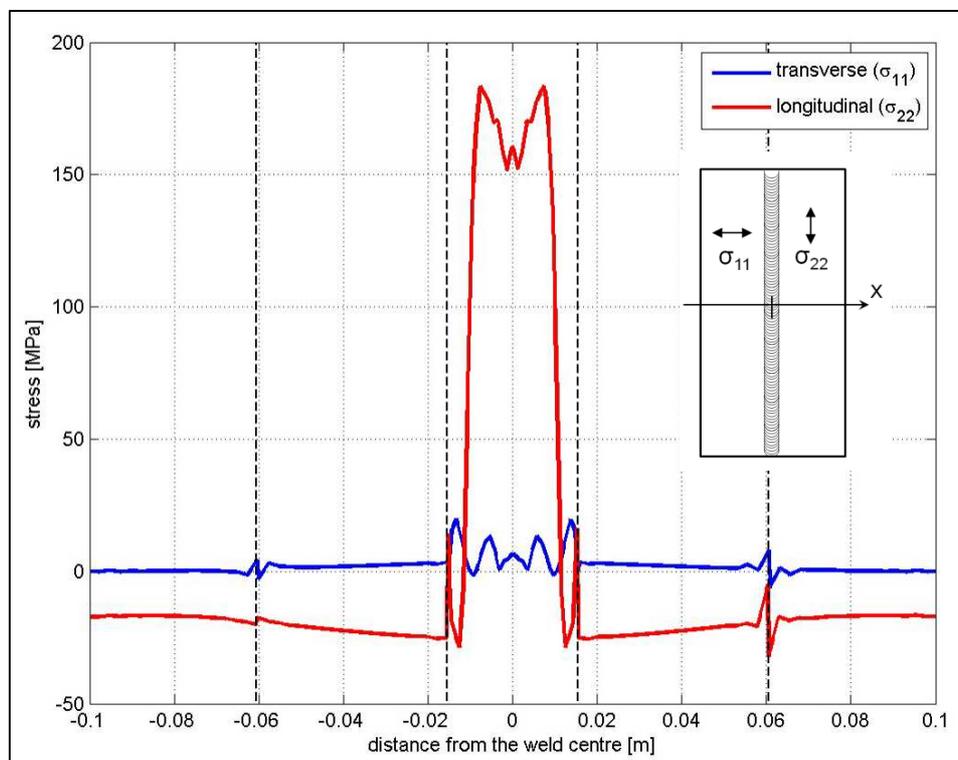


Abbildung 5-5: Quer- und Längseigenspannung über Werkstückbreite

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-23
---------------------	----------------------	---	----------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

#### 5.2.2.5 Zusammenfassung

Die aufgebaute numerische Simulation konnte die grundsätzliche Fähigkeit zur Abbildung des FSW mittels FEM zeigen. Es wurden Erkenntnisse bezüglich der für die Simulation wesentlichen Parameter gewonnen. Ein wichtiges Ergebnis war auch die Identifikation von Verständnisdefiziten zum FSW-Prozess selbst, insbesondere bezüglich dessen Energiehaushalt. Die Simulation lieferte verwertbare Ergebnisse zum Eigenspannungszustand des Werkstücks. Die Ergebnisse zur Verformung entsprechen qualitativ den Versuchen, es bestehen aber Abweichungen bei der Größenordnung. Da keine weiteren Ergebnisse aus der Simulation im Projekt benötigt wurden, wurde die Arbeit zu diesem Punkt in diesem Stand abgeschlossen.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-24
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

### **5.2.3 AP10.3 Herstellung von Verzugproben mittels FSW Technologie**

Siehe AP10.1.

### **5.2.4 AP10.4 Friction Plug Welding (FPW)**

Beim Rührreißschweißen entsteht beim Herausziehen des Werkzeugs am Nahtende ein Endloch, das bei umlaufenden Schweißnähten eine Fehlstelle im Übergang Nahtanfang-Nahtende darstellt. Eine Strategie zum Endlochschluss ist das Setzen eines Niets. In Fertigungsversuchen im Rahmen von ASSYMET wurde gezeigt, dass das Schließen des Endlochs durch einen Senk-Senk-Vollniet zu sehr guten Ergebnissen führt. Ein weiteres Verfahren wäre durch das Einschweißen eines Plugs durch Friction Plug Welding (FPW) in das Endloch gegeben. Über eine Beauftragung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München wurde eine Machbarkeitsprüfung zur Ermittlung von Arbeitsvoraussetzungen für das Friction Plug Welding (Ausführung als Schwungradreißschweißen, Prozess Nr. 42 entsprechend EN ISO 4063) an gelochten Aluminiumblechen durchgeführt. Ziele dieser Untersuchung waren die Festigkeitsanforderungen in der Schweißnaht zu erfüllen, die Prozesskräfte (Axialkraft, Moment bzw. Motorstrom) zu ermitteln und möglichst zu begrenzen und die geometrischen und werkstofflichen Anforderungen der Plug/Blech-Verbindung zu ermitteln. Dabei sollte die Entfestigung und das Abscheren des Aluminium-Plugs vermieden werden. Das weiterführende Ziel dieser Studie wäre die Entwicklung eines Konzepts für eine handgeführte Maschine, um die Zugänglichkeit an großen Baugruppen zu gewährleisten.

#### **5.2.4.1 Versuchsbedingungen**

Die Versuche wurden mit konturierten Rundstäben (Plug mit den Steigungen 1:10 und 1:5) und gebohrten Aluminiumblechen (Steigung 1:10) durchgeführt (vgl. Abbildung 5-6).

Versuchswerkstoffe: 2 Plug-Werkstoffe 10,0 mm (ENAW 2024, ENAW 7475)

Blechwerkstoff ENAW 2024, t = 3,0 mm

Reißschweißmaschine: H&W RSM 401 (vgl. Abbildung 5-8)

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-25
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

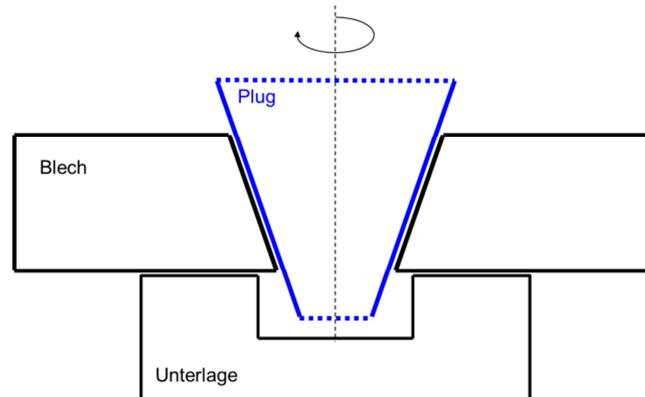


Abbildung 5-6: FSW-Endlochschluss durch Friction Plug Welding

Die Variation der Bohrungsgeometrie (Durchmesser, Winkel) erfolgte mit der beigeestellten Kegelreibahle (1:10). Dabei wurden Bohrungsdurchmesser von 6 mm und 8 mm erzeugt. Als Plug-Geometrie wurden die Steigungen 1:5 bzw. 1:10 verwendet. In Tabelle 5-3 sind für die durchgeführten Versuchsreihen die entsprechenden Werkstoffpaarungen und Geometrievariationen aufgelistet.

Probenummer	Blechwerkstoff	Plugwerkstoff	Bohrungsdurchmesser	Plugwinkel
0xx	ENAW 2024	ENAW 2024	8,0 mm	1:10
1xx	ENAW 2024	ENAW 2024	6,0 mm	1:10
2xx	ENAW 2024	ENAW 2024	8,0 mm	1:5
3xx	ENAW 2024	ENAW 2024	6,0 mm	1:5
4xx	ENAW 2024	ENAW 7475	8,0 mm	1:5

Tabelle 5-3: Versuchsserien mit entsprechenden Probennummern, Werkstoffpaarungen von Blech und Plug, Bohrungsdurchmesser und Plugwinkel

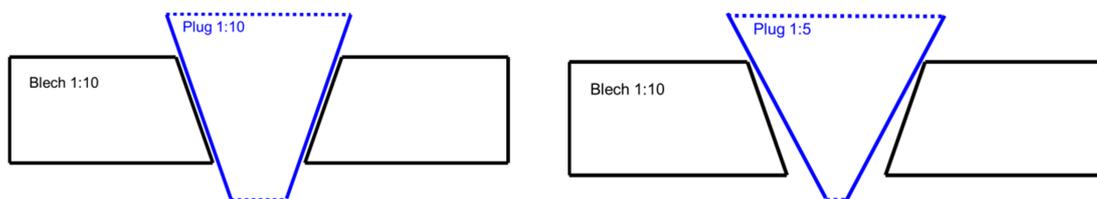


Abbildung 5-7: Schematische Darstellung der Kombination der Plug-Blech-Geometrien

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-26
---------------------	----------------------	---	----------------



Abbildung 5-8: Reibschweißmaschine H&W RSM 401

Das Friction Plug Welding wird als Schwungradreibschweißprozess (Abbildung 5-9) durchgeführt. Dabei wird der Plug relativ zum Blech in eine Drehbewegung versetzt. Der dabei ausgeübte Stauchdruck entspricht dem Reibdruck, durch welchen es zur Plastifizierung der Werkstoffe kommt. Die Reibzeit ergibt sich aus der eingestellten Drehzahl, dem Gesamtträgheitsmoment der Spindel (mit Antrieb) und dem Reibmoment in der Fügeebene. Das Gesamtträgheitsmoment =  $0,00499 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$  blieb in allen Versuchen konstant. Für die Versuchsserien 0xx – 4xx wurden Drehzahl und Stauchkraft in den Bereichen 6.000 - 15.000 1/min bzw. 0,6 – 9,0 kN variiert.

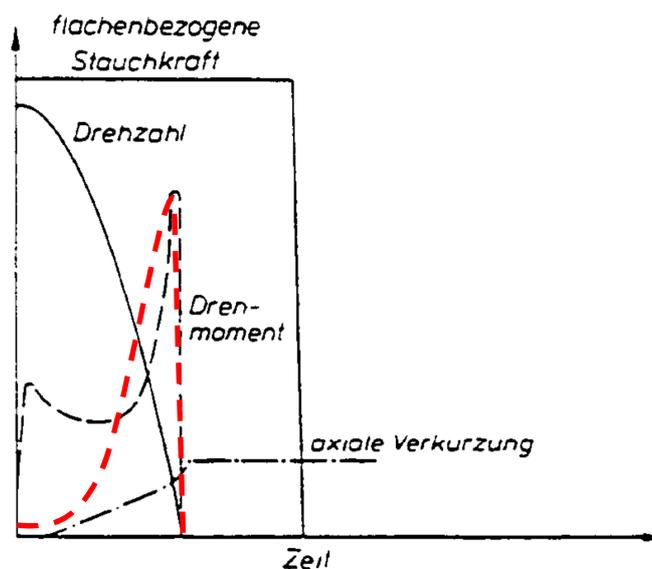


Abbildung 5-9: Zeitlicher Verlauf der Prozessgrößen beim Schwungradreibschweißen

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-27
---------------------	----------------------	---	----------------

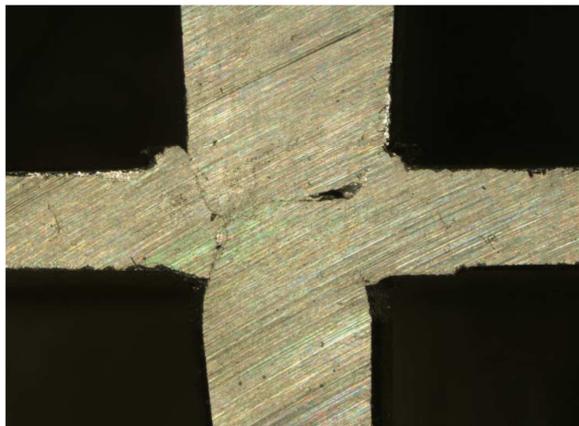
#### 5.2.4.2 Ergebnisse, Diskussion und Ausblick

Im Folgenden werden die essentiellen Ergebnisse, die sich aus den Versuchsreihen 0xx – 4xx ergeben haben, vorgestellt.

**1xx** (Blech: ENAW 2024, Plug: ENAW 2024, 6mm, 1:10)

Mit dem kleineren Bohrungsdurchmesser von 6,0 mm kommt es zum Abscheren des Plugs. Ein Herabsetzen der Reibungswärme durch Begrenzung der Reibkraft auf mindestens 600 N und durch eine systematische Drehzahlreduzierung von 15.000 auf 9.000 1/min führte weiterhin zum Abscheren des Plugs in der Blechebene (vgl. Abbildung 5-10).

Eine weitere Möglichkeit der Entfestigung des Plugs entgegenzuwirken, ist eine Verringerung der Reibzeit. Dazu wird bei geringer Reibdrehzahl der Druck erhöht. Dadurch steigt das Reibmoment in der Fügeebene. Die Eigenbremsung vergrößert sich und der Reibprozess verkürzt sich. Trotz dieser Maßnahme kam es weiterhin zum Abscheren des Plugs.



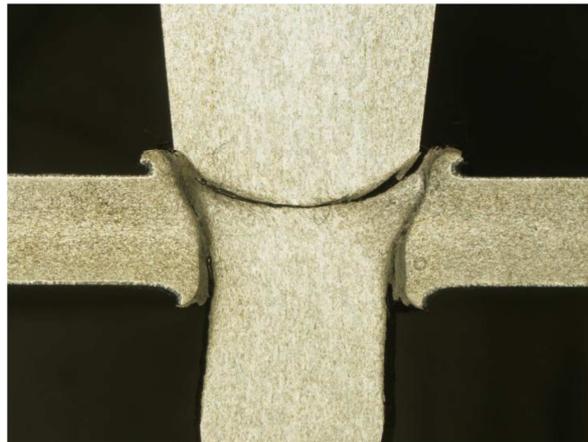
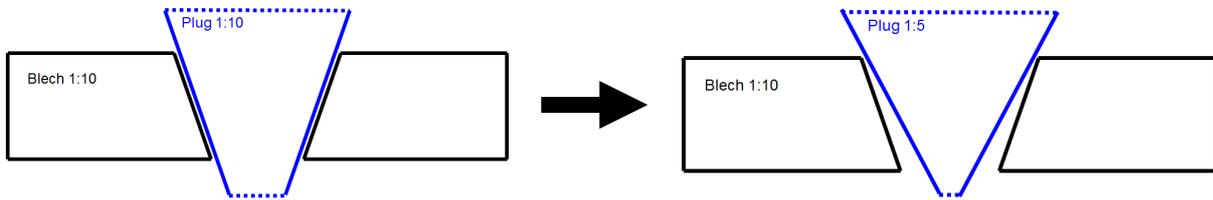
**Abbildung 5-10: Makroschliff der Reibschweißverbindung 103 (9000 1/min, 600N)**

**3xx** (Blech: ENAW 2024, Plug: ENAW 2024, 6mm, 1:5)

Auch durch eine Zunahme der Plugsteigung von 1:10 auf 1:5 verbessert sich das Schweißergebnis nicht (vgl. Abbildung 5-11). Der Querschnitt in der Blechebene ist zu gering bzw. die Entfestigung durch die Reibungswärme zu groß, so dass es nicht möglich ist das Reibmoment prozesssicher in die Fügeebene zu übertragen.

Mögliche Gegenmaßnahmen:

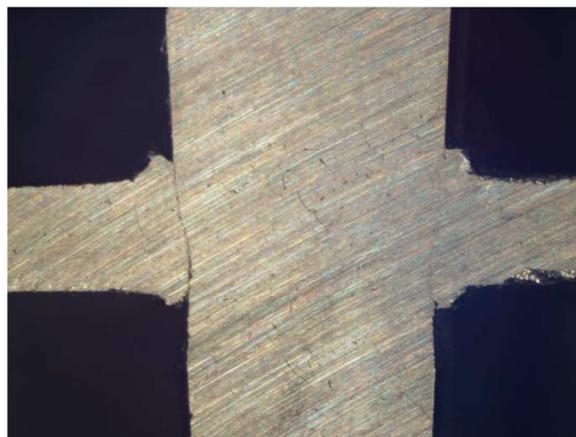
- größerer Bohrungsdurchmesser
- variable Pluggeometrie
- warmfesterer Plugwerkstoff



**Abbildung 5-11: Geätzter Makroschliff der Reibschweißverbindung 302 (10000 1/min, 1800N)**

**0xx** (Blech: ENAW 2024, Plug: ENAW 2024, 8mm, 1:10)

In der Probenserie 0xx wurde ein Bohrungsdurchmesser von 8,0 mm verwendet. Dabei wurde mit der Pluggeometrie 1:10 zu wenig Wärme in die Reibebene eingetragen und die Verbindung ist nicht fehlerfrei (vgl. Abbildung 5-12).



**Abbildung 5-12: Makroschliff der Reibschweißverbindung 001 (12000 1/min, Reibkraft: 600N, Stauchkraft: 1500N)**

**2xx** (Blech: ENAW 2024, Plug: ENAW 2024, 8mm, 1:5)

Eine Verbesserung des Schweißergebnisses kommt durch die steilere Pluggeometrie auf 1:5 zustande. Bei kurzer Reibzeit und einer Axialkraft von über 4.500 N ist die Verbindung im Querschliff vor dem Ätzen ohne erkennbare Fehler (Probe 205). Abbildung 5-13 zeigt den Makroschliff der Reibschweißverbindung. Der Reibschweißwulst an der Blechober- und -unterseite bildet sich durch das plastisch verdrängte Werkstoffvolumen durch Einreiben des Plugs. Die in Abbildung 5-13 dargestellte Steigung des Plugs liegt bei 1:5. Gegenüber der flacheren Steigung von 1:10 (0xx) ist der Wärmeeintrag deutlich besser. Die Fügeebene ist fast fehlerfrei.



**Abbildung 5-13: Geätzter Makroschliff der Reibschweißverbindung 205 (12000 1/min, 5500 N)**

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-30
---------------------	----------------------	---	----------------

**4xx** (Blech: ENAW 2024, Plug: **ENAW 7475**, 8mm, 1:5)

Als zweiter Plugwerkstoff zur Verbesserung der Verbindungseigenschaften wurde der Aluminiumwerkstoff ENAW 7475 untersucht. Dabei wurde aufgrund der besseren Ergebnisse mit der Steigung 1:5 bei dem Plugwerkstoff ENAW 2024 dieselbe Steigung verwendet. Bereits bei einem niedrigen Reibkraftniveau von 1.500 N, Reibdrehzahl von 12.000 1/min und einer Reibzeit (eff.) von 0,26 s zeigt der Makroschliff keine Fehler. In Abbildung 5-14 ist die Probe 404 dargestellt bei der die Reibzeit durch Erhöhung der Stauchkraft auf 6000 N nur noch 0,20 s beträgt.



**Abbildung 5-14: Geätzter Makroschliff der Reibschweißverbindung 404 (12000 1/min, 6000 N)**

Härteprofile an den Proben 205 und 404 längs und quer zur Reibschweißverbindung sind in Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 dargestellt. Die FPW-Schweißung 404 (Abbildung 5-14) zeichnet sich durch eine Zunahme der Härte längs zur Reibschweißverbindung aus, was mit dem härteren Plugwerkstoff zusammenhängt. Probe 205 (Abbildung 5-13) zeigt entsprechend dazu beim Übergang zum Plugmaterial erhöhte Härtewerte, was mit Oxideinschlüssen zusammenhängen könnte.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-31
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

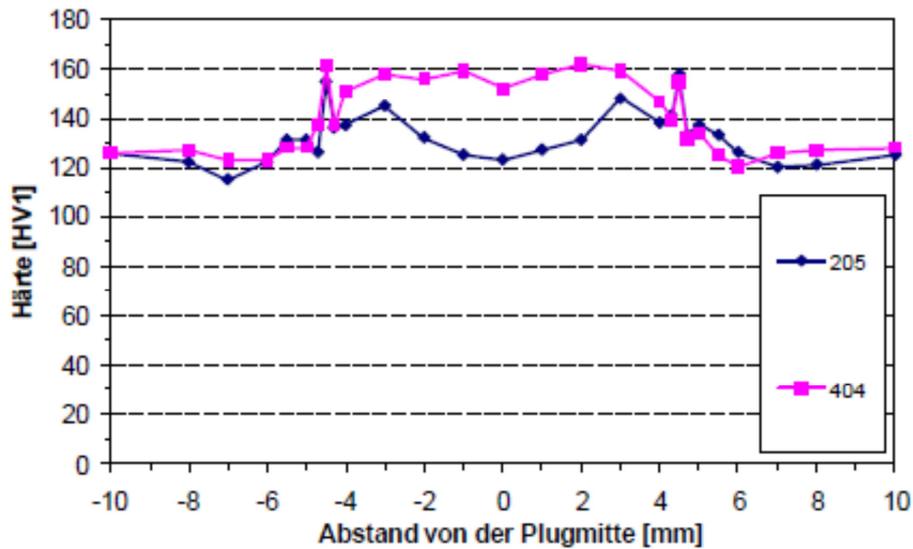


Abbildung 5-15: Härteverläufe längs zur Reibschweißverbindungen.

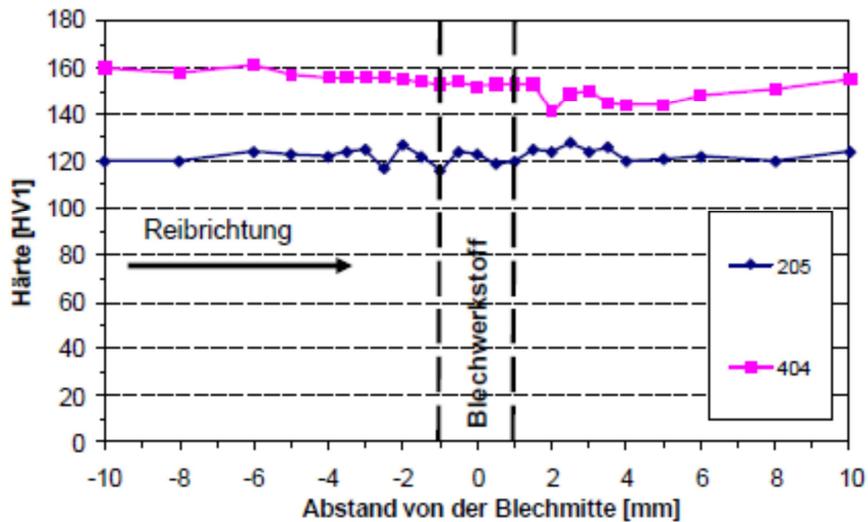


Abbildung 5-16: Härteverläufe quer zur Reibschweißverbindung

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

Allgemein haben die Versuche gezeigt, dass das Friction Plug Welding als Schwungradprozess geeignet ist, um gelochte Aluminiumbleche mit einem Plug zu fügen. Die besten Ergebnisse wurden dabei mit dem Bohrungsdurchmesser von 8 mm (keine Entfestigung des Plugs), der Plugsteigung 1:5 (optimierter Wärmeeintrag nicht über die gesamte Blechquerschnittsfläche) und dem Plugwerkstoff ENAW 7475 (festeres Material) erlangt. Somit konnten die geometrischen und werkstofflichen Anforderungen der Plug/Blech-Verbindung ermittelt werden.

Die Festigkeitsanforderungen konnten ebenfalls erfüllt werden. Die Härteprofile zeigen für das härtere Plugmaterial ENAW 7475 höhere Werte und auch für ENAW 2024 wurde keine starke Verminderung der Härte festgestellt. Ein Grund hierfür dürfte das „Durchschieben“ des Plugs sein, d.h. entfestigter Aluminiumwerkstoff wird beim Einschweißen des Plugs durch das Blech geschoben.

Die Parametervariation hat gezeigt, dass bei den jeweiligen Versuchsreihen (0xx-4xx) die besten Ergebnisse erzielt wurden, wenn der Schweißprozess schnell durchgeführt wurde, d.h. bei niedrigen Reibdrehzahlen und hohen Kräften. So soll bei ausreichendem Wärmeeintrag eine Entfestigung des Aluminiums verhindert werden.

Zur Umsetzung des FPW an Schalenelementen ist eine Abstützung des Blechwerkstoffes im Bereich der Fügeebene notwendig. Die angestrebten niedrigen Reibkräfte um eine handgeführte Anlage in die Praxis umzusetzen konnten nicht verwirklicht werden.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-33
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

### 5.2.5 AP10.5 Prozesssicherheit

Im Rahmen der durchgeführten Couponversuche und einer FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) wurden die kritischen Parameter definiert, welche durch eine Prozessüberwachung kontinuierlich überwacht werden sollen.

Überwacht werden folgende Prozessparameter:

- Drehzahl
- Drehmoment
- Prozesskraft
- Vorschubgeschwindigkeit

Sowie deren abgeleitete Größen:

- Leistung (Drehzahl x Drehmoment)
- Pitch (Vorschub / Umdrehung)
- Leistung / Pitch

Hierzu wurde ein PC gestütztes System entwickelt, welches alle wichtigen Prozessparameter während des Schweißprozesses aufzeichnet/überwacht und in einem Prüfprotokoll dokumentiert. In Abbildung 5-17 ist schematisch der Informationsfluss zur Prozessüberwachung an der RUAG FSW-Roboteranlage im Zusammenspiel mit dem Informationsfluss in einem Serienproduktionsumfeld dargestellt.

Über einen Arbeitsauftrag werden die Vorgabewerte

- Drehzahl
- Prozesskraftkraft
- NC-Programm (Bahn und Vorschubgeschwindigkeit)

sowie die Grenzwerte für die zu überwachenden Parameter gestellt.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-34
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

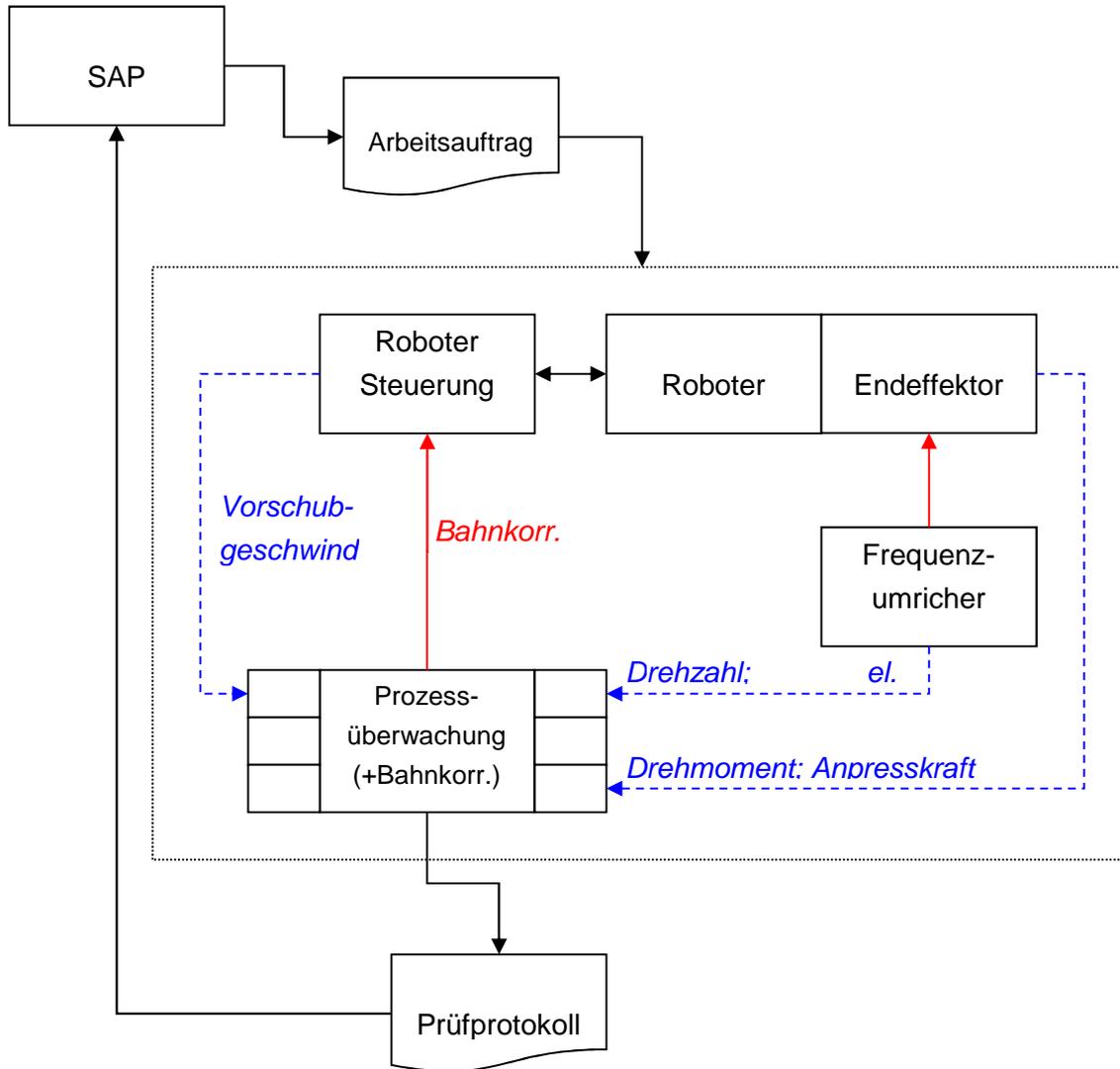


Abbildung 5-17: Informationsfluss zur Prozessüberwachung

### Messtechnik

*Ergebnisse aus Vertraulichkeitsgründen entfernt.*

### Messgenauigkeit

*Ergebnisse aus Vertraulichkeitsgründen entfernt.*

### Software Nutzeroberfläche und Protokoll

Alle Messwerte werden während dem Schweißprozess graphisch dargestellt und die definierten Warnungs- / Fehlergrenzen angezeigt. Die Software verlangt nach einer Laufkarten- und einer Bauteilnummer. Diese werden zusammen mit den Messdaten und den definierten Grenzen in eine Excel-Datei exportiert. Diese Datei wird für jede Schweißnaht archiviert und kann zum Nachweis der Qualität herangezogen werden.

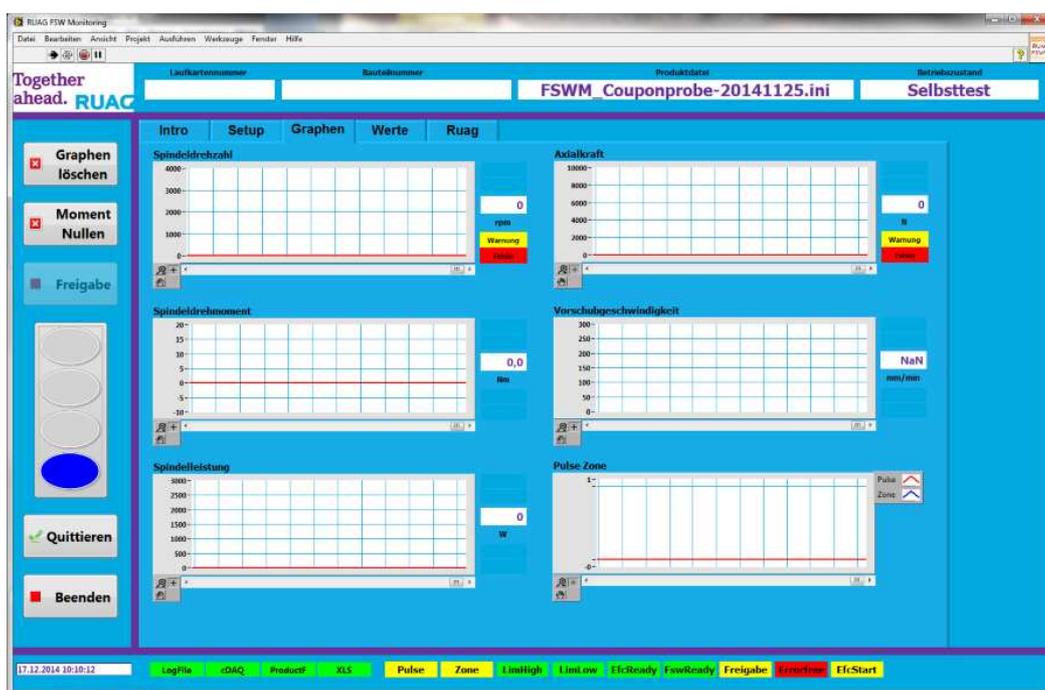


Abbildung 5-18: Graphische Benutzeroberfläche der Software

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-36
---------------------	----------------------	---	----------------

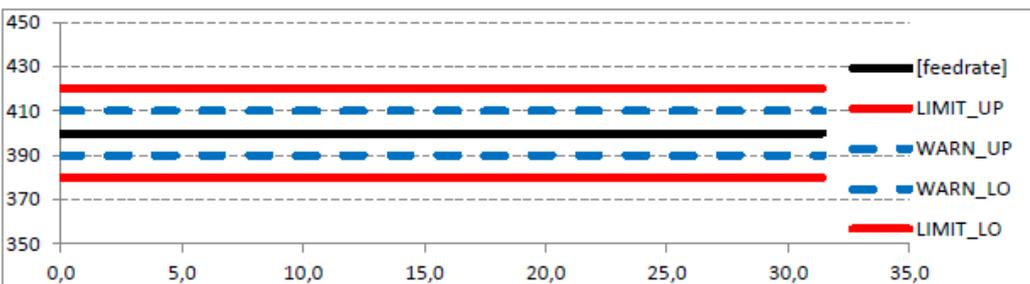
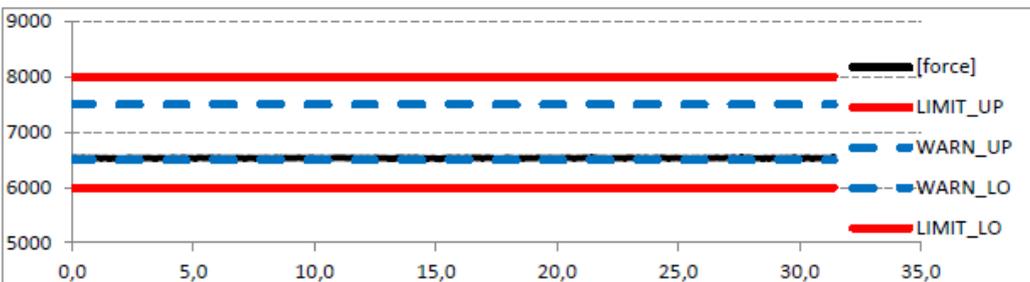
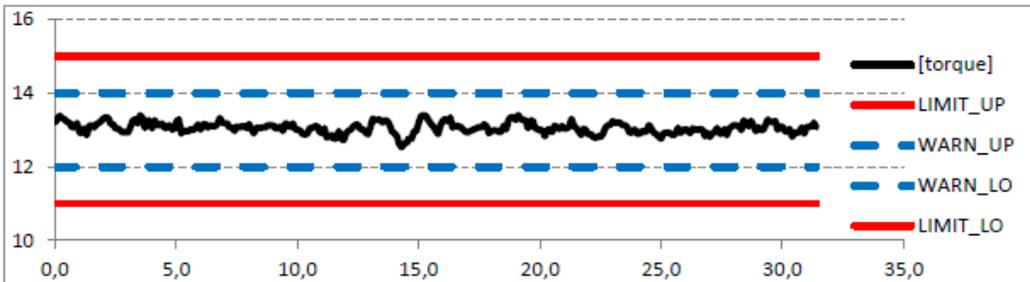
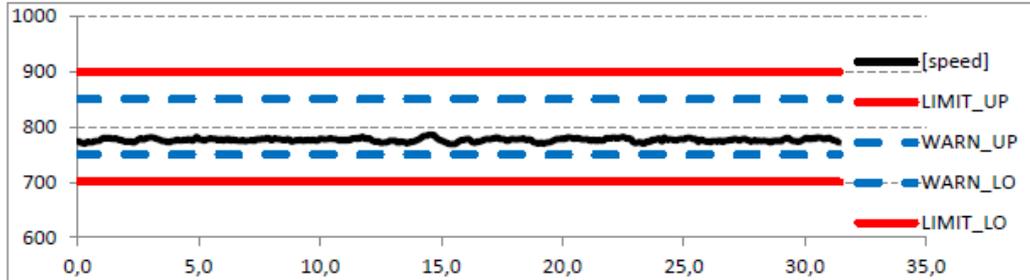
FSW - Prozessüberwachung

gem. AA-xxx-xxx

Laufkarte 222222

Bauteil d555-66566-555

Together  
ahead. **RUAG**



speed Spindeldrehzahl 1/min  
torque Spindelmoment Nm  
force Axialkraft N  
feedrate Vorschubgeschwindigkeit mm/min

Abbildung 5-19: Protokolldatei

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-37
---------------------	----------------------	---	----------------

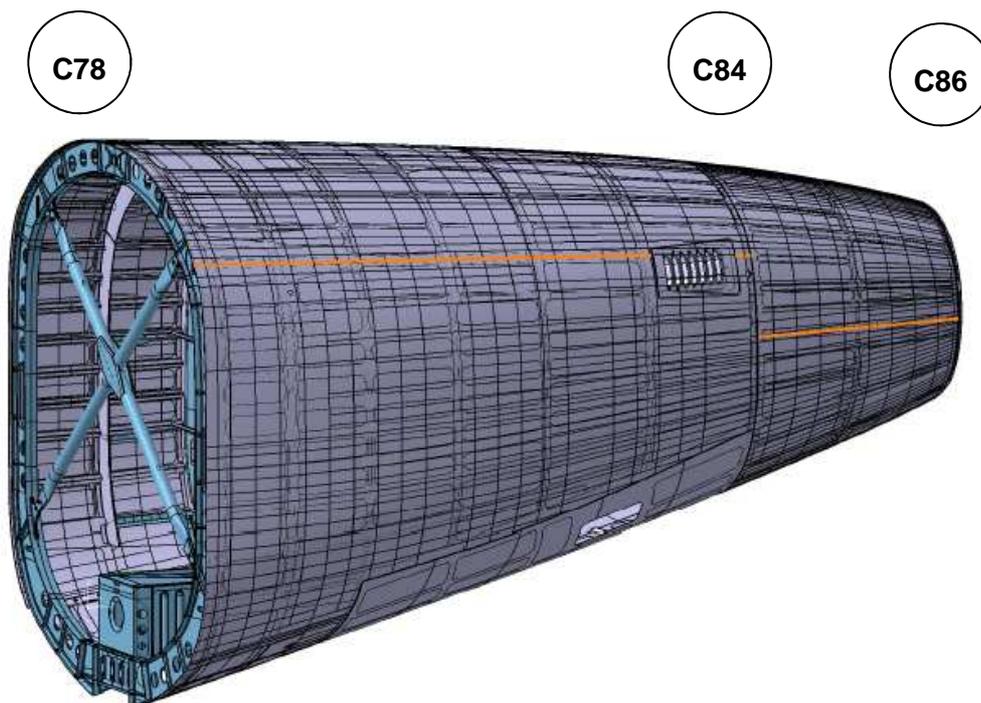
### 5.3 TA20 Komponenten

Im Rahmen von NEWTECH wurden zwei potenzielle Strukturen, welche bei der RUAG in Oberpfaffenhofen gefertigt werden für den Rührreißschweißprozess untersucht.

#### Sektion 19.1 der Airbus A320 Familie

Die Sektion 19.1 besteht zwischen den Spantpositionen jeweils aus 3 bzw. 2 Schalen. Zwischen Spant C78 und C84 bilden 3 Schalen eine nach unten offene Struktur. Die Öffnung wird vom Ansaugschacht der APU sowie den Wartungstüren des Triebwerksraumes geschlossen. Zwischen C84 und C86 bilden 2 Halbschalen eine geschlossene Hülle.

Die Länge einer FSW Längsnaht beträgt ca. 2400 mm zwischen C78 und C84 und 900 mm zwischen C84 und C86. Alle Längsnahte sind stark sphärisch gekrümmt.



**Abbildung 5-20: A320 Sektion 19.1 und deren Längsnahte**

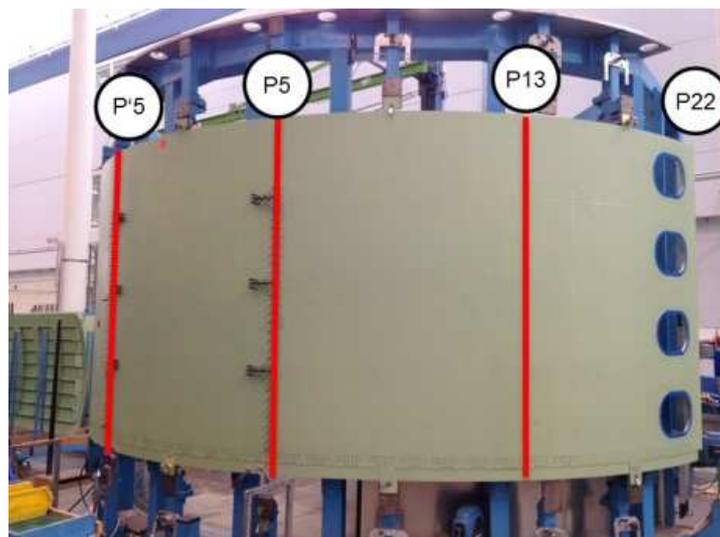
Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-38
---------------------	----------------------	---	----------------

Sektion 14a der Airbus A330/A340

Die Sektion 14a der A330/A340 wird aus Teilschalen und Einzelteilen gefügt. Geliefert wird die Sektion wegen ihrer Größe in zwei Halbtonnen. Die obere Hälfte besteht aus fünf Schalen und beinhaltet vier Längsnähte mit einer Länge von ca. 2400 mm. Die 4 Längsnähte an den Stringerpositionen P5 und P13 (spiegelgleich P'5 und P'13), welche jeweils durch eine FSW Längsnaht substituiert werden sollen, werden heute mit 3 Nietreihen (Aluminium-Vollniete) gefügt.



**Abbildung 5-21: Sektion 14A Oberschale**



**Abbildung 5-22: Längsnähte in der Sektion 14a Oberschale**

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-39
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

### 5.3.1 AP20.1 Kostenanalyse

Durch eine Vorbetrachtung verschiedener FSW-Anlagenkonzepte und den Anforderungen bei RUAG ist die Entscheidung für eine flexible Roboterzelle gefallen. Hierzu wurden auch Steifigkeitsanalysen an ABB und KUKA Robotern gemacht um eine Kaufentscheidung zu unterstützen (siehe Kapitel 5.4.3.2). Das aktuelle Konzept sieht die Kombination des FSW-Prozesses und des Bohr/Niet-Prozesses in einer Zelle vor. Die dabei erreichbare Auslastung der Anlage ist notwendig, um in einen Bereich der Wirtschaftlichkeit für einen FSW-Prozess zu kommen.

Auf dieser Basis wurde für die beiden untersuchten Komponenten Sektion 19.1 der Airbus A320 Familie und Sektion 14a der Airbus A330/A340 eine Kostenbetrachtung für eine FSW Fügeanwendung durchgeführt. Für die Kostenanalyse wurden dabei grundsätzlich folgende Kostenpunkte berücksichtigt welche sich in NRC und RC unterscheiden lassen.

#### NRC:

1. Re-Design der Bauteile angepasst an den FSW-Prozess
2. Neu an den FSW-Prozess angepasste Vorrichtungen
3. Oberflächenvorbehandlung
4. Schweißanlage (Roboter) für FSW
5. NDT-Prüfverfahren
6. Anlagen/Infrastruktur für den Oberflächenschutz

#### RC:

1. Einzelteilkosten neu bewerten  
(Geänderte Rohmaterialabmessungen, neue Toleranzanforderungen)
2. Bearbeitungszeit zum Vorbereitung der Schweißzone an den Bauteilen  
(Oxidschicht entfernen)
3. Zeit des FSW-Prozesses an sich inkl. Rüstzeiten
4. NDT-Verfahren zur Qualitätssicherung
5. Zeit für den Oberflächenschutz (Schleifen, Lackieren)

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-40
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

### 5.3.1.1 Sektion 19.1 der Airbus A320 Familie

Die Kostenanalyse wurde für die Baugruppe C84-C86 durchgeführt und unterteilt sich in die folgenden Blöcke:



**Abbildung 5-23: Blockdiagramm**

*Ergebnisse aus Vertraulichkeitsgründen entfernt.*

### 5.3.1.2 Sektion 14a der Airbus A330/A340

*Ergebnisse aus Vertraulichkeitsgründen entfernt.*

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

### 5.3.2 AP20.2 Toleranzsystem

Aus den Couponversuchen im Rahmen des vorhergehenden Forschungsprojekts ASSYMET ergab sich eine Obergrenze für den Fügespalt von 0,3 mm.

Mit den derzeitigen Einzelteil- und Positioniertoleranzen ist dieses Spaltmaß nicht sicherzustellen. Ziel ist es die Bauteile mit einer Toleranz von +/-0,1 mm unmittelbar vor dem FSW-Prozess zu beranden. Um die Toleranz zum Positionieren der Bauteile zu eliminieren, ist ein Beranden in der Spannvorrichtung vorgesehen.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Industrieroboter aufgrund der relativ geringen Anlagensteifigkeit nicht in diesen engen Toleranzen arbeiten kann. Es kann jedoch durch geeignete konstruktive Hilfsmittel in der Spannvorrichtung die notwendige Genauigkeit erreicht werden.

Durch einige Berandungsversuche auf Coupon- sowie der Bauteilebene mit dem Roboter (wie z.B. beim FSW Validator S14a) konnte das lokale Berandungskonzept erfolgreich umgesetzt und verifiziert werden.

### 5.3.3 AP20.3 Bauweise / Neue Konzepte

Siehe AP30.2.

### 5.3.4 AP20.4 Design / Simulation

Die Ergebnisse der FSW-Simulation sind im AP10.2 beschrieben.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-42
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

### 5.3.5 AP20.5 Qualitätssicherung

AP20.5 behandelte das Thema der Qualitätssicherung für den FSW-Prozess. Ziel war es zum einen den Prozess der Qualitätssicherung zu definieren und die dafür notwendigen Dokumente zu erstellen. Zum anderen sollte eine „Failure Mode and Effect Analysis“ (FMEA) durchgeführt werden, indem typische Fehler hinsichtlich ihrer Bedeutung, Auftretenswahrscheinlichkeit und ihrer Entdeckungswahrscheinlichkeit bewertet werden.

Zunächst werden zur Veranschaulichung des Qualitätssicherungsprozesses die einzelnen Stufen einer Qualifizierung in Abbildung 5-24 gezeigt. In der Produktspezifikation sind die für das Bauteil geltenden Anforderungen definiert. Aus diesen Anforderungen ergibt sich die Parameterstudie, die aus Schweißversuchen mit entsprechenden Qualitätsprüfverfahren besteht. Dabei werden Prüfungen wie Sichtprüfung, Biege- und Zugversuche zum Nachweis der Festigkeitsanforderungen und Schliffprobenpräparationen zur Identifikation von Fehlstellen im Inneren der Schweißnaht durchgeführt. Nachdem die technischen Anforderungen umsetzbar sind und die Parameter validiert wurden, kann eine Prozessqualifikation gemäß DIN EN ISO 25293-4 durchgeführt werden. Anschließend ist eine Übernahme des Prozesses in die Serienproduktion möglich. In der Serienproduktion werden die Parameter Drehzahl, Drehmoment, Vorschubgeschwindigkeit und Prozesskraft bei jedem Schweißvorgang überwacht (vgl. Kapitel 5.2.5). Zusätzlich erfolgt die Prüfung der Bauteile durch definierte Prüfverfahren in einem festgelegten Prüfumfang. Tabelle 5-4 zeigt eine Übersicht aller angewendeten Prüfverfahren und zu detektierenden Fehler mit Verweis auf die entsprechende Norm. Durch die Lost-Backing-Nahtgeometrie, welche das Risiko von LOPs minimiert (vgl. Kapitel 5.4.2.1), soll auf NDT-Verfahren, wie die Ultraschallprüfung verzichtet werden können.

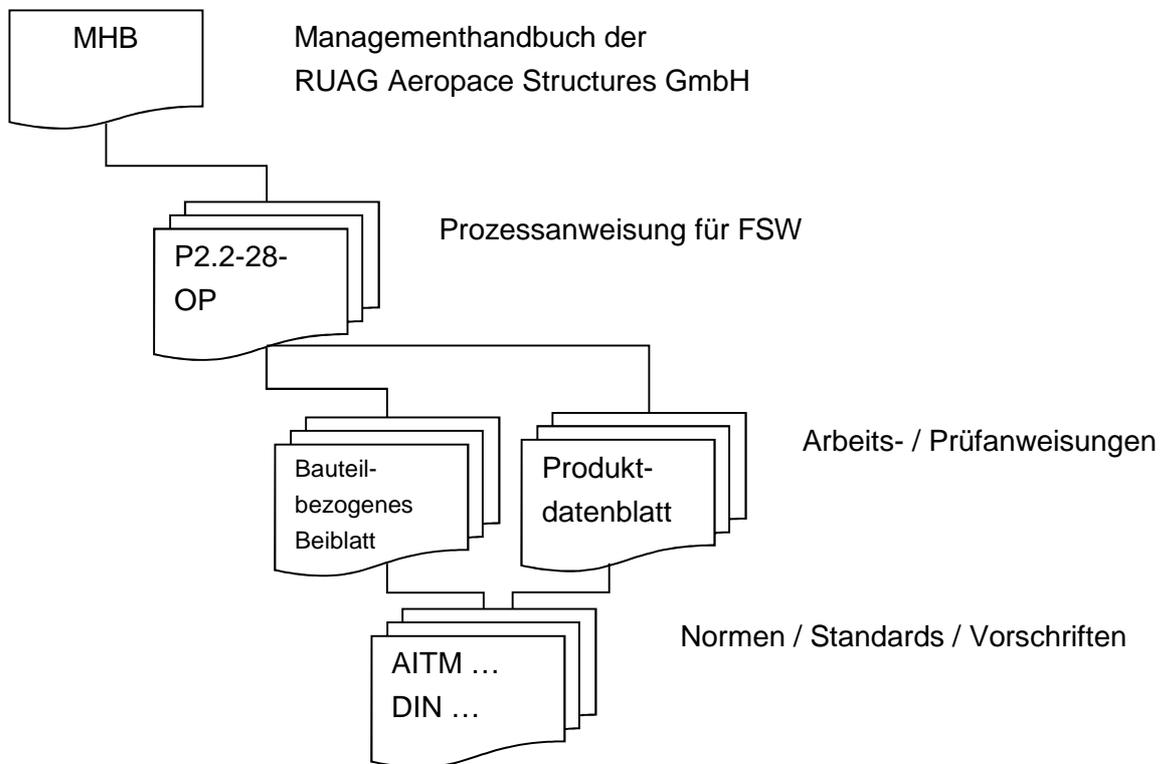


**Abbildung 5-24: Schematische Darstellung des Qualifizierungsprozesses**

Prüfmethode	Fehlertyp	Norm
Sichtprüfung	Oberflächenfehler, Rauigkeit, Welligkeit	n/a
Zugprüfung	Festigkeitsabnahme	DIN EN 2002-001
Biegeprüfung	Risse	DIN EN ISO 5173
Makroskopische Untersuchung	Risse, Lunker, LOPs	OA-RCOE-28

**Tabelle 5-4: Übersicht der Prüfverfahren**

Die für den FSW-Prozess notwendigen Dokumente sind in Abbildung 5-25 in der entsprechenden Abfolge dargestellt. Die FSW-Prozessanweisung erfüllt zusammen mit den untergeordneten Dokumenten die Anforderungen der DIN EN ISO 25239-4 (März 2012) für die Qualifizierung von Schweißverfahren. Dabei sind in dem Produktdatenblatt die technischen Anforderungen für das FSW-Bauteil definiert. In dem sogenannten bauteilbezogenen Beiblatt (BBBL) werden konkrete bauteilspezifische Angaben zum Rührreißschweißprozess gemacht. Daraus können pro Bauteil die Informationen zu Werkstoff, Werkzeug, Spannvorrichtung, Verbindungsgeometrie und Prozessparameter entnommen werden. Die anzuwendenden Vorschriften der Prüfverfahren sind im BBBL und im Produktdatenblatt angegeben.



**Abbildung 5-25: Dokumentenkaskade**

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

Neben der Erarbeitung des Prozessablaufes und der Erstellung der Dokumente zur Qualitätssicherung, wurde in einer Parameteruntersuchung des Helmholtz-Zentrums Geestacht (HZG) versucht typische Fehler, wie zum Beispiel Poren, in Abhängigkeit der verwendeten Parameter zu erzeugen und im Rahmen einer FMEA zu bewerten. Insgesamt konnten typische Fehlerbilder für die Parameter weld pitch (Quotient aus Vorschubgeschwindigkeit und Drehzahl) und laterale Abweichung des Werkzeugs von der Fügelinie gefunden werden. Eine systematische Zuordnung von in Schliffpräparaten erkennbaren Fehlern zu Abweichungen einzelner Prozessparameter und deren Bewertung ist auf Grundlage der Ergebnisse der Arbeiten des HZG allerdings nicht möglich.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-45
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

## 5.4 TA30 MCA-Assembly / Concept

### 5.4.1 AP30.1 2D/3D Spanntechnik

Im Rahmen von NEWTECH wurden diverse Spanntechniken im Hinblick auf eine industrielle Umsetzbarkeit für große Strukturen konzipiert und untersucht. Bei dieser Entwicklung wurden mehrere Faktoren entdeckt, die die Technik des Spannsystems beeinflussen. Diese Einflüsse können in die Punkte Geometrie, Material und Verbindungsform untergliedert werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass diese Untergruppen sich auch gegenseitig beeinflussen können. Um Prozesszeiten und Kosten zu verringern, gibt es verschiedene Konzepte, die Spanntechnik nicht nur für das Schweißen einzusetzen, sondern auch als Spannsystem für Bearbeitungsprozesse der Schale bzw. einen erweiterten Schweißprozess zu verwenden. Das Beranden vor dem Schweißprozess soll ohne Umspannen in der gleichen Vorrichtung geschehen.

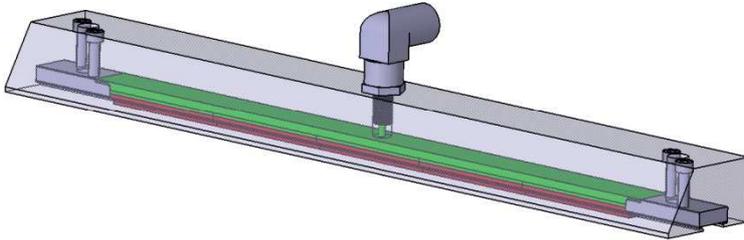
#### 5.4.1.1 **Spanntechnik – Mechanisch/hydraulisch**

Zunächst wurden kraftschlüssige mechanische Spannmethoden (Spannbalken) untersucht. Als Werkstoff für den Spannbalken wurde Baustahl gewählt, da im Wesentlichen Steifigkeit gefordert ist. Für die Gegendruckplatte ist ein hochlegierter Stahl hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit ein guter Kompromiss. Durch dessen geringere Wärmeleitfähigkeit kann die eingebrachte Leistung verringert werden.

Aus der Serie der Couponversuche wurde die notwendige Spannkraft (100 N/mm Streckenlast) festgelegt um die Bauteile zu verspannen. Durch diese hohe Streckenlast verformen sich jedoch die Balken mit zunehmender Spannlänge sehr stark (4te Potenz). Eine wesentliche Verbesserung (Faktor 5) der Durchbiegung kann dabei durch eine momentensteife Lagerbedingung des Spannbalkens an den Enden erreicht werden. Eine weitere Verbesserung kann durch die segmentierte Ansteuerung der Streckenlast erreicht werden. Dabei wird die Last nur in den Bereichen aufgebracht wo gerade geschweißt wird. Durch diese Aufteilung, kann die Durchbiegung und das Biegemoment des Balkens deutlich verringert werden. Die Steuerung der Bereiche sollte durch ein hydraulisches System realisiert werden, da Drücke von bis zu 40 bar notwendig sind (siehe Abbildung 5-26 – Prototyp eines hydraulischen Spannbalkens). Mithilfe dieser Option können zusätzlich die Kräfte reduziert werden, wodurch man die Masse des Spannbalkens senken kann um damit auch die Herstellungskosten der Anlage zu minimieren.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-46
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

Am Beispiel der S19.1 im Spantbereich C84 – C86 ist ein mechanische Spannkonzept in dieser Form umsetzbar. Bei längeren Schweißnähten (ca. 2400 mm) im Spantbereich C78 und C84 sowie der S14a der A330/A340 kommt ein rein mechanisches Spannkonzept jedoch an seine Grenzen. Aus diesem Grund wurden weitere alternative Spanntechniken untersucht und getestet.



**Abbildung 5-26: 3D Modell und Prototyp Hydraulik-Spannbalken**

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-47
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

### 5.4.1.2 Spanntechnik – BOND Clamp

Als alternatives Konzept wurde die Bauteilfixierung mittels Klebstoff untersucht. Dabei wurden folgende Anforderungen an das Klebesystem gestellt:

a) Festigkeit

Die benötigte Streckenlast ist mit 100 N/mm bekannt. Unter der Vorgabe der Breite des Klebefilms von 20 mm, kann die benötigte konservative Festigkeit von  $\tau_{min} = \frac{100N/mm}{20mm} = 5 \frac{N}{mm^2}$  ermittelt werden.

b) Temperaturbeständigkeit

Der Temperaturverlauf (siehe Abbildung 5-27) wurde experimentell ermittelt. Bei einem Abstand von 15 mm von der Schweißnahtmitte ergeben sich Temperaturen bis zu 180 °C

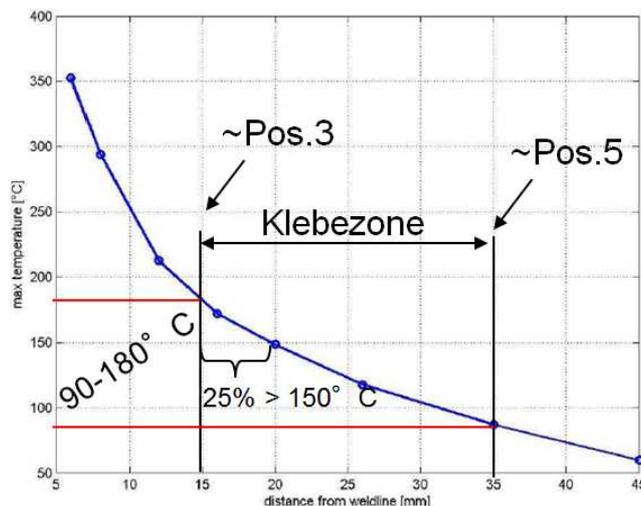


Abbildung 5-27: Örtliche Temperaturverteilung

c) Lösbarkeit

Die zu verwendete Klebeverbindung muss lösbar sein.

Ausgehend von diesen Anforderungen wurde ein Klebstoff-Screening mit der Firma 3M durchgeführt. Unter dem Gesichtspunkt der Lösbarkeit wurden die verfügbaren Klebesysteme auf Acrylate und Thermoplaste eingegrenzt. Im Gegensatz zum Acrylatklebstoff besitzt ein Thermoplast den Vorteil, dass dieser nach erneuter Aufheizung und Erstarrung wieder seine ursprüngliche Festigkeit erreicht und somit mehrfach verwendet werden kann.

Die ausgewählten Klebstoffe auf Polyamidbasis weisen Temperaturbeständigkeiten von > 100 °C auf. Die Untersuchung nach der Temperaturbelastung über der Zeit zeigt, dass Temperaturen

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-48
---------------------	----------------------	---	----------------

> 100 °C für ca. 60 s auftreten (vgl. Abbildung 5-28). Ein zeitweises, und damit örtliches Erweichen der Klebeverbindung kann für lange Schweißnähte akzeptiert werden.

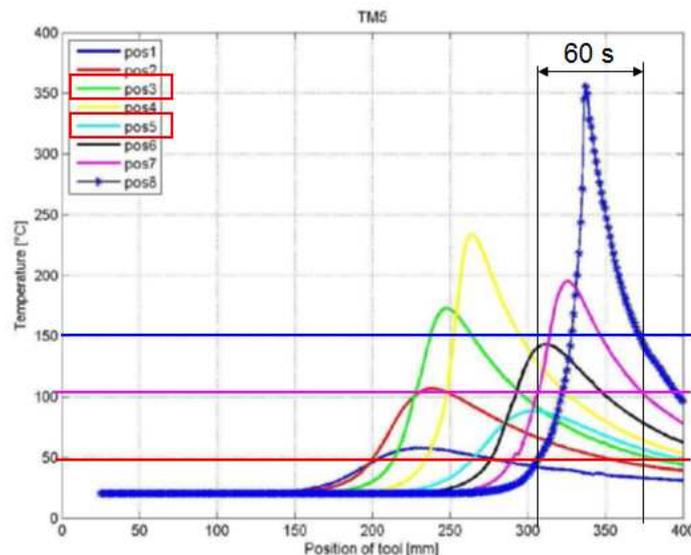


Abbildung 5-28: Zeitliche Temperaturbelastung

In Abbildung 5-29 ist die Spannvorrichtung schematisch im Schnitt dargestellt. Durch thermische Simulationen wurde die notwendige Heizleistung ermittelt um den Klebstoff in möglichst geringer Zeit zu erweichen. Mit Heizelementen mit  $3 \times 390 \text{ W} = 1170 \text{ W}$  Leistung beträgt die Zeit bis zum Erreichen der benötigten Temperatur etwa 4 min.

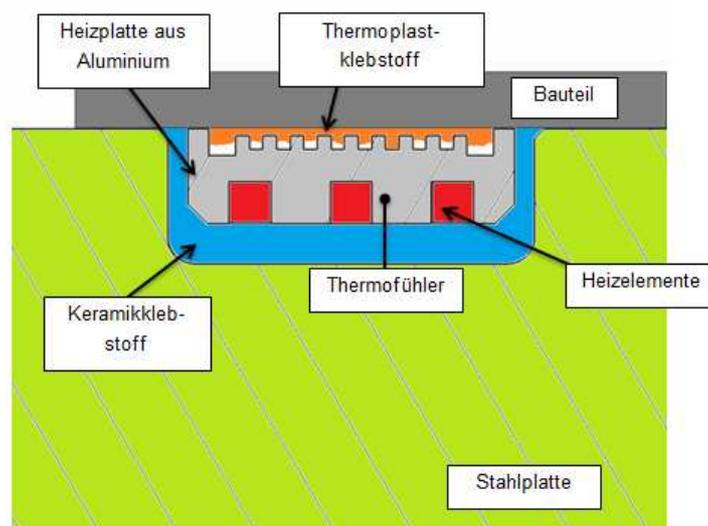


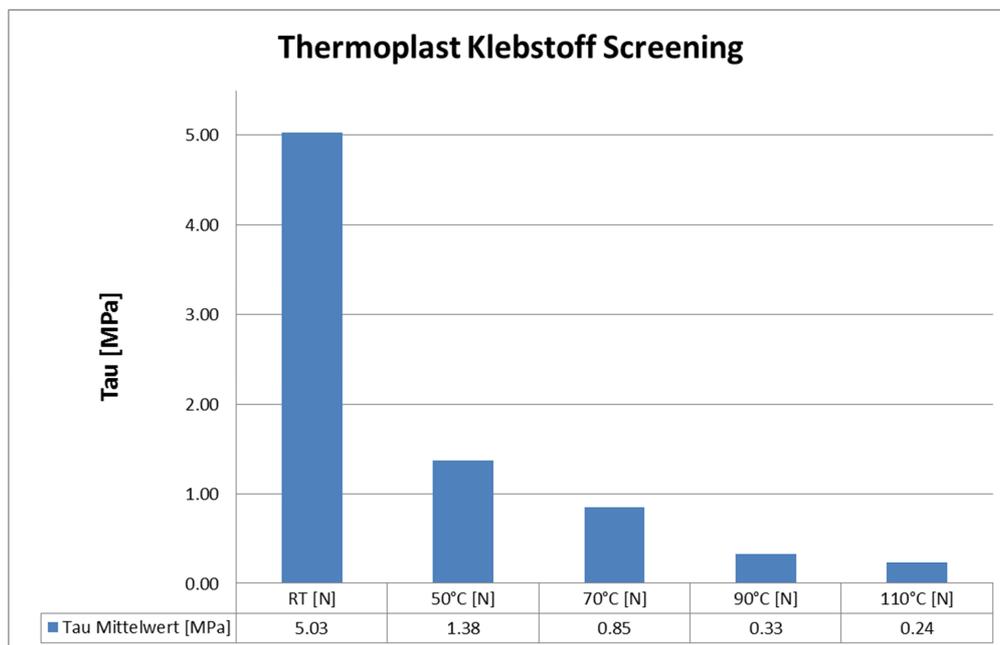
Abbildung 5-29: Schnitt durch die Spannvorrichtung

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-49
---------------------	----------------------	---	----------------

In Zugversuchen wurden Scherfestigkeiten des ausgewählten Thermoplastklebstoffes bei Raumtemperatur und bei erhöhten Temperaturen bestimmt. Dabei sollte untersucht werden, ob die Festigkeit des Klebstoffes bei den während des Schweißprozesses auftretenden Temperaturen ausreichend ist. Angenommen wird, dass eine Festigkeit von 1 MPa die Kräfte während des Schweißprozesses aushalten wird. Bei langen Schweißnähten (> 2 m), sollte im Wärmeeinflussbereichs des Schweißprozesses eine reduzierte Festigkeit von weniger als 1 MPa über eine Länge von ca. 0,2 m akzeptabel sein.

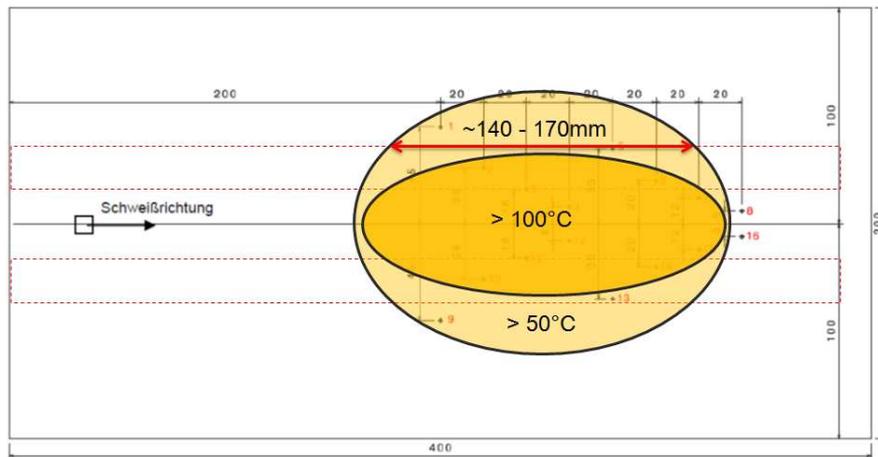
Bei den Versuchen wurde für den ausgewählten Klebstoff die Scherfestigkeit bei RT, 50 °C, 70 °C, 90 °C und 110 °C ermittelt. Dabei wurde die Last bei konstanter Temperatur stufenweise erhöht und über einen definierten Zeitraum gehalten. Die Ergebnisse dazu werden in Abbildung 5-30 gezeigt. Es kommt zu einem starken Abfall der Festigkeit bereits bei 50 °C. Die Festigkeiten sind jedoch noch größer als 1 MPa, was für den Schweißprozess als ausreichend angenommen wird. Außerdem ist die Fläche, bei denen Temperaturen > 50 °C auftreten verhältnismäßig klein. Dazu zeigt Abbildung 5-31 die Zonen der thermischen Belastung. Während der Zugversuche wurden in geringem Maße Kriecheffekte beobachtet. Da beim Schweißvorgang die hohe Temperatur allerdings nur kurzfristig besteht, sind diese Effekte vernachlässigbar.

Die Ergebnisse der Zugversuche und der thermischen Simulation bestätigen die Eignung des Polyamid-Klebstoffes mit einer Temperaturbeständigkeit von 110 °C für die Couponversuche.



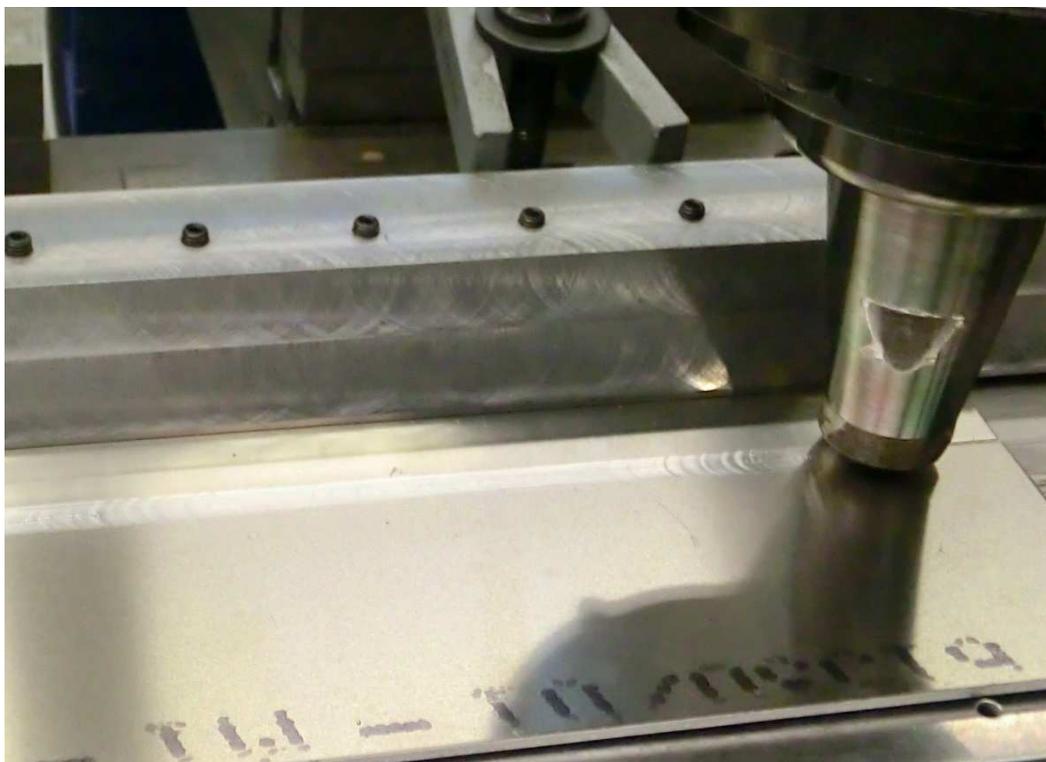
**Abbildung 5-30: Scherfestigkeit Thermoplast Klebstoff (konditioniert)**

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-50
---------------------	----------------------	---	----------------



**Abbildung 5-31: Thermische Belastung beim Schweißprozess**

Um das Spannkonzert BOND Clamp zu validieren, wurden erfolgreich Versuche im Couponmaßstab durchgeführt (siehe Abbildung 5-32). Dabei wurde eines der zu verschweißenden Bleche über BOND Clamp und das zweite der Bleche durch das konventionelle Spannen über Klemmen befestigt werden.



**Abbildung 5-32: Couponversuche – BOND Clamp**

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-51
---------------------	----------------------	---	----------------

#### 5.4.1.1 Spanntechnik – Vakuum

In Abstimmung mit dem Verbundpartner AIRBUS wurde die notwendige Größe der Vakuumhalter abgestimmt, welche für den FSW Demonstrator – S14a (siehe Kapitel 5.4.5) erfolgreich eingesetzt wurden. Es kommen vier gefräste Vakuumhalter mit einer Fläche von je 300x1000 mm zu Einsatz. Die Schalen werden jeweils über zwei Bohrungen in den Fanglaschen über die Vorrichtung positioniert und anschließend über Vakuum (regelbarer Unterdruck) an die Halter fixiert. Hierüber werden die Prozesskräfte beim FSW aufgenommen. In Abbildung 5-33 und Abbildung 5-34 ist die Vakuumspannvorrichtung als Konzept sowie fertig aufgebaut dargestellt.

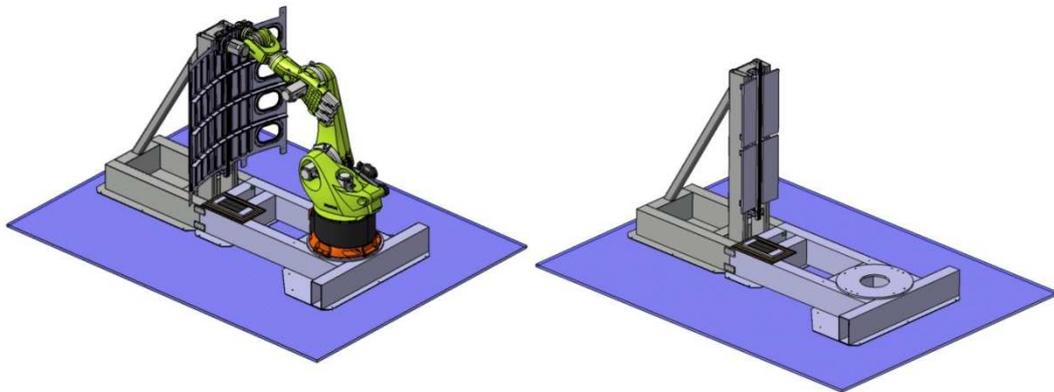


Abbildung 5-33: Spanntechnik mit und ohne Bauteil

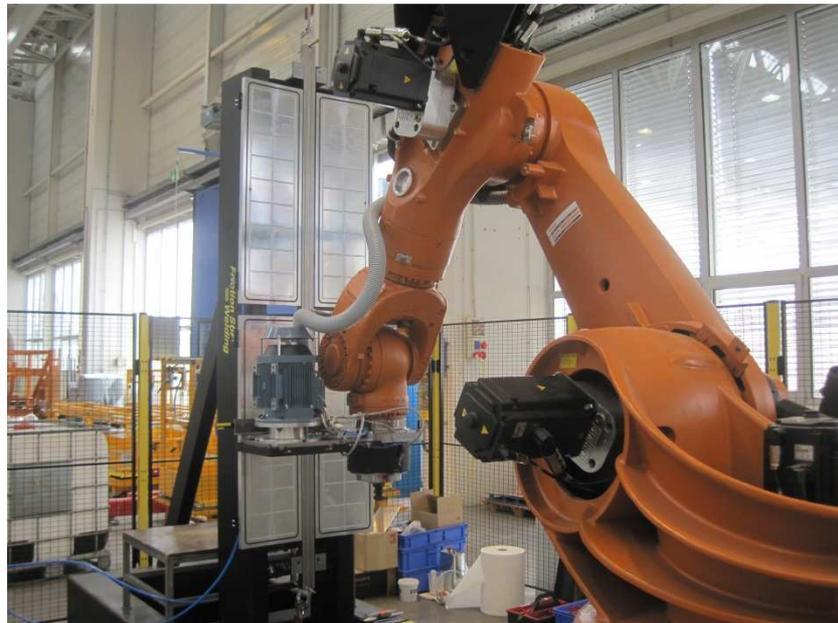


Abbildung 5-34: Vakuumspanntechnik – RUAG FSW-Roboterzelle

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-52
---------------------	----------------------	---	----------------

#### 5.4.2 AP30.2 Fügstellendesign MCA

Unter Berücksichtigung der Anforderungen Kosteneffizienz, Toleranzsystem sowie der Verzugsproblematik wurden Nahtkonzepte entwickelt.

##### 5.4.2.1 T-Stoß

Die Längsnähte in der Baugruppe S19.1 C84-C86 werden derzeit mit einem Stringer vernietet. Der Stringer dient nicht nur der Stabilität der Schale sondern bildet auch die Schnittstelle zur Aufnahme des Abgasrohrs der APU. Beschleunigungslasten im Crashfall müssen hier übertragen werden. Auf den Stringer an dieser Position kann deshalb nicht verzichtet werden. Ein nachträgliches Nieten des Stringers auf die Schweißnaht ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll.

Es wird deshalb bevorzugt den Stringer in die Längsnaht beim FSW Prozess zu integrieren. Hierzu liefen bereits Vorversuche mit einem Standardwerkzeug im Rahmen vom Forschungsprojekt ASSYMET, welche vielversprechende Ergebnisse aufzeigten. Im Rahmen von NEWTECH wurde der mögliche Einsatz und Eignung eines Delta-N Werkzeugs für diese Nahtgeometrie für sehr dünnwandige Strukturen untersucht. Dabei bleibt das generelle Konzept mit der Stringerüberhöhung zum Materialausgleich an den Radien und Spalten bestehen (siehe Abbildung 5-35).

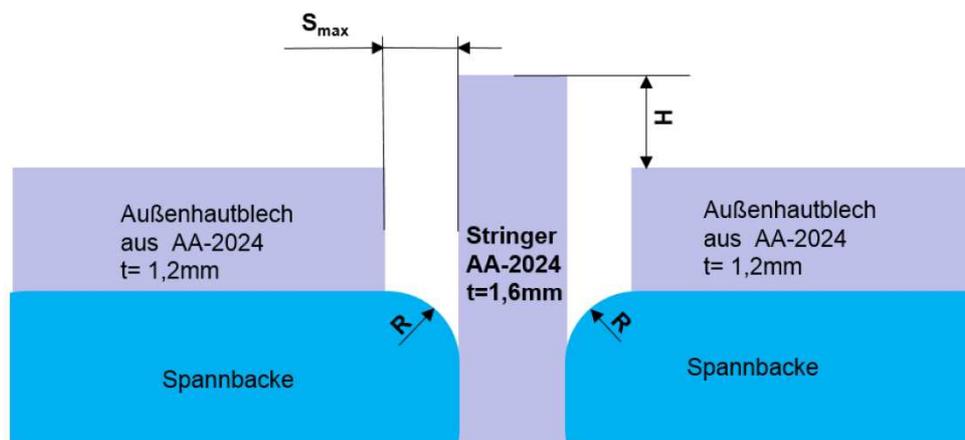


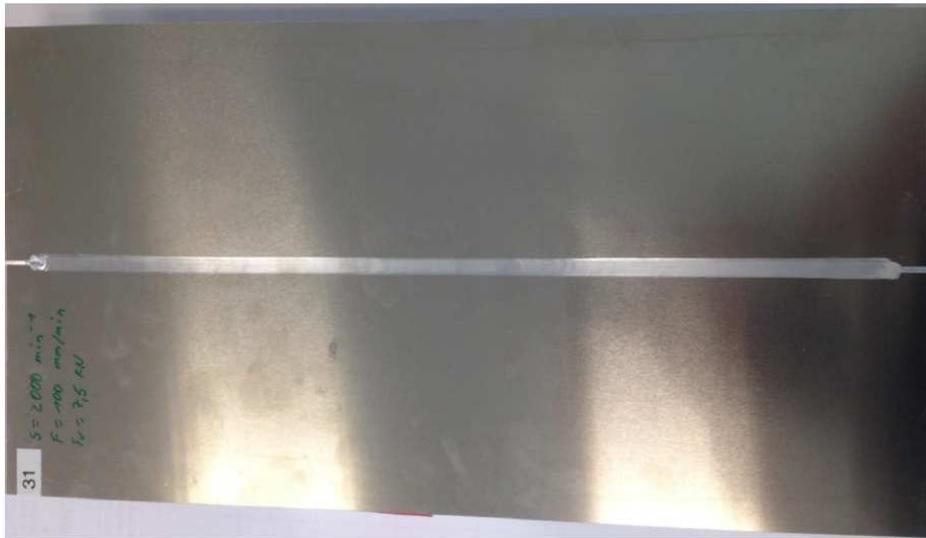
Abbildung 5-35: T-Stoß Nahtkonzept [Quelle: APWORKS (EADS-IW)]

Im Vergleich zum Standardwerkzeug verbirgt sich die Herausforderung beim Delta-N Werkzeug darin, eine ausreichende Materialvermischung und Umformung trotz des Materialüberstands mit

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-53
---------------------	----------------------	---	----------------

der stehenden Schulter zu erreichen. Positiv beim Delta-N Werkzeug wäre der geringere Verzug bei geringer thermischer Belastung während des FSW-Prozesses.

Hierzu wurden Versuche mit einem auf die dünnen Wandstärken angepassten Delta-N-Werkzeug bei der EADS-IW durchgeführt. Die Versuche verliefen erfolgreich und die Ergebnisse sind wie beim Standardwerkzeug sehr vielversprechend. In Abbildung 5-36 ist ein gefügter T-Stoß mit dem Delta-N Werkzeug abgebildet.



**Abbildung 5-36: T-Stoß Probe [Quelle: APWORKS (EADS-IW)]**

Lediglich im Radienauslauf ist teilweise noch ein kleiner Bereich der Kaltverschweißung zu erkennen (siehe Abbildung 5-37). Diese Fehlstellen müssen durch eine angepasste Pin-Geometrie vermieden werden bzw. an einem Bauteil nachbearbeitet werden. Ob die Fehlstelle vollständig durch die Anpassung des Werkzeugs vermieden werden kann, muss jedoch noch in Zukunft weiter untersucht werden.

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-54
---------------------	----------------------	---	----------------

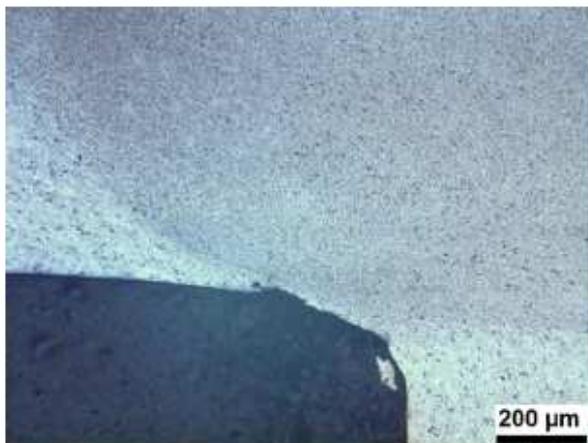


Abbildung 5-37: Mikroschliffe Radienauslauf T-Stoß Naht [Quelle: APWORKS (EADS-IW)]

#### 5.4.2.1 Lost-Backing

Die geplanten FSW-Längsnähte bei der S14a A330/A340 haben im Vergleich zur S19.1 keinen Stringer unmittelbar hinter der Naht und würden somit in einem FSW-Prozess als reine Stumpfstöße umgesetzt werden. Hierbei besteht jedoch immer die Gefahr eines LOP (Lack of Penetration), weshalb sehr kostenintensive zerstörungsfreie Prüfmethoden notwendig sind.

Aus diesem Grund wurde eine Nahtgeometrie mit „Lost Backing“ untersucht. Hierbei taucht das Werkzeug vollständig über die Bauteildicke in ein zusätzliches Opfermaterial beim Fügeprozess ein um dadurch eine vollständige Durchschweißung sicherzustellen. In Abbildung 5-38 ist das Konzept der Nahtgeometrie dargestellt. Das Opferblech wird nach dem Schweißvorgang mit einer handgeführten Fräse abgetragen und die Oberfläche geglättet. Dieser Mehraufwand wird in Kauf genommen um das Risiko eines LOP und die damit verbundene kostenintensive Ultraschallprüfung zu vermeiden.

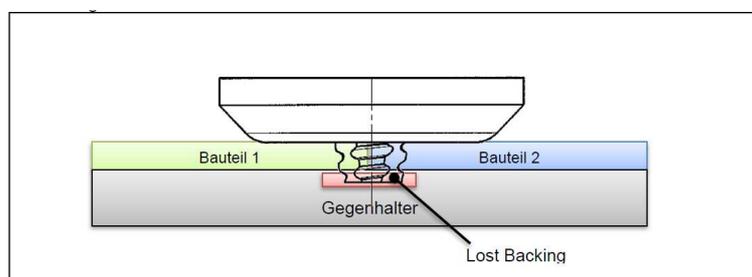


Abbildung 5-38: Nahtgeometrie – "Lost Backing"

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-55
---------------------	----------------------	---	----------------

In Rahmen von Couponversuchen wurde das Nahtkonzept untersucht und validiert. In Abbildung 5-39 ist ein Mikroschliffbild durch die Lost-Backing-Naht abgebildet. Auf Basis der guten Ergebnisse wurde das Lost-Backing-Nahtkonzept für den Validator (siehe Kapitel 5.4.5) ausgewählt und umgesetzt.



**Abbildung 5-39: Mikroschliff – "Lost Backing"**

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-56
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

### **5.4.3 AP30.3 MCA Fertigungs- und Montagetechnik**

#### **5.4.3.1 FSW Anlage**

Innerhalb des Forschungsverbundes ECO sind bereits mehrere verschiedene FSW-Anlagentypen im Einsatz. Die Anlagentypen variieren dabei von einer einfachen seriell kinematischen Roboteranlage über Werkzeugmaschinen bis hin zu FSW-Sondermaschinen (Portal- und Pentapodanlage). Die aufgelisteten Anlagen unterscheiden sich dabei auch in Ihrer Steifigkeit sowie den Investitionskosten deutlich voneinander.

Im Bereich der Luft- und Raumfahrt mit recht geringen Kadenzen und den aktuell diskutierten Nahtlängen ist es unwahrscheinlich eine reine Anlagenauslastung mit dem FSW-Prozess zu erzielen. Vielmehr ist für den wirtschaftlich erfolgreichen Einsatz der FSW Technologie in der Luft- und Raumfahrt eine Anlage mit relativ geringen Investitionskosten sowie eine flexible Nutzbarkeit der Anlage für weitere Fertigungsprozesse notwendig (siehe auch Kostenbetrachtung in Kapitel 5.3.1).

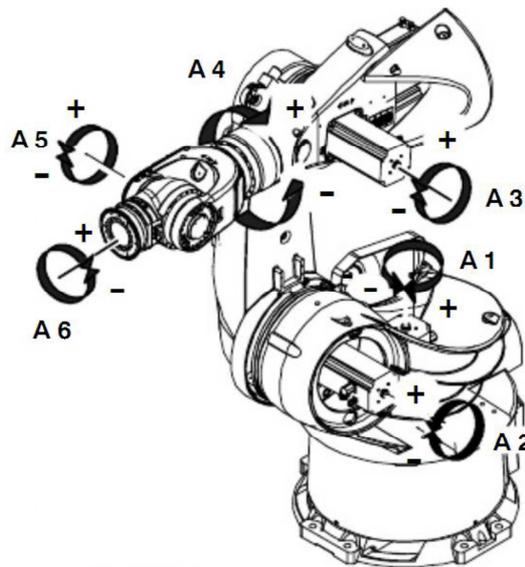
Eine Bauraumuntersuchungen der beiden Referenzstrukturen S19.1 und S14a hat ergeben, dass der Einsatz von Sondermaschinen zu Problemen führen könnte. Sondermaschinen können teilweise nur für eine bestimmte Baugruppe verwendet werden und es bedarf einer umfangreichen Anpassung der Anlage für ein anderes Bauteil.

Innerhalb der RUAG wurde deshalb die Verwendung eines FSW-Roboters untersucht. Aufgrund der relativ niedrigen Investitionskosten ist solch eine Anlage in der Serienproduktion sehr attraktiv. Es muss jedoch die geringe Steifigkeit im Zusammenspiel mit den hohen Prozesskräften beim FSW-Prozess detailliert betrachtet und untersucht werden.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-57
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

### 5.4.3.2 Steifigkeitsuntersuchung Industrieroboter

Ein Knickarmroboter zeichnet sich durch seine komplexe Kinematik aus. Gegenüber einer trivialen Kinematik, bei der eine Kraft in einer Achse nur eine Verschiebung in der gleichen verursacht, antwortet der Roboter mit Verschiebungen in allen 6 Achsen (siehe Abbildung 5-40).



**Abbildung 5-40: Gelenke, Drehrichtung und Nullage**

Im Rahmen von NEWTECH wurde ein FE-/Steifigkeitsmodell für den Roboter erstellt, um die Nachgiebigkeit des Gesamtsystems qualitativ zu bewerten und die Eignung solcher Systeme für den FSW-Prozess zu untersuchen. Validiert wurde das Steifigkeitsmodell durch experimentelle Messungen am Roboter. Die größten Nachgiebigkeiten des Roboters sind in den Gelenken A3 – A6 zu finden. Vor allem bei einer großen Baulänge des Werkzeugs/Endeffektors wirkt sich dies aufgrund des längeren Hebelarms negativ auf das System aus.

Die Steifigkeit des Roboters ist eine wichtige Kenngröße für den FSW-Prozess. Aus diesem Grund wurden vergleichend Steifigkeitsuntersuchungen an den kommerziell erhältlichen Schwerlastrobotern KUKA KR500MT und ABB IRB 7600 durchgeführt und bewertet. In Abbildung 5-41 ist der Ablauf der Vergleichsstudie abgebildet. Für den Vergleich wurden insgesamt 6 repräsentative Posen (Abbildung 5-42 bis Abbildung 5-47) ausgewählt und untersucht.

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-58
---------------------	----------------------	---	----------------

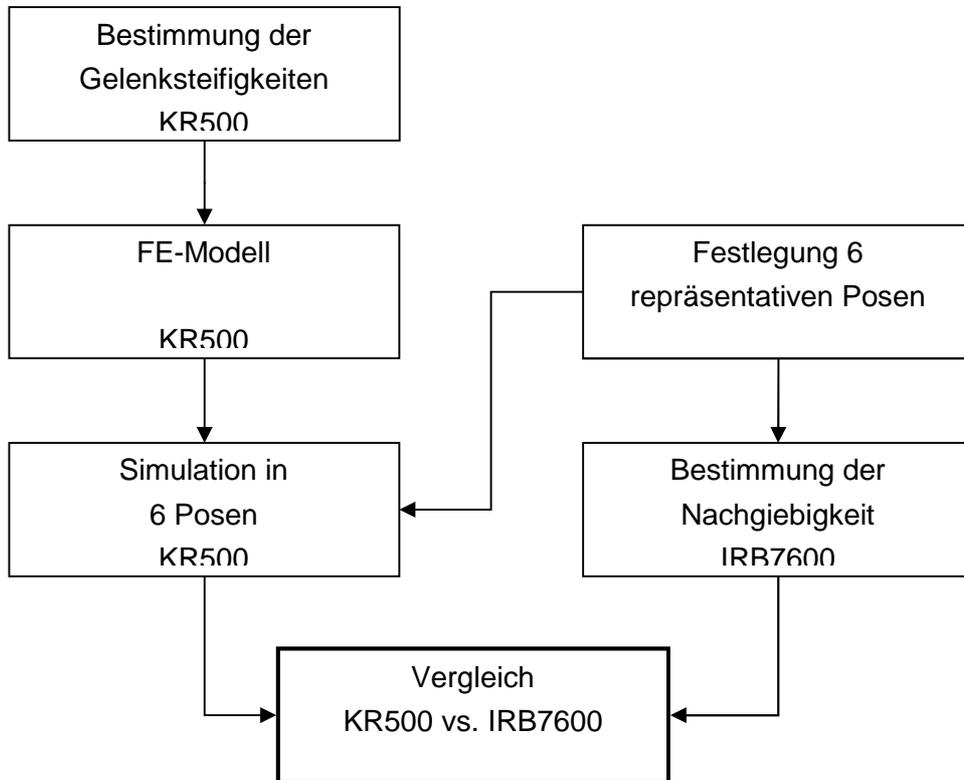


Abbildung 5-41: Prozess zum Steifigkeitsvergleich

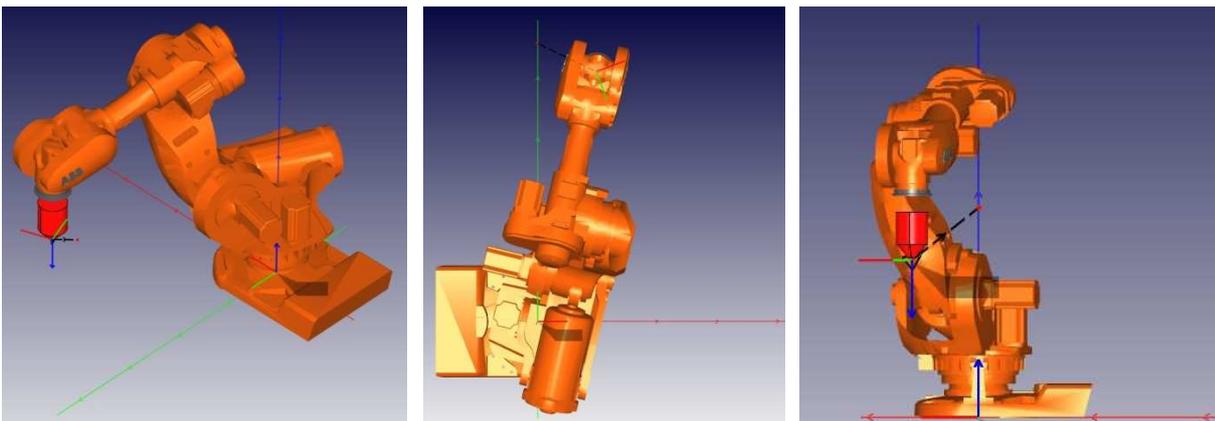


Abbildung 5-42: Pose 1

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-59
---------------------	----------------------	---	----------------

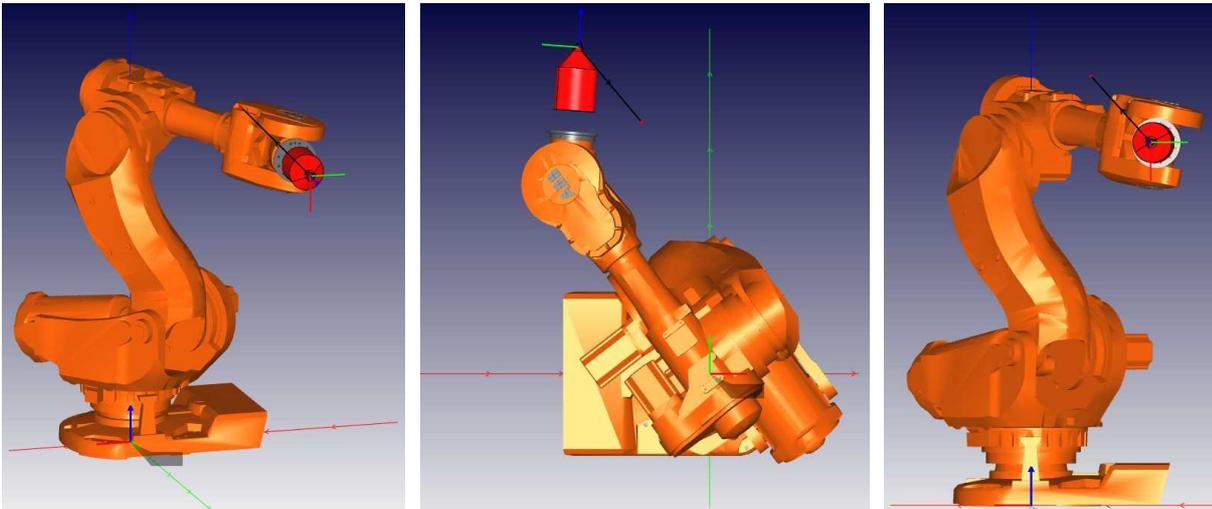


Abbildung 5-43: Pose 2

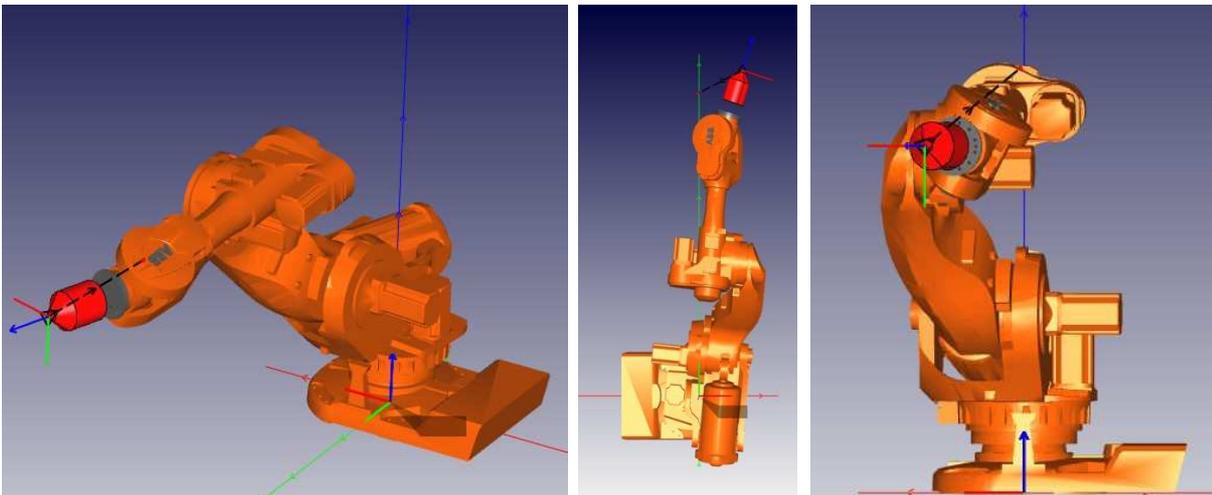


Abbildung 5-44: Pose 3

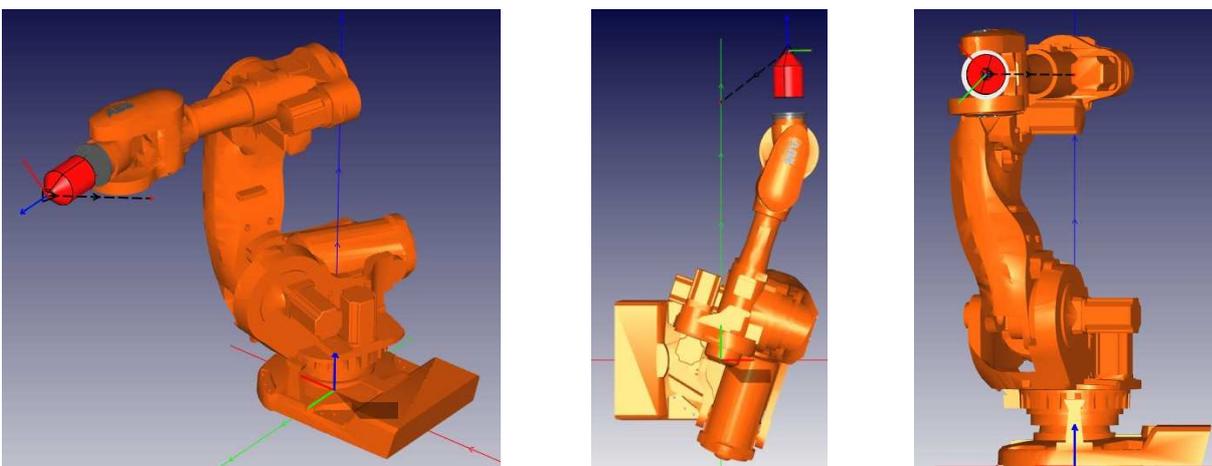


Abbildung 5-45: Pose 4

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-60
---------------------	----------------------	---	----------------

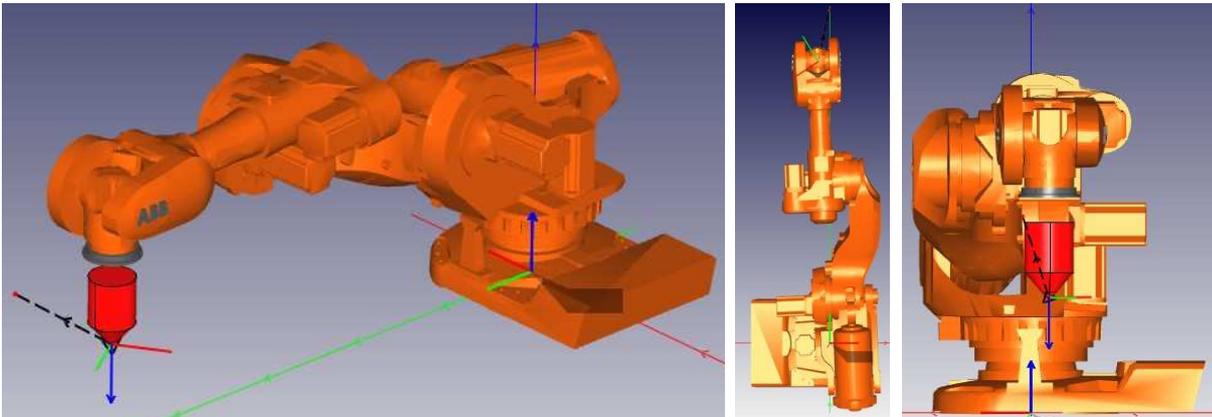


Abbildung 5-46: Pose 5

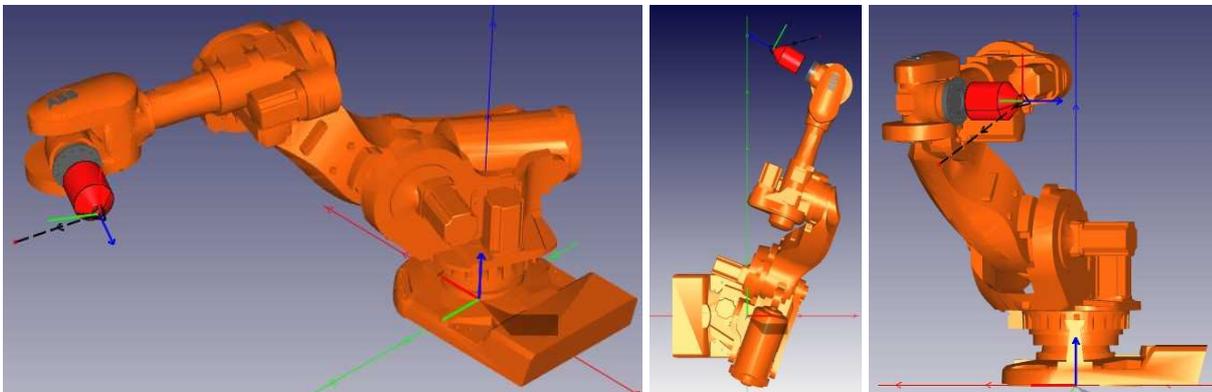


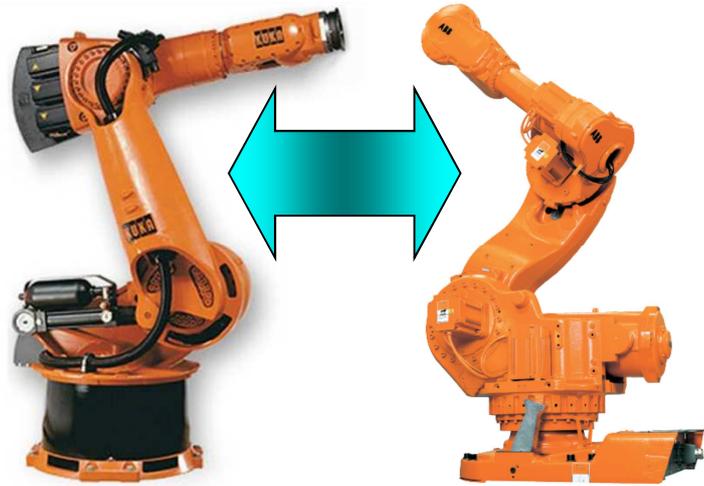
Abbildung 5-47: Pose 6

Zur Bewertung der Steifigkeit wurde die resultierende Verschiebung am TCP (Tool Centre Point) unter aufgebrachtener Versuchskraft in den jeweiligen 6 Posen untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass eine große Abhängigkeit von Pose und Belastungsrichtung besteht und das Posen mit großer Armlänge tendenziell auch geringe Steifigkeiten zeigen.

In Tabelle 5-5 sind die ermittelten Steifigkeiten des KUKA KR500MT und ABB IRB 7600 gegenübergestellt. Das Verhältnis der Steifigkeiten kann qualitativ mit 1,5 – 2 angegeben werden. Der KUKA KR500-MT ( MT = Machine Tooling ) ist mit seinen verstärkten Getrieben und Antrieben deutlich besser für den Einsatz von FSW geeignet. Bei Kräften von mehr als 6 kN ist mit Ablagen über 6 mm zu rechnen. Die axiale Nachgiebigkeit wird durch die Kraftregelung kompensiert. Eine Ablage in Schweißrichtung ist unkritisch zu bewerten. Eine laterale Ablage (Quer zur Schweißnaht) um mehr als 1 mm ist jedoch problematisch, da die Gefahr besteht, dass die Bauteile an der Fügekannte nicht verrührt werden.

Für einen industriellen Einsatz in der Serienproduktion könnte deshalb je nach Randbedingungen ein System zur lateralen Bahnkorrektur Notwendig sein.

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-61
---------------------	----------------------	---	----------------



KR500MT

IRB7600-400

Pose	L [m]	Kraft [N]	Verschiebung [mm]		k [N/mm]			
			KR500	IRB7600	KR500	KR500 korr.	IRB7600	
1	2.06	2943	1.95	4.07	1509	1207	723	1.67
2	2.48	2943	1.76	5.20	1672	1338	566	2.36
3	3.30	2943	3.76	7.29	783	626	404	1.55
4	2.87	2943	2.81	5.60	1047	838	526	1.59
5	2.57	2943	2.59	4.24	1136	909	695	1.31
6	2.92	2943	2.39	6.43	1231	985	458	2.15
Mittelw.	2.70	2943	2.54	5.47	1230	984	562	

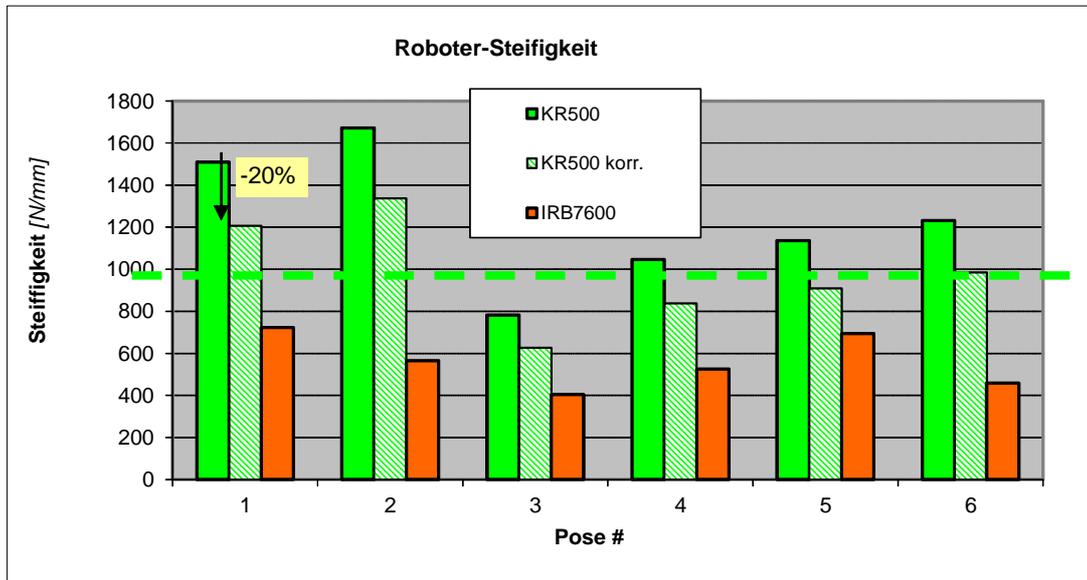


Tabelle 5-5: Gegenüberstellung der Berechnungs- / Versuchsergebnisse

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-62
---------------------	----------------------	---	----------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

### 5.4.3.3 FSW-Endeffektor

Der für Robotersysteme momentan kommerziell erhältliche FSW-Endeffektor verfügt über eine große Baulänge, welche sich bei der geringen Robotersteifigkeit gesamtheitlich nachteilig auswirkt. Weiterhin übertreffen die Leistungsdaten (ca. 42 kW) dieser Spindel die Anforderungen eines FSW Prozesses um ein vielfaches. Unter Einbeziehung der gewonnen Erkenntnisse aus den Couponversuchen und in Diskussionsgesprächen mit den Verbundpartnern wurde folgende Anforderungen an einen eigens entwickelten FSW-Endeffektor gestellt.

Wichtige Eckpunkte dieser Neuentwicklung sind:

- Axialkraftregelung im Endeffektor ermöglicht die Nutzung eines Roboters mit Positionssteuerung
- Geringer Bauraum und vor allem Länge (240 mm) zur Reduktion der Hand- und Ellbogenmomente des Roboters (siehe Abbildung 5-48)
- Thermische Entkopplung von Spindel und Motor zur späteren Überprüfung des Thermalhaushalts
- Der Endeffektor liefert direkt Daten für eine Prozessüberwachung
  - Drehmoment
  - Drehzahl
  - Axialkraft
- Werkzeugaufnahme für Standard- und Delta-N-Werkzeuge
- Geringe Wartungskosten

Der Endeffektor wurde speziell für den Rührreibschweißprozess ausgelegt:

- Axialkraft 0 – 10 kN
- Drehmoment 5 – 20 Nm
- Drehzahl 500 – 3000 1/min
- Leistung ca. 3 kW

Mit dem integrierten Drehmomentsensor kann die mechanische Leistung mit einer Genauigkeit < 1% ermittelt werden.

Ein Prototyp des Endeffektors wurde gemeinsam mit dem iwv der TUM erfolgreich entwickelt und gebaut (siehe Abbildung 5-49). Im Rahmen von Couponversuchen und dem FSW Validator wurde der Endeffektor Prototyp erfolgreich eingesetzt und validiert.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-63
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

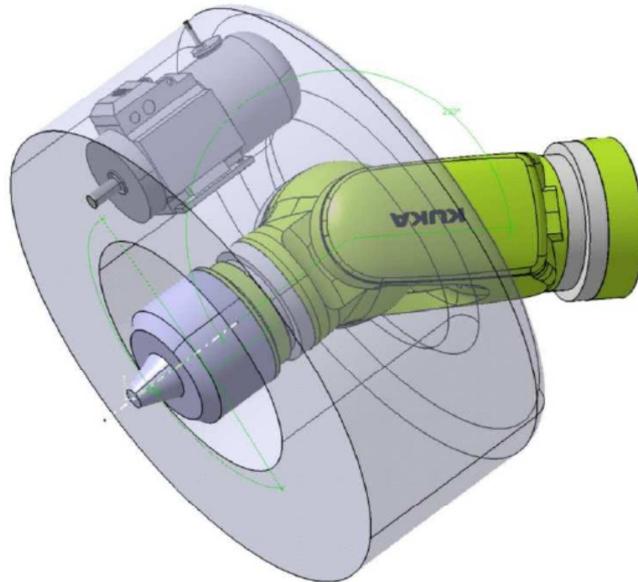


Abbildung 5-48: Bauraumvorgabe des Endeffektors



Abbildung 5-49: RUAG FSW Endeffektor Prototyp

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-64
---------------------	----------------------	---	----------------

#### 5.4.3.4 Roboterzelle

Auf Basis der Ergebnisse der FSW Anlagen und Robotersteifigkeitsuntersuchungen (siehe vorherige Kapitel), wurde die Beschaffung eines KUKA KR500MT und der Aufbau einer Roboterzelle im Versuchsumfeld umgesetzt (siehe Abbildung 5-50).



Abbildung 5-50: Roboter mit Sicherheitszelle

Im Rahmen von NEWTECH wurden Couponversuche sowie die Schweißung des FSW Validators an der eigenen FSW Roboteranlage umgesetzt. Für die Anwendung der Anlage für den FSW Validator wurden für die S14a Bau- und Arbeitsraumuntersuchungen durchgeführt (siehe Abbildung 5-51 und Abbildung 5-52).

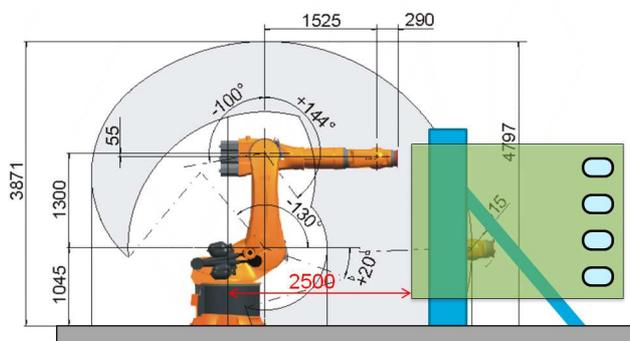
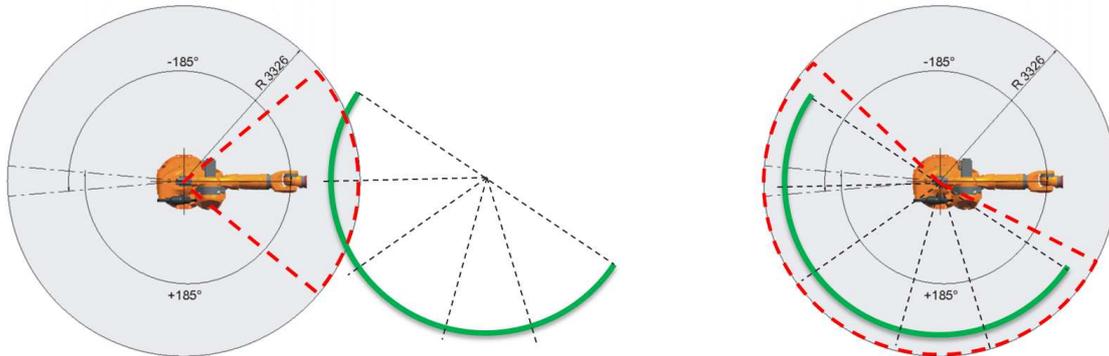


Abbildung 5-51: Sektion 14a im Arbeitsraum eines KUKA KR500

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-65
---------------------	----------------------	---	----------------

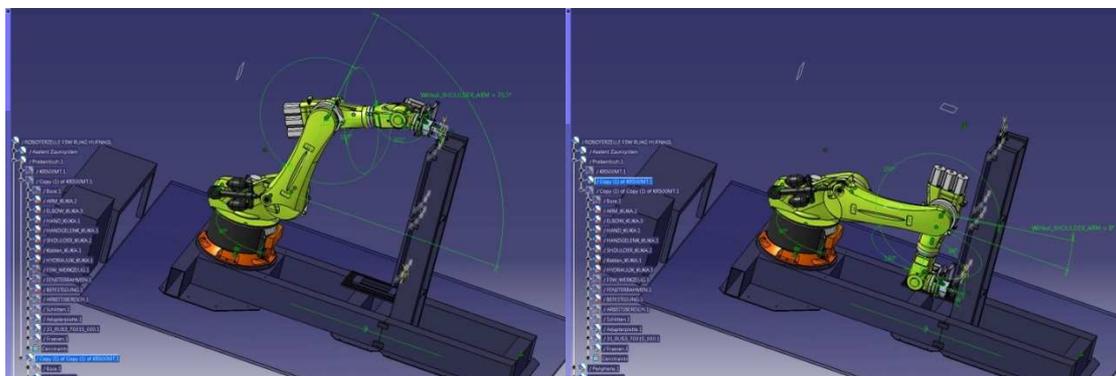


**Abbildung 5-52: Anordnung des Roboters innerhalb und außerhalb des Bauteils**

Die Variante von außen zu schweißen hat den Vorteil, dass der Arbeitsraum des Roboters nur gering belegt ist. Dies ist besonders für eine Serienanwendung im Long Range Programm von Interesse, da hier die Produktionszahlen bei nur ca. 10% der von Single Aisle liegen. Eine Mehrfachnutzung der Anlage steigert die Auslastung und senkt den Maschinenstundensatz.

Der Nachteil liegt jedoch im reduzierten Freiraum für die Spanntechnik. Da bei den Schalen die Stringer bereits verklebt und andere Bauteil geheftet sind, kann die für die Vakuumspanntechnik benötigte Fläche nicht realisiert werden. Unter Abwägung der Vor- und Nachteile wurde eine Schweißposition von innen für die Versuchszelle und den FSW-Validator gewählt. Die innere Schweißposition ermöglicht den Einsatz der Vakuumspanntechnik, da auf der Außenseite genügend Freiraum gegeben ist.

Bei der Konstruktion der Spannmechanik für den FSW-Validator wurde ebenfalls eine Bauraumanalyse des Roboters mit Endeffektor vorgenommen um zu verifizieren, dass die Startposition und Endposition der Schweißung erreichbar sind. Bei der Spannmechanik wurde ebenfalls die Berandung der Bauteile vor dem FSW Prozess in der selben Vorrichtung konstruktiv berücksichtigt.



**Abbildung 5-53: Bauraumanalyse – FSW-Validator S14a**

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-66
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

#### 5.4.4 AP30.4 Oberflächenschutz

In dem Arbeitspaket AP30.4 Oberflächenschutz werden Prozesse untersucht, um den nachträglichen Oberflächenschutz nach dem FSW-Schweißen sicherzustellen. Üblicherweise wird die Plattierung anodisiert und anschließend werden die Lacksysteme, Grundierung und Decklack aufgebracht (vgl. Variante 1, Tabelle 5-6). Daraus ergeben sich unterschiedliche Varianten, die als nachträglicher Oberflächenschutz in Frage kommen (vgl. Tabelle 5-6).

Variante 1 (Referenz)	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Plattierung	Flammspritzen	-	-
Anodisieren	Anodisieren	Lokales Anodisieren	Lokale Konversionsschicht
Grundierung & Decklack	Grundierung & Decklack	Grundierung & Decklack	Grundierung & Decklack

**Tabelle 5-6: Varianten des nachträglichen Oberflächenschutzes.**

Um die Plattierung auf die FSW-Zone aufzubringen, wurde der Prozess des Kaltgasspritzens identifiziert (vgl. Variante 2, Tabelle 5-6). Eine entsprechende Untersuchung zur Umsetzbarkeit dieses Prozesses wurde am Centre de Projecció termica (CPT) an der Universität in Barcelona durchgeführt. In dieser Untersuchung wurden die Parameter zur Beschichtung von Reinaluminium für zwei Beschichtungsstärken bestimmt. Nachfolgend wurden die Schichten mittels Metallographie und Elektronenmikroskopie untersucht. Die Korrosionsbeständigkeit wurde in elektrochemischen Korrosionstests nach ASTM G65 nachgewiesen.

Als Alternative zum Kaltgasspritzens wird das lokale Anodisieren (vgl. Variante 3, Tabelle 5-6) in Betracht gezogen. Dabei würde die Reinaluminium-Schicht entfallen. Zum lokalen Anodisieren wurde für die T-Stoß-Geometrie ein Anlagenkonzept entworfen, das im Rahmen des Projektes noch nicht validiert werden konnte.

Als letzte Variante 4 steht das lokale Auftragen einer Konversionsschicht zur Verfügung. Dabei kommen Produkte zum Einsatz, die durch Pinsel oder Stifte aufgetragen werden und mit zusätzlicher Grundierung und Decklack den Oberflächenschutz gewährleisten.

Zur Einordnung der Qualität der Beschichtungssysteme wären vergleichende Korrosionstests (Salzsprühnebeltest, Elektrochemische Korrosionsversuche) notwendig, welche im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt wurden. Allerdings ist davon auszugehen, dass die Korrosionsbeständigkeit in folgender Reihenfolge abnehmen wird: Variante 1 (Referenz) > Variante 2 > Variante 3 > Variante 4. Bei der Kosten- und Prozessrealisierung für die industrielle

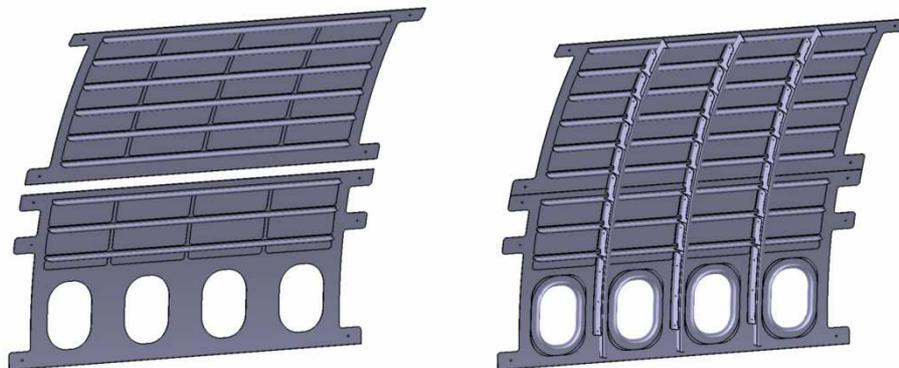
Umsetzung schneidet momentan Variante 4 am besten ab. Variante 2 ist durch den zusätzlichen Prozessschritt am teuersten und für Variante 3 fehlt momentan noch eine verlässliche Prozessdurchführung.

#### **5.4.5 AP30.5 MCA Validator**

Im industriellen Umfeld wurde Anhand eines Demonstrators der S14a (A330/340) erfolgreich die einzelnen Ergebnisse der vorgehenden Arbeitspakete gesamtheitlich als FSW-Prozess bei RUAG validiert:

- FSW-Roboteranlage und entwickelter Endeffektor
- Toleranzsystem/lokale Berandung vor Schweißung
- Vakuumspanntechnik
- Lost-Backing-Konzept
- Online Prozessüberwachung

In Abbildung 5-54 ist der Demonstrator S14a bestehend aus 2 Teilschalen mit Klebestranger als CAD-Modell vor und nach der Schweißung abgebildet. Nach dem Schweißprozess werden die Clips und Spante sowie die Fensterrahmen eingemietet.



**Abbildung 5-54: CAD-Modell Validator/Demonstrator A330/340 S14a vor und nach der Schweißung**

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 5-68
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------



Abbildung 5-55: Schweißung Validator/Demonstrator A330/340 S14a

Abteilung: RCOE2	Datum: 28.08.2015	Verfasser: Becker/Reichardt/Selk/Yip	Seite: 5-69
---------------------	----------------------	---	----------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

## **6 NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE**

Durch das Forschungsvorhaben konnte bei der RUAG wesentliches Know-How zur industriellen Anwendung der innovativen FSW-Fügetechnologie im Flugzeugstrukturbau weiter aufgebaut werden. Die Zielsetzung der Steigerung des Technologiereifegrads in der Luftfahrt konnte durch das Forschungsprojekt umgesetzt werden.

Das gesammelte Wissen und die umfangreichen Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben werden dem RUAG Standort Oberpfaffenhofen zur Verfügung gestellt und sollen in zukünftigen Aktivitäten zur Industrialisierung und Qualifizierung des FSW-Fügeprozesses sowie in zukünftigen Entwicklungsprojekten berücksichtigt und angewendet werden.

Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme der FSW-Roboter-Pilotanlage und FSW-Endeffektor im September 2014 und der Qualifizierung des FSW Prozesses bei der RUAG gem. DIN EN ISO 25239-4 im Juli 2015 (Ergebnisse zum Zeitpunkt des Berichts noch ausstehend) wurde bereits ein maßgeblicher Schritt in diese Richtung erfolgreich umgesetzt.

## **7 BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT BEI ANDEREN STELLEN**

Während der Projektlaufzeit wurden in den Teilvorhaben NEXXT (Airbus), INPRO (PAG), MTEXT (DLR), FUTURE (Fraunhofer Dresden) und RADICAL (Airbus Group Innovations) des gemeinsamen Forschungsverbundes ECO umfangreiche Ergebnisse hinsichtlich neuer innovativen Füge- und Montagekonzepten für Luftfahrtstrukturen erarbeitet. Hinsichtlich der detaillierten Ergebnisdarstellung sei an dieser Stelle auf die jeweiligen Abschlussberichte der Teilvorhaben verwiesen.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 7-70
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------

	<b>Forschungsprojekt</b>  <b>NewTech</b>	<b>Bericht Nr.: RCOE-2015-00040</b> Abschlussbericht Ausgabe A
---	--	--

## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] F. Campbell, Metallurgy and engineering alloys, ASM International, 2008.
- [2] J. Hackius, Förderantrag Verbundbeschreibung ECO Wirtschaftlicher Metallrumpf Generation Best ECO Mix., Airbus, X53WD1103296, 2011.
- [3] R. Wall, Sketching the A30X, Aviation Week & Space Technology, 4. Feb. 2008.
- [4] E. Yip, Abschlussbericht des geförderten Forschungsvorhabens ASSYMET, RUAG Aerospace Structures GmbH, 2013.
- [5] N.N., Airbus Global Market Forecast 2007 – 2026, Airbus S.A.S, Blagnac Cedex, France .
- [6] N.N., European Commission, European Aeronautics, A Vision for 2020, ISBN 92-894-0559-7, 2001.
- [7] N.N. , Friction Stir Welding of Aluminium Alloys, Airbus Process Specification (AIPS), Airbus, 2009.
- [8] N.N. , Rührreischweißen – Aluminium – Teil 4: Anforderungen und Qualifizierung von Schweißverfahren, EN ISO 25239-4:2011, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, März 2012.
- [9] M. Pacchione, Design Principles for Damage Tolerant Butt welded joints for application in the pressurized Fuselage, 24th ICAF Symposium - Naples 16-18 May 2007, Airbus, 2007.
- [10] A. Merlin, Numerical and Experimental Investigation of Friction Stir Welding, master thesis, Politecnico di Milano, April 2013.

<b>Abteilung:</b> RCOE2	<b>Datum:</b> 28.08.2015	<b>Verfasser:</b> Becker/Reichardt/Selk/Yip	<b>Seite:</b> 8-71
----------------------------	-----------------------------	--	-----------------------