

# Abschlussbericht

## EITEC - EPROC

Evolutionäre Prozesse für CFK-Rumpfstrukturen  
im Verbundvorhaben



Zuwendungsempfänger:	Airbus Operation GmbH
Förderkennzeichen:	20W1304A
Projektdauer:	01.01.2014 – 30.09.2017

Erstellt von: Projektteam

Projektleitung: U. Kütemeier

Freigabe: U. Kütemeier

Hamburg, Monat/Jahr

*April 2018*

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'U. Kütemeier', written over a horizontal line.

Rechtsverbindliche Unterschrift

## Inhalt

<b>1. KURZDARSTELLUNG</b>	<b>6</b>
1.1 <b>AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>6</b>
1.2 <b>VORAUSSETZUNGEN UND RANDBEDINGUNGEN</b>	<b>9</b>
1.3 <b>PLANUNG UND ABLAUF / ZEITPLAN</b>	<b>10</b>
1.4 <b>WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND DER TECHNIK</b>	<b>10</b>
1.5 <b>ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN</b>	<b>17</b>
1.5.1 Projektpartner	17
1.5.2 Unterauftragnehmer	17
<b>2. ERGEBNISSE</b>	<b>19</b>
2.1 <b>ERZIELTE ERGEBNISSE</b>	<b>19</b>
2.1.1 AP1.1 Stringer-Integration	19
2.1.2 AP1.2 & AP4 Integralspant-Fertigung & Hochautomatisierte Integralspant-Montage	41
2.1.3 AP2 Oberflächentechnologien	52
2.1.4 AP 3.1 Schnelle und hochpräzise Montage	54
2.1.5 AP 3.2 Vibrationsbohren	81
2.2 <b>NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE</b>	<b>107</b>
2.3 <b>RELEVANTE ERGEBNISSE DRITTER</b>	<b>107</b>
<b>3. LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>108</b>
<b>4. ABKÜRZUNGEN</b>	<b>109</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Gesamtmeilensteinplanung.....	10
Abb.2: Hauptaufgaben im Rahmen des Förderprojektes.....	14
Abb.3: Ablauf - konventioneller Thermoformprozess.....	20
Abb.4: Wellenbildung.....	20
Abb.5: Thermoformsimulation (Rumpfausschnitt).....	21
Abb.6: Querschnitt - kontinuierliches Thermoformen.....	22
Abb.7: Detail – Thermoformwerkzeug (Vakuumversorgung).....	22
Abb.8: Formstation.....	23
Abb.9: Abdichtkonzepte Blister/Blister mit Zugang von außen.....	24
Abb.10: Legende.....	24
Abb.11: Abdichtkonzepte Blister/Blister mit Zugang von innen.....	25
Abb.12: Abdichtkonzepte Blister/Tool.....	25
Abb.13: Getestete Produkte.....	26
Abb.14: Verbindung der Blister-Segmente.....	27
Abb.15: Stringer mit Klebefilm FM300 und Schlauchkerne.....	28
Abb.16: Aufrüstung der Schlauchkerne und der Blisterfolie.....	28
Abb.17: Handhabbarkeit der ausgerüsteten Blisterfolie.....	29
Abb.18: Testpyramide.....	32
Abb.19: Beispielaufbau Vorversuche.....	33
Abb.20: Hergestellte Stringer und Aufbau.....	33
Abb.21: Testaufbau.....	34
Abb.22: Liste der qualitativen Aspekte.....	34
Abb.23: Ermittlung der Output-Parameter für jeden Teilprozess.....	36
Abb.24: Einflussgrößen Prozessparameter.....	37
Abb.25: Vermessene Blister-Segmente.....	38
Abb.26: Blockdiagramm - Skalierungsfaktor.....	39
Abb.27: Übersicht der untersuchten Materialien und Prozesskonfigurationen.....	40
Abb.28: Montagesystem in der Major Component Assembly der A350XWB.....	58
Abb.29: Sektions- und Rumpfmontagebauplatz der A350XWB (Stand 2012).....	60
Abb.30: Arbeitsplan im Rahmen des AP 3.1.....	62
Abb.31: Arbeitsschwerpunkte der im AP3.1 involvierten Projektpartner.....	62
Abb.32: Vereinbarte Vorgehensweise des Projektpartners Broetje-Automation GmbH.....	65
Abb.33: Unterschiede der Konzepte.....	74
Abb.34: Versuchsaufbau (A) und Werkzeugaufnahme (B).....	82
Abb.35: Spanbildung bei der Legierung Ti6Al4V.....	83
Abb.36: Effektive Spannungen in den Werkzeugen.....	85
Abb.37: Zug- und Druckspannungen in den Werkzeugen.....	86
Abb.38: Highspeedaufnahme zur Spanabfuhr (Positivbeispiel).....	89
Abb.39: Highspeed-Aufnahmen zur Spanabfuhr (Negativbeispiel).....	90
Abb.40: Roboterzelle mit Versuchsstand zum Vibrationsbohren.....	93

Abb.41: Späne nach dem Bohren mit dem piezo-elektrischen Werkzeughalter .....	93
Abb.42: Signalverstärker und Steuereinheit .....	94
Abb.43: Bohreraustritt beim konventionellen Bohren in Al2024 (Cladschicht).....	95
Abb.44: Bohrer Austritt beim vibrationsunterstützten Bohren in Al2024 (Cladschicht).....	95
Abb.45: Keramikbohrer bei der Zerspanung von CFK/Aluminium Verbundwerkstoffen .....	97
Abb.46: Max. Axialkräfte $F_{zmax}$ bei unterschiedl. Prozessparam. und Werkstoffen .....	98
Abb.47: Durchschnittl. Grathöhen $h$ bei unterschiedl. Prozessparam. und Werkstoffen .....	99
Abb.48: Durchschnittl. Rauheiten $R_a$ bei unterschiedl. Prozessparam. und Werkstoffen .....	100
Abb.49: CP- Wert bei unterschiedlichen Prozessparametern und Werkstoffen .....	101

## Tabelleverzeichnis

Tabelle 1: Messwerte Blister-Segmente.....	38
Tabelle 2: Bohrlochqualitäten an Austrittsseite CFK-Layer (Drehzahl-Vorschub-Variation1) .....	102
Tabelle 3: Bohrlochqualitäten Austrittsseite CFK-Layer (Drehzahl-Vorschub-Variation 2).....	103
Tabelle 4: Bohrlochqualitäten Austrittsseite CFK-Layer (Drehzahl-Vorschub-Variation3) .....	104

# 1. KURZDARSTELLUNG

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben EITEC verfolgte im Wesentlichen 2 technologische Schwerpunkte:

- a. Die Optimierung der Integrationsschritte bei der Herstellung von komplexen Strukturkomponenten
- b. Die Effizienzsteigerung entlang der Montageprozesskette für Flugzeugkomponenten.

Im Rahmen des Airbus-Vorhabens EPROC wurde hierzu auf Technologieansätze fokussiert mit hohem Optimierungspotential hinsichtlich Kostenreduktion und Produktionsratenerhöhung.

Die Arbeiten teilten sich bei Airbus auf 4 Haupt-Arbeitspakete auf.

- AP1. Entwicklung einer prozesssicheren und kostenoptimierten Lösung zur industriellen Herstellung von integrierten Hochleistungs- CFK-Komponenten
  - AP 1.1. Stringer-Integration
  - AP 1.2. Integralspant-Fertigung
- AP2. Entwicklung und Validierung einer neuen Messmethode zur Online Detektion und Überwachung des Trocknungszustandes von Lacken
- AP3. Montagetechnologien
  - AP 3.1. Identifizierung und Minimierung nicht produktiver Arbeitsschritten entlang der Montagekette durch intelligente Werkzeuge und Algorithmen zur Bewertung und Gestaltung von Prozessabläufen und Prozessketten.
  - AP 3.2. Entwicklung und Validierung des Vibrationsbohrens als innovativer Ansatz zur Effizienzsteigerung und zur Optimierung des Bohrprozesses.
- AP4. Hochautomatisierte Montagetechnologie für den Integralspant.

### AP1.1 Stringer-Integration

In AP1.1 soll eine Lösung zur schnellen flexiblen und robusten Integration von Versteifungselementen entwickelt werden. Die Substitution der geläufigen mehrschichtigen Hilfsstoffe durch eine thermogeformte thermoplastische Folie soll dabei die wichtigste Innovation darstellen. Darauf aufbauend sollen neue Dichtungskonzepte entwickelt werden. Zur Steigerung der Prozessfähigkeit des neuen Ansatzes ist es ferner geplant eine Reihe von Funktionalitäten (u.a. einstellbare lokale Steifigkeiten, Detektion von Vakuumleckagen, Regulierung des Temperaturfeldes) in die Folie zu integrieren. Die Entwicklungsarbeiten sollen durch die Entwicklung und Bewertung von Industrialisierungskonzepten sowie durch die Bewertung der Produktivitätsanalyse ergänzt werden.

Um eine ganzheitliche und zukünftig einsetzbare Lösung zu entwickeln werden folgenden Schwerpunkte untersucht:

- Evolutionäre Entwicklung des Vakuumaufbaus
- Funktionsintegration

- Werkstoffe und neue Verfahren
- Industrialisierung
- Produktivitätsanalyse

### AP1.2 Integralspant-Fertigung

Bei der Fertigung des integralen Spantes in AP1.2 bestand die ursprüngliche Aufgabenstellung darin, aufbauend auf den im Rahmen RENO TORA mit einem mittleren Reifegrad (TRL3) abgeschlossenen Arbeiten zum Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit des integralen Spantes im typischen Rumpf mittels eines geflochtenen, trockenen „Preform“, diese fortzuführen, und die Reproduzierbarkeit in der Fertigung nachzuweisen und industrialisierte Prozessketten zu demonstrieren. Als Partner waren dafür die EADS-IW (später Airbus Group Innovation AGI) sowie als industrieller Partner die Xperion GmbH vorgesehen. Im Verlaufe zeigte sich zwar dass das Strukturgewicht des geflochtenen Spantes als vergleichbar mit dem der UD-tape Prepreg Varianten ist, und die Kosteneinsparpotentiale in der Fertigung sogar als höher. Vor allem die geforderten Gewichtseinsparpotentiale zeigten sich aber als nicht ausreichend bei gleichzeitig erhöhtem Material- und Prozessentwicklungsrisiko. Es wurde deshalb seitens Airbus entschieden, den Fokus im Rahmen EPROC auf bereits etablierte Materialien und grundsätzliche Fertigungs-Prozesse (AFP-Prepreg) für einen integralen Spant zu verändern. In der Folge wurde basierend auf aus Voruntersuchungen der COTESA GmbH sowie der Premium Aerotech GmbH (et al) außerhalb von EPROC vorliegenden Ergebnissen der Fertigung einfacher integraler Prepreg- Spant-Demonstratoren mittels AFP entschieden, diese Technologie weiter zu verfolgen. Die grundsätzliche Aufgabe blieb unverändert die, die fortgeschrittene technologische Reife (TRL4) der Fertigung eines integralen Spantes nun in AFP-Prepreg gefertigt insbesondere hinsichtlich geometrischer Maßhaltigkeit sowie Reproduzierbarkeit dieser nachzuweisen, sowie die dafür erforderlichen strukturmechanischen Methoden zu erarbeiten, und mittels Strukturtests zu validieren.

### AP2 Oberflächentechnologien

Aufgabenstellung dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines optimierten Prozessablaufes zur Trocknung von Luftfahrzeugbeschichtungen basierend auf dem Einsatz von kontaktlosen Spektroskopie-Messvorrichtungen in Kombination mit Infrarot-aushärtung. Wobei die kontaktlose Spektroskopie-Messvorrichtung den Aushärtungsgrad des Lackes misst und sofort beim Erreichen der dry-to-tape-Zeit die Infrarottrocknung automatisch unterbricht um eine Überbehandlung auszuschließen. Der innovative Charakter dieses Messverfahrens besteht darin, dass der Trocknungsfortschritt des zu trocknenden Flugzeuglackes direkt, berührungslos und automatisch gemessen werden kann. Hierbei handelt es sich um einen signifikanten Wandel zu der dry-to-tape-Technik, bei der auf der Basis von Rückständen eines Klebebandes, welches auf die Beschichtung manuell aufgetragen wird, der Trocknungsgrad indirekt erschlossen wird.

### AP 3.1 Schnelle und hochpräzise Montage

Die Luftfahrtindustrie steht Herausforderungen hinsichtlich einer steigenden Produktkomplexität in Bezug auf Geometrie und Dimension der zu verbauenden Komponenten sowie zunehmender Produktvielfalt gegenüber. Insbesondere Faserverbund- und/oder hybride Werkstoffe bringen neue

Anforderungen an sämtliche Prozesse in der Großkomponentenmontage mit sich. Am Beispiel des Programms A350XWB wird deutlich, dass die Formen und die Dimensionen von Großkomponenten neue Anforderungen an Messkonzepte und Vorrichtungen stellen.

Große und integrale Sub-Komponenten, insbesondere in der Rumpfmontage, bieten großes Potential hinsichtlich Wertschöpfungstiefe und Durchlaufzeitverkürzung über die gesamte Prozesskette. Die dadurch verringerten Arbeitsanteile in der Rumpfmontage dürfen dabei nicht zum Engpass werden. Aufgrund der größeren und höher integrierten Bauteile steigt die Komplexität der Montageprozesse. Daher ist es zwingend erforderlich neuartige Automatisierungskonzepte zu entwickeln, mit denen die angestrebte Wertschöpfungstiefe und Durchlaufzeitverkürzung erreicht werden können.

Nicht direkt wertschöpfende, aber unverzichtbare Prozessschritte wie z.B. Transporte, Taktvorgänge sowie Positionierungs- und die damit zusammenhängenden Messaufgaben, müssen schneller und robuster gestaltet werden, um einen Beitrag hinsichtlich der Ziele für Ratenstabilität und -flexibilität leisten zu können.

Insbesondere hohe Raten verlangen nach robusten und kurzen Zyklen für diese Prozesse, um hier das Risiko für Produktionsausfälle zu minimieren. Dabei muss ausgehend von Produkteigenschaften und den geplanten Fügeprozessen eine Ableitung auf die geforderte Hard- und Softwareumgebung und deren Vernetzung erfolgen. Dabei soll möglichst auf Standardkomponenten zurückgegriffen werden.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollten anhand eines beispielhaften Baukonzeptes für zukünftige Flugzeugprogramme jeweils Konzepte für Messtechnik, Vorrichtungsbau und intelligente Vernetzung und Kommunikation ausgearbeitet werden. Im Weiteren galt es die Konzeptauswahl anhand von geeigneten Kriterien zu verdichten und konkrete technische Fragestellungen im kleinen Maßstab zu testen.

Die Zusammenarbeit aller Bereiche Messtechnik, Vorrichtungstechnologie und Hard-, sowie Softwareintegration war dazu unerlässlich. Das finale Ziel der schnellen und hochpräzisen Montage soll es sein, die Einzelkonzepte in einen neuartigen Gesamtprozess zu integrieren und diesen hinsichtlich Prozessfähigkeit und Leistungsfähigkeit zu validieren.

### AP 3.2 Vibrationsbohren

Robotersysteme werden zwar bereits zur automatisierten Fertigung von Nietbohrungen in Leichtbauwerkstoffen eingesetzt, die heute angewendeten Strategien führen jedoch nicht zu einem kontaminationsfreien Prozess. Die technische Innovation des hier geplanten Vorhabens besteht darin, den Bohrprozess bzw. das Robotersystem so zu adaptieren, dass alle während der Bearbeitung entstehenden Späne, Stäube und weiteren gesundheitsgefährdenden Stoffe prozesssicher abgesaugt werden können. Aus wissenschaftlicher Sicht sind vor allem die Eingriffsverhältnisse und die Spanbildung beim Vibrationsbohren von großem Interesse. Durch eine FE-Simulation des Vibrationsbohrprozesses sollen die Einflüsse der Schnittparameter und Werkzeug-Geometrien auf die Spanbildung und die sich daraus ergebende Span-Form analysiert werden. Parallel soll in experimentellen Versuchen geklärt werden, wie sich die Span-Form auf den Abtransport entlang der

Span-Nut auswirkt. Die Informationen können dazu genutzt werden, gezielt und ohne experimentellen Aufwand eine günstige Span-Form zu erreichen.

#### AP4 Spant-Integration

Das Hauptziel des Arbeitspaketes AP4 ist die Entwicklung einer hochautomatisierten Montagetechnologie für den Integralspant inklusive dessen Demonstration. Die Umsetzung des Konzeptes und anschließende Montage-Demonstration erfolgt auf der seriennahen Montage-Versuchs-Anlage des Fraunhofer IFAM in Stade. Die Grundkonzeption des Montageprozesses der integralen Spante basiert zunächst auf der Annahme, dass die Fügepartner Spant einerseits und Rumpf-Schale aus Haut und Stringer andererseits fehlerbehaftet sind, und deshalb eine Korrektur der Ist-Geometrien mittels Shim für die spätere Montage erforderlich sein wird. Um dies zu antizipieren sollte eine „virtuelle“ Füge-Spalt-Vermessung erfolgen, d.h. eine Simulation der sich einstellenden Spalte basierend auf vorab vermessenen Fügepartnern. Weiterhin sollen noch vor der eigentlichen Fügung die später zu erwartenden Spalte durch den Auftrag von Shim soweit reduziert werden, dass die verbleibenden Spalte nur noch mit Dichtmasse montiert werden können, und damit keine Verzögerung im industriellen Montage-Prozess durch den Auftrag von Shim erfolgt.

## 1.2 VORAUSETZUNGEN UND RANDBEDINGUNGEN

Als Verbundführer integriert Airbus die Entwicklungen aller Verbundpartner. Ziel ist es, eine Reife für die selektierten Technologien im Laufe des Projektes zu erreichen, die eine Weiterentwicklung hin zur Industrialisierung ermöglicht. Die Ziele werden durch das Zusammenwirken der einzelnen Partnerprojekte erreicht. Das Airbusvorhaben EITEC-EPROV gliedert sich in folgende 4 Hauptarbeitspakete:

- WP1: Fertigungstechnologien für CFK-Rumpfstrukturen
- WP2: Oberflächentechnologien
- WP3: Optimierte Montageprozesse
- WP4: Spant-Integration

Die Arbeitspakete 1.2 und 4 adressieren zum Beispiel die Weiter-Entwicklung von Fertigungs- und Montage-Prozessen und haben dabei die konkrete Entwicklung integraler Spante und deren Montage bis zu einem fortgeschrittenen technologischen Reifegrad zum Gegenstand. Gleichzeitig sollen zur Vermeidung von Folge-Kosten bei der Einführung weder in der Design-Integration idealerweise keine Änderungen in der Bauteilumgebung erfolgen, noch in den entsprechenden heutigen Montage-Stationen gravierende d.h. kostenintensive Umbauten notwendig werden. Die Nachweisführung sowohl in der Bauteilherstellung als auch in der Montage ist aufgrund der Vielzahl der im Rumpf verbauten Spant-Varianten aufwändig, wollte man sämtliche dieser Varianten und Komplexitäten demonstrieren, und wollte man die Montage auch nur einer kompletten Schale darstellen, und darüber hinaus auch noch die Robustheit statistisch über ausreichend viele Montagen nachweisen.

Die Herstellung einer entsprechenden Vielzahl von Bauteilen wäre entsprechend zeitaufwändig und kostenintensiv. Als Lösung einen Projekt-Fortschritt dennoch zu erzielen sind sowohl im Rahmen des Projektes vorgesehene statistische Simulationen nötig, als auch die Verwendung von ggf. Serienbauteilen insbesondere Schalen für die Montageversuche.

In den Arbeitspaketen zur Verbesserung von Herstellungsprozessen werden ebenfalls Beweise für die Umsetzbarkeit in einem industriellen Umfeld benötigt. Der Schwerpunkt liegt hier bei den Fertigungsmethoden, die wirtschaftliche Vorteile durch eine Reduzierung von Montagezeiten versprechen.

### 1.3 PLANUNG UND ABLAUF / ZEITPLAN

Folgender Meilensteinplan lag dem Projektstart zugrunde:

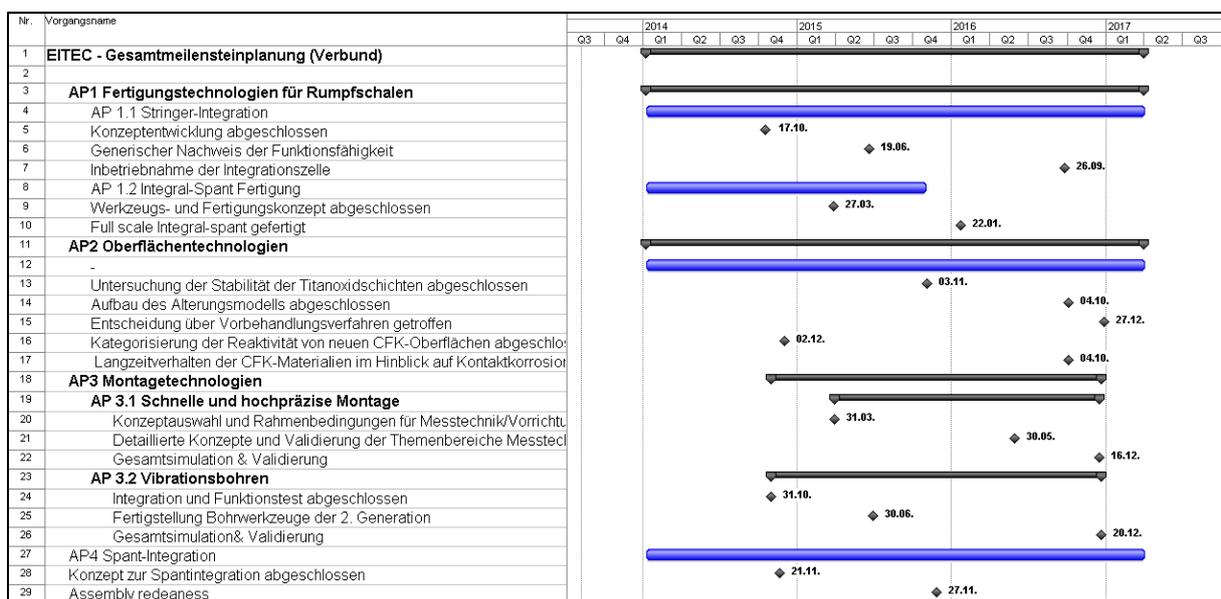


Abb.1: Gesamtmeilensteinplanung

### 1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND DER TECHNIK

#### AP 1.1 Stringer-Integration

Die Integration von Stringern stellt einen für die Herstellung von versteiften und leistungsoptimierten Rumpfstrukturen in monolithischer Bauweise notwendigen, und qualitäts- sowie produktivitätsbestimmenden Prozessschritt dar.

Sowohl für kleine als auch für große Passagierflugzeuge wurden in den vergangenen Jahren unterschiedliche Ansätze erprobt. Dabei spielen die Komplexität der Strukturen, die Wahl der Werkstoffe und vor allem die vorgegebene Produktionsrate eine entscheidende Rolle für die Prozessfähigkeit der einzelnen Ansätze.

Die Einführung von Rumpfschalen aus faserverstärkten Kunststoffen in Großflugzeugen (B787, A350) zeigte die Grenzen der Industrialisierung der bis dahin geläufigen Ansätze und verdeutlichte die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung der Fertigungstechnologien unter Berücksichtigung der Anforderungen an eine moderne Produktion

Beispiele von Technologieansätzen zur Integration von Versteifungselementen unter seriennahen Bedingungen findet man u.a. in [Will-1997] oder als regelmäßige Beiträge in den Tagungsbänden ausgewählter Veranstaltungen, die der Luft- und Raumfahrt gewidmet sind [IntQ1, IntQ2].

Trotz der Fülle an Verfahren und deren Varianten prägen die Eigenschaften des verwendeten Harzsystems die Ausführung der einzelnen Prozesse und ermöglichen somit die Bildung von Typen bzw. Familien. Die für thermoplastische Matrixsysteme entwickelten Prozesse befinden sich zurzeit im Entwicklungsstadium, ebenso wie die auf Infusionstechnologie basierten Verfahren. Lediglich bei der Verwendung von vorimprägnierten Materialien lässt sich eine industrielle Anwendung eindeutig nachweisen. Für die zwei weltführenden Hersteller von Großpassagierflugzeugen lässt sich der Stand der Technik der Stringer-Integration als halbautomatisiert einstufen. Auffällig sind vor allem die langen Prozesszeiten zur Applikation und zur Entfernung der Hilfsstoffe sowie der enorme Aufwand zur Positionierung der Stringer.

Herkömmliche Vakuumaufbauten bestehen aus mehreren Schichten unterschiedlicher Folienmaterialien. Die Anzahl der Schichten ergibt sich aus Anforderungen funktioneller Natur, wie zum Beispiel der flächigen Absaugung von volatilen Bestandteilen des Prepreg-Materials oder der restlosen Entfernung des Vakuumaufbaus nach dem Aushärteprozess. Eine für Prepreg-Bauweise geeignete Zusammenstellung des Vakuumaufbaus besteht somit aus mindestens 3 Schichten, nämlich einem Abreißgewebe, einem Absaugfließ und einer Trennfolie. Je nach Komplexität der Bauteile oder je nach Anforderungen der einzelnen Prozessausführungen kann auf vorgefertigte Hilfsstoffpakete zurückgegriffen werden.

Der Stand der Technik hat sich entsprechend um die in diesem Arbeitspaket entwickelten und im Kapitel 2 beschriebenen Innovationen erweitert.

#### AP 1.2 & 4 Integralspant Fertigung & Montage

Die Spante des typischen CFK-Rumpfes erster Generation sind in differentieller Bauweise auf die Haut verbaut d.h. die Verbindung zwischen Spant und Haut erfolgt über L-Winkel, den sogenannten Clipsen. In der Montage werden hierzu die differentiellen Spante relativ zur Haut ohne direkten Kontakt zwischen beiden positioniert. Die Clipsen werden über einen Hebelmechanismus zwischen Haut und Spant positioniert. Sodann wird der Spalt zwischen Clip und Haut vermessen, um die Clipsen dann wieder zurückzufahren, ggf. Spaltfüller aufgebracht, und neuerlich Kontakt hergestellt. Nachdem der Spaltfüller ausgehärtet ist, wird der Kontakt wiederum getrennt, auf den Spaltfüller wird Dichtmasse aufgetragen und der Clip wird final positioniert.

Bei der im Rahmen von LuFo V EITEC-EPROC als Fortführung von LuFo IV RENO weiter zu entwickelnden integralen Bauweise sind die bei der differentiellen Bauweise erforderlichen Clipsen in die Spante selbst größtenteils integriert d.h. der integrale Spant wird im direkten Kontakt auf die

Rumpf-Haut verbaut. Dadurch ist die Anzahl der Einzelteile hinsichtlich Clipse deutlich reduziert, die Verbindungselemente für die Vernietung der Clipse zum Spant entfallen und die Aufwände in der Montage der Clipse auf die Spante bzw. zur Haut sind signifikant reduziert. Die Komplexität des Spantes ist zwar durch Integration des Kontaktes des Spant-Fußes zur Haut erhöht. Auch sind die Anforderungen an die Maßhaltigkeit des integralen Bauteils gegenüber der differentiellen Bauweise deutlich gestiegen, da die Kontur des Integral-Spantes im direkten Kontakt mit der Haut, deren Geometrie respektive die Geometrie der aus beiden Fügepartnern entstandenen Rumpfschale definiert, und nicht mehr wie bei der differentiellen Bauweise über die diskrete Position der Clipse am Spant kompensiert werden.

Die erwarteten Vorteile liegen zunächst in der deutlichen Gewichtseinsparungen unmittelbar resultierend aus der Weglassung der Clipse respektive der für die Vernietung zum Spant erforderlichen Material-Überlappung und Niete selbst.

Ein weiterer Vorteil sind die signifikanten Kosteneinsparungen, welche trotz ggf. leicht erhöhter Kosten für den integralen Spant selbst im sechsstelligen Bereich je Flugzeug erwartet werden. Dabei sind neben der Kosten-Reduktion durch die Einsparung der Vielzahl an Clipsen, sowie die Aufwände und Stückkosten der Vernietung der Clipse zum Spant, vor allem in der deutlich effizienteren Montage des Spantes auf die Haut selbst zu sehen. Hierbei wird der für den differentiellen Spant beschriebene Prozess des mehrfachen Anlegens des Clips an Haut und Spant deutlich effizienter dadurch, dass der Spant als Ganzes verfahren wird.

Die Arbeiten zum typischen Spant im Rahmen RENO TORA konzentrieren sich auf die teilautomatisierte Herstellung des trockenen „Preforms“ sowie den Aushärtvorgang anhand eines integralen Spantes. Die Aktivitäten wurden innerhalb von Reno-Tora mit einem „mittleren“ Reifegrad (TRL3) im Wesentlichen mit dem Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit eines integralen Spantes abgeschlossen.

Im Rahmen von LuFo V wurden die Tätigkeiten fortgeführt. Aufbauend auf dem TRL3 wurde die Reproduzierbarkeit der Bauteil-Fertigung nachgewiesen bzw. optimiert und es wurden industrielle Aushärtekonzepte entwickelt, umgesetzt und in der Fertigung einer Kleinserie von Spanten demonstriert. Im Verlaufe zeigte sich dass das Strukturgewicht des geflochtenen Spantes vergleichbar mit dem der UD-tape Prepreg Varianten ist, und die Kosteneinsparpotentiale in der Fertigung sogar höher sind. Die geforderten Gewichtseinsparpotentiale zeigten sich aber als nicht ausreichend bei gleichzeitig erhöhtem Material- und Prozessentwicklungsrisiko. Es wurde deshalb seitens Airbus entschieden, den Fokus im Rahmen EPROC auf bereits etablierte Materialien und grundsätzliche Fertigungs-Prozesse (AFP-Prepreg) für einen integralen Spant zu richten.

Der Stand der Technik hinsichtlich der Integralspant-Fertigung mit diesen Technologien wurde damit auf die fortgeschrittene Technologische Reife (TRL4) erweitert. Die dafür erforderlichen strukturmechanischen Methoden wurden erarbeiten, und mittels Strukturtests validiert. Die geometrische Maßhaltigkeit sowie Reproduzierbarkeit konnte nachgewiesen werden. Der Stand der Technik wurde weiterhin um ein Vermessungskonzept und Montagekonzept für Integralspante erweitert. Dabei wird final eine „virtuelle“ Vermessung des Spantes zwischen Spant-Fuß und Haut

durchgeführt, in dem die beiden Fügepartner für sich vermessen und deren Fügung dann simuliert wird. Nachdem daraus abgeleitet ggf. erforderlicher Spaltfüller ebenfalls ohne Kontakt aufgetragen und ausgehärtet wurde, reduziert sich der Prozess der Montage auf den bloßen Auftrag von Dichtmasse und der einmaligen und also finalen Positionierung des Spantes auf der Haut.

#### AP 2 Entwicklung und Validierung einer neuen Messmethode zur Online Detektion und Überwachung des Trocknungszustandes von Lacken

Immer mehr etablieren sich forcierte Trocknungsverfahren als Lösungsmöglichkeiten im Flugzeugbau, um die Trocknungszeiten der Beschichtungen und damit auch die Gesamtproduktionszeiten deutlich zu verkürzen. Bei Airbus wird beispielsweise die Infrarotstrahlung zur Trocknung der Außenbeschichtungssysteme der Sharklets eingesetzt.

Prinzipiell gilt, dass der nächste Prozessschritt an einer lackierten Flugzeugbauteiloberfläche erst dann erfolgen kann, wenn die Beschichtung den sogenannten Trocknungszustand dry-to-tape erreicht hat. Dieser hängt bei einer Infrarottrocknung davon ab, welcher Farbton die Beschichtung innehat und welcher Chemismus dem Beschichtungssystem zugrunde liegt.

Momentan unterliegen die verschiedenen Beschichtungen bei einer Infrarottrocknung einer festgelegten Trocknungszeit. Bei dieser Zeit handelt es sich um die längste Trocknungszeit, die für einen (kritischen) Farbton gemessen worden ist. Folglich werden Beschichtungen, die bereits die dry-to-tape-Zeit erreicht haben, überbehandelt. Bei einer Übertrocknung kommt es zu Verlusten hinsichtlich Prozesszeiten und Energie.

Der Stand der Technik wurde in diesem Arbeitspaket durch die Entwicklung eines optimierten Prozessablaufes zur Trocknung von Luftfahrzeugbeschichtungen basierend auf dem Einsatz von kontaktlosen Spektroskopie-Messvorrichtungen in Kombination mit Infrarotaushärtung bis zum technologischen Reifegrad TRL3 erweitert.

#### AP 3.1 Schnelle und hochpräzise Montage

Das aktuelle Produktionssystem für die A350XWB Rumpfmontage bildet die technologische Grundlage für das Arbeitspaket 3.1 in EPROC.

Erstmals wurden hier sehr große CFK-Rumpfkompenten gefertigt, vor- und endmontiert. Die klassische vierer Schalenteilung ist auch hier zur Umsetzung gekommen, allerdings sind die Rumpsegmente deutlich integraler hinsichtlich Aufbau, Länge und Umfang als in bisherigen Serienprogrammen. Weiterhin wurde erstmals ein Rumpf größtenteils aus CFK gefertigt und montiert. Die Flexibilität in den Positionier- und Aufnahmepunkten erlaubt auch die Montage von unterschiedlichen Derivaten des Airbus A350XWB. Von entscheidendem Vorteil ist hierbei, dass der Unterschied in der Rumpflänge im zylindrischen Anteil des Rumpfes liegt und keine Positionen von Passagiertüren oder Frachttoren von der Änderung betroffen sind.

Messungen werden mittels Laser Tracker und dazugehörigen Targets vorgenommen. Dieses Verfahren bietet hinsichtlich Robustheit und Prozesszeit noch viele Verbesserungspotentiale. Zum Beispiel fehlt noch eine zentrale Speicherung und Verwertung von Messdaten, sowie die

Verknüpfung von vor- und nachgelagerten Fertigungs- und Montageschritten. Die Montage der ersten fünf Maschinen für statische Nachweise und die Flugerprobung haben gezeigt, dass die Positionierung der Komponenten für die Rumpfmontage sehr viel Zeit in Anspruch nimmt. Für den Ratenhochlauf ist eine steile Lernkurve unerlässlich.

Um Entwürfen für einen hochintegralen Rumpf und neuen Anforderungen für eine zukünftige Fabrik mit intelligenter Steuerung und Vernetzung gerecht zu werden ist es wichtig, diese Technologien für ein zukünftiges Flugzeugprogramm weiterzuentwickeln. Insbesondere für einen schnellen Ratenhochlauf, gemischte Produktionslinien und eine größere Vielfalt an Derivaten wird eine neue Generation von robusten und flexiblen Vorrichtungen, dazugehöriger Messtechnik und die Vernetzung auf Prozess- und Bereichsebene entlang der gesamten Montagekette benötigt.

Der Stand der Technik hat sich entsprechend um die in diesem Arbeitspaket entwickelten und im Kapitel 2 beschriebenen Innovationen erweitert.

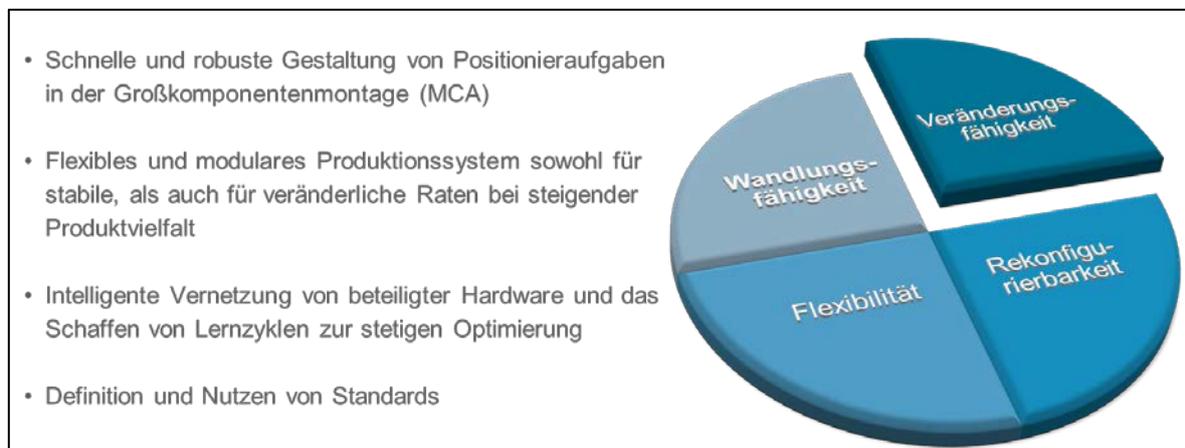


Abb.2: Hauptaufgaben im Rahmen des Förderprojektes

### AP 3.2 Vibrationsbohren

Faser-Metall-Schichtverbunde weisen hervorragende gewichtsspezifische Eigenschaften auf, die sie zu einem beliebten Werkstoff für Leichtbauanwendungen machen [Ste09]. Speziell in der Luftfahrtbranche ist der Einsatz von Werkstoffverbunden innerhalb der letzten Jahre stark angestiegen [Jah-2012].

Um das Fügen dieser Materialverbunde zu ermöglichen, müssen zunächst Senk- oder Durchgangsbohrungen eingebracht werden. Das Bohren durch die unterschiedlichen Werkstoffschichten ist dabei mit erheblichem Aufwand verbunden. Anders als bei den Bohrparametern, die für jede Schicht individuell angepasst werden können, müssen bei der Wahl des Werkzeugs Kompromisse hinsichtlich Geometrie, Schneidstoff und Beschichtung eingegangen werden. Dies ist besonders kritisch, wenn die Zerspanungseigenschaften zweier am Verbund beteiligter Werkstoffe stark voneinander abweichen. Einen großen Einfluss auf die entstehende Bohrungsqualität haben auch die Anordnung der Werkstoffe und die Stärke des Schichtverbundes.

Bei dieser Materialanordnung kommt es sehr häufig zu einer Durchmessererweiterung im Bereich der Faserverbundschicht. Als Ursache für diese Art der Schädigung wird der Abtransport von metallischen Spänen aus der Bohrung angesehen. Dabei reiben die Späne der nachfolgenden metallischen Schicht während der Förderung in Richtung Bohrungseintritt an der bereits erzeugten Oberfläche. Grenzflächen von Faserverbundwerkstoffen sind aufgrund der inhomogenen und anisotropen Materialeigenschaften extrem anfällig gegen abrasiven Verschleiß, wodurch es gerade in diesen Schichten zu einem erosiven Abtrag an der Bohrungswandung kommt [Bri-2011, Ram-2001, Shy-2011, Zit-2012]. Als Folge daraus ergibt sich eine Durchmessererweiterung, die in einigen Fällen bis zu 600 µm erreichen kann [Bri-2002].

Der beschriebene Effekt tritt besonders in Verbindung mit Titanlegierungen auf. Die Folge ist eine unzureichende Bohrungsqualität nach dem ersten Bearbeitungsschritt. Um die hohen Qualitätsanforderungen, wie sie beispielsweise in der Luftfahrt gefordert sind, zu erreichen sind daher zeitaufwändige Nachbearbeitungen durch Aufbohren oder Reiben notwendig [Pec-2012a]. Bei der Zerspanung von Titanlegierungen wird in diesem Zusammenhang auch häufig über eine thermische Schädigung des Matrixwerkstoffes (Verbundphase des FVW) berichtet [Bri-2002, Bri-2011, Ram-2001, Shy-2011, Zit-2012]. Es wird angenommen, dass die Bohrungswandung durch die teilweise über 500°C heißen Titanspäne überhitzt wird [Bri-2002]. Die Zersetzungstemperatur der in der Luftfahrt eingesetzten Epoxidharze (Matrixwerkstoff) liegt in etwa bei 350°C [Cha-2009]. Um diese Art der sekundären Schädigung zu vermindern haben sich Stufenbohrer als nützlich erwiesen, jedoch steigt hierbei die Bearbeitungszeit durch den verlängerten Schnittweg an [Bri-2002].

Als weitere Ursache für Durchmesserabweichungen werden die ungleichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten sowie die unterschiedlichen Elastizitäten der jeweiligen Werkstoffschichten angesehen. Faserverbundwerkstoffe weisen einen wesentlich kleineren E-Modul auf als beispielsweise Aluminium oder Titan. Infolge dessen kommt es während des Bohrprozesses zu einer radialen Abdrängung des Materials, was wiederum zu einer Abnahme des finalen Bohrungsdurchmessers in dieser Schicht führt. Die hierdurch hervorgerufenen Durchmesserunterschiede sind jedoch relativ gering [Bri-2002].

Neben den hier beschriebenen Schädigungen der Bohrung durch die Spanabfuhr ist auch die geringe Standzeit der Werkzeuge als problematisch anzusehen. Speziell bei der Zerspanung von CFK/Ti-Verbunden kommt es durch die stark abrasive Wirkung der Kohlenstofffasern in Kombination mit der hohen thermomechanischen Last im Titan zu einem drastischen Verschleiß der Schneiden. Als Folge nimmt die Bohrungsqualität bereits nach wenigen Bohrungen ab. Werkzeuge aus Vollhartmetall zeigen hier wesentliche Vorteile gegenüber HSS [Ram01, Kim04]. Geringfügige Verbesserungen der Standzeit konnten durch den Einsatz von Beschichtungen aus TiAlN und einer Compositbeschichtung aus TiN/AlTiN/CrAlSiN erzielt werden [Shy-2011, Bri-2002]. Durch die Verwendung von Minimalmengenschmierung ließen sich die Adhäsionsneigung und der Verschleiß in Titanlegierungen deutlich reduzieren und das Bearbeitungsergebnis noch weiter verbessern [Bri-2002].

Ein alternatives Verfahren zur schädigungsarmen Herstellung von Bohrungen stellt das Orbitalbohren dar. Hierbei handelt es sich um einen helikalen Bohr-Fräse-Prozess, bei dem ein spezieller Schaftfräser

auf einer helixförmigen Bahn in das Werkstück eindringt und so die Bohrung erzeugt. Die Vorteile gegenüber dem konventionellen Bohrprozess liegen in deutlich geringeren Zerspanungskräften (weniger Delamination), niedrigeren Zerspanungstemperaturen (keine thermischen Schädigungen der Randzone) und der guten Spanabfuhr (Kommaspäne aufgrund des Fräsvorgangs). Bei metallischen Werkstoffen entsteht unter gewissen Randbedingungen am Bohrungsausstritt eine sichelförmige Kappe, die sehr gut durch die Bohrung abgesaugt werden kann. Das Verfahren eignet sich daher auch für die „saubere“ Herstellung von Nietbohrungen in geschlossenen Bauteilen [Fan12]. Bei ungünstigen Aspektverhältnissen (Bohrungslänge zu Bohrungsdurchmesser) kommt es jedoch infolge der großen Auskraglänge zu einer deutlichen Abdrängung des Werkzeugs. Tiefe Bohrungen mit kleinen Durchmessern sind daher nicht herstellbar. Weiterhin können beim Orbitalbohren nur relativ kleine Vorschubgeschwindigkeiten realisiert werden.

Ein vielversprechendes Verfahren zur Verbesserung der Spanabfuhr, stellt das vibrationsunterstützte Bohren dar [Gui-2008]. Hierbei wird der an der CNC-Maschine programmierten Vorschubbewegung eine axiale Schwingung überlagert. Unter bestimmten Bedingungen führt dies zu einer Schnittunterbrechung und damit zu einer Bruchspanbildung. Im Vergleich zu den Schnittparametern beim konventionellen Bohren (Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  und Vorschub  $f$ ), werden diese beim Vibrationsbohren um die Amplitude  $A$  und Frequenz  $F$  der Schwingung ergänzt. Als Frequenz ist hier die Schwingungsanzahl pro Werkzeugumdrehung definiert. Durch die neue Kinematik ändern sich die Eingriffsverhältnisse und die damit verbundene Spanbildung drastisch.

Bisherige Untersuchungen konzentrieren sich hauptsächlich auf das ultraschallunterstützte Vibrationsbohren, das mit sehr hohen Frequenzen (bis zu 40 kHz) und relativ kleinen Amplituden zwischen 10 und 20  $\mu\text{m}$  betrieben wird. Durch dieses Verfahren lässt sich die Vorschubkraft beim Bohren reduzieren, was bei metallischen Werkstoffen zu einer Verminderung des Grades führt [Cha-2010] und in Faserverbundwerkstoffen die Delaminations-Neigung reduzieren kann [Pha-2013]. Durch die kleinen Amplituden kommt es jedoch in metallischen Werkstoffen nicht zwangsläufig zu einem Spanbruch, gerade wenn diese besonders duktile Eigenschaften aufweisen. Das zu untersuchende Vibrationsbohren bei niedrigen Frequenzen (ca. 125 Hz) erlaubt wesentlich höhere Amplituden von bis zu 0,2 mm, was zwangsläufig zu einem unterbrochenen Schnitt führt. Die bei diesem Verfahren auftretenden Spanbildungsmechanismen sind bisher noch nicht durchdringend verstanden.

Erste Projekte zum Thema „sauberes Bohren“ haben gezeigt, dass bei herkömmlichen Bohrprozessen eine Kontamination mit gesundheitsgefährdenden Stoffen am Bohrungsausstritt nicht vermeidbar ist. Erst durch die Einführung spezieller Prozessstrategien, wie beispielsweise der Anwendung von Endspanhüben und durch den Einsatz optimierter Absaugeinrichtungen konnten Verbesserungen erzielt werden, die jedoch noch keinen „sauberen“ Prozess garantieren. Aus diesem Grund ist es erforderlich neue Bohrtechniken, wie beispielsweise das Vibrationsbohren in Kombination mit geeigneten Werkzeugen sowie Strategien für die Prozessführung und den Schmiermitteleinsatz einzuführen. Die Voruntersuchungen zu diesem Thema wurden auf stationären Werkzeugmaschinen durchgeführt. Es ist zu prüfen, ob die hier gewonnenen Erkenntnisse auf Robotersysteme zur automatisierten Fertigung übertragbar sind.

Der Stand der Technik hat sich entsprechend um die in diesem Arbeitspaket entwickelten und im Kapitel 2 beschriebenen Innovationen erweitert.

## 1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen erfolgte gemäß dem Antrag. Nachfolgend werden die wesentlichen Aspekte der Zusammenarbeit mit den einzelnen Partnern aufgeführt. Eine vollständige Erläuterung der geplanten Partnerbeiträge zur Erreichung der Projektziele kann dem Antrag entnommen werden.

### 1.5.1 Projektpartner

Der Verbund bestand aus folgenden Projektpartnern:

- EADS DEUTSCHLAND GMBH–INNOVATION WORKS
- CENIT AG
- FRAUNHOFER GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG.E.V (FHG-IFAM)
- DÜRR SYSTEMS GMBH
- Cenit AG (Projektakronym)

Abweichend zum Antrag entfällt XPERION Aerospace als Partner.

### 1.5.2 Unterauftragnehmer

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden F&E Fremdleistungen an folgende Unternehmen und Institutionen vergeben:

- Brötje Automation GmbH
- EADS Innovation Works (IW)
- Stiftung Institut für Werkstofftechnik
- Klent GmbH und Co. KG
- Bremer Werk für Montagesysteme (BWM)
- Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
- CTC GmbH
- Kunststoffverarbeitender Betrieb (Industrie: Huhtamaki Films bzw. Airtech)
- Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) GmbH
- Kunststofflabore und kunststoffverarbeitender Betrieb (KMU)
- Werkzeughersteller (Frimo GmbH)
- Premium Aerotech GmbH (PAG)
- COTESA GMBH
- LTI

Innerhalb dieses Vorhabens entstanden unmittelbare Vorhabenkosten mit folgende Unternehmen und Institutionen im Rahmen eines Unterauftrages:

- 3D Contech für Design Ingenieur Dienstleistung
- ELAN für Stress Ingenieur Dienstleistung (FEM)
- Global Technics für Stress Ingenieur Dienstleistung (Trades)

## 2. ERGEBNISSE

### 2.1 ERZIELTE ERGEBNISSE

#### 2.1.1 AP1.1 Stringer-Integration

##### 2.1.1.1 Evolutionäre Entwicklung des Vakuumaufbaus

#### Herstellung der neuen Generation Blister-Hauben

Im Rahmen der Projektarbeit wurden verschiedenen Verfahren zur Herstellung der Blister-Hauben untersucht und auf derer Eignung bewertet. Angefangen mit dem Stand der Technik, wurde zunächst in Zusammenarbeit mit der Firma Kiefle das konventionelle Thermoformen auf Standardanlagen erprobt. Unter Berücksichtigung weiterer Randbedingungen (u.a. Bauteilgröße, Prozesskosten) wurden danach Alternativen mit der CTC GmbH entwickelt und getestet. Die eigentliche Entwicklung der Umformtechnologie wurde dem Erzielen einer belastbaren Lösung für die angestrebte Zielanwendung (A350 WUC) zuerst beendet. Eine spätere Fortführung im Rahmen einer Disseminierung kann zurzeit nicht ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Kiefel inkl. Optimierung der TF-WKZ + Identifizierung der Grenzen

#### Lösung für lange Bauteile

- Erkenntnisse über Kriterien zur erfolgreichen Umformung und zur Auswahl einer Umformtechnologie unter Beachtung der geometrischen und industriellen Randbedingungen.
- Berichte über Fertigungsversuche

Die Herstellung der Blister-Hauben kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Dabei kann zunächst auf das konventionelle Thermoformen zurückgegriffen werden. Dieses Konzept lässt sich vor allem auf handliche Blister-Formate anwenden. Der Prozessablauf des konventionellen Thermoformens in stichpunktartiger Darstellung mit dazugehörigen Fotos:

1. Auflegen der Folie auf den Maschinentisch
2. Festklemmen der Folie durch einen Spannrahmen
3. Gleichmäßiges Erwärmen der Folie durch Keramikstrahler
4. Folie wird durch die Regulierung des Drucks im Maschinenuntertisch waagrecht gehalten oder durch Aufblasen leicht vorgestreckt
5. Werkzeug fährt in das Folienhalbzeug, gleichzeitig wird das Volumen zwischen Folie und Werkzeug durch Vakuum evakuiert (die Folie legt sich an das Werkzeug)

6. Blister wird abgekühlt
7. Blister wird entformt

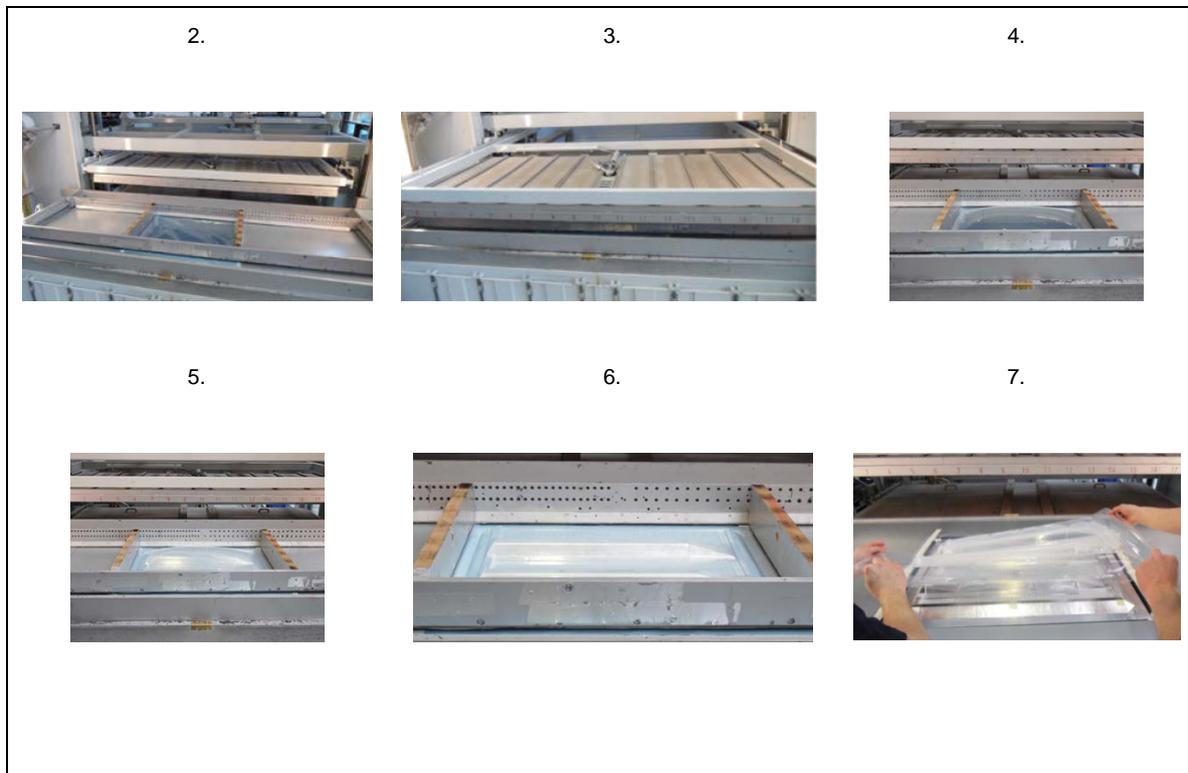


Abb.3: Ablauf - konventioneller Thermoformprozess

Die Abformgenauigkeit bzw. -qualität ist bei der vorangegangenen Herstellung stellenweise noch nicht ausreichend. Das liegt an einer zu geringen Anzahl von Vakuumböhrungen und an einer inhomogenen Temperatur- bzw. Dickenverteilung. Vorher genannte Unstimmigkeiten und Materialdickenunterschiede nach dem Umformen, hervorgerufen durch eine stellenweise Ausdünnung, führen zu einer Wellenbildung in den Stringer-Innenkanten (siehe folgende Abbildung). Des Weiteren ist beim Entformen bei unzureichender Abkühlung des Blisters eine leichte plastische Nachverformung zu beobachten.

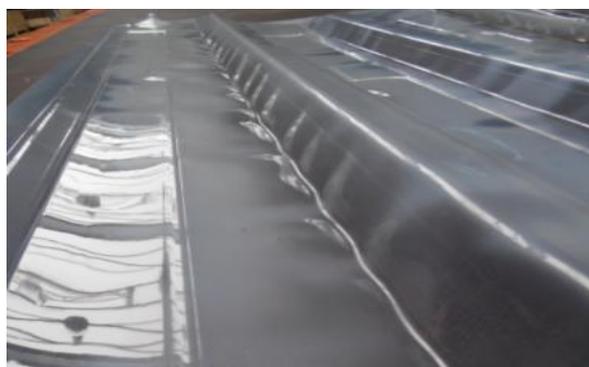


Abb.4: Wellenbildung

Die Dichte der Vakuumborungen im Werkzeug sollte zumindest in geometrisch komplexen Bereichen sehr hoch sein (etwa 20 mm Abstand). Der Prozess kann optimiert werden, indem man Störgrößen ausschließt. Die Folie und das Werkzeug müssen beim Formvorgang eine jeweils homogene Temperaturverteilung haben. Der Abkühlvorgang nach dem Umformen muss ausreichend effektiv gestaltet werden, damit sich der Blister beim Entformen nicht mehr plastisch verformen lässt. Durch den Einsatz eines Oberwerkzeuges, das die Kontur der Blister-Oberseite abbildet, könnten die Einflüsse der Entformung deutlich verringert werden.

### Thermoformsimulation

Von der Firma Kiefel Technologies wurde für das konventionelle Thermoformen mit einem Werkzeug der Rumpfgeometrie eine Thermoformsimulation durchgeführt. Dabei wurde das Ausmaß der Materialausdünnung in den Bereichen der größten plastischen Dehnung ersichtlich. Messungen an den thermogeformten Folien konnten die Ergebnisse der Simulation bestätigen. Die Restwandstärke beträgt stellenweise nur noch 30% der Wandstärke des Rohmaterials. Demzufolge verringern sich die Gesamtsteifigkeit des Vakuumaufbaus und die Stabilität in den Bereichen der Stringer-Flanken.

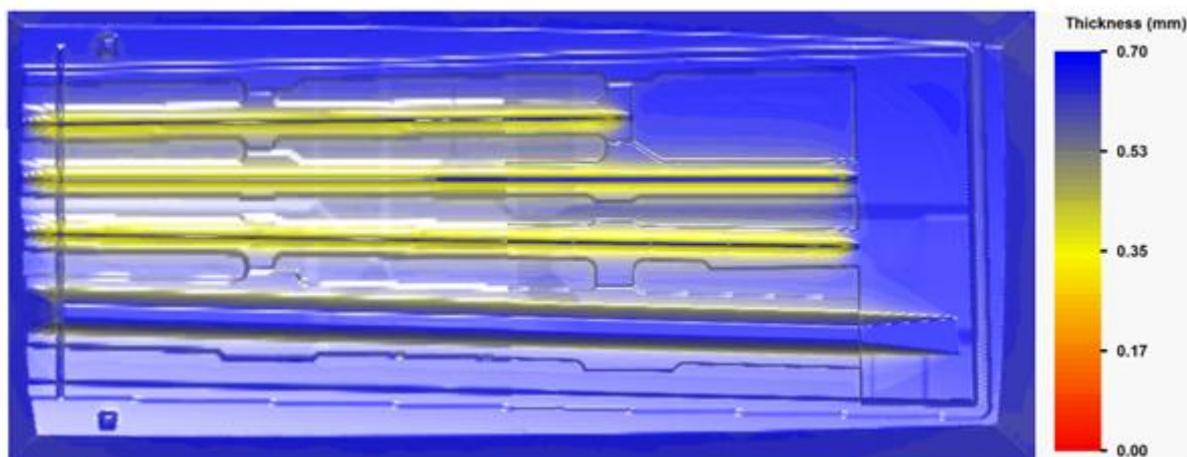


Abb.5: Thermoformsimulation (Rumpfausschnitt)

Die Aushärteversuche mit thermogeformten Blistern verliefen wie technisch gefordert. Somit erfüllt die BlisterVac-Technologie die erforderlichen Funktionen auch in Bereichen, die bis zu einem gewissen Grad (~0,15mm) ausgedünnt sind.

### Kontinuierliches Thermoformen – BlisterVac

Um längliche Strukturen, wie z.B. eine CFK-Flügelschale, mit der BlisterVac-Technologie auszuhärten, wird über die Möglichkeit des kontinuierlichen Thermoformens nachgedacht. Der Grundgedanke besteht darin, die sich wiederholende Geometrie einer Flügelschale (Haut – T-Stringer– Haut) mit langen, schmalen Blister-Segmenten abzudecken und der Länge nach abzudichten. Der Thermoformprozess könnte dadurch einfacher und kostengünstiger gestaltet werden. Die Multilayer-Folie wird dabei grob über ein geeignetes Thermoformwerkzeug variabler Länge vordrapiert. Es kommt also nur zu geringen mechanischen Deformationen, da genügend Material vorhanden ist. Für

eine gute Abformung, insbesondere der Innenkanten, muss das Thermoformwerkzeug über ausreichend viele Vakuumb Bohrungen verfügen. Die Wärmeeinbringung kann entweder mit Hilfe eines langen Ofens konstant an jeder Stelle, oder mit einem Heizsystem, welches kontinuierlich über das Thermoformwerkzeug geführt wird, erfolgen. Dabei sollte die Folie möglichst an jeder Stelle im Querschnitt homogen erwärmt werden. Das kann mittels Wärmestrahlern oder Gebläsen realisiert werden, oder aus einer Kombination von beiden (Strahlung und Konvektion).

Prinzip Skizze:

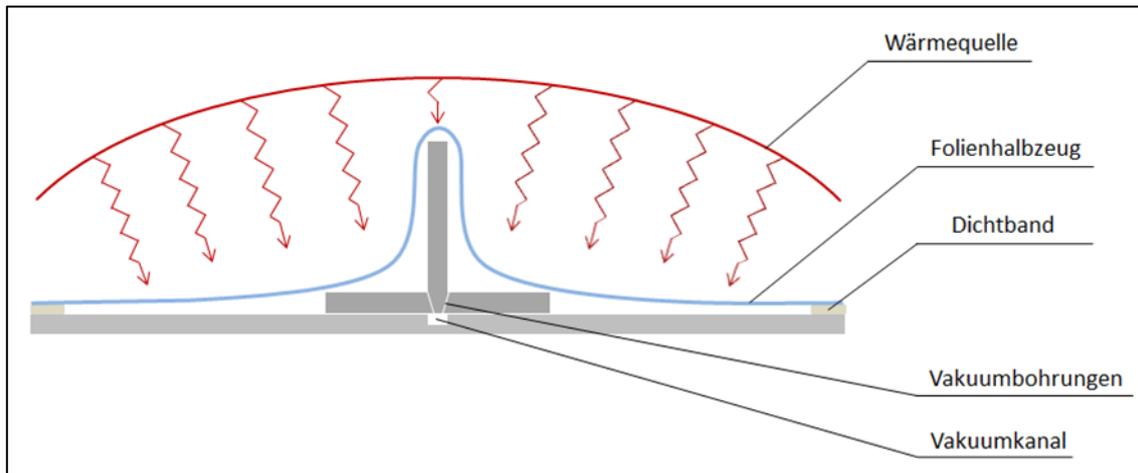


Abb.6: Querschnitt - kontinuierliches Thermoformen

Unter dem Stringer-Steg wird ein Vakuumkanal vorgesehen. Dieser sorgt dafür, dass an jeder Bohrung Vakuum anliegt, um so eine gute Abformtreue zu erreichen. Die Verbindung des Stringers mit der Haut kann mit einem Klebeband bzw. Klebefilm erfolgen. Zum Erreichen einer scharfkantigen Abformung im Übergangsbereich Stringer zu Haut besteht die Möglichkeit die Klebung nicht bündig mit dem Rand abschließen zu lassen. Dadurch wird eine linienförmige Absaugung realisiert, die sich in Versuchen als äußerst effektiv dargestellt hat.

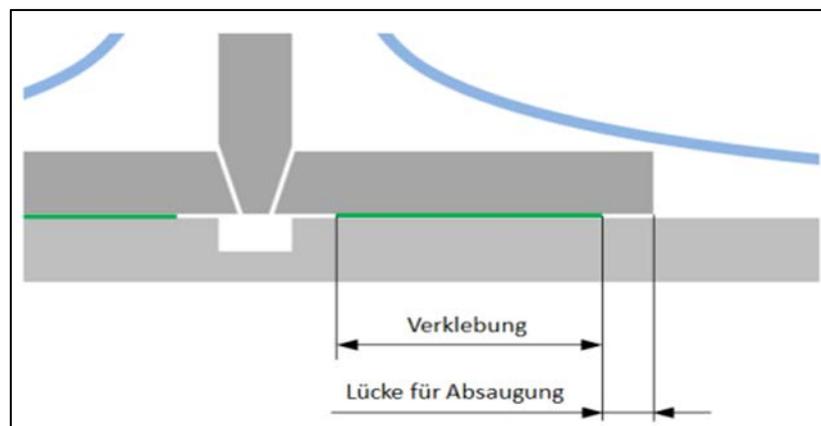


Abb.7: Detail – Thermoformwerkzeug (Vakuumbversorgung)

Für die Aufgabe ist es sinnvoll die Arbeitsschritte „Vordrapieren“, „Formen“ und „Entformen“ voneinander zu entkoppeln und somit eine Vorformstation, eine Formstation und eine Entformungsstation vorzusehen. In Längsrichtung angeordnete Rollen sollen eine Taktung der Bauteile und somit die durchzuführenden manuellen Arbeitsschritte gewährleisten. Somit kann die Folie auf der Vorformstation der Werkzeugkontur durch grobes Vordrapieren vorangepasst werden, um folglich auf der Formstation durch Hitzeeinwirkung endgültig geformt zu werden. Ist das fertige Produkt zur Entformungsstation getaktet, kann es schließlich von dem Werkzeug entformt werden. Um eine Formung des Bauteils der Länge entlang durchzuführen, sind zwei seitlich an der Formstation angebrachte Schienen vorgesehen, auf dem ein Portal mit zugehörigen Schlitten verfahren kann. Die Heizmittel sind folglich in dem Portal anzubringen, welches kontinuierlich über dem Formwerkzeug zu verfahren ist und somit das Abformen einer theoretisch unendlichen Bauteillänge ermöglicht. Eine grobe Konzeptskizze ist in folgender Abbildung zu sehen.

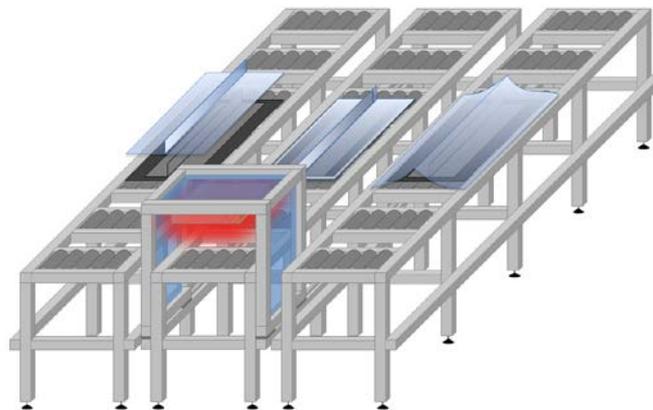


Abb.8: Formstation

Für die Auswahl eines geeigneten Infrarotstrahlers wird die Firma Heraeus Noblelight GmbH herangezogen, da diese maßgeschneiderte Lösungen für unterschiedliche Anwendungsfälle anbietet. Ebenso stellt die Firma Leihgeräte zur Verfügung, um vorab Versuche mittels in Frage kommender Infrarotstrahler durchführen zu können. Für die vorliegende Anwendung bieten sich laut der Heraeus Noblelight GmbH Carbonstrahler an, da diese einen besonders hohen Anteil der abgegebenen Strahlung in der Wellenlängen zwischen  $2\ \mu\text{m}$  und  $4\ \mu\text{m}$  besitzen. Hierbei handelt es sich um Infrarotstrahler, die aus einem Quarzrohren bestehen, in denen Heizfilamente aus Carbon eingebracht sind. Ein auf der Rückseite der Quarzrohre angebrachter Goldreflektor sorgt für eine gerichtete Strahlung.

Mittels der Carbonstrahler sind im Gegensatz zu mittelwelligen Strahlern, sehr hohe Flächenleistungen sowie sehr kurze Reaktionszeiten erreichbar. Demnach sind Flächenleistungen von bis zu  $150\ \text{kW}/\text{m}^2$  erreichbar sowie Reaktionszeiten im Bereich von 1 bis 2 s notwendig, um die volle Leistung der Strahler nutzen zu können [Quelle: Heraeus Noblelight GmbH, Infrarot-Strahler für industrielle Prozesse, Produktinformation, N.N.].

## Entwicklung und Validierung neuer Ansätzen zur Abdichtung

Durch den klassischen Thermofomprozess auf einer konventionellen Anlage ist die erreichbare maximale Blister-Größe beschränkt. Bei großen CFK-Bauteilen (z.B. Rumpf oder Flügelschale A350) ist es daher erforderlich mehrere Blister-Segmente auf dem nichtausgehärteten CFK-Bauteil zu verbinden. Außerdem ist wie bei normalen Vakuumaufbauten eine Abdichtung zum Rand notwendig.

Für die Verbindung der Blister-Segmente untereinander sind verschiedene Ausführungen der Verbindungsflächen sowie die Verwendung von Klebebändern und flüssigen Kleb- und Dichtstoffen denkbar. Eine Übersicht über alle ausgearbeiteten Geometrien ist in folgender Abbildung zu sehen:

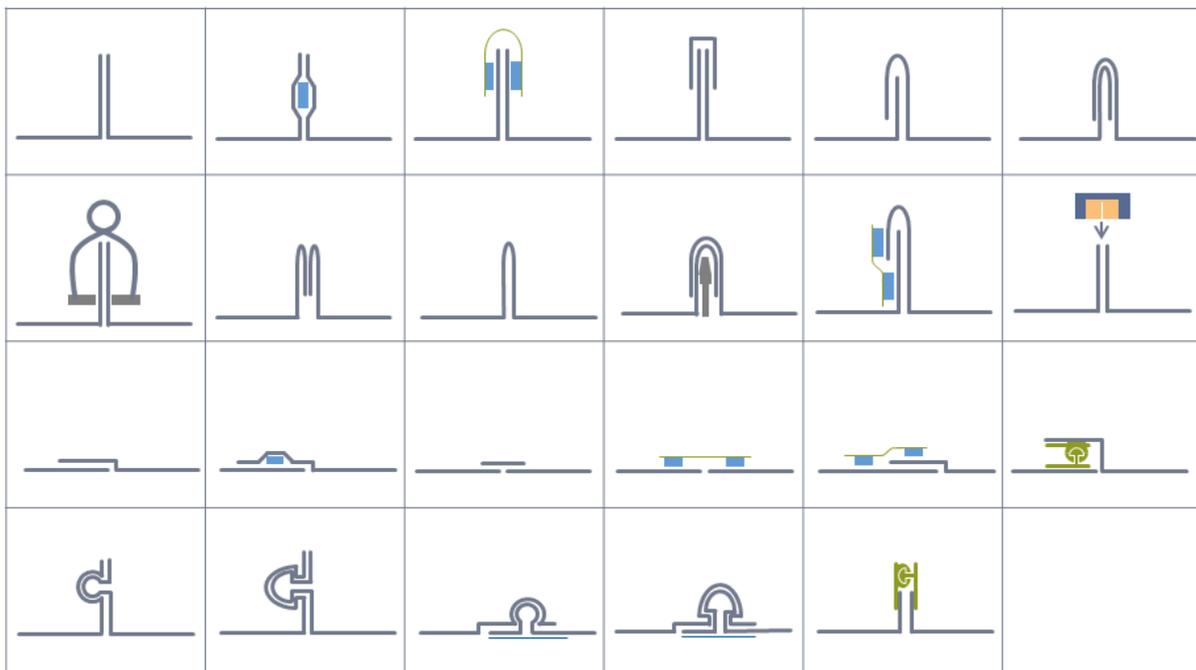


Abb.9: Abdichtkonzepte Blister/Blister mit Zugang von außen

	Blister-Folie
	Teflon-Band
	Elastomer-Material
	Dichtband („Tacky Tape“)
	PA-Folie (Vakuumfolie)
	Metall
	Dichtmasse

Abb.10: Legende

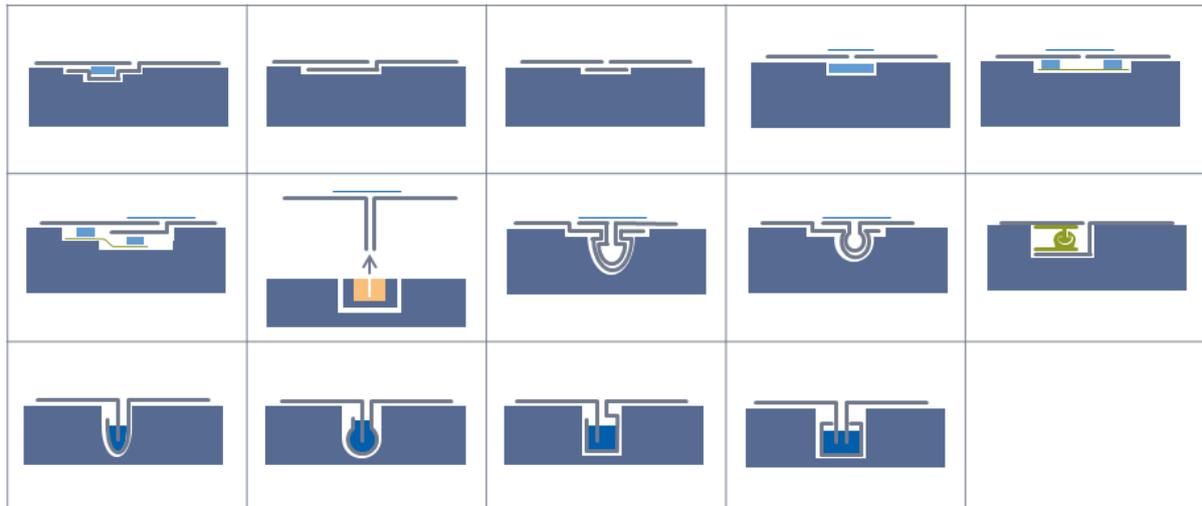


Abb.11: Abdichtkonzepte Blister/Blister mit Zugang von innen

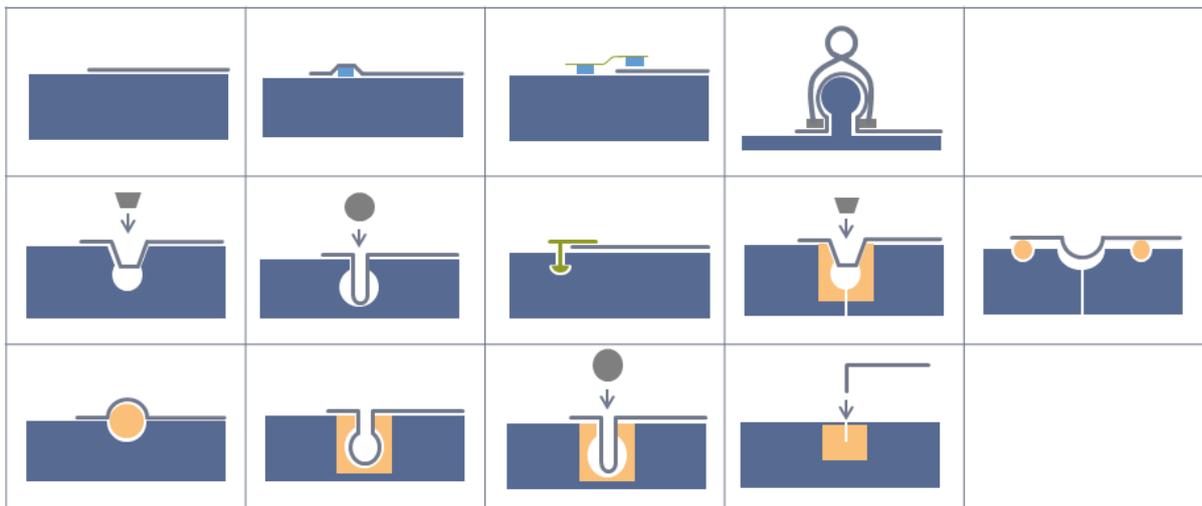


Abb.12: Abdichtkonzepte Blister/Tool

Neben den möglichen Ausführungen der Verbindungskonzepte Blister gegen Blister und Blister gegen Tool, wurden auch verschiedene Klebebänder und Kleb-/Dichtstoffe recherchiert und auf ihre Tauglichkeit getestet. Die wesentlichen Anforderungen waren eine Vakuumdichtheit der Fugestelle bei 180°C und eine ausreichende Klebekraft bei 180°C. Für die Bewertung der Dichtigkeit wurde als Obergrenze ein maximaler Druckanstieg von 50mbar/min angesetzt. Für die Verklebung wurde vorausgesetzt, dass die Klebeverbindung in einem Schälversuch mindestens eine Kraft von 10N aushält.

Hersteller	Produkt	Art	vakuumdicht 20°C		vakuumdicht 180°C		ausreichend Klebkraft 20°C		ausreichend Klebkraft 180°C (-<10N Zugkraft Schälung)	
			PA/PA	ETFE/ ETFE	PA/PA	ETFE/ ETFE	PA/PA	ETFE/ ETFE	PA/PA	ETFE/ ETFE
3M	9485	doppelseitiges Klebeband								
	9627	doppelseitiges Klebeband								
	4411N	Dichtband								
Aremco	Bond 570									
	Bond 2310									
Bostik	Thermelt 4500									
	CH874									
	H9446									
CMC	CMC 77703	doppelseitiger Klebefilm								
	CMC 15100	doppelseitiger Klebefilm								
Delo	DUOPOX AD 540									
	PUR AD948									
Dymax	UVKlebstoff 3083	UV-aktivierter Klebstoff								
Huntsman	Epibond 100 A/B									
Hylomar	S5900	Silikon								
Loctite	3090 mit Primer 7700	Sekundenkleber								
Polytec PT	EP 655									
	EP 610									
	VP4113									
Reiß	Merbenit 2K40									
	Merbenit 2K10									
	2k Semp 01+02									
Tesa	8410	hitzeaktivierbare Klebefilm								
	4965	doppelseitiges Klebeband								
tewipack Uhl	Nitto AI57	Dichtband								
Weicon	FLEX 310 M HT 200									
	RK1300 mit Primer P400									

	erfüllt Anforderungen
	erfüllt Anforderungen beschränkt
	erfüllt Anforderungen nicht

Abb.13: Getestete Produkte

## Entwicklung und Validierung neuer Ansätze zur Aufrüstung und Positionierung

### Vorbereitung der Blister-Folie

Bereits während der Thermoformversuchen bei der Fa. Kiefel wurde die Qualität der thermogeformten Folien grob bewertet und dokumentiert. Für das Versuchsbauteil wurden von diesen Folien jeweils die besten ausgesucht. Um alle Folien gleichzeitig an einem Versuchsbauteile testen zu können wurde entschieden, dass bei den vier Segmenten zweimal die Folie vom Typ 1 und jeweils einmal vom Typ 4 und Typ 5 verwendet wird. Die Folien mit der besten Abformung, insbesondere in den Randbereichen, wurden für das Testbauteil ausgewählt und vorbereitet

### Aufrüstung der Blisterfolie

Um die Blister-Segmente gegeneinander abzudichten musste von außen Tacky Tape über die Flansche geklebt werden. Damit das Dichtband beim Autoklav-Prozess und dem Autoklav-Druck von 10bar nicht in kleine Spalte zwischen den Flansche gedrückt wird, wurde unter dem Dichtband zunächst ein Streifen Permacell stirnseitig auf die Flansche geklebt. Auf das Permacell wurde dann von beiden Seiten Tacky Tape und oben gründlich zusammengedrückt. Zusätzlich wurde auf dem Dichtband erneut eine Schicht Permacell aufgebracht, um dem Dichtband während des Autoklav-Prozess eine bessere Beständigkeit zu verleihen.

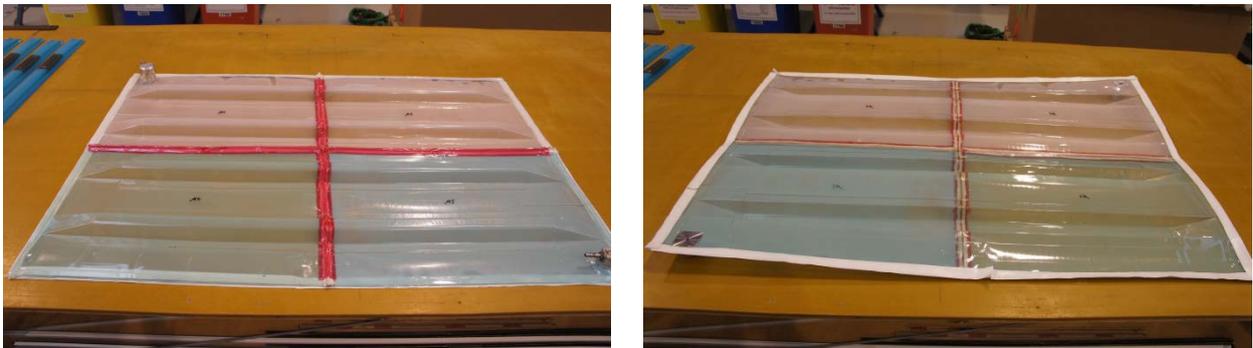


Abb.14: Verbindung der Blister-Segmente

Bevor der Blister mit den Stringer und den Schlauchkernen ausgerüstet werden konnte, wurden die Unterseiten der Omega-Stringer zunächst angeschliffen und mit dem Klebefilm FM300 versehen.



Abb.15: Stringer mit Klebefilm FM300 und Schlauchkerne

Bevor die Blister ausgerüstet werden konnte, musste zunächst in jedem Stringer-Profil ein Loch zur Belüftung der Schlauchkerne gestanzt werden. Dazu wurden die Schlauchkerne im Blister positioniert und ausgerichtet. Dann wurde die Position der Löcher in den Schlauchkernen von außen am Blister angezeichnet und mit einem Lochstempel ausgestanzt. Zum Ausrüsten der Blister wurden die Stringer dann in die richtige Position am Blister gelegt und ausgerichtet. Anschließend wurden die Schlauchkerne ebenfalls im Blister positioniert und mit Magneten von außen im Blister fixiert.



Abb.16: Aufrüstung der Schlauchkerne und der Blisterfolie

Der Blister ist somit fertig ausgerüstet und kann problemlos transportiert und bewegt werden. Beim Anheben des fertig ausgerüsteten Blister-Aufbaus ist allerdings aufgefallen, dass die Folie M4 mit einer Dicke von 300µm an den Enden hochklappt und nicht in der thermogeformten Form bleibt. Dies ist in der folgenden Abbildung zu erkennen. Diese Foliendicke weist keine ausreichende Steifigkeit für einen sicheren Transport nach der Ausrüstung auf. Dies sollte bei weiteren Versuchen berücksichtigt werden.

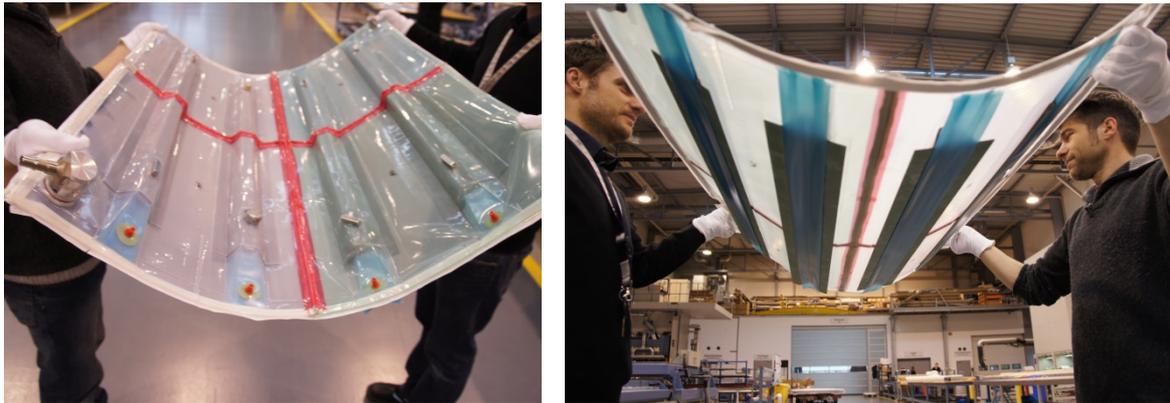


Abb.17: Handhabbarkeit der ausgerüsteten Blisterfolie

## Qualitätsanalyse

Bei der Verwendung der Blister für einen Vakuumaufbau müssen verschiedene materialspezifische Eigenschaften beachtet werden. Dies sind vor allem:

- Schrumpf bei Erwärmen der Folie
- Schwindung nach Thermoformen
- Thermaldehnung bei Aushärtung

### Schrumpf

Unter Schrumpfung versteht man die Maßänderung eines thermoplastischen Halbzeugs unter Temperatureinwirkung, ohne jegliche mechanische Beanspruchung bzw. Verhinderung der Maßänderung. Die Schrumpfung erfolgt immer während des Aufheizens. Sie kann auch gezielt genutzt werden, um andere thermische Eigenschaften zu beeinflussen. So ist es z.B. denkbar, die Thermaldehnung der Blister-Segmente während der Aushärtung im Autoklaven durch ein gezieltes Recken der Folie vor/während des Thermoformens zu kompensieren.

### Schwindung

Unter Schwindung eines Thermoformteils versteht man die Maßunterschiede des Formteils gegenüber denen des Thermoformwerkzeugs. Die Schwindung erfolgt immer nach dem Entformen, beim Erkalten des geformten Teils. Man unterscheidet zwischen Entformungsschwindung ES, Verarbeitungsschwindung VS, Nachschwindung NS und Gesamtschwindung GS. Vergleicht man die Formteillängenmaße unmittelbar nach der Entformung mit den Maßen des Formwerkzeuges (Werkzeug bei 70°C), erhält man die Entformungsschwindung ES. Die Verarbeitungsschwindung kann auf Basis der temperaturabhängigen Längenänderung von Werkzeug und Halbzeug berechnet werden. Die Schwindung nach der Verarbeitungsschwindung VS wird als Nachschwindung NS bezeichnet. Die Gesamtschwindung ist die Summe aus Verarbeitungsschwindung und Nachschwindung.

Die Schwindung hat auch einen großen Einfluss auf den Thermoformprozess, da die Folie bei der Abkühlung auf dem Thermoformwerkzeug zusammenzieht und durch ungleichmäßige Ablösung vom Thermoformwerkzeug verziehen kann. Dies hat sich als großes Problem bei den Thermoformversuche mit den großen Werkzeugen für das BlisterPanel#3 gezeigt. Hier ist es notwendig, einen optimierten Entformungsprozess zu verwenden/entwickeln, um die Formtreue des Blisters beim Abkühlen zu gewährleisten. Die Gesamtschwindung der thermogeformten Blister-Segmente für das BlisterPanel#3 sind noch auszuwerten.

### Thermaldehnung

Für das Verhalten des Blisters während der Aushärtung ist vor allem die Thermaldehnung zu beachten. Die Thermaldehnung von PA6 liegt mit ca. 1% deutlich über der Thermaldehnung des CFK-Bauteils. Aus den Ergebnissen des BlisterPanel#2 hat sich gezeigt, dass der Blister möglichst exakt über die Kanten der ausgehärteten Stringer verlaufen muss, da es sonst in diesen Bereichen zu Anlaufwellen im Laminat kommt und die Laminatqualität in diesen Bereichen nicht mehr die Vorgaben erfüllt. Aus diesem Grund ist es notwendig, das Thermaldehnungsverhalten der Blister während der Aushärtung zu untersuchen und in der Auslegung des Thermoformprozess bereits zu berücksichtigen.

## 2.1.1.2 Werkstoffe und neue Materialien

### Erstellung eines Anforderungskatalogs und der Testkampagne

Während der Entwicklung ist sind folgende Anforderungen an die Blister-Folie aufgestellt worden:

- Vakuumdichte Basisschicht (z.B. Pa6.6 oder PA6 thermostabilisiert)
- Trennwirkung (Coextrudiert als integrierte Schicht, plasmabeschichtet oder ähnliches)
- Extrusionsbreite: 1500 mm als Baseline
- Minimum Dicke: 500  $\mu\text{m}$  (Erste Materialauswahl; Muss je nach Zielbauteil validiert werden)
- Thermoformbar
- Thermisch Stabil bis 180°C Aushärtetemperatur; Vergleichbar mit Standartvakuumfolien
- Beständig gegenüber Umwelteinflüssen bei Raumtemperatur und im Autoklaven/Ofen
- Keine Brüchigkeit während der Entformung
- Beständig gegen Feuchte
- Ausreichend Eigensteifigkeit (Auch während des Handlings)

## Materialscreening und Materialvorauswahl und Testreihe

Im Folgenden soll auf die verschiedenen Folienextrusions-Kampagnen und deren Ergebnisse insbesondere im Berichtszeitraum eingegangen werden

### Kampagne August 2013

- Folie M1 (500µm PA+ETFE, b=680mm)
- Folie M4 (300µm PA+ETFE)
- Folie M5 (700µm PA+ETFE, b=650mm)
- Folie M8 (500µm alternatives PA+ETFE)

Die Qualität aller produzierten Folien war in Ordnung. Die Breite von 650mm wurde noch dadurch limitiert dass hier noch auf eine externe Extrusionsanlage im Zugriff der Fa. Infiana zurückgegriffen wurde.

Die Ergebnisse aus den Versuchen werden im Folgenden stichpunktartig zusammengefasst:

- Folie M1
  - Auslösetemperatur 229°C bei Aufheizleistung von 60%
  - sehr gutes Thermoformverhalten
  - relativ großer Umformtemperaturbereich
  - relativ gute Innenkantenabformung
- Folie M4
  - Auslösetemperatur 238°C bei Aufheizleistung von 60%
  - gute Thermoformverhalten
  - kleiner Umformtemperaturbereich → schnelle Auskühlung
  - mäßig bis schlechte Innenkantenabformung
  - verhältnismäßig großer Schrumpf
- Folie M5
  - Auslösetemperatur 233°C bei Aufheizleistung von 60%
  - relativ großer Umformtemperaturbereich
  - sehr gute Innenkantenabformung
- Folie M8
  - Auslösetemperatur 258°C bei Aufheizleistung von 75%
  - mäßig bis schlechtes Thermoformverhalten
- potentielle Möglichkeiten
  - maximale handhabbare Tiefe für das Thermoformen etwa 1,5m
  - Länge beliebig → bis zu 40m denkbar
- Probleme mit Folienfeuchtigkeit

- bei Hersteller nach Extrusion direkt einschweißen → wie lange lagerbar? → Blister wie lange lagerbar?
- ungetrocknete Folien lassen sich besser handeln, da Randbereich nicht verformt

Die Folie M8 wurde aufgrund eines im Vergleich schlechteren Thermoformverhaltens zurückgestellt.

### 2.1.1.3 Industrialisierung

Im Zusammenhang mit der Flügelentwicklung ist eine Testpyramide aufgestellt worden, die einen groben Überblick über die Versuche bis zur Serieneinführung geben soll. Diese ist in folgender Abbildung zu sehen. Darin ist zu erkennen, dass zunächst mit kleinen Versuchen spezielle Teilgebiete erarbeitet werden. Diese Kleinversuche haben jedoch häufig nicht genug Bezug zum Endbauteil weshalb mit Hilfe einer zweiten Ebene spezifische Anforderungen getestet werden sollen. Am Ende soll dies in ein finales Validatorbauteil zusammenfließen. Dieses Bauteil soll in Größe und Komplexität dem Endbauteil entsprechen.

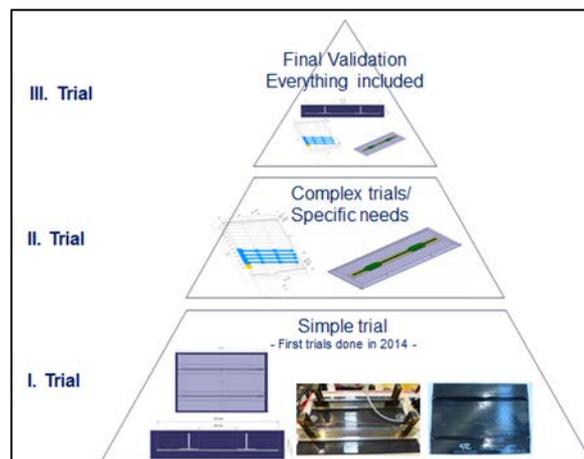


Abb.18: Testpyramide

Die Testpyramide ist in drei verschiedene Bereiche aufgeteilt. Der unterste Bereich zeigt kleine Vorversuche die sich ohne zusätzliche industrielle A350 Anlagen aufbauen lassen. In solchen Versuchen können zu Beispiel die Besten Fußübergangs- und Stegkantenausformungen getestet werden. Zusätzlich ist ein spezieller Dichtigkeitstest designt worden. Damit kann getestet werden mit welcher Blistergeometrie das beste Ergebnis im Sinne der Dichtigkeit und des Fließverhaltens des Tacky Tapes erreicht werden kann.

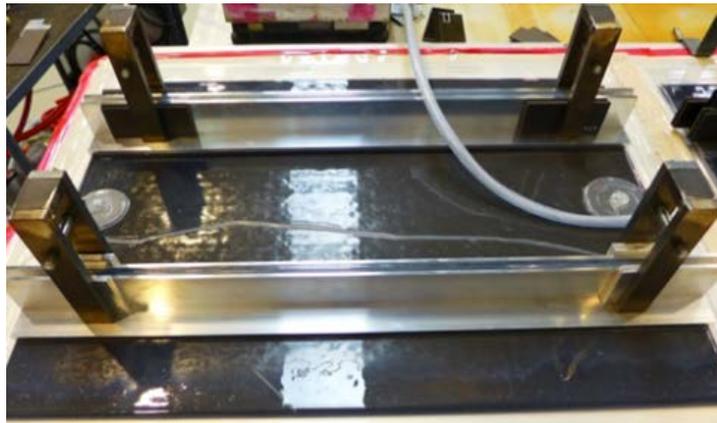


Abb.19: Beispielaufbau Vorversuche

Ein Root Joint Demonstrator Test wurde durchgeführt, um das grundsätzliche Konzept für das Wing Upper Cover zu validieren und um zu überprüfen welche Bereiche einer weiteren Entwicklung bedürfen.

Dazu wurde ein Bauteil (roter Bereich) aufgebaut und ausgehärtet. Da zu diesem Zeitpunkt lediglich ein Thermoforming-Werkzeug zur Verfügung stand musste Stringer 8 an Position 8 und Stringer 8 an Position 10 ausgehärtet werden.

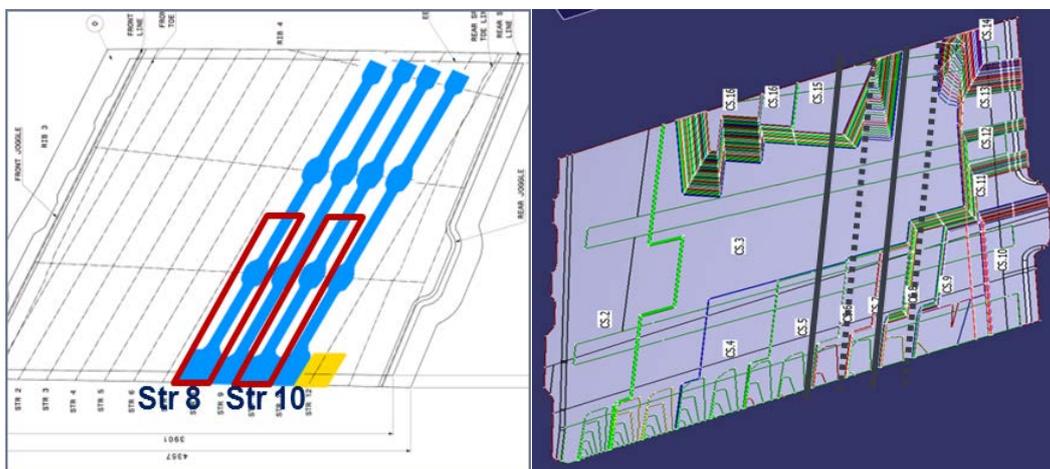


Abb.20: Hergestellte Stringer und Aufbau

Für den Versuch wurden die Stringer mit den Blister-Segmenten aufgebaut und alle Verbindungen sind mit herkömmlicher Vakuumfolie hergestellt worden. Der Versuch ist mit dem Standartzyklus 352 ausgehärtet worden.



Abb.21: Testaufbau

Um die Bauteilqualität zu überprüfen ist nach der Aushärtung eine NDT Prüfung der beiden Stringer durchgeführt worden, bei der sich keine Auffälligkeiten gezeigt haben. Zusätzlich sind danach noch Schliffbilder angefertigt worden, um auch die innere Qualität besser beurteilen zu können.

Während der dritten Phase der Testpyramide sollen alle Ergebnisse zusammengefasst werden und in einem Validierungsbauteil verschmolzen werden. Die qualitativen Aspekte dessen lassen sich aufgelistet in folgender Abbildung finden.

Qualitative	
1.	Web Thickness
2.	Foot Thickness
3.	Surface
4.	Surface in Rib Station
5.	Radius Quality
6.	Top Edge Quality
7.	Foot Edge Quality
8.	<u>Bondline</u> Quality
9.	Transition Area Root Joint
10.	Root Joint Quality
11.	Breathing Capability over 32 m
12.	Waviness

Abb.22: Liste der qualitativen Aspekte

#### 2.1.1.4 Produktivitätsanalyse

## Berechnungsgrundlagen zur schnelle Prozessauslegung

Um den gesamten Herstellungsprozess systematisch zu analysieren wird ein Modell erarbeitet, das die Zusammenhänge während der Blisterfertigung aufzeigt und eine Bewertung der einzelnen Prozessschritte darstellt. Als geeignetes Instrument um die Zusammenhänge im Prozess zu analysieren wurde ein Tool aus dem Bereich des Quality Function Deployments (QFD) gewählt. Dieses in der Qualitätssicherung verwendete Instrument House of Quality (HoQ) ist für den Prozess angepasst und ausgearbeitet worden. Es eignet sich für eine methodische Aufbereitung der komplexen Prozesskette im BlisterVac-Projekt, indem es die Anforderungen an das Bauteil mit den möglichen Einflussgrößen in Beziehung setzt und so eine Bewertung der Wichtigkeit einzelner Prozessparameter zulässt. Entwickelt wurde der Ansatz zur Integration von Kundenwünschen in ein existierendes Produkt oder eine Dienstleistung. Andere Verwendungszwecke sind Kostenreduktion, Zuverlässigkeitssteigerung und verbesserte Kommunikation zwischen Entwicklung und Fertigung.

### Anwendung des House of Quality

Bei der Anwendung des HoQ gibt es kein vorgefertigtes Muster, das nur noch ausgefüllt werden muss. Vielmehr stellt es ein Schema dar, das für jeden Anwendungsfall individuell angepasst werden kann und muss. Da es aber aufgrund der großen Anzahl an Prozessparametern nicht möglich ist, im Rahmen dieser Arbeit, jeden einzelnen Parameter durch exemplarische Versuche einzustellen und zu verifizieren, ist eine methodische Vorgehensweise unumgänglich. Dazu gehört auch die Kenntnis über alle wesentlichen Prozessparameter und deren Wichtigkeit in Bezug auf den Gesamtprozess. Hierfür sollte jeder einzelne Prozessschritt möglichst detailliert verstanden werden. Für den Einsatz im BlisterVac-Projekt werden nachfolgend die einzelnen Schritte bis zum fertig ausgefüllten HoQ beschrieben. Dieses Modell wird für jeden einzelnen Prozessschritt (siehe Kapitel 2.3.1) ausgearbeitet. Dies dient zur Erhöhung der Übersichtlichkeit. Durch dieses Vorgehen wird die Prozessverkettung aufgebrochen, weshalb diese gesondert noch einmal aufgegriffen wird. Nachfolgende Abbildung zeigt das Schema und die Reihenfolge der einzelnen Schritte.

1. Ermittlung der Output-Parameter für jeden Teilprozess
2. Gewichtung der Output-Parameter
3. Ermittlung der Prozessparameter für jeden Teilprozess
4. Festlegung der technischen Zielwerte
5. Definition der Richtung der Veränderung
6. Festlegung der Beziehungsstärken
7. Berechnung der technischen Bedeutung absolut und relativ
8. Festlegung der Korrelation der Prozessparameter
9. Angabe des Verkettungseinflusses

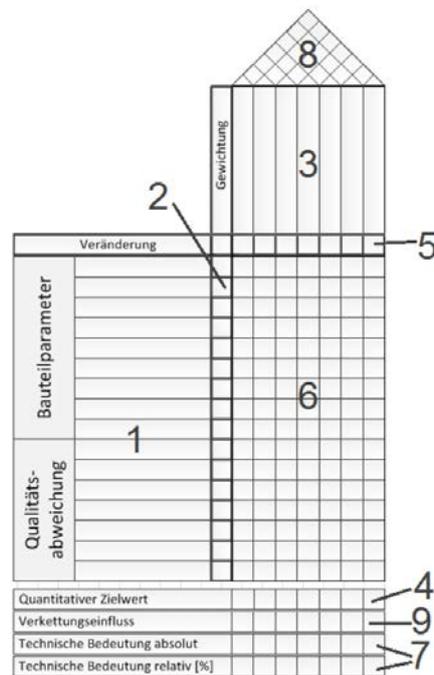


Abb.23: Ermittlung der Output-Parameter für jeden Teilprozess

### Ergebnisse der Modellbildung

Mit dem Aufstellen und Bearbeiten des HoQ-Modells wurde die Prozesskette des Blister-Fertigungsverfahrens durchleuchtet. Dazu wurde die Wichtigkeit einzelner Output- Parameter über einen paarweisen Vergleich bestimmt. Zudem wurde mit der Berechnung der technischen Bedeutung ein Maß festgelegt, das den Grad der Steuerfähigkeit von Output-Parametern durch einzelne Prozessparameter angibt. Die Sollwerte der Prozessparameter wurden als quantitative Zielwerte erfasst und die Grenzen in der Beeinflussbarkeit durch die Korrelationsmatrix sowie durch den Verkettungseinfluss abgesteckt. All diese Informationen wurden in dem HoQ für jeden einzelnen Prozessschritt zusammengefasst. Das Modell erlaubt es nicht nur die komplexen Zusammenhänge eines Prozessschrittes auf einen Blick darzustellen, sondern ermöglicht auch die Rückverfolgbarkeit einzelner Teilergebnisse.

Nicht berücksichtigt wurde dabei wie groß der tatsächliche Einfluss der verwendeten Parameter ist, da alle Prozessparameter für die Ermittlung des Verkettungseinflusses den Index „1“ erhalten haben. Das bedeutet geringe Beeinflussungen werden als genauso wichtig wie starke Beeinflussungen bewertet. Ein möglicher Ansatz, die Beeinflussungsstärke mit zu berücksichtigen, könnte durch ein zusätzliches prozentuales Bewertungsschema erfolgen. Damit kann nicht nur eine Aussage getroffen werden, ob ein Parameter einen anderen beeinflusst, es kann auch eine Angabe über die tatsächliche Gewichtung gemacht werden. Da sich aber der gesamte BlisterVac-Prozess noch in der Entwicklung befindet, ist das Entwickeln eines Bewertungsschemas erst nach dem folgenden Schritt, den experimentellen Untersuchungen, sinnvoll.

Um möglichst gezielt die Auswirkungen von bestimmten Änderungen in der Prozesskette untersuchen zu können, ist es wichtig, die Einflussgrößen möglichst unabhängig voneinander betrachten zu können. Daher ist es für die experimentellen Untersuchungen wichtig, Prozessparameter mit möglichst niedrigem Verkettungsgrad auszuwählen. Diese Überprüfung sollte mittels strukturierter Versuchsplanungen erfolgen. Nach dem Beispiel in der folgenden Tabelle kommen für eine exemplarische Untersuchung die orange markierten Prozessparameter in Frage. Dies sind „Umformdruck“ und „Form des Werkzeugs“. Aufgrund der hohen relativen technischen Bedeutung und des niedrigeren Verkettungseinflusses sind diese besser geeignet als z. B. „Umformtemperatur“ oder „Wärmeeinwirkdauer“. Der rot markierte Parameter „Abstand des Halbzeugs zu den Flächen des Werkzeugs“ konnte aufgrund des Projektstandes, hier noch nicht untersucht werden.

Theorie		Gewichtung												
Erwärmen auf Umformtemperatur		Kristallisationsgrad	Gleichmäßigkeit des Vakuums	Prozessdruck	Abstand des Halbzeugs zu den Flächen des Werkzeugs	Feuchtegehalt Folie	Form des Werkzeugs	Werkzeugtemperatur	Werkzeugmaterial	Wärmeeinwirkdauer	Umformtemperatur	Erwärmungsgeschwindigkeit	Gleichmäßigkeit der Erwärmung	
Veränderung		●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○		
Bauteilparameter	Lokale Verstreckungen	9	0	3	9	1	0	9	0	0	9	3	1	1
	Faltenbildung	8	0	1	3	0	0	9	0	0	1	0	9	3
	Kristallisationsgrad	3	3	0	0	1	0	0	3	3	1	9	1	1
	Materialspannungen	5	1	3	1	3	1	3	3	1	0	1	9	3
	Feuchtegehalt der Folie	6	0	0	0	0	0	0	1	0	9	3	3	0
Qualitätsabweichung	Folie zu dünn auf Flächen	3	0	0	3	3	0	3	1	0	1	1	0	0
	Folie zu dünn an Ecken	6	0	0	3	3	0	3	1	0	1	1	0	0
	Folie zu dünn in Radien/Kanten	7	0	0	3	3	0	3	1	0	1	1	0	0
	Falten/Wellen Bildung auf Flächen	5	0	1	1	9	0	1	1	0	1	0	0	0
	Faltenbildung an Ecken/Kanten	5	0	1	1	9	0	1	1	0	1	0	0	0
	Rissbildung	9	0	0	3	9	0	9	1	0	3	3	3	3
	Veränderung des Mattheitswertes	2	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
	Luft einschüsse/Blasenbildung	4	0	0	0	0	9	0	0	0	3	9	0	1
	Werkzeug wird nicht von Folie berührt	5	0	3	9	3	0	3	1	0	9	9	3	1
	Schlechte Trenneigenschaften	6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Schlechte Haptik/Foliengüte	2	3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
Vorherschaubare Eigenschaften	6	1	3	9	9	3	3	1	3	9	3	1	9	
Geringe Formstabilität	5	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
Qualitativer Zielwert		X%	> X bar	2,5,3,5%	X°C	< X sek	80-200°C	X K/s	< 20°C					
Verkettungseinfluss		10	7	13	16	6	10	14	9	18	18	14	11	
Technische Bedeutung absolut		33	93	294	317	66	344	80	40	314	223	200	141	
Technische Bedeutung relativ		2	4	14	15	3	16	4	2	15	10	9	7	

Abb.24: Einflussgrößen Prozessparameter

### Skalierungsfaktor des Werkzeugs

Als Werkstoff zur Herstellung von Blistern für die Aushärtung von Demonstratorbauteilen wird bisher Aluminium verwendet. Dieser Werkstoff verfügt nicht über die optimalen thermischen Eigenschaften, aber über geringe Anschaffungskosten und ist maschinell gut zu bearbeiten. Die Wärmedehnung des Werkzeugs, in Kombination mit der Schwindung des Formteils, wird durch einen Skalierungsfaktor ausgeglichen.

Die Bestimmung des Skalierungsfaktors erfolgt durch die prozentuale Ausdehnung des Werkzeugs bei Prozesstemperatur und dem prozentualen Wert der Materialschwindung. Die Wärmedehnung kann berechnet werden, wenn die Werkzeugtemperatur im Prozess bekannt ist. Die Schwindung wurde durch die Vermessung der in vorherigen Versuchen thermogeformten Blistern gegenüber der Werkzeuggeometrie ermittelt. Aus diesen Eingangswerten wurde der Skalierungsfaktor zu 0,8% bestimmt, d.h. die Werkzeugabmessungen sind um 0,8% größer als bei der Zielgeometrie.

Um eine Verifikation dieser Abweichungen zu erlangen, werden Blister-Segmente auf das dazugehörige Thermoformwerkzeug gelegt und vermessen. Die Messergebnisse sind Grundlage für die Bestimmung von Skalierungsfaktoren der Thermoformwerkzeuge, die für nachfolgende Demonstrator-Bauteile gefertigt werden.

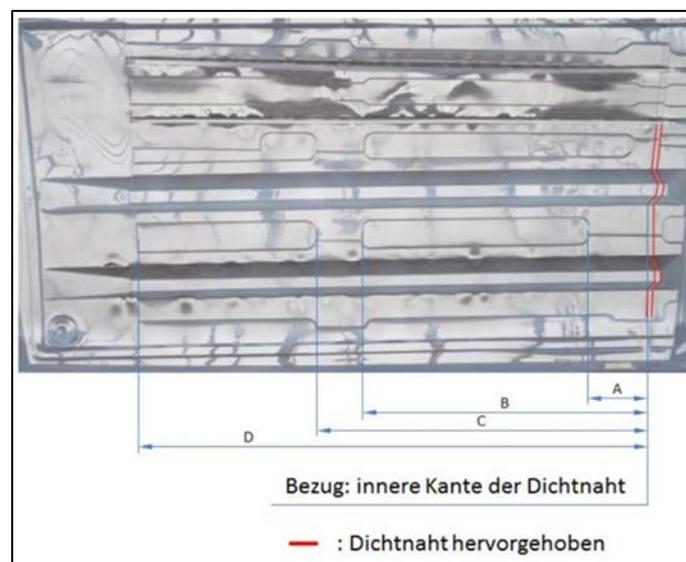


Abb.25: Vermessene Blister-Segmente

**Tabelle: Messwerte - Blister-/ Werkzeugvermessung**

Messstelle	Werkzeug	0,5 mm-Blister (Nummer 54/53)	0,7 mm-Blister (Nummer 46/42)
A	124,5 mm	125 mm/125 mm	124 mm/124,5 mm
B	619 mm	617 mm/ 617,5 mm	616 mm/617 mm
C	718 mm	716 mm/716 mm	715 mm/715 mm
D	1104 mm	1100 mm/1100 mm	1098,5 mm/1100 mm

Tabelle 1: Messwerte Blister-Segmente

Durch das Auflegen der Segmente und die Vermessung (Blister gegenüber Werkzeug) wird festgestellt, dass der vor der Konstruktion bestimmte Skalierungsfaktor nicht zur erforderlichen Geometrie führt. Mit den aufgenommenen Messwerten lässt sich ein korrigierter Skalierungsfaktor berechnen. Zur übersichtlichen Darstellung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Maßen wird zunächst ein Blockdiagramm angeführt.

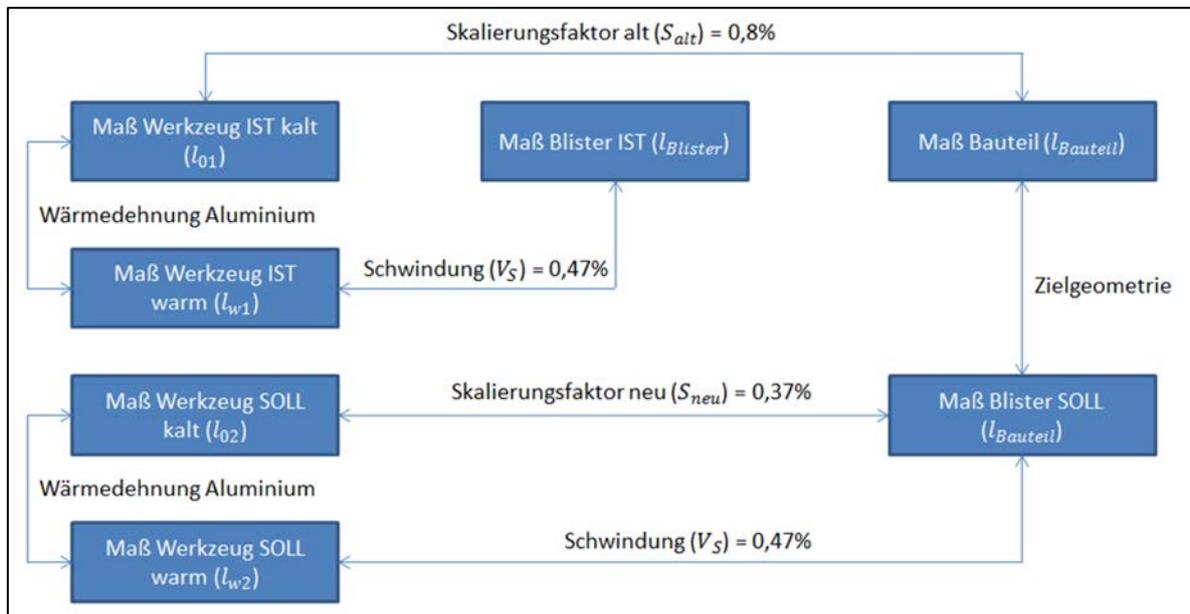


Abb.26: Blockdiagramm - Skalierungsfaktor

Das Maß des Thermoformwerkzeugs bei Prozesstemperatur lässt sich über die lineare Wärmeausdehnung berechnen:

$$l_{w1} = l_{01} + (l_{01} \cdot \alpha_{\text{Aluminium}} \cdot \Delta T)$$

Die Schwindung ( $V_S$ ) lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$V_S = ((l_{w1} - l_{\text{Blister}}) / l_{\text{Blister}}) \cdot 100\%$$

Es folgt die Berechnung des Maßes des warmen Werkzeuges zum Erreichen der erforderlichen Blistergeometrie:

$$l_{w2} = (V_S / (100\%)) \cdot l_{\text{Bauteil}} + l_{\text{Bauteil}}$$

Daraus folgt die Berechnung der Länge am kalten Werkzeug zu:

$$l_{02} = l_{w2} / (1 + \alpha_{\text{Aluminium}} \cdot \Delta T)$$

Nun lässt sich der neue Skalierungsfaktor berechnen:

$$S_{\text{neu}} = (l_{02} / l_{\text{Bauteil}} - 1) \cdot 100\%$$

Mit eingesetzten Zahlenwerten errechnet sich der neue Skalierungsfaktor zu 0,37%.

Abschließend die Übersicht der untersuchten Materialien und Prozesskonfigurationen. Der grün hinterlegte Pfad verdeutlicht eine mögliche Variante für die bevorstehende Serieneinführung.

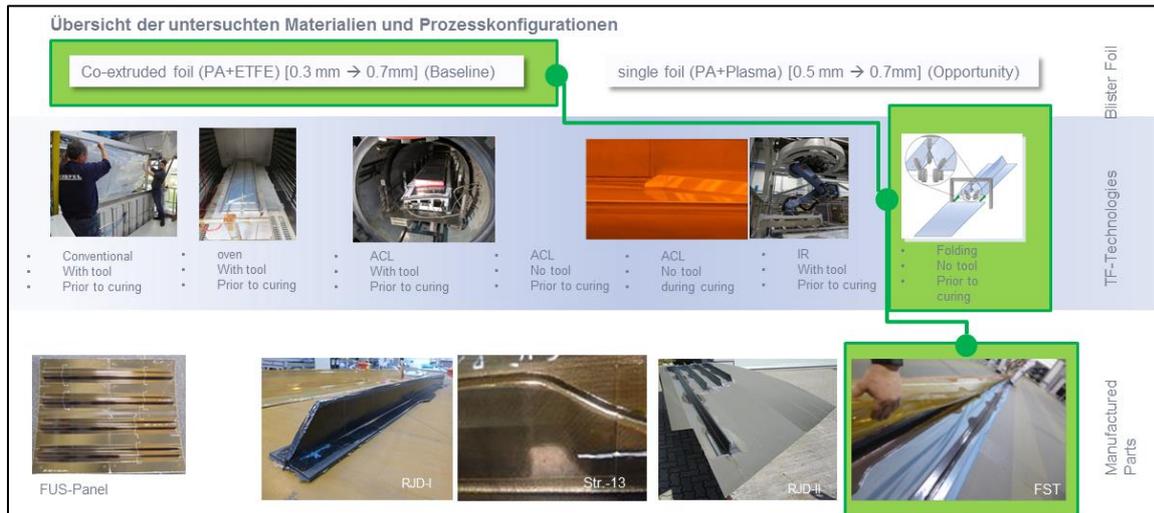


Abb.27: Übersicht der untersuchten Materialien und Prozesskonfigurationen

## 2.1.2 AP1.2 & AP4 Integralspant-Fertigung & Hochautomatisierte Integralspant-Montage

### 2.1.2.1 Konstruktion

Am Beginn der konstruktiven Arbeiten zu den integralen Spanten im Rahmen EITEC EPROC wurden seitens Airbus mehrere detaillierte Konstruktionsprinzipien für mögliche, verschiedene Spant-Querschnitte entwickelt und bzgl. detaillierter Auswirkungen auf die Konstruktions-Umgebung bewertet.

Aus den verschiedenen Spant-Querschnitten wurde der einfache C- Spant als Kompromiss aus Gewichts-Einsparungspotential, Auswirkungen auf die Design-Umgebung bzgl. Änderungsaufwand sowie insbesondere geringste Kosten sowie Risiken in der Fertigung ausgewählt. Für den Demonstrator des integralen Spantes wurde zunächst ein für die Fertigung einfacherer Spant in der Oberschale ausgewählt und zum TRL3 geführt.

Nach erfolgreichem Nachweis des TRL3 für den Oberschalenspant wurde dann ab Anfang 2015 ein Spant in der Seitenschale der hinteren typischen Rumpfsektion (Sektion 16/18) als nächster Demonstrator mit entsprechend höherer Komplexität bzgl. sich verändernder Steghöhen sowie Dickenveränderungen definiert, und neuerlich zum TRL3 sowie im Anschluss auch für den TRL4 bewertet.

Es handelt sich hierbei um einen voll-formatigen Seitenschalenspant mit unterschiedlichen Wandstärken entlang des Spantes. In den Spant-Füßen dieser Konzeption sind sämtlich 2 Auswölbungen je Fuß respektive Stringerstation zur Aufnahme von seitlichen Abstützungen mit jeweils 2 Vernietungen vorgesehen. Dies ist mit dem derzeitigen Stand der Entwicklung überkonservativ i.e. sichert den für die Fertigungsdemonstration kritischeren Fall des breiteren Spantfußes ab, da eine Reduzierung der Anzahl seitlicher Abstützungen sowie ggf. die Verringerung der entsprechenden Spant Fußbreite als möglich erachtet wird, und also der spätere Spant-Fuß schmaler zu erwarten ist.

Die Auslegung und Konstruktion des Spantes erfolgte so, dass der Spant für die Montage und den Test in einer Struktur-Testschale (außerhalb des Vorhabens EPROC) verwendet werden konnte.

Die letzte Variante für einerseits den Nachweis der reproduzierbaren, maßhaltigen Fertigbarkeit als auch andererseits zur Verwendung in den Montageversuchen entsprechend der dafür in AP4 vorgesehenen Seitenschale der Sektion 16/18.

Für sämtliche Demonstratoren wurde dafür ein kompletter Satz Bau-Unterlagen (Rohteil-Konstruktion, endgültiges Bauteil, Faser-Lagen Modelle, usw.) erstellt. Sämtliche in mehreren Fertigungs-Optimierungen abgestimmt mit der Airbus internen Fertigung sowie mit den Fertigungsspezialisten der COTESA GmbH zum Abgleich der fertigungstechnischen Machbarkeiten.

Kontinuierlich erfolgte dementsprechend auch die Weiterentwicklung und Ausdetaillierung der Design Prinzipien für die Integral-Spante im gewählten Fertigungsprozess. Teil dessen und ebenfalls im engen Abgleich mit der Fertigung der COTESA GmbH erfolgte die Festlegung der Anforderungen hinsichtlich AFP-Programmierung insbesondere bezogen auf das Management der beim AFP-Ablegen zwischen den Ablegebahnen entstehenden Spalte resp. der Definition der dbzgl. Anforderungen maximal in Anzahl und Breite zulässiger Spalte sowie ggf. dem erforderlichen Schließen dieser Spalte durch einzelne Bänder sowie der Verteilung der Spalte über die Bauteildicke.

### 2.1.2.2 Strukturmechanik

Zu Beginn der Aktivitäten im Rahmen EITEC-EPRPOC wurden die detailliert zu entwickelnden strukturmechanischen Methoden für die Auslegung des integralen Spantes identifiziert, und die dafür erforderlichen Struktur-Test- und Simulations-Aktivitäten definiert. Für die spätere Bewertung der Gewichtseinsparungspotentiale des möglichen Einsatzspektrums des integralen Spantes im Rumpf wurde eine vereinfachte Methodik basierend auf einer Tabellenkalkulation entwickelt, um auf den dann vorliegenden Methoden schnell eine Abschätzung der Auswirkungen auf das resultierende Struktur-Gewicht zu bekommen.

Die Definition der gegenüber dem einfacheren Oberschalen-Spant erforderlichen strukturmechanischen Nachweise ist in der Test Pyramide wie folgt definiert:

Für den strukturmechanischen Nachweis des integralen Spantes inklusive der Seitenschalenspante musste der Umfang der Testpyramide um weitere Spant-Konfigurationen erweitert werden, um die Aufbauten, möglichen Faserorientierung und insbesondere Bauteildicken sämtlicher späterer integraler Spante im typischen Rumpf zu repräsentieren.

Für die mögliche Anwendung der integralen Spante im gesamten Rumpf wurden 3 Spant-Konfigurationen mit den Stegdicken dünn 1,472 mm, mittel 1,84 mm und dick 4,784 mm als repräsentativ erforderlich definiert.

Des Weiteren und um den Umfang der erforderlichen Tests an aufwändigen Spant-Biege-Schalen weiter zu reduzieren, wurde der 4-Punkt-Biegespant am geraden Spant weiterentwickelt zum Test am gekrümmten Spant.

Der Test am gekrümmten 4-Punkt-Biegespant ersetzt dann bzgl. der damit erzielbaren Testergebnisse teilweise den aufwändigeren Schalentest (frame bending panel test), und erlaubt damit schneller, kostengünstiger und einfacher Ergebnisse inkl. besserer Statistik zu generieren.

Konkret wurden die Spante Seitens Airbus definiert und die Bauunterlagen dafür erstellt, von der COTESA GmbH gefertigt, beim CTC für den Test ausgerüstet (Aufbringen eines Al-Streifens am Spant-Fuß zur Simulation der Haut, und beim DLR in Braunschweig getestet. In der Verantwortung von Airbus lief die Definition, Simulation i.e. Test-Vorhersage, Auswertung sowie Kennwert-Generierung (Allowables) für die spätere Auslegung der Serien-Spante.

Vormals werden auf Element-Level gerade Spante statistisch getestet für die Schadens- Toleranz am inneren Gurt. Dies ist deswegen möglich, da die bisherigen Herstellverfahren gleiche innere Qualitäten liefern unabhängig davon ob der Spant gekrümmt oder gerade gefertigt ist. Das mit COTESA/PAG entwickelte Tailored Wave Laminat Verfahren ist insofern anders, als gerade Spante die Wellen des Tailored Wave Laminat Verfahrens eben nicht bedingen resp. für gerade Spante eben keine Wellen für das Umformen des/am inneren Gurt benötigt werden. Es ist deshalb speziell in diesem Fertigungsverfahren nicht sinnvoll gerade Spante zu testen. Gleichzeitig können auch für andere Fertigungstechnologien krumme Spante getestet werden, um Aspekte des Sub-Komponenten Tests darzustellen wie Schadenstoleranz am inneren Gurt, Beulverhalten am und im Steg über dem Mousehole, und also die dafür erforderlichen Aufwände zu reduzieren.

Zur Entwicklung des Tests in Abhängigkeit des Testaufbaus und der gewählten Konfigurationen wurden die Tests der verschiedenen Konfigurationen im Testaufbau mittels FEM (ABAQUS) dargestellt.

Die Simulation soll insbesondere sicherstellen, dass das Versagen im zu prüfenden kritischen Bereich i.e. z.B. am inneren Gurt des Spantes erfolgt, und nicht ein unerwünschtes, vorzeitiges Versagen z.B. am Stringer-Ausschnitt am Spant-Fuß erfolgt. Des Weiteren dient erfolgreich mit dem realen Test korrelierte Simulation der nachfolgenden Ableitung von Auslegungskennwerten (Allowables).

Im Rahmen von EITEC-EPROC konnte bis zum TRL4 nur die erste, dünnste Konfiguration der Tests am gekrümmten Spant durchgeführt werden. Der Rest der Konfigurationen und Tests erfolgte dann im Rahmen des Vorhabens IMPULS-RASANT.

Im Ergebnis wurde im Test der dünnsten Konfiguration eine für die Dimensionierung der Spante wichtige Schadenstoleranz am inneren Gurt ermittelt, welche deutlich unter dem erwarteten Niveau vergleichbarer Tests lag. Dieses Verhalten wird einerseits als möglicherweise in der Architektur des integralen Spantes an sich und dessen Eignung für diesen Test vermutet sowie ggf. im Aufbau der Testvorrichtung an sich, welche zudem insbesondere für geringe Bauteildicken und deren Sensibilität bzgl. Beulen im Steg den Abfall der Schadenstoleranz noch verstärken. Für die Konfigurationen mit größerer Wandstärke wird dieser Effekt als weniger ausgeprägt vermutet. Insgesamt sind also zum Abschluss der Aktivitäten im Rahmen EPROC noch nicht alle strukturmechanischen Aspekte geklärt, auch da noch nicht alle Tests abgeschlossen sind.

### 2.1.2.3 Bauteilfertigung

Im ersten Halbjahr 2014 zu Beginn des Vorhabens EPROC fand im Bereich der Bauteilfertigung gegenüber der ursprünglichen Projektplanung eine Umorientierung bzgl. der Material- und Fertigungstechnologie statt. Diese war getrieben von der Verbesserung der Aussicht auf tatsächliche Anwendung und Verwertung i.e. Einführung in ein Flugzeugprogramm unter besonderer Berücksichtigung bereits etablierter Materialien und Prozesse. Im Grundsatz geht es dabei um den Schwenk hin zur etablierten Prepreg-Technologie. Der Kern der Entwicklungsarbeit war dann

fokussiert auf die Hochskalierung im Grundsatz existierender Technologien auf die bzgl. z.B. Maßhaltigkeit gesteigerten Anforderungen an die Bauteile an sich bei der integralen Bauweise. Im Berichtszeitraum wurden hierfür die Fertigungsdemonstratoren und erforderlichen Nachweise für den zunächst angestrebten Technologiereifegrad TRL3 für den Oberschalenspannt detailliert. Die Konzeption und das Design des Spantes, wurde im Verlaufe des ersten Halbjahres abgeschlossen. Die Arbeiten zur konkreten Herstellung des Bauteils wurden bei der COTESA GmbH begonnen.

Im zweiten Halbjahr 2014 erfolgte die eigentliche Fertigung der Demonstratoren des Oberschalenspannt-Demonstrators, und die Auswertung bzgl. der inneren Bauteilqualität sowie äußeren Geometrie.

Die Ergebnisse flossen direkt in die Definition des Seitenschalen-Fertigungs-Demonstrators im Abgleich zwischen Airbus interner Fertigung und COTESA sowie Konstruktion und Strukturmechanik mit ein. Konkret wurde auf die Erfordernisse eines späteren industriellen Prozesses eingegangen, und der Materialablegeprozess angepasst. Es wurden entsprechende fertigungstechnologische Vorversuche durchgeführt und theoretische Evaluierungen möglicher industrieller Prozessketten erarbeitet. Aktueller Status ist die Auswahl eines Prepreg-Fertigungsverfahrens welches im Wesentlichen auf einer Kombination aus automatischem Fasern ablegen und Warmumformen basiert.

Parallel wurden mit Airbus, unter Berücksichtigung der Anforderungen seitens der Strukturmechanik, Design und Montage, die Toleranzen sowie ein Komponentenmess- und Komponentenmontage-Referenzsystem für den Spant festgelegt. Ziel hierbei ist eine kontinuierliche iterative Erarbeitung eines Optimums aus wirtschaftlichen und strukturmechanischen Anforderungen.

Im Bereich der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist mittels des erarbeiteten industriellen Prozesskonzeptes für die Komponentenfertigung, und der Berücksichtigung eines Komponentenmontage-Konzeptes, eine Kostenanalyse in Zusammenarbeit mit Airbus durchgeführt worden. Diese bestätigt die erwartete Wirtschaftlichkeit eines Integral-Spantes im Vergleich zur aktuell eingesetzten differentiellen Spant-Bauweise.

Durch die Neuausrichtung im Rahmen von EPROC anstatt trockenem zu flechten mit Prepreg zu arbeiten, wurde der Gegenstand der Beauftragungen der AGI obsolet. Im Verlaufe der Definition des Prepreg-Ablagekonzeptes der verschiedenen Faserrichtungen, erschienen als mögliche Varianten die  $\pm$ Orientierungen zu Flechten sowie die  $90^\circ$ -Orientierungen zu Wickeln, und zwar mit Prepreg-Bändchen Material anstatt mit textilem Bandmaterial wie bis dahin. Es wurde dementsprechend die AGI beauftragt eine solche Möglichkeit hinsichtlich Machbarkeit auf deren Anlagen zu überprüfen respektive in Fertigungsversuchen zu demonstrieren.

Die Versuche wurden erfolgreich durchgeführt, d.h. es erschien grundsätzlich machbar das Prepreg-Bändchen-Material auf den Anlagen der AGI zu flechten und zu wickeln. Die grundsätzliche Machbarkeit konnte also nachgewiesen werden. Im Verlaufe wurde aber diese Variante der Herstellung der  $\pm$  und  $90^\circ$ -Orientierungen wieder verworfen, resp. konnten einfachere unmittelbar im AFP-Ablegeprozess integrierte und damit kostengünstigere Methoden entwickelt werden, als die separate Herstellung einzelner Lagen oder lokaler Verstärkungen.

### Aushärtung- Simulation des Rückstellverhaltens zur Werkzeugkompensation

Von Anfang an war offensichtlich, dass zur Erzielung der erforderlichen hohen Maßhaltigkeit des integralen Spantes, eine rechnerische Simulation der Verformung des Integralspantes beim Abkühlen nach dem Aushärten erforderlich war, um in der späteren seriellen Fertigung Anpassungen der Aushärtewerkzeuge zur Korrektur evtl. Geometrieabweichungen des ausgehärteten Bauteils möglichst zu vermeiden.

Für die Durchführung der Simulation der Verformungen wurde ein phänomenologischer Ansatz gewählt. Dieser Ansatz erlaubt eine einfachere im Sinne von weniger aufwändige Methode zur Vorhersage von Verformungen ohne komplexe Material Tests und ohne nicht-lineare Verformungs-Rechnungen.

Herstellung und Vermessung von einfachen Probekörpern repräsentativ für den späteren Material, Laminataufbauten, Faserorientierungen sowie Aushärteprozess resp. dessen Verlauf im Aushärtewerkzeug

Ermittlung der äquivalenten thermischen Ausdehnungskoeffizienten anhand der Messungen am Probekörper

Phänomenologische Simulation im Sinne einer elastischen Verformung beim Abkühlen von Aushärte-auf Raumtemperatur. Hierfür wurde halb-automatisch ein FE-Modell mittels Hyper-Mesh generiert.

Es wurden sowohl das Bauteil vor dem Fräsen auf Endkontur als auch mit der finalen Kontur i.e. mit im Spant-Fuß ausgeschnittenen Bereichen für die Längssteifen simuliert.

Die ersten Ergebnisse zeigten eine qualitativ gute Übereinstimmung der Simulation im Vergleich zu den tatsächlichen am Bauteil gemessenen Verformungen. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung werden die Ergebnisse weiter quantifiziert. Im Folgenden werden dann die Aktivitäten auf den komplexeren Seitenschalenspannt verlagert i.e. entsprechende Simulationen aufgebaut.

Letztendliches Ziel ist es anhand der Simulation eine bessere Vorhersage der zu erwartenden Verformungen der Bauteile zu erhalten, und damit die erforderlichen Vorhaltewinkel bzw. globalen Radien zur Kompensation der Verformung dann exakter im Aushärtewerkzeug vorsehen zu können. Dies führt unmittelbar zu engeren Toleranzen am Bauteil und eliminiert sonst erforderliche Nacharbeiten am Werkzeug und die damit verbundenen Kosten.

### Herstellung und Analyse von Demonstratoren für einen integralen Spant in der Oberschale

Ziel der Entwicklung des Herstellprozesses ist die spätere industrielle Umsetzung der Fertigung der Spante in Bezug auf robuste und kostengünstige Verfahren, welche gleichzeitig die Einhaltung der technischen Anforderungen insbesondere der inneren Bauteil-Qualität sowie äußeren Maße i.e. Toleranzen leistet.

Hierzu wurde in der Zusammenarbeit mit der im Rahmen von EPROC beauftragten COTESA GmbH eine entsprechende Prozesskette entwickelt, die ausgehend vom quasi-ebenen automatisierten

Materialablegen im globalen Spant-Radius, den kompletten Aufbau zum finalen C-Querschnitt umformt. Die anschließende Aushärtung erfolgt dann in möglichst kostengünstigen Werkzeugen - siehe auch nachfolgenden Abschnitt bzgl. Seitenschalen Integral-Spant.

Die COTESA GmbH sollte in Antizipation der Anforderungen der späteren industriellen Fertigung von Spanten berücksichtigen, dass bei einer größeren Anzahl von Spanten z.B. die Werkzeugmaterialkosten möglichst gering zu halten sind. Gleichzeitig war ebenfalls von großem Augenmerk die Kontrolle der Maßhaltigkeit der späteren Bauteile.

Im Ergebnis wurde ein mehrteiliges Werkzeug entwickelt, bestehend aus unterschiedlichen Materialien und mit der Möglichkeit zur Nachstellung des Werkzeuges.

Der Seiten-Schalen-Spant unterscheidet sich vom Spant in der Oberschale im Wesentlichen durch die Veränderung in der Steg-Höhe im Querträger-Anschlussbereich (in der Abbildung rechts). Dies bedingt größere Herausforderungen in der Definition des Lagenaufbaus des CFK-Materials, in der Definition der Ablage-Werkzeuge, der Definition der Vorhalte-Winkel für die Rückstellung des Bauteils usw.

Die Aushärte-Werkzeuge wurden im Unterauftrag über die Fa. COTESA zusammen mit Airbus definiert. Die Werkzeuge haben eine gewellte Oberfläche entsprechend dem Prinzip des Tailored Wave Laminates d.h. zur Kompensation von Unterschieden in der Bogenlänge beim Umformen von quasi-ebenen Gelegen zu polaren 3D-Bauteilen.

#### Definition und Beschaffung einer Warmluft-Umform-Box

Für das Umformen des quasi-flachen Laminates wurde in Vorwegnahme eines späteren Serien-Werkzeuges eine Warmluftbox konzipiert und beschafft.

Hierbei wird der quasi-ebene, noch nasse Prepreg-Preform in einem abgeschlossenen Volumen über eine möglichst homogene Verteilung der Warmluft erhitzt und unter einer flexiblen Membran mit zunehmendem Vakuum verformt.

Das Aushärte-Werkzeug für den Seitenschalen-Spant unterscheidet sich von den Werkzeugen für den Oberschalen-Spant. Das grundlegend andere Werkzeugkonzept wurde aufgrund des noch längeren Spantes nötig, da die Beherrschung der exakten Maße bei zunehmender Länge noch komplexer wird. Das Werkzeug erlaubt in dieser Konzeption das Nachstellen der Geometrie, zur ggf. erforderlichen Kompensation der thermischen Dehnungen beim Aushärten.

Sämtliche vormals konzipierten und beschafften Werkzeuge dienten dann endlich der Fertigung mehrerer CFK-Spant-Demonstratoren. Die Fertigung gelang auf Anhieb i.e. ohne dass Ausschussteile entstanden. Sämtliche gefertigten Spante konnten also für die weitere detaillierte Untersuchung der inneren und äußeren Qualität verwendet werden.

Vermessung der äußeren Geometrie und Überprüfung der inneren Qualität der Demonstratoren

Bei sämtlichen der gefertigten Spante wurde eine 3D-Vermessung der äußeren Geometrie durchgeführt.

Des Weiteren erfolgten Dickenvermessungen, Faservolumengehaltsbestimmungen und die innere Qualität der Bauteile wurde anhand von Mikro-Schliffen beurteilt.

Im Ergebnis konnten mit den Demonstratoren weitestgehend die üblichen Qualitätsanforderungen der Serienfertigung erreicht werden. Dort wo die Messungen außerhalb der Toleranz lagen wurden entsprechende korrigierende Maßnahmen definiert.

Bis zum Abschluss der Arbeiten im Rahmen EPROC sowie bis zum Erreichen des TRL4, wurden bis zum 1. Halbjahr 2017 weitere voll-formatige Fertigungs-Demonstratoren von integralen Spanten in der Seitenschale gebaut und deren äußere Geometrie vermessen sowie deren innere Qualität überprüft, und mit den Toleranzanforderungen angeglichen.

Die Ergebnisse der ersten Messungen führten zum Nachstellen des Aushärte-Werkzeuges bzgl. der globalen Verformung des Bauteils, da der Spant im globalen Radius zu groß war.

Sämtliche der generierten Mess-Daten wurden statistisch analysiert, und bzgl. Reproduzierbarkeit des Fertigungsprozesses bewertet. Wichtig hierbei sind die sog. process capabilities (cp und cpk), welche abgeleitet aus den Verteilungen der Messwerte der einzelnen Spante sowie sämtlicher gemessener Spante im Vergleich ermittelt werden.

Während sämtliche der Messwerte bezogen auf die Breite des Toleranzfeldes in einem engen Band lagen, und somit die grundsätzliche Reproduzierbarkeit gut demonstriert wurde, konnte nicht überall die Mitte des Toleranzfeldes getroffen werden. Entsprechende Anpassungen des Fertigungskonzeptes und/oder der Toleranzfelder sind vereinzelt erforderlich.

Im Ergebnis und zum Abschluss von EPROC konnte die grundsätzliche Machbarkeit der Fertigung von integralen Spanten im Rahmen der Toleranzanforderungen auf dem Niveau TRL4 nachgewiesen werden.

#### 2.1.2.4 Montage

Im ersten Halbjahr 2014 waren die Arbeiten im Bereich der Definition des Montageprozesses für den Integralen Spant wesentlich davon geprägt die detaillierten Anforderungen der Entwicklung zu definieren, und daraus die konkreten Arbeiten z.B. bzgl. Montagedemonstration abzuleiten.

Zum einen muss die Montage der integralen Spante an sich anders erfolgen als bei den differentiellen Spanten. Um gleichzeitig aber die Kosten einer geänderten Montage Station soweit wie möglich zu begrenzen, und um idealerweise aus Gründen z.B. der Kommunalität zwischen verschiedenen Bauweisen sowohl differentielle als auch integrale Spante montieren zu können, soll soweit möglich auf existierende Vorrichtungen und Prozesse zurückgegriffen werden. Zur Diskussion

möglicher Lösungsansätze wurden verschiedene Arbeitsbesprechungen abgehalten. Im Rahmen dieser wurden Montage-Prozessketten definiert, und die erforderlichen Demonstratoren für den Nachweis der Machbarkeit vereinbart.

Begleitet wurden diese Aktivitäten durch vielzählige Arbeiten im Bereich Toleranzmanagement. Angefangen bei der Simulation respektive der Vorhersage des Verformungsverhaltens des Bauteils an sich, über Abschätzungen der aus der Erfahrung mit der Fertigung ähnlicher Bauteile zu erwartenden Bauteilgeometrien resp. Toleranzen, der Durchführung entsprechender Bauteil-Mess-Kampagnen, der Definition durchgehender Vermessungs- und Referenz-Systeme über die finale Simulation der zu erwartenden Toleranzen in der Montage.

Im Rahmen der Erstellung der Prozessketten wurden des Weiteren technische, prozessspezifische Risiken sowie Industrialisierungsrisiken identifiziert und bewertet. Auf dieser Basis wurden der Prozesse und Anlagen angepasst und verfeinert, um eine möglichst detaillierte Vorhersage für eine Prozesseinführung treffen zu können. Die theoretischen Untersuchungen wurden durch praktische Tests und Versuchsaufbauten unterstützt; die hierfür erforderlichen Schalen-Komponenten wurden im Verlaufe des Jahres 2014 beschafft. Der Start der Montagedemonstration erfolgte dann zunächst noch nur mit vormontierten differentiellen Spanten, da zur Schale passende integrale Seitenschalenspannte noch nicht verfügbar waren.

#### Prozesszeitenanalyse in der Montage

Für die Abschätzung der Prozesszeiten der Montage von Integralspanten wurde die Prozesskette differentieller Spante als Referenz verwendet. Basierend auf der neu konzipierten Prozesskette der industriellen Montage integraler Spante (inkl. ggf. zu ändernder Vorrichtungen) werden die Prozesszeiten abgeschätzt und mit der Referenz verglichen.

Bereits zum TRL3 des Oberschalen-Spantes wurde ein industrielles Montage-Konzept vorgestellt.

Die Montageversuche eines integralen Spantes werden anhand einer Seitenschale des hinteren Rumpfes durchgeführt. Hierzu werden sämtliche erforderliche Komponenten wie Haut/Stringer, Spante, Clipse, Cleats usw. passend zur Montage-Vorrichtung beim IFAM beschafft. Die Vorrichtung an sich muß dann auf die Gegenheiten der Schale umgerüstet werden. So dann werden die eigentlichen Montageversuche d.h. die Demonstration der Montage von integralen Spanten durchgeführt, und damit die vormals identifizierten alternativen industriellen Montagekonzepte überprüft.

Für die Montageversuche stehen die notwendigen Integralspante im ersten Halbjahr 2015 noch nicht bereit. Um die notwendigen Fügeversuche repräsentativ durchführen zu können wird ein differentieller Spant mit Clips vorausgestattet und somit ein „Ersatzintegralspant“ für die ersten Versuche erzeugt. Die Vorausstaltung der Spante C72 bis C77 wurde in diesem Halbjahr durchgeführt. Die Clips wurden hierbei auf den Steg der differentiellen Spante geklebt.

Zusammen mit allen Projektpartner IFAM Forschungszentrum CFK Nord, sowie in der Zusammenarbeit mit der Premium Aerotec GmbH wurde eine Testplanung erstellt. In drei Versuchs-

Szenarien sollen Informationen zum Fügeprozess von Integralspanten unter Serienbedingungen erarbeitet werden.

Im ersten Versuch (Trial1) wurde das Verformungsverhalten des Spantes untersucht. Im geplanten industriellen Verfahren wird Kraft auf die Schale ausgeübt. Hierbei muss die Verformung des Spantes analysiert werden. Ausgehend von den Resultaten kann zum Beispiel die Anzahl der notwendigen Fixierungselemente in einer späteren Serienanlage definiert werden. Für die ersten Fertigungsversuche kann zudem der geplante industrielle Prozess aufgrund der vorhandenen Anlagentechnik nicht wie geplant durchgeführt werden. Bei dem industriellen Planprozess soll Kraft mit Vakuumschalen und den Clipspannern aufgebracht werden. Für die Fertigungsversuche im Testaufbau wird ein Pinning Verfahren genutzt. Für eine spätere Auswertung der Testresultate ist das jeweilige Verformungsverhalten von Schale und Spant relevant. Der Krafteinfluss auf den Spant wurde mit folgendem Testaufbau bei der CTC GmbH untersucht.

Aufgrund des ersten Versuches kann das Verformungsverhalten des Spantes analysiert werden und es können Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten der Schale gemacht werden. Somit kann ein Vergleich zwischen dem industriellen Planprozess und den Versuchsdaten stattfinden.

Für den zweiten Versuch (Trial2) wurde die Anlage beim IFAM Forschungszentrum CFK Nord modifiziert. Die Position der Abstecker und die Schalenaufnahme wurden für die Teststruktur angepasst d.h. die Anlage wurde entsprechend modifiziert.

Im industriellen Verfahren ist eine Toleranzkompensation durch das Verformen der Bauteile und leichter Krafteinwirkung auf die Haut geplant. Hierfür sollen im dritten Versuchsaufbau (Trial3) die Welligkeiten und Verformungen der Schale nach dem Fügen des Spantes untersucht werden und ein Vergleich zu der heutigen Montage i.e. mit dem differentiellen Spant aufgestellt werden. Als Start wurde zunächst die Schale ohne Spant-Versteifung i.e. nur Haut und Stringer mit einem Lasertracker vermessen um den Ausgangszustand vor der Montage aufzuzeigen.

Die Airbus Group Innovation wurde mit der Konkretisierung der statistischen Toleranzsimulation der Montage von flexiblen Körpern beauftragt. Das existierende DFEM Modell der kompletten hinteren Seitenschale wurde auf das reduzierte Format des Panels für die Montage-Demonstration reduziert und bzgl. Parametrisierung auftretender Toleranzen aufbereitet.

Es wurde hierzu zunächst vereinbart folgende zur Toleranz beitragenden Elemente zu parametrisieren:

- Stringer-Fuß-Dicke
- Haut-Dicke
- (Clip bzw. Spant-) Fuß-Spring-in
- Radiale Position des Clips bzw. Spant-Fußes

Im Verlauf erfolgte der Abgleich des Toleranzsimulationsmodells um weitere Toleranz-Parameter bezogen auf den ersten realen Versuchsdurchlauf mit vormontierten differentiellen Spanten.

Die ersten Simulationen der Montage von Spanten wurden durchgeführt- Ergebnisse und Abgleich mit den Messungen siehe weiter unten.

3D-Messung sämtlicher Fügepartner vor der Montage, Messung sämtlicher entstehender Spalte, sowie 3D-Vermessung der Schale nach dem Austakten.

Nach dem Verbinden der Spante mit dem Panel, wird die Schale aus der Vorrichtung gehoben.

Und es erfolgt nochmals eine Vermessung der Oberfläche der Haut um sicher zu stellen, dass eine mit dem integralen Spant vormontierte Schale keine schlechtere Oberflächengüte (z.B. bzgl. Welligkeiten) generiert als im Vergleich zur differentiellen Bauweise. Die möglichst geringe Verformung der Haut ist also entscheidend für die Akzeptanz.

In einem letzten Schritt wurden dann die 3D-Vermessungen der Schale sowie die entstehenden Spalte zwischen Clip-Füssen (später Spant-Füßen) und der Haut bzw. den Stringern verglichen. Dies dient einer ersten Korrelation der Simulation mit der Messung, also dem Nachweis dass die Simulation tatsächlich die zu erwartenden Spalt-Maße generiert.

Der Vergleich der Simulation mit der realen Messung zeigte in erster Näherung hierbei eine gute Übereinstimmung der Daten. Eine gleiche farbliche Markierung entspricht gleichem Spalt-Maß. Vor allem zum vorderen und hinteren Rand der Schale hin. In der Darstellung, jeweils linker und rechter Bereich der schematischen Darstellungen, ergaben sich vereinzelt Abweichungen. Diese wurden aber, aufgrund von Fehlern in der Vor-Montage der differentiellen Spante, welche so am Integral-Spant nicht auftauchen können, oder Aufgrund von Fehlern, die durch die Verformung der Montage-Vorrichtung an sich entstanden, als irrelevant für die Betrachtung erachtet.

Weitere Montage- Simulation zu erwartender Toleranzen resp. Spalte in der Montage unter Berücksichtigung erlaubter Verformungen der Fügepartner erfolgten im Folgenden kontinuierlich im Abgleich zu den physikalischen Versuchen in der Anlage. Des Weiteren musste die Simulation ausgehend von vormontierten differentiellen Spanten hin zu integralen Spanten modifiziert werden.

Die Durchführung von weiteren Montage-Versuchen erfolgte auf der Fraunhofer IFAM-Anlage in Stade anhand eines Abschnittes einer Schale im hinteren linken Rumpfbereich unter Verwendung von vormontierten differentiellen Spanten repräsentativ für die integralen Spante. Hierzu Korrektur und Einmessen der Anlage des äußeren Konturrahmens. Vormals ausgelegt für eine Oberschale nun Veränderung zur Seitenschale.

Als Referenz-Schale wurde eine Schale nach A350 Bauweise d.h. differentiell montiert gebaut. Diese wurde aus der Montagevorrichtung ausgebaut und in einer Aufspannung, welche vergleichbar mit der Messstation in der Serienfertigung ist, vermessen und soll als Referenz für alle Fertigungsversuche mit den nachfolgenden montierten Integralspanten dienen.

Wie sich im Verlaufe der Montage-Versuche zeigte, musste Anlagentechnik im Fraunhofer neu justiert resp. kalibriert werden. Dazu waren zeitaufwändige Vermessungen und Anpassungen der Anlage erforderlich. Des Weiteren wurde die Anlage dahingehend modifiziert druckgebene

Manipulatoren in die Anlagensteuerung zu integrieren. Diese ermöglichen in der Montage der Spante auf die Haut das lokale und im Betrag minimale Verringern von Spalten zwischen Spant-Fuß und dem direkten Kontakt auf der Haut- den Stringerfüßen.

Nach erfolgter Anlagenmodifikation wurden Montage-Tests wiederum zunächst mit den vormontierten Spanten an der Schale durchgeführt. Dazu wurden differentielle Spante vorab mit clips und cleats ausgerüstet, und dadurch ein Quasi-Integral-Spant erzeugt. Im Unterschied zum ersten dbzgl. Versuch konnte nun mit dem modifizierten äußeren Konturrahmen auf die Haut lokal Druck ausgeübt werden.

Die Montage-Tests erfolgten im Vergleich zu den vormals zunächst mit vormontierten Spanten an der Schale durchgeführten.

Die integralen Spante werden so wie heute bei den differentiellen Spanten auf die Führungsbohrungen im Spant-Steg aufgenommen und verspannt. Dann erfolgt abhängig vom jeweiligen Spant-Montage-Konzept das Annähern von Spant und Haut, ggf. das weitere Verringern der entstehenden Spalte durch die druckgebenden Manipulatoren, und abschließend werden dann die entstehenden Spalte gemessen.

Einzelne der so montierten Schalen wurden dann in eine finale Messstation transferiert und neuerlich Vermessen. Im Fokus dieser Vermessungen standen allerdings nicht mehr die Spalte sondern z.B. die resultierenden Verformungen an den Spant-Enden, welche für die Montage der Schalen zu einer Rumpftonne besonders wichtig sind. Gleichzeitig erfolgte auch die Vermessung der äußeren Topologie der Schale, welche maßgeblich die Akzeptanz beim späteren Kunden beeinflusst sowie zunächst über die aerodynamischen Anforderungen toleriert ist. Für diese globale Vermessung musste eigens eine Messvorrichtung konzipiert und aufgebaut werden, welche die Serien Anlage in ihrer Beeinflussung der Genauigkeit der Messungen reproduziert.

Im Ergebnis der Vermessungen konnte mit ausgewählten Montagekonzepten bei den mit den integralen Spanten montierten Schalen ähnliche Toleranzen erzielt werden wie mit den heutigen differentiellen Spanten.

Auch in Bezug auf die Montageaspekte konnte eine technologische Reife auf dem Niveau TRL4 im Rahmen EPROC nachgewiesen werden.

### 2.1.3 AP2 Oberflächentechnologien

Die Entwicklung eines optimierten Prozessablaufes zur Trocknung von Luftfahrzeugbeschichtungen startete mit vorbereitenden Untersuchungen an verfügbaren berührungslosen Messmethoden. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die nahe Infrarot Spektroskopie (780 -2500 nm) gelegt

Ob Transmission, Reflexion oder Transflexion, die grundlegende Messmethodik wurde jeweils erörtert und für weitere Betrachtungen entsprechend bewertet.

Neben dem Messprinzip wurden ebenfalls die Analyseverfahren (etwa für NIR-spektrometer oder für Chemometrie) betrachtet. [Wa.-2014] liefert hierzu eine detaillierte Zusammenstellung.

Für die Durchführung der Versuche wurden folgende Lacksysteme verwendet:

- Aviox Finish 77702 Grau
- Aviox Finish 77702 Schwarz
- Härter 90150
- Activator 99330

Als NIR-Spektrometersystem wurde ein Gerät der Firma Polytech eingesetzt. Die wichtigen Gründe dafür sind:

- weniger empfindlich gegenüber Vibrationen und mäßigen thermischen Schwankungen .
- aufgrund des Diodenzeilen-Detektors sehr schnelle Datenerfassung.
- Distanzmessung möglich.
- die zu analysierende Probe bleibt erhalten .

Die Spektren aller Messreihen lieferten für eine Auswertung genug Informationen, wobei sich mit steigendem Anteil schwarzer Farbe einige Unterschiede bemerkbar machten. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Rohspektren der Messreihen M1/M5/M9 (ohne Zusatz schwarzer Farbe) und M4/M8/M12 (15 % Zusatz schwarzer Farbe). Die drei Spektren eines Grautons sind jeweils in einem Spektrum zusammengefasst und durch verschiedene Farben gekennzeichnet.

Mit steigendem Anteil schwarzer Farbe verschlechtert sich das Signal/Rausch-Verhältnis, im Spektrum erkennbar durch Abflachen der Kurve und geringere Ausbildung der Absorptionsbanden. Die Spektrallinien werden immer gezackter und ähneln dem Hintergrundrauschen. Dieser Effekt kommt hauptsächlich durch den erhöhten Anteil der Rußpartikel aus der schwarzen Farbe und die damit verbundene Streuung zustande.

An den Standorten Bremen und Hamburg wurden Versuche durchgeführt mit den Zielen sowohl die Anwendbarkeit neuen Trocknungsverfahren zu demonstrieren als auch die Eignung ausgewählter Messmethoden zur berührungslosen Überwachung des Trocknungsstands von Lacken.

Im Hinblick auf eine Verkürzung der Prozesszeiten, haben die Versuche ergeben, dass ein Infrarotbasiertes Trocknungsverfahren sehr sensitive gegenüber des Farbtons ist, und somit für mit

einem generellen Zeitersparnis nicht immer verbunden ist. Die Größe der Bauteile und derer Komplexität sind u.a. weitere Faktoren mit erheblichem Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von infrarotbasierten Trocknungsverfahren. Es ergibt sich hinsichtlich der Sensitivitätsanalyse ein heterogenes Bild quer über die getesteten Verfahren.

Die prinzipielle Machbarkeit ist zwar gegeben, die Reproduzierbarkeit und die Wiederholbarkeit der Ergebnisse erweisen sich jedoch als kompliziert. Die Notwendigkeit weiteren Untersuchungen zur Klärung der noch offenen Fragen und der in folgenden Tabellen aufgelisteten Risiken zunächst auf Labormaßstab ist demnach ersichtlich. Die Entwicklungen erfolgten bis zum technologischen Reifegrad TRL3. Aufgrund der hohen Risiken wurden gemäß Änderungsantrag die Aktivitäten in diesem AP gestoppt.

## 2.1.4 AP 3.1 Schnelle und hochpräzise Montage

### 2.1.4.1 Prozessanalyse & Definition

Es war in der Konzeptionierungsphase darauf zu achten, dass die Gesamtarchitektur (z.B. Schnittstellen) des Systems ausreichend offen gestaltet sind, um eine spätere Prozessfähigkeit sowie Skalierung des Ansatzes zu ermöglichen.

Hervorzuheben ist an dieser Stelle das breite Spektrum von Anforderungen hinsichtlich Funktion und Funktionssicherheit, Ressourceneinsatz und Design. Diese spezifischen Anforderungen an die physischen Prozesse einer Montage von CFK Großkomponenten werden wie folgt abgeleitet:

- KVP = Kontinuierlicher Verbesserungsprozess, wird erreicht durch konsequente Prozessanalyse, daraus optimierten Abläufen und Reduzierung von Verschwendung.
- Hohes respektive schnelles Reaktionsvermögen, dies wird beispielhafter Weise durch kurze Regelkreise in den Prozessen und Abläufen einer Produktion implementiert.

Wesentliche Voraussetzungen für die Erfüllung der o.g. Anforderungen sind Transparenz sowie ein ergebnisorientierter, dynamischer Informationsfluss. Die Transparenz ist vorhanden, wenn die Prozesse sowie deren Parameter, Ursache und Wirkungs-Beziehungen genauestens bekannt sind.

Grundsätzlich sollte ein Informationsfluss ergebnisgerichtet und dynamisch sein. Die für die Ergebnissicherung bedeutenden Prozessparameter müssen ereignisorientiert und unmittelbar sowie sicher und genau dokumentiert werden, um in den folgenden Prozessschritten genutzt werden zu können.

Im Antrag des EiTeC Projektes von AP 3.1 ist u.a. auch die Rede von Montageprozessen und deren Wertschöpfung. Die Wertschöpfung ist das originäre Ziel von Produktionsprozessen. Durch Wertschöpfung werden vorhandene Produktionsobjekte in Güter mit größerem (Kunden-) Nutzen transformiert. Die Wertschöpfung misst den Ertrag von Produktionsprozessen als Differenz zwischen dem Output (Produktwert) und dem Input (Vorleistung) eines Produktionsprozesses, so dass gilt:

Wertschöpfung = Produktwert – Vorleistung

- Produktwert ist der bewertete Produktionsoutput (Umsatzerlös +/- Bestandsveränderung).
- Vorleistungen sind fremdbezogene Güter und Dienste, die im Produktionsprozess verbraucht werden. Hierzu zählen zugelieferte Materialien und bezogene Serviceleistungen, nicht aber der Faktor Arbeit, der die Veränderung zwischen Output und Input darstellt.

Der durch Wertschöpfung erzielte höhere Nutzen ist messbar durch den Geldwert der Veränderung, die durch die Produktionsprozesse bewirkt wird.

Ein Produktionssystem umfasst alle Elemente und Relationen, die zur vollständigen Erstellung eines Produktes erforderlich sind. Es beschreibt die Zusammenhänge und Strukturen zwischen einzelnen Produktionsobjekten und –prozessen.

Jedes System ist durch seine Systemgrenze von seiner Umwelt und seinen Nachbarsystemen getrennt. Um dennoch einen Austausch zu ermöglichen müssen Schnittstellen eingerichtet werden, über die der Kontakt mit der Umwelt und Nachbarsystemen abgewickelt werden kann. Ein Produktionssystem wird maßgeblich durch Fertigungs-, Informationsverarbeitungs- und Logistikprozesse aufgebaut. Unterstützt und vorbereitet werden diese Abläufe durch Gestaltungs-, Entwicklungs-, Planungs- und Serviceprozesse. Jeder Produktionsprozess beinhaltet eine spezifische logische Kette. In Fertigungsprozessen unterliegen Objekte einer Veränderung durch Aktionen.

Die Veränderung in Fertigungsprozessen wird durch die Wertschöpfung beschrieben, die direkt zum Kundennutzen eines Produktes beiträgt. Fertigungsprozesse können zeitlich und räumlich sowohl parallel als auch hintereinander angeordnet werden.

Fertigungsprozesse werden unterschieden in

- Fertigungsprozesse und
- Montageprozesse.

Typische Änderungen eines Fertigungsprozesses sind Modifikationen der Bauteilgeometrie oder der Materialeigenschaften, z. B. in spanenden Bearbeitungsprozessen oder in Wärmebehandlungsverfahren. In einem Montageprozess werden mehrere Bauteile zusammengesetzt. Dadurch werden die Parameter Bauteilanzahl und Bauteilzusammensetzung (und damit auch die Funktionalität) verändert.

Fertigungsprozesse lassen sich weiter spezifizieren in die Teilprozesse

- Rüsten,
- Bearbeiten,
- Prüfen.

Diese Prozesskette unterliegt dem Prinzip der logischen Kette Planen – Durchführen – Sichern. Die Hauptaufgabe von Logistikprozessen ist die Steuerung des Materialflusses innerhalb einer Montagelinie oder eines Produktionsnetzwerkes. Durch den Materialfluss werden Fertigungsprozesse in einer Weise gelenkt, ver- und entsorgt, die sicherstellt, dass das Ergebnis dem Kunden zum richtigen Zeitpunkt, am richtigen Ort, in der richtigen Menge und in der richtigen Qualität zur Verfügung steht.

Logistikprozesse verändern folgende Parameter:

- Ort,
- Lage oder

- Menge eines Objektes

Logistikprozesse sind nicht wertschöpfend. Sie sind am Produkt selbst nicht erkennbar.

Man unterscheidet Logistikprozesse in

- Handhabungsprozesse,
- Transportprozesse und
- Lagerprozesse.

Handhabungsprozesse dienen zur Vorbereitung von Fertigungs- und Logistikprozessen, z. B. durch Vereinzelung, Ausrichtung oder Zusammenführung von Objekten. Lagerprozesse dienen der Pufferung (Sicherheitsbestand) oder Veredelung (Reifung Logistikprozesse unterliegen der logischen Kette Planen – Disponieren – Dokumentieren).

Gemeinsam mit den involvierten Verbundpartnern wurden mit der sogenannten „go-look-see“ Vorgehensweise repräsentative Flugzeugrumpfschalen- und –sektionsmontagen in Faserverbundbauweise sowie weitere Großkomponentenmontagen an den AIRBUS Standorten Hamburg Finkenwerder und Stade besichtigt und anschließend analysiert.

In Gesprächen mit Vertretern der verschiedenen Planungsabteilungen sowie mit Endanwendern vor Ort wurden aktuelle Problemstellungen diskutiert und analysiert, um in nachgelagerten Diskussionen innerhalb der Beteiligten im Arbeitspaket 3.1 daraus die konkreten Handlungsbedarfe zukünftiger Montagetechnologien abzuleiten.

Anhand dieser ermittelten Handlungsbedarfe wurde dann im Rahmen eines Workshops die weitere konkrete kurz- mittelfristige Vorgehensweise festgelegt:

Der geplante Meilenstein für das Arbeitsfeld Prozessanalyse & Definition kann somit zum Projektende als erreicht angesehen werden.

Da es nicht das Ziel des Arbeitspakets im Rahmen dieses Verbundvorhabens war bestehende Produktionslinien zu optimieren, wurden aus den identifizierten Handlungsfeldern gemeinschaftlich verschiedene zu untersuchende Planungsszenarien abgeleitet. Diese wurden Airbus intern diskutiert. Das Ergebnis der Untersuchungen sowie die vereinbarte Vorgehensweise werden im folgenden Kapitel dargestellt.

#### 2.1.4.2 Konzeption

In der Flugzeugmontage dominiert der Sondermaschinenbau in besonderer Weise. Dieses gilt für passive Einheiten, wie Vorrichtungen und ebenso für aktive Einheiten, wie semi- oder vollautomatisierte Montagesysteme. Diese Anlagen zeichnen sich durch geringe Standardisierung und hohe Komplexität aus. Nicht nur die verwendeten Komponenten, sondern ebenfalls die Prozessgestaltung und die darin zur Anwendung kommenden Technologien sowie Vorgehens- und Lösungsprinzipien sind davon betroffen.

Durch die Beschaffenheit der Bauteile hinsichtlich Gewicht und insbesondere Größe sind einige Teilprozesse vielfach in übergeordneten Prozessen wiederzufinden. Dabei ist zum einen die Bauteilpositionierung, also die genaue Ausrichtung des Bauteils in bis zu sechs Freiheitsgraden innerhalb des Raumes bezüglich eines Referenzkoordinatensystems oder in Bezug auf ein anderes Bauteil, und zum anderen die Kompensation von Gestaltabweichungen z.B. in Folge von Fertigungstoleranzen und Störeinflüssen zu nennen.

In den bestehenden Prozessen der CFK-Großkomponentenmontage nehmen diese beiden Teilprozesse häufig einen erheblichen Anteil der gesamten Durchlaufzeit ein. Die Realisierung der Aufgabenlösung ist nicht standardisiert und anlagen- sowie prozessseitig sehr komplex gestaltet. Darin ist begründet, dass die Prozesse nicht die nötige Robustheit aufweisen, um langfristig stabile Prozesse, kostengünstige Wartungsintervalle und die nötige Flexibilität hinsichtlich Herstellungsrate und Einsetzbarkeit des Produktionsmittels zu gewährleisten.

Zunächst konzentrierten sich die Arbeiten im Rahmen des Arbeitspaketes 3.1 auf die beiden Teilaufgaben Positionierung und Kompensation von prozessbeeinflussenden Gestaltabweichungen der Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen. Hierfür sollten Lösungsprinzipien recherchiert, konzipiert, erforscht und bewertet werden.

Die Zielgrößen ergeben sich neben der möglichst geringen Durchlaufzeit ebenso in der Erreichung der geforderten Genauigkeit und Qualität bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Einfachheit, Erhöhung der Flexibilität, Erhöhung der Robustheit beim Einsatz in einem weiten Prozessspektrums und damit Bildung eines generischen Konzeptansatzes.

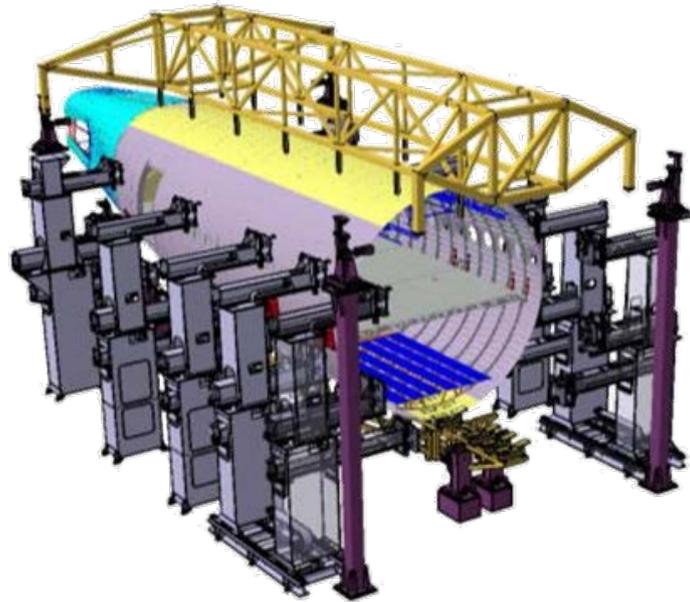


Abb.28: Montagesystem in der Major Component Assembly der A350XWB

In der oben dargestellten Abbildung ist ein Positionier- und Formgebungssystem abgebildet, das aktuell in der Major Component Assembly (MCA) der A350 eingesetzt wird. Der zu fügende Rumpf besteht in dieser Phase aus vier Teilschalen (zwei Seitenschalen sowie Unter- und Oberschale), die zu einer Rumpfsektion gefügt werden sollen.

Zur Realisierung der Positionier- und Formgebungsprozesse verfügt das System über passive Vorrichtungen für die Ober- und Unterschalen sowie eine kartesische aktive Kinematik, aufgeteilt in mehrere Aktoren entlang der Seitenschalen. Diese Aktoren können sich unabhängig voneinander translativ in die drei Raumrichtungen bewegen. Diese Möglichkeit wird genutzt um die an speziellen Beschlägen formschlüssig in das Montagesystem eingespannten Seitenschalenteile zu den beiden anderen Schalenteilen auszurichten und etwaige Abweichungen durch gezielte Stellbewegungen der Aktoren zu kompensieren.

Die Synchronisierung der Antriebe bei den Bewegungen ist extrem wichtig, da sonst Bauteilverformungen und unkontrollierbare Spannungszustände innerhalb des Bauteils auftreten können. Besonders bei Bauteilen aus CFK ist das ein gefährlicher Zustand, weshalb während des Prozesses ständig die Kräfte in den Aktuatoren gemessen werden. Dies stellt somit eine indirekte Kraftmessung dar. Diese Prozedur ist somit technisch sehr komplex und zeitintensiv.

Da die Schalenteile diesen Zyklus prozessbedingt mehrmalig durchlaufen müssen, stellen sich erhebliche Durchlaufzeiten ein.

Im weiteren Verlauf des Prozesses werden die Bohrungen für die Nieten eingebracht, die Fügstellen gereinigt sowie versiegelt und abschließend der Rumpf ausgenietet, bevor er ausgetaktet werden

kann. Messtechnisch wird der Prozess neben der Kraftmessung durch mehrere Laser Tracker für die Koordinatenmessung unterstützt.

Bei der Analyse aller Prozessschritte wurde deutlich, wie sich sowohl Montagephilosophien als auch technische Detaillösungen über die Jahre verändert und den Anforderungen z.B. hinsichtlich Fertigungsgenauigkeit oder bezüglich des Umgangs mit neuen Werkstoffen angepasst haben.

Exemplarisch sei hier auf die Montage von Sektionen für Flugzeugrümpfe hingewiesen: in den Montagelinien der Baureihen A320 und deren Derivate sowie der Baureihen A330/340, deren Rumpfschalen aus rein metallischen Werkstoffen bestehen, wird noch ausschließlich mit festen Beschlägen für die Aufnahme der Schalen in den Bauplätzen sowie mit Konturschablonen und Endanschlägen für die Herstellung der Rumpfgeometrie gearbeitet. Die Rumpfschalen werden stark vereinfacht dargestellt an diese Konturschablonen und Endanschläge herangedrückt bzw. herangezogen und somit auf die geforderte Sektionsgeometrie gebracht, bevor mit den eigentlichen Fügeoperationen (Bohren, Nietverbindungselemente setzen etc.) begonnen werden kann.

In der Sektionsmontage der A380, deren Rumpfschalen in der Regel deutlich größer sind und teilweise aus hybriden metallischen Werkstoffen mit hohem Glasfaseranteil (GLARE) bestehen gibt es zwar auch noch feste Beschläge für die Aufnahme der Schalen in den Bauplätzen, aber an Stelle der Schablonen und Endanschläge wird die Positionierung bzw. Manipulation der Schalen zu der geforderten Rumpfgeometrie bereits mit Positionierungstürmen vorgenommen. Die Positionen der Schalen zueinander werden dabei mittels Laser Tracker punktuell überwacht und ggf. korrigiert.

Bei der nach dem aktuellen Stand der Technik ausgestatteten und für dieses Projekt hinsichtlich der technischen Detaillösungen als Referenz definierten Sektions- und Rumpfmontage der A350XWB wird hingegen auf feste Beschläge für die Aufnahme der Schalen sowohl in deren Montage als auch bei der Sektionsmontage weitestgehend verzichtet. Feste Beschläge gibt es im Prinzip nur dort, wo sie entweder für interne Transporte oder für folgende Rumpfmontageschritte bzw. in der Systemausrüstung unerlässlich sind. Für die Seitenschalen des in Hamburg montierten Rumpfhecks werden beispielsweise neben den vier unverzichtbaren festen Beschlägen je Schale zusätzlich sogenannte Saugerfelder für die Aufnahme der Schalen in den Positionierungstürmen verwendet:

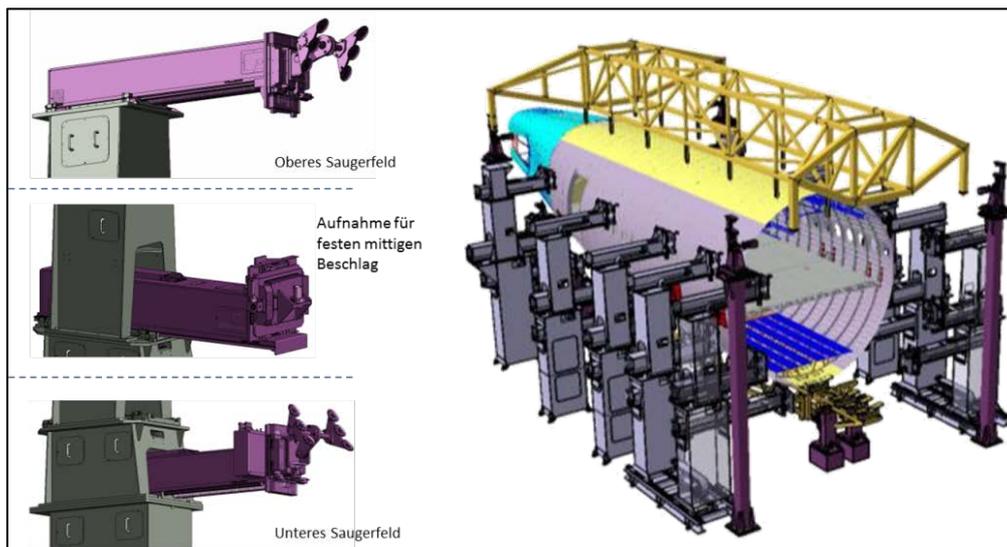


Abb.29: Sektions- und Rumpfmontagebauplatz der A350XWB (Stand 2012)

Die Positionierung bzw. Manipulation der Schalen der sphärisch gekrümmten Rumpfhecksektion 16-18 zu der geforderten Rumpfgeometrie werden mittels den so ausgeführten Positionierungstürmen vorgenommen, wobei die Positionen der Schalen zueinander dabei iterativ mittels Laser Tracker überwacht und ggf. korrigiert werden.

Der Verzicht auf feste Beschläge zugunsten von Saugerfeldern führt zunächst zu reduzierten Montage-, Investitions- und Logistikkosten. Zudem kann die Verwendung von Saugerfeldern als materialgerecht für Faserverbundwerkstoffe angesehen werden, weil dadurch stark veränderliche lokale Steifigkeiten in den sphärisch gekrümmten Rumpfschalen besser ausgeglichen und die nötigen Lastenleitungen für ggf. notwendige Verformungen bei der Manipulation der Schalen auf größere Flächen verteilt werden können.

Für die im Werk Hamburg zu lösende Montageaufgabe ergibt sich weiter die Herausforderung einer kombinierten Sektions- und Rumpfmontage. Die Montage der sphärisch gekrümmten Sektion 16-18 wird in einem gleichen Schritt mit der Verheiratung der konischen Sektion 19 zu dem Rumpfheck der A350XWB realisiert:

Die Komplexität dieser Montageaufgabe kann exemplarisch an den multiplen Messschritten dargestellt werden: die Position jeder in den Bauplatz montierten Einzelkomponente bzw. Montagegruppe wird mittels Laser Tracker erfasst und in Relation zu dem physischen Bauplatz gebracht. Dazu ist jede Komponente und Montagegruppe mit teilweise mehr als 30 Messtargets ausgerüstet, die vor dem Eintakten des Bauteils in den Bauplatz positionsgerecht montiert werden müssen.

Die Position jeder Komponente muss nach jeder Form- und/oder Lagekorrektur erneut erfasst werden und in Relation zu den anderen im Bauplatz befindlichen Bauteilen sowie dem Bauplatz gebracht werden. Aufgrund der Größe der Bauteile und der wirksamen Hebelarme an den

Positionierungseinrichtungen können auch kleine Verfahrswege bereits zu großen Lageveränderungen führen, deshalb wird in der Regel in mehreren Iterationsschritten verfahren und vermessen.

Da über die zu messende Strecke die Genauigkeit eines Laser Trackers abnimmt, und zudem die Strahlengängigkeit = Erreichbarkeit aller Messtargets für einen Laser Tracker für die Vermessung von den beiden im Bauplatz befindlichen Sektionen nicht gegeben ist, wird in dem vorliegenden Fall mit zwei Laser Trackern gearbeitet.

Bei den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Analysen hat sich gezeigt, dass die Form- und Lagekorrektur speziell der beiden sphärisch gekrümmten und mit stark veränderlichen lokalen Steifigkeiten behafteten Seitenschalen, die zudem für Faserverbundwerkstoffe typische Toleranzen aufweisen, beliebig schwierig und mit den vier Positionierungstürmen je Seite auch beliebig zweitaufwändig sein kann.

Neben dem bereits erwähnten iterativen Verfahren und Vermessen der Bauteile werden bei allen Positionierungsschritten die dabei auftretenden Zug- und Druckkräfte an den festen Beschlägen und den Saugerfeldern parallel dazu überwacht.

Somit ergibt sich eine Vielzahl zu berücksichtigender Parameter bevor akzeptable Ergebnisse hinsichtlich der geforderten Geometriegenauigkeit für das Rumpfheck erzielt werden. Wenn dabei einer der Parameter sukzessive an seine Toleranzgrenzen divergiert und diese letztlich erreicht oder überschreitet, stoppt der automatisierte Prozess der Form- und Lagekorrektur und es müssen Änderungsmaßnahmen ergriffen werden. Schlimmstenfalls muss der Prozess sogar unterbrochen und im manuellen Betrieb weitergearbeitet werden. Daraus resultiert unter Umständen ein langer Prozesszyklus, der sich negativ auf die Gesamtdurchlaufzeit auswirkt.

Aus den Erfahrungen bisheriger Flugzeugprogramme ist bekannt, dass Bauteile in Faserverbundbauweise stark individuell sein können. Das kann sich bei sehr großen Bauteilen, an denen zudem von Zeit zu Zeit wesentlich Änderungen durchgeführt werden müssen, schnell potenzieren.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Analyse der Ist-Situation und den daraus abgeleiteten Handlungsfeldern wurde in Zusammenarbeit mit den involvierten Projektpartnern die folgende Vorgehensweise vereinbart:

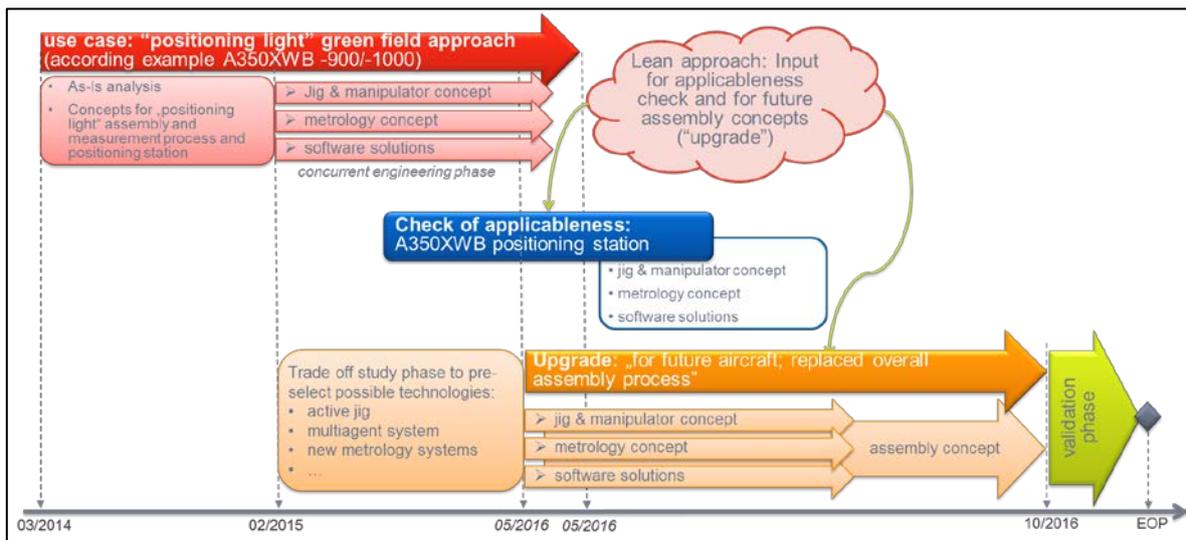


Abb.30: Arbeitsplan im Rahmen des AP 3.1

Weiter wurde die folgende Arbeitsteilung für das Verbundprojekt vereinbart:

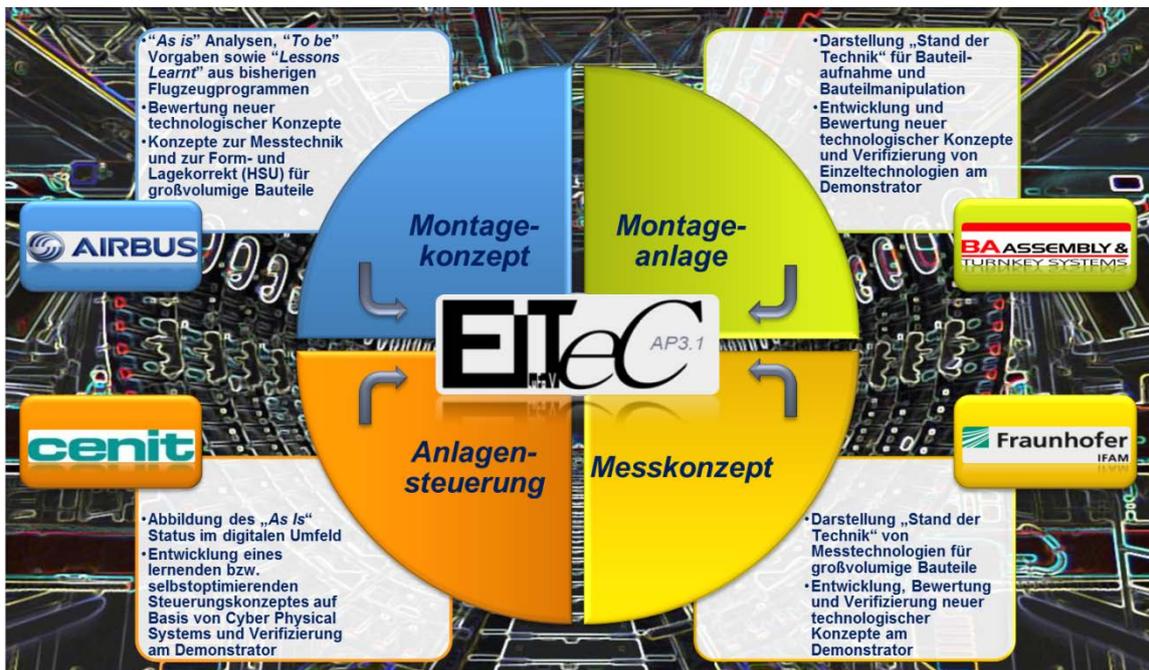


Abb.31: Arbeitsschwerpunkte der im AP3.1 involvierten Projektpartner

Der geplante Meilenstein für das Arbeitsfeld Konzeption kann somit zum Projektende als erreicht angesehen werden.

Im Folgenden werden die Arbeiten und Teilergebnisse der einzelnen Schwerpunktthemen zusammenfassend vorgestellt.

### 2.1.4.3 Messkonzept und Messtechnologie

Im Kapitel „Konzeption“ wurde bereits kurz auf die Wichtigkeit der Messkonzepte und Messtechnologien hingewiesen. Durch alternative Messtechnikkonzepte in der Montage wird die Aufgabe der Positionierung bzw. der Formkorrektur betrachtet. Erkannte Unbestimmtheiten in der Statik der Anlagen führen, wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung, bei Montageprozessen zu einer Beeinflussung der Referenz. Sind z.B. Laser Tracker an den Anlagen montiert, kann die geometrische Referenz (Abstand, Orientierung) einen Montageprozess beeinflussen.

Für die Verifizierung der Lage und Form einer CFK- Schale in der jeweiligen Montagelage sollen im Rahmen des EITeC Projektes alternative Messverfahren zur Anwendung kommen, die ohne bzw. nur mit einem nicht beeinflussbaren Referenzsystem auskommen.

Wesentliche Messaufgaben sind:

- Verifizierung der Abweichungen der Form einer CFK-Schale von der Sollvorgabe.
- Abweichungen der Orientierung einer CFK-Schale von der Montagelage im Raum.
- 3D Abstandsvektoren zwischen zwei zu verbindenden CFK-Schalen.
- Für den endgültigen Positioniervorgang sollten zusätzlich optische Systeme und Referenzpunkte genutzt werden, die unmittelbar auf den CFK-Schalen montiert werden können.
- Verifizierung des verbleibenden Spaltmaßes zwischen den zu verbindenden CFK-Schalen.
- Verifizierung der Lasten und Momente, die in das Material der CFK- Schalen durch Korrektur eingebracht worden sind.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die Überprüfung der Lage und Form von CFK-Schalen ein Messsystem mit einem Referenzsystem eingesetzt werden sollte, das weder vom Prozess selbst noch von Umgebungsbedingungen beeinflusst wird. Zusätzlich sollten die notwendigen Messzeiten relativ kurz sein, da bei der Korrektur der Form ein iteratives Vorgehen notwendig ist und dadurch kontinuierliche Messvorgänge erforderlich sind.

Aus diesen Informationen lässt sich eine Aufgabencharakterisierung bezüglich des benötigten Arbeitsraums, Bewegungsarten, Genauigkeiten, Arbeitsumgebung etc. erarbeiten. Anhand dieser Charakterisierung mittels Messtechnik lassen sich die Anforderungen des Prozesses hinsichtlich Geschwindigkeit, Freiheitsgrad, Genauigkeit, Lasten, Steifigkeit und mechanischen Systemgrenzen abgleichen. Gleichzeitig werden hier etwaige technische Differenzen zwischen Anforderungen und Leistungsparametern sichtbar. Dies mündet in einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung künftiger Lösungsansätze bzw. Konzepte. Abschließend lässt sich eine Handlungsempfehlung zur zielgerichteten Automatisierungsstrategie geben, die auf der einen Seite die nötigen technischen

Lösungen berücksichtigt, auf der anderen Seite jedoch auch Bezug auf die automatisierungsgerechte Produktgestaltung nehmen kann.

Die heute in den einzelnen Bauplätzen für Passagierflugzeugrümpfe in Faserverbundbauweise verwendete Messtechnik für die Form- und Lagekorrektur einzelner Großkomponenten, sowie für die Gestaltkontrolle des Gesamtrumpfes, basiert ausschließlich auf der Technologie der Laser Tracker. Um Bauteile mittels eines Laser Trackers vermessen zu können müssen zahlreiche Meßspiegel, sogenannte Targets, vor dem Eintakten einer Komponente in den Rumpfmontagebauplatz montiert werden. Für einige Komponenten gibt es dafür separate Arbeitsstationen.

Grundsätzlich muss das gesamte Rumpfmontagekonzept neuer Montagelinien bereits sehr früh in der Planungsphase vorab auf die Verwendung eines Laser Trackers abgestimmt werden: Referenzsystem, Koordinatensystem, Art und Lage der Messtargets, Erreichbarkeit der Messtargets für den Laserstrahl, Anlagensteuerung und weitere Parameter. Späte Änderungen an einem dieser Details können somit zu umfangreichen Korrekturen an vielen Prozessbausteinen führen.

Da es sich bei Komponenten für einen Passagierflugzeugrumpf um sehr großvolumige Bauteile handelt sind entsprechend viele Messtargets nötig, was wiederum die Durchlaufzeit für eine Messung deutlich beeinflusst. Soll ein Messvorgang beschleunigt werden, so muss entweder die Anzahl der Messtargets signifikant reduziert werden, oder mehrere Laser Tracker kommen gleichzeitig zum Einsatz. Aufgrund der Großvolumigkeit der verwendeten Bauteile für ein Rumpfheck in Faserverbundbauweise kamen bislang zwei fest in den Arbeitsplatz integrierte Laser Tracker zum Einsatz. Um die Durchlaufzeit eines Messvorganges, der während der Form- und Lagekorrektur einzelner Komponenten mehrfach wiederholt werden muss, zu beschleunigen, wurden die Rumpfmontagebauplätze der Serienfertigung in der Projektlaufzeit um jeweils einen weiteren Laser Tracker ergänzt, da eine signifikante Reduzierung der Messtargets nicht erreicht werden konnte.

Der bereits in der Anfangsphase des Projekts „EiTec“ identifizierte Handlungsbedarf im Bereich der messtechnischen Konzeptionierung wurde somit deutlich unterstrichen. Die Verwendung von Laser Trackern entspricht zwar dem Stand der Technik, ist technisch robust und liefert hinreichend gute Ergebnisse, sie ist aber auch planungs- und investitionsintensiv.

Neben dem von Airbus bereits genutzten photometrischen Messverfahren sind am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM derzeit eine Reihe geeigneter alternativer Messverfahren in der Evaluierung, u.a. auch eine Laser-Radar Messeinheit.

Darauf aufbauend konzentrierten sich die Untersuchungen im Rahmen des Projektes „EiTec“ im Wesentlichen auf Konzepte die berührungslos und „targetless“ messen, also ohne Meßspiegel oder Reflektoren auskommen können. Daher wurden im Projektverlauf mehrere Versuche mit verschiedenen technologischen Ansätzen sowohl in der für das Verbundprojekt aufgebauten Versuchsumgebung als auch in produktionsbegleitenden Anwendungstests in einem Strukturmontagebauplatz für die laufende Serienfertigung der A350XWB durchgeführt.

Der geplante Meilenstein für das Arbeitsfeld Messkonzept und -technologie kann somit zum Projektende als erreicht angesehen werden.

#### 2.1.4.4 Vorrichtungen & Manipulatoren

Im Kapitel „Konzeption“ wurde bereits ausführlich auf die Relevanz von Vorrichtungs- und Manipulatorenkonzepten für die Großkomponentenmontage von Druckrumpfflugzeugen eingegangen.

Die Schwerpunkte dieses Arbeitsfeldes wurden daher gemeinschaftlich wie folgt definiert:

- Effizienz : Anteil der wertschöpfenden Prozesse maximieren.
- Bedienbarkeit: Messprozesse, Formkorrektur und Aktoren verständlich und einfach bedienbar.
- Messprozesse: Aufwand für Messprozesse minimieren.
- Formkorrektur: Möglichkeit die Form großer Bauteile automatisiert zu manipulieren.
- Geometrie-Flexibilität: Flugzeugteile werden in unterschiedlichen Größen gefertigt.
- Raten-Flexibilität: Ressourcen zwischen Flugzeugprogrammen verschiebbar.

Im Arbeitsfeld Montageanlagen gab es im Projektverlauf regelmäßige Gespräche und Abstimmungen mit dem Projektpartner Broetje-Automation GmbH über deren konzeptionellen Ausarbeitungen:

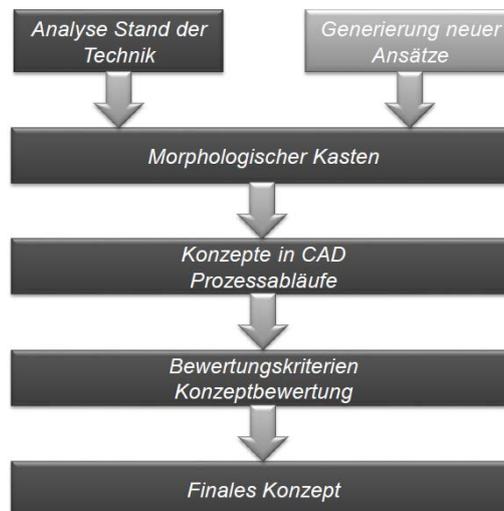


Abb.32: Vereinbarte Vorgehensweise des Projektpartners Broetje-Automation GmbH

Dafür wurde seitens des Projektpartners eine Auswahl- und Bewertungsmatrix von in Frage kommenden Technologien erstellt, die sowohl Airbus- als auch Projektintern diskutiert und bewertet wurden.

Aus den gewählten Möglichkeiten wurden in Folge der weiteren Ausarbeitung vier Grundkonzepte erarbeitet, analysiert und weiter detailliert.

Die Konzepte sowie Alternativen wurden gemeinschaftlich besprochen, Eckpunkte festgelegt und die weiteren Vorgehensweisen abgestimmt.

Einzelne Aspekte sind in die Planung und Durchführung von den Versuchsreihen am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM eingeflossen und wurden anhand des Demonstrators untersucht. Die Ergebnisse und die ausgearbeiteten Konzepte wurden für eine abschließende Validierung im Rahmen des Förderprojektes in Form eines funktionalen digitalen 3D Modells umgesetzt. Das Modell wurde vor Projektabschluss zur weiteren Bewertung durch einzelne Fachbereiche der AIRBUS Operations GmbH zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen eines Projektmeetings wurden das Gesamtkonzept sowie Einzelaspekte der Ausarbeitung detailliert besprochen.

Der geplante Meilenstein für das Arbeitsfeld Vorrichtungen und Manipulatoren kann somit zum Projektende als erreicht angesehen werden.

#### 2.1.4.5 Systemintegration und intelligente Vernetzung

Im Kapitel „Konzeption“ wurde bereits kurz auf die Rolle der Systemintegration und einer intelligenten Vernetzung hingewiesen. Bei modernen automatisierten Systemen gewinnen Anforderungen an die Flexibilität (z. B. Anpassungsfähigkeit, Skalierbarkeit und Integrationsfähigkeit) zunehmend an Bedeutung. Vielfach ist jedoch noch unklar, wie die gewünschte Flexibilität bei der Entwicklung eines automatisierten Systems erzielt und die dadurch entstehenden komplexen Abläufe und Verhaltensweisen beherrscht werden können. Mit Hilfe von Softwareagenten soll es zukünftig möglich sein, die notwendige Flexibilität von automatisierten Systemen systematisch zu entwerfen.

Gemeinsam mit den Vertretern des Projektpartners CENIT AG verständigte man sich auf die folgenden Tätigkeitsschwerpunkte:

- Selbstlernendes/-optimierendes System zur Vermeidung unnötiger Iterationen beim Positionierungsprozess,
- Konzept und prototypische Entwicklung einer intelligenten Vernetzung von Systemkomponenten und
- eigenständiges Lernen des Systems durch Verwalten und Auswerten von Daten, die während des Prozesses gesammelt werden (z.B. Sensordaten der Aufnahmekräfte während des Fügeprozesses).

In Anlehnung an die VDE/VDI 2653 Agentensysteme in der Automatisierungstechnik wurden vier Grundlagenkonzepte betrachtet, die bei einer Entwicklung und Anwendung von Agentensystemen in der Automatisierungstechnik in Frage kommen.

Daraus wurde eine Grundkonzeption für die Verknüpfung einer intelligenten, multiagentenbasierten Steuerungssystematik für einen Strukturmontagebauplatz erarbeitet. Die bei diesem Grundkonzept zugrunde gelegten technischen Ansätze basierten auf:

- Reduzierung der Komplexität durch Teilung des Gesamtprozesses in interagierende Teilprozesse (Annahme eines lineares Verhalten bei kleinen Verformungen gemäß des Materialgesetzes nach Hooke).
- Schnelle Vorhersage des Systemverhaltens durch empirisches Verhaltensmodell auf Basis neuronaler Netze (Zusammenhang zwischen Positioniererbewegungen und Reaktionskräften sowie Bauteilverformung wird durch reale Messdaten „trainiert“).
- Verteilte Steuerung durch interagierende Systeme auf Basis der Multiagententechnologie (Cyberphysisches System: integriertes physische Einheit mit Datenverarbeitungseinheit, um durch geeignete Verarbeitung von Sensordaten sinnvolle Bewegungskorrekturen vorzunehmen; zudem kann das cyberphysisches System über eine Kommunikationsschnittstelle mit anderen cyberphysisches Systemen kommunizieren).
- Selbstlernfähigkeit durch Training von neuronalen Netzen.

Verschiedene Aspekte des gemeinschaftlich ausgearbeiteten Konzeptes sind in die Planung und Durchführung von den Versuchsreihen am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM eingeflossen und wurden anhand des dort betriebenen Demonstrators untersucht und vor Projektabschluss in der Versuchsumgebung der Helmut Schmidt Universität validiert.

Der geplante Meilenstein für das Arbeitsfeld Systemintegration und intelligente Vernetzung kann somit zum Projektende als erreicht angesehen werden.

#### 2.1.4.6 Systemintegration & Validierung

##### Versuchsträger des Fraunhofer IFAM

Sämtliche beschriebenen Konzepte sind in die Planung des seitens des Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM bereitgestellten und betriebenen Demonstrator eingeflossen und wurden hinsichtlich ihrer industriellen Anwendbarkeit überprüft.

Anhand eines realen Rumpfschalenbauteils in hybridbauweise aus Faserverbundaußenhaut mit metallischen Versteifungselementen wurden in der vorhandenen Testanlage in enger Abstimmung mit allen involvierten Projektpartnern gemeinschaftlich umfangreiche Versuche unter anderem in den Bereichen

- absolute Genauigkeit von Kinematiken mit 3 und mit 6 Freiheitsgraden mit und ohne anhängenden Lasten,

- Wiederholgenauigkeit von Kinematiken mit 3 und mit 6 Freiheitsgraden mit und ohne anhängenden Lasten,
- Wiederholgenauigkeit von Kinematiken mit ohne und mit anhängender Lasten,
- Bauteilverformung,
- kraftabhängige Regelungssysteme,
- selbstoptimierende Steuerungskonzepte

sowie in weiteren Themengebieten durchgeführt. Die dafür notwendigen Hard- und Softwareseitigen Anpassungen der Versuchsumgebung wurden projektintern abgestimmt und von den involvierten Projektpartnern gemeinschaftlich vorgenommen.

Sämtliche Versuchsreihen sind dabei mit verschiedenen messtechnischen Konzepten vom Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM begleitet und überwacht worden.

Die Anlagensteuerung wurde mit fortschreitendem Erkenntnisgewinn über das Systemverhalten der Versuchsanordnung schrittweise von der seitens des Projektpartners CENIT AG entwickelten Softwarelösung übernommen.

Da die einzelnen Versuchsreihen im wesentlichen von den involvierten Projektpartnern geplant, durchgeführt und ausgewertet wurden verweisen wir an dieser Stelle auf die Abschlussberichte zu den individuellen Förderprojekten der involvierten Projektpartner.

Der geplante Meilenstein für das Arbeitsfeld Systemintegration und Validierung kann somit zum Projektende als erreicht angesehen werden.

#### Verifikation des Messtechnikkonzeptes mittels Laser Radar

Um die gemeinsam mit dem Projektpartner Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM erarbeiteten messtechnischen Konzepte zu validieren waren ursprünglich produktionsbegleitende Messungen in der realen Fertigungsumgebung der A350XWB vorgesehen und detailliert geplant worden. Aufgrund von terminlichen und ablauftechnischen Problemen konnte dieses Vorhaben im Projektzeitraum nicht umgesetzt werden.

Um die Validierung der erarbeiteten Konzepte dennoch ermöglichen zu können wurde eine Messkampagne an einem realen Schalenbauteil für Flugzeugdruckrümpfe in metallischer Bauweise in der von der AIRBUS Operations GmbH betriebenen Testumgebung des Zentrums für Angewandte Luftfahrtforschung GmbH im Berichtszeitraum geplant und durchgeführt.

Dabei wurde mittels Laser Radar ein Abgleich zwischen Soll- und Ist-Daten gemäß CAD Daten eines realen Flugzeugschalenbauteils durchgeführt.

Um die Messstrategie hinsichtlich ihrer Stabilität und des Einflusses auf geringfügige Änderungen validieren zu können, wurde die Schale sowohl im unveränderten Ursprungszustand als auch in einem undefiniert verformten Zustand vermessen.

Für die Auswertung der Ergebnisse verweisen wir auf den Abschlussbericht des Projektpartners

Der geplante Meilenstein für das Arbeitsfeld Systemintegration und Validierung kann somit zum Projektende als erreicht angesehen werden.

#### 2.1.4.7 Verifikation eigener messtechnischer Konzepte

Stand der Technik bei AIRBUS ist derzeit die photogrammetrische Endvermessung beispielsweise von Rumpfschnittstellen oder der Gestalt ganzer Sektionen. Dabei kommen jedoch jeweils nur eine manuell geführte Kamera oder wenige manuell geführte Kameras gleichzeitig zum Einsatz. Für eine Form- und Lagekorrektur innerhalb eines Bauprozesses von Rumpfsektionen kam die Photogrammetrie bislang noch nicht zum Einsatz.

Der im Rahmen dieses Projektes untersuchte Ansatz benötigt nicht wie bei den bisherigen Anwendungen eine Überlappung der digital aufgenommenen Einzelbilder, sondern die Einzelbilder haben keine Überdeckung und werden in einem Gesamtsystem kalibriert.

Die so aufgenommenen Einzelbilder werden mittels einer entsprechenden Software, die charakteristische Strukturen wie z.B. Bauteilkanten oder vorab angebrachte codierte und/ oder reflektierende Messtargets identifiziert, ausgewertet und beispielsweise zur Gestaltbestimmung einer dreidimensionalen Komponente unter Hinzunahme von bekannten Referenzpunkten herangezogen.

Das im Rahmen des produktionsbegleitenden Versuches zu realisierende Konzept basiert auf einer Vielzahl starrer Photogrammetrie-Kameras, die die Überwachung der Veränderung der Form und Lage einer Komponente in Faserverbundbauweise in einem Strukturmontagebauplatz anhand der Veränderung signifikanter Strukturen dieser Komponente gleichzeitig und in sehr kurzer Zeit erfassen.

Eine Bildverarbeitungssoftware soll diese Veränderungen unmittelbar nach der erfolgten Messung auswerten und an die Steuerung der Positionieranlage zur Adaption der Form und Lage übermitteln.

Als geeignete charakterisierende Struktur wurden letztlich die Köpfe von Nietverbindungselementen ausgewählt: Nietverbindungselemente sind zahlreich vorhanden, ihre Anzahl und ihre Position sind bekannt und verändern sich auch nicht innerhalb der Komponente bei Bewegungen, ihre Größe ist bekannt und sie unterscheiden sich farblich stark von den Oberflächen der Innen- und der Außenseite von Rumpfkomponten in Faserverbundbauweise und sind somit für entsprechend genaue Kameras hinreichend gut sichtbar und als Zielmarken identifizierbar.

Bei der untersuchten Komponente handelte es sich um eine Seitenschale einer A350XWB-900 aus dem Serienprozess. Die Kameras wurden nach einem vorher festgelegten Schema am Bauplatz installiert, auf die Seitenschale ausgerichtet und mit dem Analyserechner verbunden.

Um eine qualifizierte und vergleichbare Aussage über die Genauigkeit der Messergebnisse des beschriebenen photogrammetrischen Testaufbaus zu erhalten, wurde die Seitenschale im Serienbauplatz aufgenommen, spannungsfrei ausgerichtet und es wurde eine initiale Referenzmessung mit den im Bauplatz vorhandenen Laser Tracker Systemen durchgeführt. In dieser Position der betrachteten Komponente wurden dann die Kameras kalibriert.

Anschließend wurden die Aktuatoren des Bauplatzes in den Flugzeugkoordinatenrichtungen in Y und in Z sequentiell nacheinander in radialer Richtung um jeweils einen definierten Betrag verfahren (0.5 mm bzw. 1.0 mm mit geringer Schrittgeschwindigkeit bzw. bis zur Lastgrenze, je nachdem welcher Wert zuerst erreicht wurde).

Nach dem Verfahren eines Aktuators wurde jeweils eine Referenzmessung mit den im Bauplatz vorhandenen Laser Trackern und zeitgleich eine Messung mit dem Kamerasystem durchgeführt. Nach der Messung wurde der jeweilige Aktuator wieder auf seinen Ausgangspunkt zurückgefahren und der nächste Aktuator wurde anschließend verfahren.

Zusammengefasst hat die Auswertung der Versuchsergebnisse ergeben, dass die erzielten Genauigkeiten mit nur einer Kamera je betrachtetem Bereich vor allem in der X Koordinate nicht in jedem Fall ausreichend sind. Zudem wurde eine der Kameras nicht präzise genug auf einen vorher festgelegten Bereich der Nietverbindungselemente ausgerichtet, so dass die Messergebnisse der Kamera nicht mit den Ergebnissen aus der Laser Tracker Messung korrelierten.

Projektintern wurde daraufhin beschlossen, die Anwendungsmöglichkeit einer anderen ebenfalls für die Montage großvolumiger Bauteile neuartigen Messtechnologie zu untersuchen und im Rahmen einer Versuchsdurchführung zu verifizieren.

Mittels der Laser Scanner Technologie soll ebenfalls die Gestalt sowie deren Veränderung von Rumpfbauanteilen messtechnisch erfasst werden, vergleichbar zu dem früher dargestellten Ansatz der Photogrammetrie. Um zu verifizieren, ob diese heute bereits in verschiedenen industriellen Anwendungsbereichen verwendete Messtechnologie hinreichend genau ist um die teils sehr kleinen Veränderungen in Form- und Lage eines Rumpfbauanteils erfassen zu können, wurde eine Versuchsanordnung mit einem realen Rumpfssegment im Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung GmbH (ZAL) umgesetzt.

Voruntersuchungen hatten bereits gezeigt das sehr glatte Flächen, oder Flächen mit glänzender Endlackierung nur ungenau erfasst werden können. Gekrümmte Bauteile mit relativ großen Radien verursachen zusätzlich das Problem, dass der Rückstrahlwinkel der Laserstrahlen nicht ausreichend sein könnte.

Da die beiden Laser Scanner aufgrund der Platzverhältnisse und der Ausstattung der Testumgebung nur starr installiert werden konnten, wurde das Rumpfssegment während der Messung mit gleichbleibender Geschwindigkeit und parallel zu dem umgebenden Gestell durch den Messbereich der beiden Laser Scanner bewegt.

Dabei wird mittels zweier 2D Laser Scanner, die in einem Abstand von ca. 18m zueinander angebracht wurden, die Oberfläche einer oberen Hälfte einer Flugzeugsektion abgetastet, zeitgleich wird die Position des zu vermessenden Objektes mit einem weiteren Laser Scanner überwacht. Somit können Orientierung und Position von Bauteilen nachverfolgt und gleichzeitig Daten von der Oberfläche des zu überwachenden Objektes erfasst und eine 3D Punktwolke erzeugt werden.

Nach Vorbetrachtungen verschiedener Laser Scanner unterschiedlicher Anbieter wurde der Versuch mit zwei SICK LMS551 sowie einem SICK NAV350 Scanner durchgeführt.

Um mit nur zwei Sensoren einen möglichst großen Bereich erfassen zu können wurden diese V-förmig oberhalb des mit der Standardgrundierung versehenen Rumpsegmentes einer A320 angeordnet, so dass sich näherungsweise ein 45° Winkel zu der zu erfassenden Oberfläche ergab.

Um die Messdaten der beiden 3D Laser Scanner deutlich voneinander unterscheiden zu können wurden diese in der Punktwolke in unterschiedlichen Farben visualisiert.

Die bislang vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die gewählten Laser Scanner Einheiten unter den gegebenen Umgebungsbedingungen grundsätzlich in der Lage sind, verwertbare digitale 3D Punktwolken zu erzeugen.

Die Präzision der Auflösung kleiner Strukturen ist dabei nach heutigem Anforderungsprofil nicht ausreichend. Aufgrund der sehr weit voneinander entfernt angebrachten Laser Scanner und den nicht idealen Winkeln zu diesen Objekten in der Versuchsanordnung sind die aufgenommenen Daten für die weitere Verarbeitung in einem industriellen Umfeld nach heutigen Anforderungen kaum sinnvoll verwertbar.

Um die Grenzen der Gestalterkennung von großvolumigen Flugzeugdruckrumpfbauteilen auszuloten wurden im Projektverlauf auch eine strukturell wesentlich komplexere Flügelmittelkastensektion mit den gleichen Laser Scanner Systemen aus dem vorigen Versuchsaufbau vermessen.

Um die Messdaten der beiden 3D Laser Scanner deutlich voneinander unterscheiden zu können wurden diese in der Punktwolke in unterschiedlichen Farben visualisiert.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat gezeigt dass die gewählten Laser Scanner Einheiten unter den gegebenen Umgebungsbedingungen grundsätzlich in der Lage sind verwertbare digitale 3D Punktwolken auch von komplexeren Bauteilen zu erzeugen.

Die Präzision der Auflösung kleiner Strukturen ist dabei nach heutigem Anforderungsprofil aber noch nicht ausreichend und muss daher ggf. mit anderen Laser Scanner Einheiten oder mit neueren Baureihen zu einem späteren Zeitpunkt oder im Rahmen andere Projekte fortgeführt werden.

Der geplante Meilenstein für das Arbeitsfeld Systemintegration und Validierung kann somit zum Projektende als erreicht angesehen werden.

## 2.1.4.8 Ergebnisse der Zusammenarbeit mit der Helmut Schmidt Universität

### Aufgabenstellung und Konzept

Das Arbeitspaket befasst sich mit der Erforschung neuer Prozessmöglichkeiten zur Positionierung und Kompensation von Gestaltabweichungen der in den aktuellen und zukünftigen Produkten verwendeten großflächigen Faserverbundkomponenten.

Neben der grundlegenden Prozessfähigkeit, also der Erreichung der geforderten Genauigkeit und Qualität, sind weitere Zielgrößen anvisiert, wie geringe Durchlaufzeiten, Erhöhung der Flexibilität und der Robustheit beim Einsatz eines wechselnden Produktspektrums.

Übergeordnetes Ziel ist ein möglichst generisch anwendbares Prinzip bzw. ein breites Spektrum anwendbarer Technologien zu erforschen bzw. in den Grundfunktionen zu validieren. Zu diesem Zweck wurde die Helmut Schmidt Universität seitens der AIRBUS Operations GmbH unterbeauftragt.

Zur Vorbereitung bzgl. der Konzeptfindung ist der vorhandene exemplarische Fertigungsprozess für Flugzeuggroßkomponenten tiefgehend untersucht worden. Für diesen Zweck dienlich ist die Elementarisierung des Fertigungsprozesses in seine Grundprozesse.

Das Prinzip der Elementarisierung ergibt sich in der Zerlegung des Gesamtprozesses in seine elementaren Funktionen und Vorgänge. Dies lässt eine Fokussierung auf die Prozesshaupttreiber zu, um diese bei der Konzeptbildung zu priorisieren. Die Methode ist an das Methods-Time Measurement-Verfahren (MTM) bzw. an das REFA-Verfahren angelehnt und bietet durch die blockbasierte Untergliederung des Gesamtprozesses die Reduktion der Systemkomplexität durch die Schaffung von Übersichtlichkeit.

Bei der Elementarisierung wird ein Ebenen-Modell aus den Prozesselementen des Produkts gebildet. Aus der Arbeitsablafebene ist die Verrichtungsfolge des Anwendungsfalles zu analysieren.

Auf Basis dieser Analyse wurden die wichtigsten Prozessteile entnommen und für spätere prototypische Betrachtungen Teillösungen gesucht. Die Teillösungen haben ihren Ursprung im Einsatz innerhalb der Automobil- und Schienenfahrzeugbranche sowie in der allgemeinen Automatisierungstechnik.

Die Teillösungen wurden kategorisiert und in einen morphologischen Kasten zur Auswahl der Konzeptausprägung überführt. Der morphologische Kasten listet dabei die zu erfüllenden Funktionen und die funktionszugeordneten, möglichen Teillösungen auf.

Dieser sogenannte Kriterienkatalog wurde durch die Bildung von Hauptkategorien und untergeordnete Kriterien erarbeitet und lag den bereits genannten Anforderungen an das Montagesystem zu Grunde, die um weitere Aspekte ergänzt wurden.

Die Hauptkategorien bestehen aus der Wirtschaftlichkeit, Personal, Technologie und Veränderungsfähigkeit. Die Kriterien in den Hauptkategorien wurden durch paarweisen Vergleich

durch Experten in eine Bewertungsrangfolge gebracht. Ebenso wurde mit den Hauptkategorien untereinander verfahren.

Die Teillösungen wurden nach diesen Kategorien bewertet. Im Anschluss wurde durch Pfadbildung der höchstbewerteten Lösungen einer jeden Funktion das Gesamtkonzept konstruiert.

Das verfolgte Konzept basiert auf einem robotergeführten, modular gestalteten und flexibel einsetzbaren aktiven Greifer, der CFK Schalenteile positionieren und deren Form hinsichtlich der Sollgeometrie manipulieren kann.

Das Konzept verfolgt einen grundlegend neuartigen Ansatz in der Trennung der beiden Hauptfunktionen Positionierung und Formgebung. Vormals war hierfür das komplexe Zusammenspiel der kartesischen Kinematik zuständig, diese Funktionen werden nun von unterschiedlichen Systemkomponenten ausgeführt.

Der Industrieroboter ist eine günstige und leistungsstarke Maschine, die Positionieraufgaben in hoher Qualität erfüllen kann. Gleichzeitig verspricht die langjährige Erfahrung und hohe Verbreitung einen hohen Reifegrad. Das montierte Werkzeug übernimmt die Formgebung durch Linearaktoren. Die Linearaktoren wirken dabei in radiale Richtung auf das Schalenteil. Die Separation der Positionierung von der Formgebung und die Beschränkung auf eindimensionale Formgebungsimpulse reduziert die Komplexität des Prozesses entscheidend. Die Kopplung von Werkstück und Werkzeug wird pneumatisch über Vakuumsauger realisiert.

Die Bildung komponentenbezogener Koordinatensysteme vereinfacht die Berechnung der nötigen Stellbewegungen zwischen Schalenteil und Linearaktoren erheblich. Durch Koordinatentransformation kann die Abweichung zwischen der Ist- und Sollposition schnell quantifiziert werden. Ebenso ist die absolute Position des Werkstücks im Raum und zum roboterinternen Koordinatensystem schnell beziffert, so dass die Positionierung einfach eingeleitet werden kann.

Nachfolgend werden kurz die Unterschiede des neuen Konzepts zum bestehenden exemplarischen System aufgelistet:

	<b>Bestehendes Montagesystem</b>	<b>EITEC Konzept</b>
<b>Funktionskonzept</b>	Komplexes kinematisches Prinzip	Komplexitätsreduzierung durch funktionale Trennung von Positionierung und Formgebung
<b>Anbindung</b>	Feste spezielle Beschläge	Vakuumsauger
<b>Rüstprinzip</b>	serielle Eintaktung	parallele Eintaktung möglich
<b>Prozesskräfte</b>	indirekte Kraftmessung	direkt Kraftmessung
<b>Prozessinformationen</b>	Limitiert	integrierte Datenauswertung
<b>Erweiterbarkeit</b>	Limitiert	modular erweiterbar
<b>Rekonfigurierbarkeit</b>	Schwierig	einfach

Abb.33:Unterschiede der Konzepte

Mit der Umsetzung des Konzepts auf Laborebene sollte die Machbarkeit des Konzepts nachgewiesen werden. Dafür wurde ein Demonstrator aufgebaut. Die Linearaktoren sind auf einem Standardaluminiumprofil installiert. Ein KUKA KR 125/2 bildete das Positioniersystem. An den Aktoren sind Kraftsensoren sowie die Saugnäpfe montiert.

Der neue Anwendungsfall setzt sich zusammen aus der Aufnahme eines Schalenhautfeldes aus CFK, der Formgebung in die richtige Gestalt und anschließender Positionierung. Die abschließende Positionierung wird alleinig durch den Industrieroboter ausgeführt. Der Vorgang verläuft iterativ während mehrmalig die Referenzpunkte auf dem Hautfeld mittels eines taktilen Koordinatenmessgeräts aufgenommen werden.

Im Verlauf der durchgeführten Versuchsreihen mit diesem Demonstrator wurden die Berechnungsalgorithmen für die Formgebung sowie Positionierung entwickelt und kontinuierlich verbessert. So konnten bei gleichzeitig höherer Genauigkeit die iterativen Zyklen zur finalen Formgebung des Hautfeldes verringert und eine effiziente Annäherungs- und Positioniertrajektorie des Industrieroboters erreicht werden.

Mit Hilfe eines 3D-Modells sowie einer FEM-Analyse wurden Kräfte und Momente die während der Formkorrektur auf das Bauteil wirken berechnet und optimiert. In Summe ergeben sich dadurch signifikante Durchlaufzeitverkürzungen.

Durch die Implementation von erweiterten Prozess-Monitoring-Funktionen konnte die Prozesssicherheit erheblich gesteigert werden. Dem Bediener können die Abweichungen der Referenzmerkmale von der Sollposition übersichtlich dargestellt werden.

Besonders wichtig ist die Erweiterung des Gesamtsystems durch ein Kraftverlaufs-Monitoring. Hier ist es nun möglich den Prozesskraftverlauf gegenüber den Stellbewegungen der einzelnen Zylinder nachzuverfolgen.

Durch die Integration der Ergebnisrückführung und des Kraft-Monitorings konnte das Prozessverständnis erheblich gesteigert werden. Diese Erkenntnisse lassen sich nicht nur auf den vorliegenden Prozess anwenden, sondern geben ebenso Impulse auf die vorangestellte CFK-Bauteilentwicklung. Eine werkstoffgerechte Verformung ist dadurch möglich.

#### Nachweis in der Versuchsumgebung

Das von der Helmut Schmidt Universität betreute Arbeitspaket befasst sich vorrangig mit der Erforschung neuer Prozessmöglichkeiten zur Positionierung und Kompensation von Gestaltabweichungen der in den aktuellen und zukünftigen Produkten verwendeten großflächigen CFK-Komponenten. Neben der grundlegenden Prozessfähigkeit, also der Erreichung der geforderten Genauigkeit und Qualität, sind weitere Zielgrößen anvisiert, wie geringe Durchlaufzeiten, Erhöhung der Flexibilität und der Robustheit beim Einsatz eines wechselnden Produktspektrums.

Übergeordnetes Ziel ist ein möglichst generisch anwendbares Prinzip bzw. eine breit anwendbare Technologie zu erforschen und zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurde ein gemeinsames Versuchsprogramm definiert, welches zum Ziel hat typische technologische Prozessparameter, wie z.B. die Verformungen von CFK Bauteilen, zu untersuchen und zu charakterisieren. Die Verformungsarten können sowohl einzeln als auch kombiniert auftreten und wurden messtechnisch erfasst. Dazu wurde die statistische Stabilität und Interpretationsvarianz verschiedener Referenzsysteme für verschiedene Verformungsmodi untersucht.

Außerdem wurden Abweichungen in Messung und physischer Genauigkeit der Referenzsysteme sowie deren Einfluss auf dem Prinzip des „Design of Experience“ (kurz genannt DoE) hin untersucht. Die verschiedenen Wirkprinzipien und ihr gesetzmäßiges Zusammenwirken wurden teilweise in Versuchsreihen oder im Simulationsmodell demonstriert.

Das Versuchsszenario besteht aus einem Standardindustrieroboter sowie einen End-Effektor mit aktiven Zug-Druck-Aktuatoren (Linearzylinder) zur Formkorrektur. Das CFK Versuchsbauteil ist durch Stringer in Längsrichtung ausgesteift. Die CFK Spanten dienen zur Versteifung in Quer- bzw. radialer Richtung und werden im Versuchsszenario montiert. Dafür sind drei neuartige CFK Integralspante an einem Trägergestell montiert. Die Spante selbst werden von Spantkonturboards definiert aufgenommen.

Das verfolgte Konzept basiert auf einem robotergeführten, modular gestalteten und flexibel einsetzbaren aktiven Greifer, der CFK Schalenteile positionieren und deren Form hinsichtlich der Sollgeometrie manipulieren kann. Das Konzept unterscheidet sich insofern von aktuell eingesetzten Technologien, da die Positionierung und die Formgebung funktional getrennt sind und somit die Prozesskomplexität stark reduziert werden kann.

Folgende Verformungsarten von Schalen wurden in der Verformungsanalyse zugrunde gelegt:

- **Spring-in/out:** Der Spring-in- bzw. Spring-out-Effekt, sorgt bei der Schale für eine Verringerung bzw. Vergrößerung des Radius'. Dieser Effekt soll sowohl symmetrisch, also konstant zu beiden Seiten, als auch asymmetrisch im Bezug zur Längsachse untersucht werden. Auch eine Veränderung des Radius entlang der Längsachse ist darzustellen.
- **Sattelform:** Bei dieser Verformung sind die äußeren Radien im Verhältnis zur Mitte größer, woraus sich eine Form ähnlich der eines Reitsattels ergibt.
- **Torsion:** Bei einer Torsion der Schale kommt es zu einer Verdrehung der vorderen und hinteren Kante zueinander, was in einer asymmetrischen Verformung resultiert.
- **Kombination:** In der Praxis können auch komplexere Verformungen auftreten, bei denen unterschiedliche Grundverformungen in Kombination vorliegen. In der Realität tritt meist eine Kombination aus verschiedenen Verformungsmodi auf, deren messtechnische Bewertung stark vom gewählten Referenzsystem abhängt.

Der Fokus lag im Projekt auch auf die Weiterentwicklung der Referenzierungsmethoden zwischen den am Prozess beteiligten Komponenten, bestehend aus Anlage bzw. Kinematik sowie CFK Schale.

Die Referenzierung ist ein Kernelement des Gesamtprozesses, da nur durch die robuste Ermittlung der geometrischen Gegebenheiten und Beziehungen der Komponenten der Prozess ermöglicht wird.

Dabei galt die Anforderung durch schnelle Vermessungsverfahren auf Änderungen der Produktionsumgebung reagieren zu können und so hohe Flexibilität zu erreichen. Als besondere Herausforderung ergibt sich die über den Prozess ändernde geometrische Gestalt des Werkstücks, also des Schalenteils sowie Formgebung.

Das Vorgehen für die Schalenteilaufnahme lässt sich wie folgt kategorisieren:

- Programmierung einer kollisionsfreien Bahnkurve des Roboters mit Handhabungs-Endeffektor
- Positionierung des Roboters über das Schalenteil
- Kraftgesteuerte bzw. -geregelter Aufnahme mittels Saugfunktion
- Unterschiedliche Weg-Zeit Steuerung der Zylinder
- Regelung der potentiellen Deformierung durch zu hohe Vorspannkräfte
- Alle Zylinder verfahren und stoppen auf definiertem Kraftniveau (garantiert durch innenliegende Anschläge)
- Ansaugen des Schalenteils und Verfahrbewegung der Kinematik zum Bauteilträger mit den CFK Spantelementen

Im Anschluss an den Positionierprozess folgt die Ausrichtung der potentiellen Fügepartner mit gleichzeitiger werkstoffgerechter Formgebung. Das Vorgehen der Abweichungsvektoren für die Formkorrektur lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen:

- Aktuelle Ermittlung der Zylinderpositionen
- Ermittlung der Schalenmerkmalspositionen
- Solldaten der Schalenmerkmale in den Regelkreislauf laden
- Kräfte und Momente der Zylinder berechnen sowie Koordinaten bzw. Vektoren bestimmen
- Koordinaten bzw. Vektoren der Schale bestimmen
- Abweichungen der theoretischen Koordinaten zu den realen Koordinaten ermitteln
- Korrektur durch den implementierten Lage-Regelkreis durchführen
- Erneute Messung starten, sofern eine Iteration erforderlich ist bzw. eine Abweichung zum Soll-Koordinatensystem festgestellt wurde
- Optimale Verfahrbewegungen an die Steuerung übermitteln und Kraftgrenzen überwachen

Im nächsten Schritt wird auf die Entwicklung und Gestaltung des Prozesses eingegangen. Das Versuchsszenario gliedert sich in sechs Hauptkomponenten:

- Schalenteil
- Kinematik oder Roboter

- Handhabungs- oder Greiferwerkzeug
- Spante
- Vorrichtung für Spantaufnahme
- Messtechnik

Diese Komponenten müssen in geometrische Beziehung gebracht werden, damit die Berechnungen hinsichtlich Formgebung und Positionierung ermöglicht werden.

Im vorgesehenen sowie zukünftigen Anwendungsfall innerhalb der Strukturmontage stellt das Flugzeug das Referenzsystem dar. Um den funktionalen Montageprozess auf Laborebene zu validieren, musste ein äquivalentes Referenz-Koordinatensystem definiert werden. In diesem Fall bot sich das Spant-Koordinatensystem als Referenz-Koordinatensystem an. Wichtiges Kriterium dabei ist, das dieses Koordinatensystem über den Prozess hinaus ortsfest bleibt.

Am mittleren Spant, der auf einem Spantkonturboard am Spanthaltergestell montiert ist, wird das Referenzkoordinatensystem definiert. Dieses steht stellvertretend für das Flugzeugkoordinatensystem, welches innerhalb des Versuchsaufbaus nicht dargestellt werden konnte.

Der Spant verfügt über zwei Fertigungslöcher, auch „F-Holes“ genannt, sowie das Konturboard mit einer Ausrichtungsbohrung. Diese 3 Merkmale werden zur Messung der Referenzebene genutzt. Der Ursprung liegt in der Ausrichtungsbohrung. Die Z-Richtung wird durch den Vektor zwischen den F-Holes markiert. Die X-Richtung zeigt in Richtung des Normalenvektors der eingemessenen Referenzebene. Die Y-Richtung erschließt sich dadurch orthogonal.

Das Messinstrument soll während des Versuchs ortsfest bleiben. Damit wird der Aufwand minimiert, da bei Ortswechsel des Messinstruments während des Versuchs, dieses auf jeder neuen Position neu eingemessen werden müsste, d.h. die relative Ausrichtung und Position zum Referenzkoordinatensystem müsste stets neu bestimmt werden.

Der taktile Messarm muss vor dem Versuch einmalig das Referenzkoordinatensystem und ebenso den Robotergreifer zum Einmessen erreichen und anschließend während des Versuchs das Schalenteil ständig vermessen können. Obwohl der Messraum des Messarms vergleichsweise groß ist, ist die Erreichbarkeit zudem durch die Störkonturen des Greifers, Schalenteils und des Spanthaltergestells limitiert.

Aus diesem Grund hat sich zweckdienlich erwiesen, das Messgerät auf dem Messgestell zu montieren. Die Standfläche und Masse des Gestells reicht aus, um das Messgerät während des Versuchs ortsfest zu halten.

Das Tool Center Point (TCP) Koordinatensystem, also das Werkzeugkoordinatensystem, liegt standardmäßig im Werkzeugmontageflansch des Roboters. Es ist möglich diesen Frame durch Parametrierung in der Robotersteuerung zu verlegen. Es bietet sich zumeist an, den Frame in die Spitze des Werkzeuges zu legen.

So ist die Programmierung von Bahnen bei Schweißapplikationen oder Schweißpunkten mit Schweißpunktzangen sehr viel einfacher durchführbar, da der Programmierung sich über die kinematische Kette, die zum Werkzeug führt, keine Gedanken machen muss und sich auf den Hauptprozess konzentrieren kann.

Im Anwendungsfall ist eine Möglichkeit den TCP auf das Greiferwerkzeug zu verlegen. Es könnte beispielsweise auf den mittleren Saugnapf ausgerichtet werden. Der Nachteil hierbei ist, dass das Schalenteil der Idee nach nicht immer exakt in der gleichen Position aufgenommen wird. Der TCP in Relation zum Schalenteil ist somit stets unbestimmt.

Eine weitere Möglichkeit ist den TCP in das Schalenteil-Koordinatensystem zu legen. Auch wenn das Greiferwerkzeug im engeren Sinne das Werkzeug des Roboters darstellt, soll das Schalenteil jedoch auf den Spant positioniert werden, weshalb das Schalenteil stellvertretend als Werkzeug angesehen wird. Es wurde deshalb festgelegt, dass der TCP in den Schalenteilframe gelegt wird.

Die Problematik, dass das Schalenteil unbestimmt vom Greifer aufgenommen wird, bleibt jedoch bestehen. Es kommt hinzu, dass sich der Schalenteilframe durch die Formgebungsiterationen stetig verändern kann. Das hängt in erster Linie von der eingesetzten Spanntechnik des modularen Greifers ab bzw. von sogenannten „Slippage-Effekten“ der verwendeten Kinematik.

Neben der Nutzung des Schalenteilframes zur Bestimmung des Abweichungsvektors zwischen Schalenteil und Spant, ist der Schalenteilframe essentiell für den Formgebungsalgorithmus.

Die Bestimmung des Schalenteilkoordinatensystems hat sich als komplex herausgestellt. Der Schalenframe ist unbedingt nötig, um die Sollform und die Istform gegeneinander abgleichen zu können, indem die CAD-Daten der Sollform in das gemessene Koordinatensystem ausgerichtet und anschließend die Abweichungen bestimmt werden, um in letzter Instanz die Positionierung des Schalenteils auf dem Spant zu ermöglichen.

Das Schalenteil besitzt aus diesem Grund acht Messmerkmale, die aus der folgenden Abbildung in roten Kreisen dargestellt zu entnehmen sind. Anhand dieser Merkmale muss der Frame bestimmt werden. Für diesen Zweck wurden mehrere Varianten in Betracht gezogen und getestet. Die besten Ergebnisse konnten dabei mit der Ebenenbildung über 6 Kantenpunkte erzeugt werden.

Dafür wurde der Normalenvektor als lineares Ausgleichswertproblem der Form  $A \cdot b = 0$  über Singulärwertzerlegung bestimmt. Der Ursprung des Koordinatensystems (KOS) liegt auf der Hälfte des Vektors zwischen den Messmerkmalspunkten  $m_l$  und  $m_r$ . Nach allgemein üblicher Konvention in der Luftfahrt liegt die X-Richtung des KOS in Flugzeug Längsachse also konzentrisch zur Wölbungsachse des Schalenteils. Die Y-Achse stellt der Normalenvektor dar und die Z-Achse ergibt sich dadurch orthogonal zu den beiden bestehenden Achsen zu einer Orthonormalbasis.

Eine Orthonormalbasis (ONB) oder ein vollständiges Orthonormalsystem (VONS) ist in den mathematischen Gebieten lineare Algebra und Funktionalanalysis eine Menge von Vektoren aus einem Vektorraum mit Skalarprodukt (Innenproduktraum), welche auf die Länge eins normiert und

zueinander orthogonal (daher Ortho-normal-basis) sind und deren lineare Hülle dicht im Vektorraum liegt.

Das Schalenteil wird handelsüblichen Vakuumsaugern im Greifer fixiert. Es gibt ein weites Produktspektrum an Formen, Größen und Materialien für diese Greifer. In der Automobilindustrie haben sich zur Handhabung von großen leicht gebogenen Blechen konkave Flachsauger bewährt.

Ein wesentliches Ergebnis der Versuchsreihen ist die direkt proportionale Abhängigkeit zu dem Evakuierungsgrad und den damit verbundenen hohen Greifkräften.

Innerhalb der Versuchsreihen zeigten diese Vakuumsauger das Verhalten, die CFK Schalenteile lokal, im Bereich der Ansaugstellen, unzulässig zu deformieren. Als weiteres Ergebnis sind die in den Zug-Druck-Stangen der Linearzylinder angeordneten Kugelgelenke identifiziert worden. Diese Kugelgelenke sind in der Idee begründet, dass die Kugelgelenke den Vakuumsaugern ermöglichen, trotz Linearbewegung der Zylinder der Wölbung des Schalenteils zu folgen ohne aktiv den Angriffswinkel der Linearzylinder durch komplexe Kinematik nach zu regeln und somit den Prozess zu vereinfachen.

Dieser Ansatz stellte sich mit den Saugern als unvorteilhaft heraus, da die Distanz zwischen Kugelgelenk und Schalenteil mit den dazwischen montierten Kraftsensoren zu einer Wellenbildung im Schalenteil führte.

Als Substitut der defizitären Vakuumsauger samt Kugelgelenk wurden spezielle Anforderungen, bedingt durch den Prozess, definiert und umgesetzt. Diese Sauger sind Standardfaltenbalgsauger, in die ein Edelstahlstift eingebracht wird. Dieser Stift hat zwei Funktionen:

- Anschlag des Schalenteils => definierte Aufnahme des Schalenteils
- Begrenzung von Falten beim Ansaugen => Verkippung des innenliegenden Stifts

Diese Funktionserweiterung hat sich im weiteren Verlauf der Validierungsphase als vorteilhaft erwiesen, da der Sauger auf dem Schalenteil um die Spitze des innenliegenden Stifts kippen kann.

Die abgesetzten Kugelgelenke konnten dadurch substituiert werden, da der Sauger jetzt gleichzeitig ein auf die Schalenoberfläche gelegtes virtuelles Kugelgelenk darstellt. Aus diesem Grund wurden die abgesetzten Kugelgelenke mit 3D-gedruckten Schellen versteift. Dies hat zum Vorteil, dass die Wellenbildung erheblich verringert werden konnte.

Im Projektverlauf wurden verschiedene technologische Aspekte gemeinschaftlich ausgearbeitet und vertieft. Aufgrund der modularen Architektur des Versuchsträgers konnte die Integrationsfähigkeit vereinfacht werden. Dies wurde anhand von ausgewählten Versuchsreihen auf Basis von Elementarfunktionen des Demonstrators gemeinsam mit der Helmut-Schmidt-Universität validiert und in weiteren Teilschritten optimiert.

Zum Projektabschluss können somit alle im Zusammenhang mit der Unterbeauftragung der Helmut-Schmidt-Universität stehenden Meilensteine als erreicht angesehen werden.

## 2.1.5 AP 3.2 Vibrationsbohren

### 2.1.5.1 Optimierung der Bohrwerkzeuge hinsichtlich ihrer Zerspanungseigenschaften

#### Simulationen zum Verständnis des Spanbildungsmechanismus

Im Gegensatz zur Bearbeitung von Aluminiumlegierungen gestaltet sich die Zerspanung von Titanlegierungen, aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit als äußerst komplex. Zum besseren Verständnis des Spanbildungsmechanismus beim Vibrationsbohren wurde eine Finite-Elemente-Analyse des Zerspan-Prozesses bei beiden Materialien durchgeführt. Die Ergebnisse wurden anhand von experimentellen Untersuchungen verifiziert. Anschließend wurde der Einfluss unterschiedlicher Werkzeuge auf den Zerspan-Prozess der Titanlegierung simuliert. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Spitzenwinkel den größten Einfluss auf die Form und Größe der Späne hat. Die höchsten Umformungen, Temperaturen und Spannungen sind im Bereich der Ausspitzung des Bohrers vorzufinden, da es hier zu keinem Schnitt sondern vielmehr zu einer Quetschung des Materials kommt. Für alle Simulationen wurden einheitliche Schnittparameter verwendet.

Zu den Ergebnissen wurde im ersten Schritt ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen und den Simulationsergebnissen durchgeführt. Anschließend wurde anhand geeigneter Vergleichskriterien der Einfluss der Werkzeuggeometrie auf die Prozessgrößen untersucht.

#### Evaluation

Um die Aussagekraft des entwickelten Simulationsmodells zu testen, wurden die Ergebnisse der praktischen Versuche denen der Simulationen gegenübergestellt, wobei zunächst der verwendete Versuchsaufbau erläutert wird. Da sich nicht alle Parameter aus den Simulationen mit der Realität vergleichen lassen, werden im Anschluss lediglich die Unterschiede zwischen den entstandenen Spanformen, dem Spangewicht, der Kinematik und den Temperaturen vorgestellt.

#### Versuchsaufbau

Für die experimentellen Versuche wurden mehrere Bohrungen (Wiederholversuche) in die Werkstoffe AlZnMgCu1,5 und Ti6Al4V eingebracht (Abb.34A)

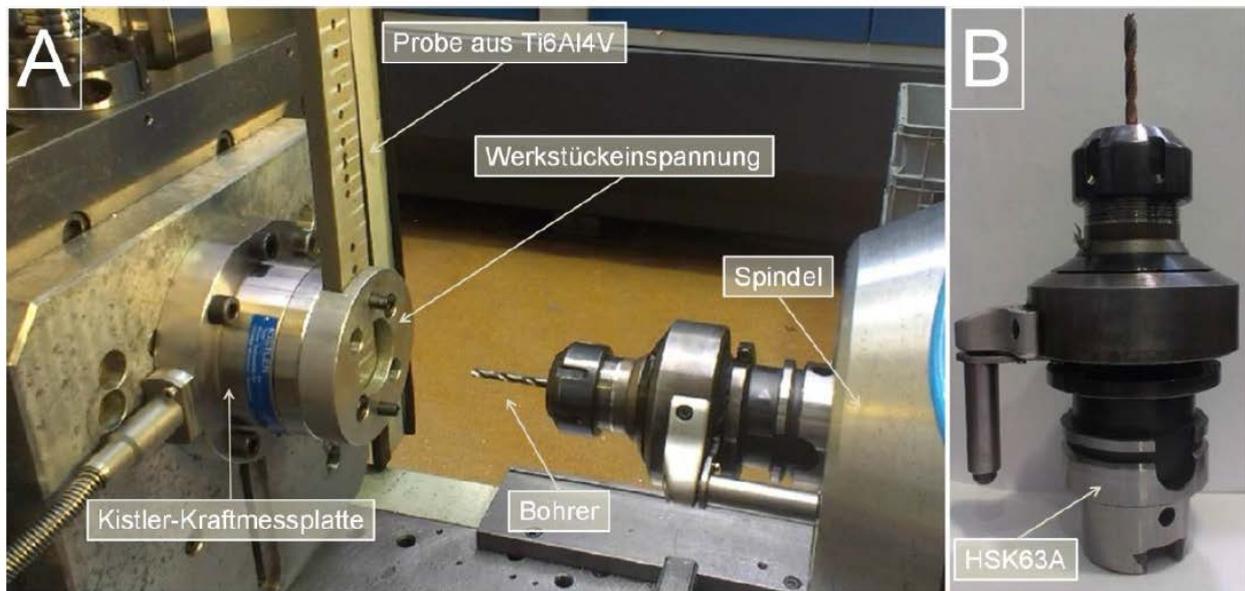


Abb.34: Versuchsaufbau (A) und Werkzeugaufnahme (B)

Über die Kraftmessplatte der Firma Kistler und die Software MesUSoft wurden die bei der Bearbeitung wirkenden Vorschubkräfte und Drehmomente aufgezeichnet. Die Überlagerung der Werkzeugbewegung durch die sinusförmige Schwingung wurde mit der abgebildeten Mitis-Werkzeugaufnahme (Abb.34B) erzeugt. Diese ist für Amplituden von 0,095 – 0,2 mm bei einer konstanten Frequenz von 1,5 Schwingungen pro Werkzeugumdrehung ausgelegt.

### Spanbildung

Da bei allen Simulationen in Bezug auf den Spanbildungsvorgang keine grundlegenden Unterschiede zu beobachten sind, erfolgte dessen Darstellung beispielhaft anhand der Bildung eines Titanspans. Hierzu wurde die Simulation in vier Abschnitte eingeteilt. In Abb.35 Teil 1 ist der Anschnitt des Materials kurz nach Beginn der Simulation zu sehen. Es fällt auf, dass das Werkzeug schon zu diesem Zeitpunkt mit allen Schneiden Kontakt zur Werkstückoberfläche hat. Außerdem ist die Spanbildung an der Bohrungswandung sowie am Übergangspunkt zwischen Haupt- und Querschneide weiter fortgeschritten als in der Mitte der Hauptschneide.

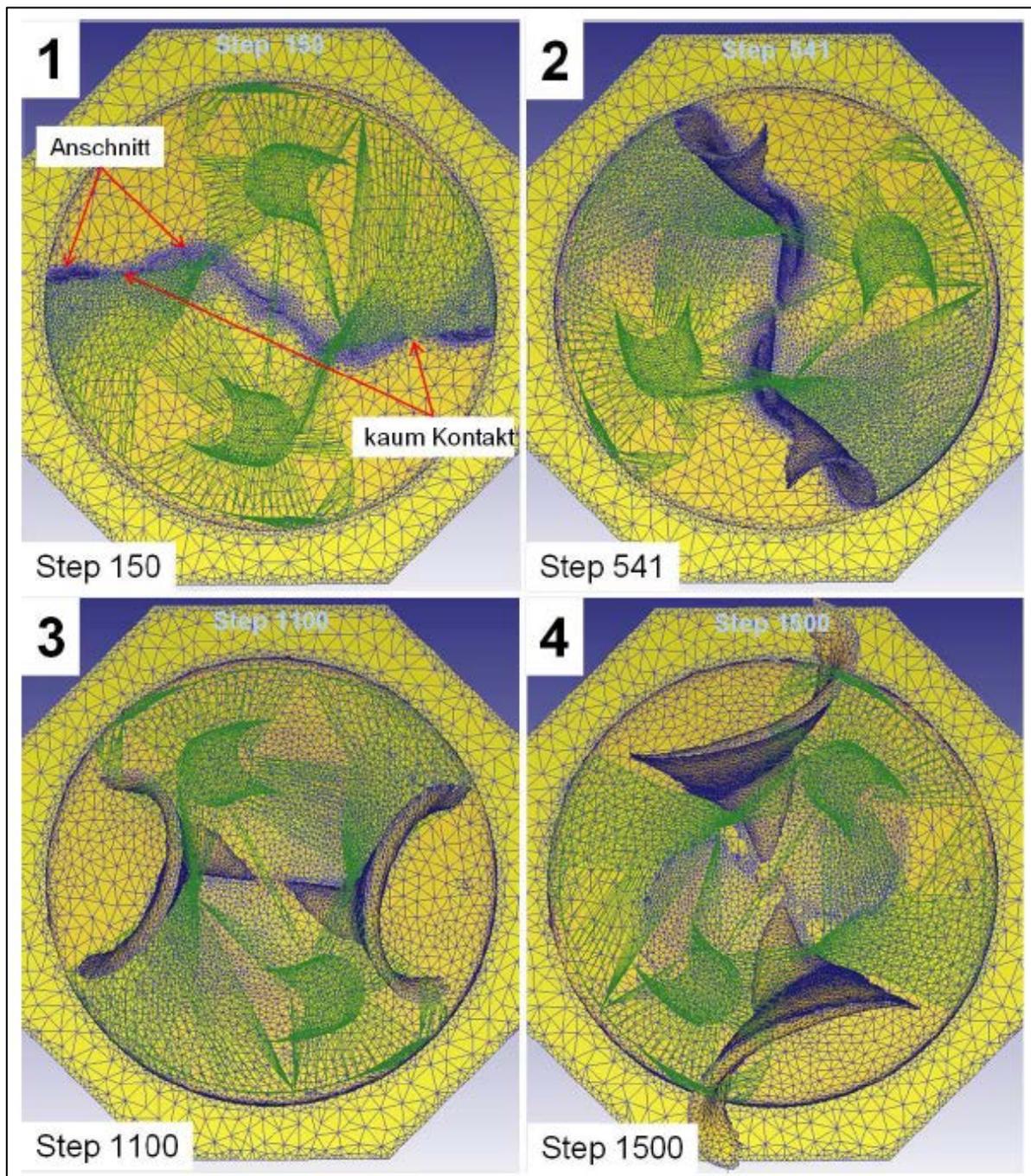


Abb.35: Spanbildung bei der Legierung Ti6Al4V

Am Punkt der maximalen Spannungsdicke (Abb.35Teil 2) ist die Spanbildung schon relativ weit fortgeschritten. Es hat eine Einrollung des Materials stattgefunden und die Her-ausbildung des für die Späne beim Vibrationsbohren charakteristischen Knicks im unteren Drittel des Spans ist zu beobachten. In Abb.35 Teil 3) besitzt der Span nur noch an der Ausspitzung Kontakt zum Werkstück und die Krümmung des Materials ist voll ausgebildet. Kurz vor dem Ende der Simulation (Abb.35 Teil 4) kommt es zu einer Überschreitung des Bohrungsdurchmessers durch

den Span, da dieser nicht auf der Spanfläche abläuft sondern vielmehr von der Werkzeugschneide vor sich hergeschoben wird.

### Spanformen

Für die Analyse der Spanformen wurde eine Gegenüberstellung von Praxis und Simulation durchgeführt. Um die Bemaßung der Späne statistisch abzusichern, wurden jeweils drei Späne pro Werkstoff unter dem Mikroskop vermessen. Hierbei stellte sich heraus, dass es innerhalb der Wiederholversuche nur unwesentliche Unterschiede zwischen den Spanformen gab. Aus diesem Grund wurde deren Beschreibung beispielhaft anhand eines Spans durchgeführt.

Alle vier Späne weisen näherungsweise eine V-Form auf und besitzen aufgrund des identischen Werkzeugdurchmessers dieselbe Höhe. Zudem ist eine Knickung des Materials in der unteren Hälfte der Späne zu beobachten. Oberhalb des Knicks kommt es zu einer Krümmung, die am oberen Rand des Spans am größten wird. In dieser Ansicht wirkt der Span aus Titan im Vergleich zu dem Aluminiumspan etwas länger und insgesamt größer. Bei den Spänen aus den Simulationen konnte ebenfalls ein leichter Größenunterschied festgestellt werden.

Um die Unterschiede der Späne besser verdeutlichen zu können, erfolgte eine Betrachtung von oben. Hierfür wurden die Späne aus den Experimenten so platziert, dass sie senkrecht unter dem Mikroskop stehen. Als Unterscheidungsmerkmal wird die Spannweite des Spans festgelegt, wobei für die Bemaßung die Einrollung des Titanspans außer Acht gelassen wurde.

In der Realität ergab sich eine Spannweite von 2,19 mm ( $\bar{x} = 2,14$  mm) für den Span aus Al<sub>2</sub>NiMgCu<sub>1,5</sub> sowie von 2,48 mm ( $\bar{x} = 2,31$  mm) für den Titanspan. Letzterer war zudem gekrümmter als der Aluminiumspan und besaß eine deutlich geringere Wandstärke. An der Stelle, an der das Werkzeug zum ersten Mal in das Material eingriff ist bei dem Span aus Titan eine Einrollung des Materials zu sehen. Diese war bei jedem der untersuchten Späne in einer unterschiedlich starken Ausprägung vorhanden. Bei sämtlichen Aluminiumspänen konnte dieses Materialverhalten nicht beobachtet werden.

Die Späne aus den Simulationen weisen längere Spannweiten von 2,71 mm (Titan) und 2,52 mm (Aluminium) auf. Während der Titanspan ebenfalls gekrümmter erscheint als der Span aus Aluminium, besitzen beide Späne im Vergleich zur Realität eine größere Wandstärke. Zudem kam es bei den Simulationen zu keiner Einrollung des Materials.

### Werkzeug

Da die Werkzeuge während der Modellbildung als Rigid (unveränderlich) definiert wurden, konnten deren Spannungen nicht direkt im Postprozessor angezeigt werden. Aus diesem Grund wurde nach Abschluss der Simulationen eine isothermale Spannungsanalyse über eine vorgefertigte Maske aus Deform durchgeführt. Hierbei musste zunächst derjenige Step aus der Database extrahiert werden, bei welchem das Drehmoment seinen maximalen Wert annimmt. Anschließend wurde das Werkzeug als elastischer Körper definiert und eine Interpolation der im Werkstück wirkenden Kräfte auf das Werkzeug durchgeführt. Die Fehlertoleranz wurde hierbei auf einen Wert von 0,1 festgelegt. Um zu

verhindern, dass sich das Werkzeug bei der Anwendung der interpolierten Kräfte bewegt wurde dessen Oberseite in alle drei Koordinatenrichtungen fixiert. Die Einstellungen für Geometrie, Vernetzung und Material wurden aus der Database übernommen. Abschließend wurden die Kräfte für den Zeitraum von einer Sekunde auf die Werkzeuge angewendet. Um eine bessere Darstellung der Spannungen zu gewährleisten, wurde für jede Abbildung eine einheitliche Skala mit einer festen Schattierung gewählt.

Abb.36 zeigt eine Gegenüberstellung der effektiven Spannungen in den Werkzeugen. Bei allen Simulationen lagen die höchsten Spannungen entlang der Schneiden des Werkzeugs. Außerdem war eine Abnahme der Spannungen in den Freiflächen des Bohrers mit zunehmendem Abstand zu den Schneiden zu beobachten.

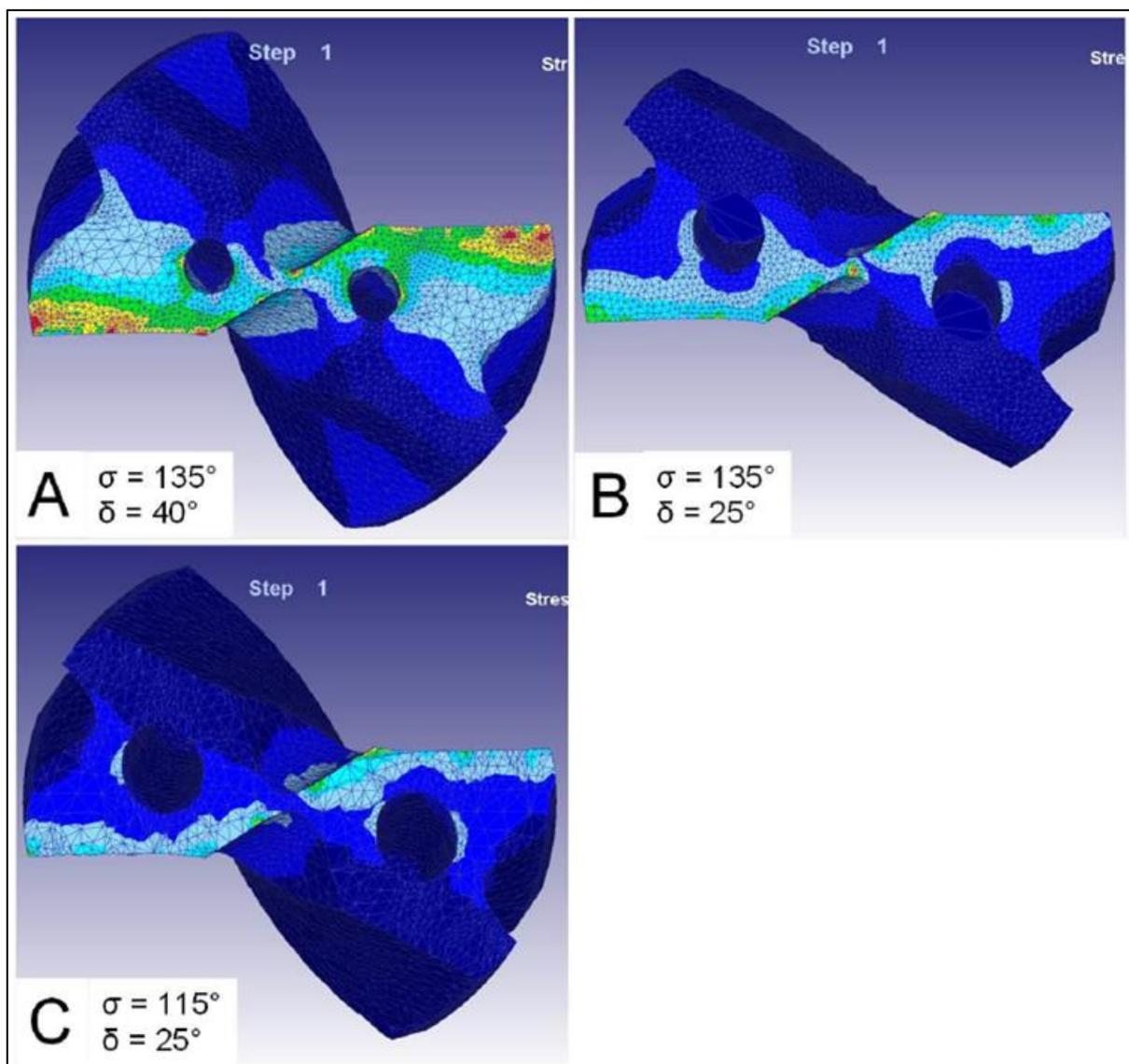


Abb.36: Effektive Spannungen in den Werkzeugen

Betrachtet man die Werkzeuge als Gesamtheit weist Simulation C die geringsten und Simulation A die höchsten Spannungen auf. Die maximalen Spannungen konzentrieren sich bei allen Simulationen auf die Schneidenecken sowie den Bereich der Ausspitzung und betragen 7430 MPa (Sim A), 6680 MPa (Sim B) sowie 5680 MPa (Sim C). Weiterhin fällt auf, dass die Spannungen an der Querschneide sowie in der Mitte der Hauptschneide vergleichsweise geringe Werte annehmen.

Für eine Unterscheidung der Spannungen in Zug- und Druckspannungen ist Abb.37 geeignet. Dabei werden Zugspannungen mit einem positiven und Druckspannungen mit einem negativen Vorzeichen dargestellt. Während im Bereich der Hauptschneiden größtenteils Druckspannungen wirken, stehen die Spannungen sowie der untere Teil des Bohrers zum größten Teil unter Zugbeanspruchung.

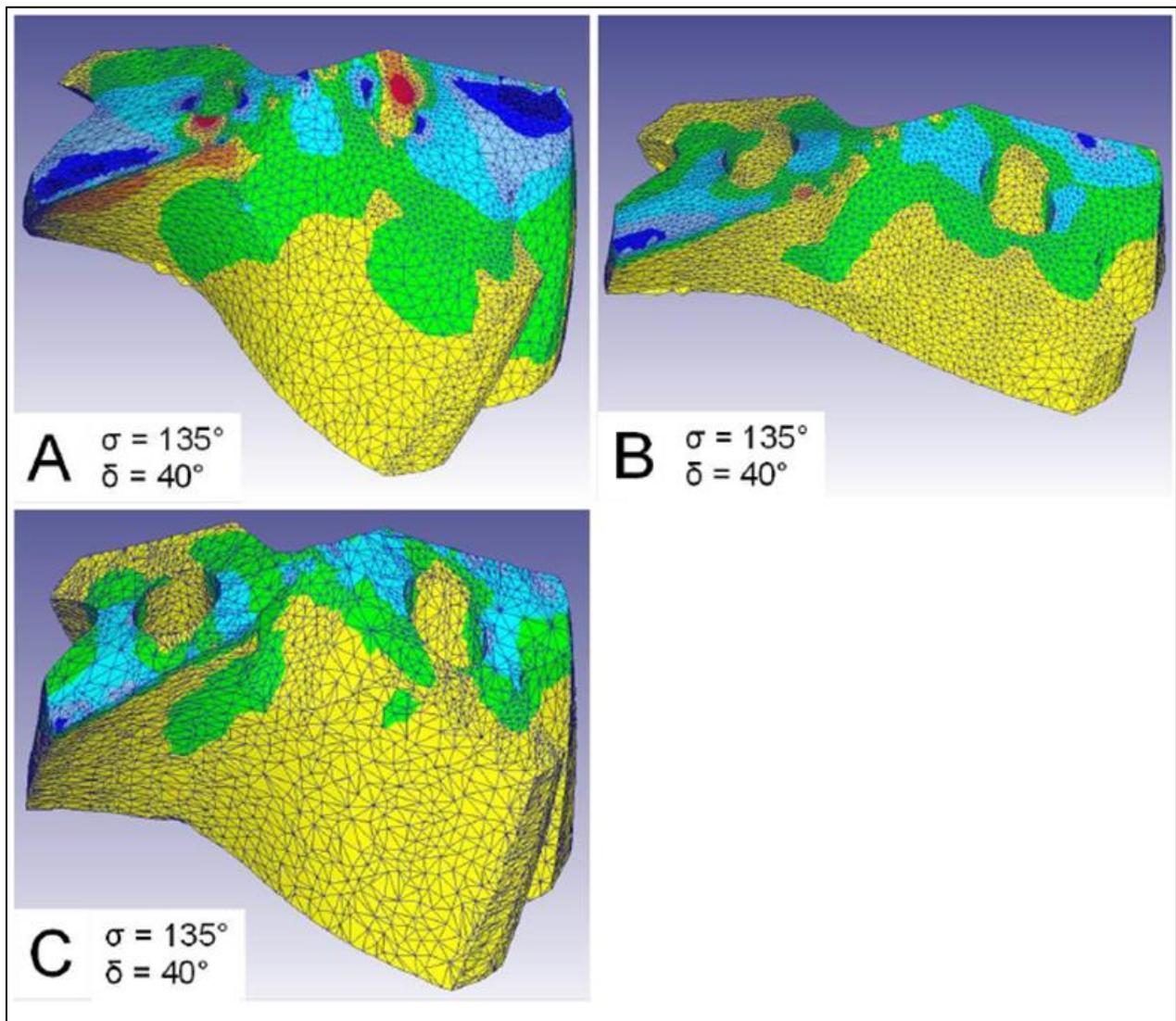


Abb.37: Zug- und Druckspannungen in den Werkzeugen

Bei allen Simulationen ist eine Konzentration der Druckspannungen an den Schneidenecken des Bohrers zu beobachten. Zusätzlich kommt es bei den ersten beiden Simulationen zu einer

Zugbeanspruchung an der Ecke zwischen Hauptschneide und Ausspitzung. Dieser Effekt kann bei Simulation C nicht beobachtet werden.

Es wurde unter anderem eine Finite-Elemente-Analyse zum besseren Verständnis des Zerspanungsprozesses beim Vibrationsbohren aufgebaut durchgeführt. Um das entwickelte Modell zu evaluieren, wurden experimentelle Versuche mit den Werkstoffen Ti6Al4V und AlZnMgCu1,5 durchgeführt. Im ersten Schritt wurden drei Simulationen mit unterschiedlichen Werkzeugen und identischen Schnittparametern durchgeführt und einander gegenübergestellt.

Im Laufe der Modellbildung konnte die Anzahl der zu simulierenden Werkzeugeingriffe reduziert werden, wodurch eine deutlich geringere Berechnungszeit der Simulationen erreicht wurde. Außerdem konnte die Darstellung der Kräfte, Momente, Temperaturen und Umformgrade durch eine Optimierung der Einstellungen im Simulationsmodell verbessert werden.

Bei der Analyse der Spanbildung wurde festgestellt, dass es zu keinem Abläufen des Spans auf der Spanfläche kommt. Stattdessen wird der Span vor der Werkzeugschneide hergeschoben. Dieser Effekt führt letztlich dazu, dass der Span den Durchmesser der Bohrung überschreitet. Im Falle der Bearbeitung eines CFK/Titan-Schichtverbunds könnte es hierdurch zu einer Schädigung der CFK-Bohrungswandung kommen. Die Betrachtung des Anschnitts in den Simulationen ergab, dass die Schneidenecken sowie der Bereich der Ausspitzung des Bohrers früher in Kontakt mit dem Werkstück geraten als die Mitte der Hauptschneide. Infolgedessen ergibt sich an diesen Stellen ein erhöhter Werkzeugverschleiß durch steigende Kräfte, Reibung und Temperaturen.

Im Rahmen der Evaluation konnten große Gemeinsamkeiten zwischen Experiment und Simulation hinsichtlich Spanform, Spanvolumen sowie Kräften und Momenten festgestellt werden. Dabei übt das Werkstückmaterial sowohl in den Simulationen als auch in der Realität einen entscheidenden Einfluss auf den Bohrprozess aus.

Die Betrachtung der Temperaturverteilungen ergab, dass bei der Bearbeitung des Titans deutlich höhere Temperaturen entstehen als bei der Zerspanung des Aluminiums. Die gute Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums sorgt dafür, dass die Wärmeenergie bedeutend schneller aus der Zerspanzone abgeführt werden kann. Außerdem konnte festgestellt werden, dass die gespeicherte Wärmemenge im Titanspan deutlich höher ist als die im Span aus Aluminium. Die Annahme, dass beim Bohren der weitaus größte Teil der Wärme über die Späne abgeführt wird, konnte nicht hinreichend bestätigt werden. Hierfür muss eine Methode zur Berechnung der im Werkstück verbleibenden Wärmemenge entwickelt werden.

Durch den Einsatz verschiedener Werkzeuge bei der Zerspanung der Titanlegierung ergaben sich, aufgrund der variierten Werkzeugwinkel, deutliche Unterschiede in den Simulationsergebnissen.

Bei der Analyse der Spanformen konnte ein Zusammenhang zwischen der Wandstärke und dem Volumen der Späne nachgewiesen werden. Dabei führt eine Erhöhung des Drallwinkels zu deutlich dickeren Spänen, wohingegen ein niedriger Spitzenwinkel die Krümmung des Spans begünstigt. Ein

großer Spitzenwinkel in Verbindung mit einem niedrigen Drallwinkel führt zu weniger gekrümmten Spänen mit einer großen Spannweite.

Die Untersuchung der entstehenden Prozesskräfte ergab eine Erhöhung von Vorschubkraft und Drehmoment durch den Einsatz eines Werkzeugs mit hohem Drallwinkel. Der Einfluss des Spitzenwinkels auf die Kinematik ist geringer. Außerdem konnte eine Abhängigkeit der Kräfte und Momente von der Eingriffstiefe des Werkzeugs nachgewiesen werden.

Die aufgezeichneten Temperaturen und Umformgrade unterscheiden sich nur in geringem Ausmaß. Hierbei kommt es am Übergangspunkt zwischen Hauptschneide und Ausspitzung des Bohrers aufgrund der Quetschung des Materials zu den größten plastischen Verformungen und Temperaturen. Zudem ist eine Zunahme beider Zustandsgrößen vom Rand der Bohrung nach innen zu beobachten.

Die Analyse der Werkzeugbeanspruchungen ergab bei allen Simulationen eine Konzentration der Spannungen entlang der Schneiden des Bohrers. Dabei treten die größten Spannungen an den Schneidenecken und dem Übergangspunkt zwischen Hauptschneide und Ausspitzung auf. Am Punkt des höchsten Drehmoments stehen die Spannungen hauptsächlich unter Zugspannung, während die Schneidkante und Freiflächen stark auf Druck belastet werden.

## Bewertung der Spanabfuhr für unterschiedliche Bohrwerkzeuge

Wichtig für einen aussagekräftigen Vergleich der Prozesskinematik war ein funktionierender Vibrationsbohrprozess, bei dem sichergestellt werden konnte, dass es zu dem gewünschten Spanbruch kommt und auch die Spanabfuhr reibungslos funktioniert. Um dies zu gewährleisten wurden unterschiedliche Werkzeuge getestet und auf die Spanbildung und Spanabfuhr hin untersucht. Im Folgenden werden beispielhaft jeweils ein Werkzeug vorgestellt, bei dem dieser Prozess besonders gut, beziehungsweise besonders schlecht funktioniert hat.

Wie im Abb.38 zu sehen, entstehen bei Verwendung dieses Werkzeugs und den Parametern aus den Hauptversuchen sehr kleine Späne, welche durch den Abhebeweg beim Vibrationsbohren brechen und sauber abgeführt werden können, ohne sich gegenseitig zu behindern. Es ist in der Abbildung unten ein Ausschnitt aus der Aufzeichnung der Highspeed-Kamera und dem beschriebenen Versuchsaufbau zu sehen.

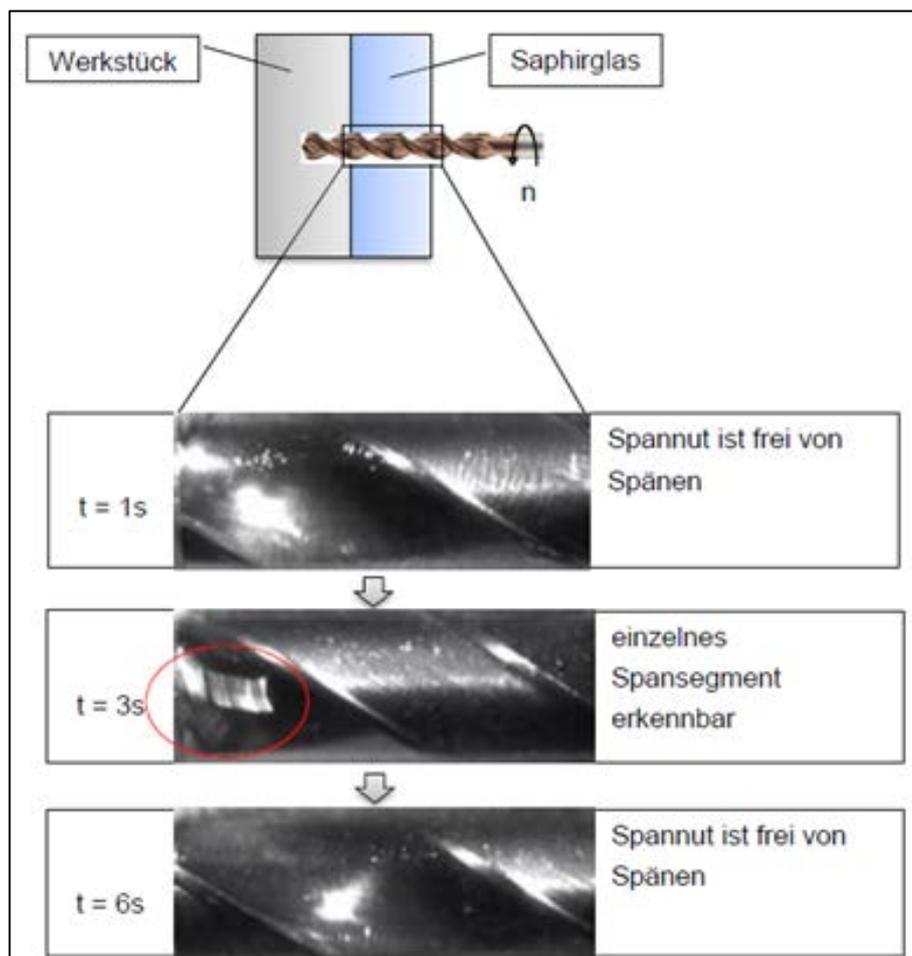


Abb.38: Highspeedaufnahme zur Spanabfuhr (Positivbeispiel)

Abb.39 zeigt dagegen ein Werkzeug, bei dem eine starke Verstopfung der Spannuten auftritt. Es kommt hier zu keinem sauberen Spanbruch, was dazu führt, dass sich die einzelnen Späne noch direkt an der Zerspan-Zone „untereinander schieben“ und somit in der Span-Nut verbleiben. So entstehen in der Zerspan-Zone immer neue Spansegmente, welche die anderen in Richtung Bohrungseintritt schieben. Das Problem bei diesem Werkzeug ist das kleine Nut-Rücken-Verhältnis woraus vergleichsweise wenig Raum in der Span-Nut resultiert. Durch die ohnehin schon hohen Temperaturen und die zwangsläufige zusätzliche Reibung der Späne an der Bohrungsrandzone wird die Bohrungsrandzone signifikant geschädigt. In den Ausschnitten des Videos die im Abb.39 zu sehen sind, lässt sich erkennen wie sich die Span-Nut zusetzt. Zusätzlich zu der erhöhten Temperatur in der Zerspanungszone kommt es dabei zu einer weiteren, nachträglichen Temperaturerhöhung. Dies wird im Detail genauer untersucht.

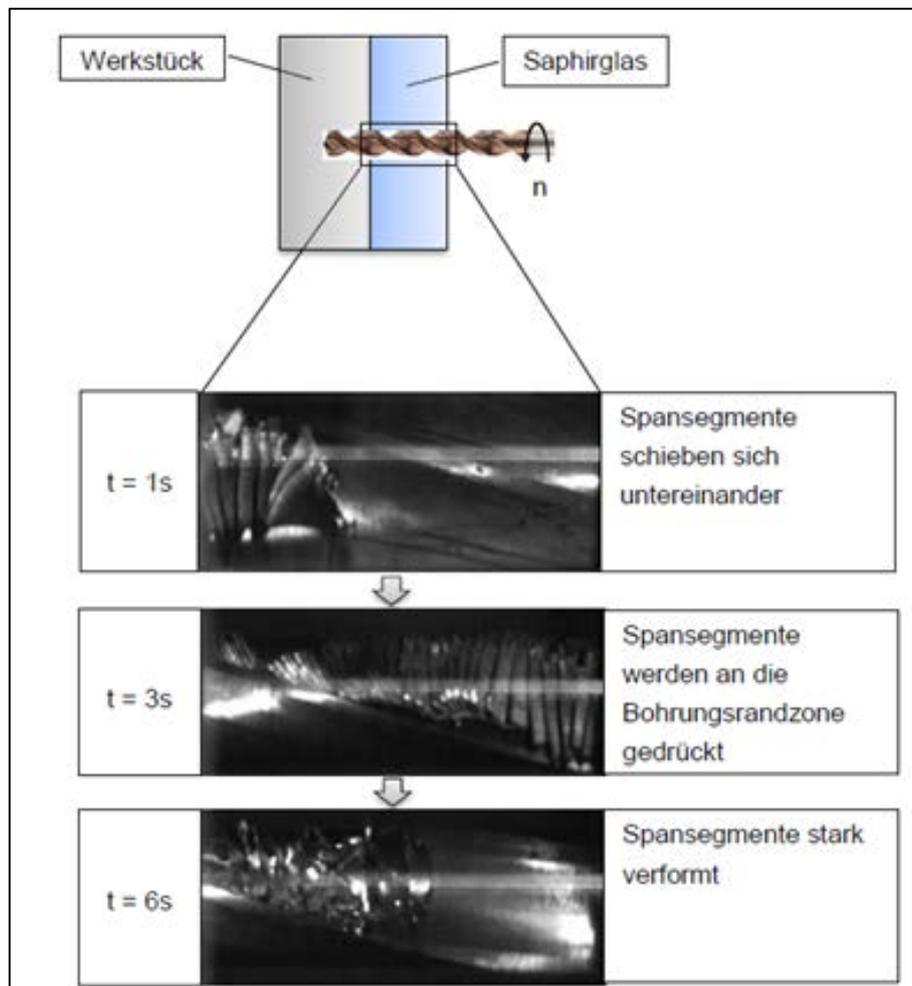


Abb.39: Highspeed-Aufnahmen zur Spanabfuhr (Negativbeispiel)

Ein entscheidender Faktor für einen schädigungsarmen Bohrprozess ist eine funktionierende Spanabfuhr. Dabei geht es insbesondere darum, kleine Späne zu produzieren, welche direkt nach ihrer Entstehung effektiv über die Spannuten abgeführt werden können und es somit nicht zu Verstopfungen der Spannuten kommt. Vorhergehende Untersuchungen und nicht zuletzt die Untersuchungen zur Analyse der Spanabfuhr aus dem aktuellen Projekt haben gezeigt, dass sich der Vibrationsbohrprozess sehr gut dazu eignet, einen frühen Spanbruch herbeizuführen und somit für kleine Segmentspäne zu sorgen.

Dabei ist zu beachten, dass sowohl das verwendete Werkzeug als auch die Prozessparameter, insbesondere die Amplitude, richtig gewählt werden. Wird beispielsweise das falsche Werkzeug ausgewählt, kommt es wie in zu sehen, trotz passend gewählten Parametern zu einem Spänestau.

Die durchgeführten Versuche zur Analyse der Spanabfuhr haben geholfen, den Mechanismus hinter diesen Spannutenverstopfungen besser verstehen zu können. Es kann über die aufgezeichneten Highspeed-Videos genau überprüft werden, zu welchem Zeitpunkt und in welchem Ausmaß die Späne nach ihrer Entstehung in der Span-Nut verbleiben und für zusätzliche Reibung sorgen.

Zusätzlich haben diese Untersuchungen gezeigt, wie wichtig der Druck der Minimalmengenschmierung durch die Innenliegenden Kühlkanäle in den Werkzeugen für eine effektive Spanabfuhr ist. Durch diesen Volumenstrom kann unabhängig von der Kühl- und Schmierwirkung sichergestellt werden, dass die produzierten Späne direkt erfasst und abtransportiert werden können.

## Untersuchungen zur Spanabfuhr

Untersuchungen zur Spanabfuhr ergaben folgende Ergebnisse:

- Ein geringes Nut-Rücken-Verhältnis des Werkzeugs hat sich durch den vergrößerten Raum innerhalb der Spannuten als vorteilhaft für die Spanabfuhr herausgestellt.
- Ein Volumenstrom durch innenliegende Kühlkanäle im Werkzeug ist, unabhängig vom Drall-Winkel des Werkzeugs, unabdingbar für eine effektive Spanabfuhr.
- Weitere Untersuchungen unter Variation verschiedener MMS-Drücke, Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Volumenströme und Kühlschmiermedien sind angedacht.

Zur Verifizierung der auf einer CNC-Maschinen gefahrenen Versuche laufen aktuell Untersuchungen mit einem piezo-elektrischen Werkzeughalter, der auf einer Roboteranlage installiert wurde.

Die Aufnahmen der Spannuten im Abb.39 zeigen, dass es auch bei einer nachweislichen Schnittunterbrechung mit vollständig separierten Spänen und interner Schmiermittelzufuhr zu einem Stau in den Spannuten kommen kann. Des Weiteren wurden Abplatzungen der Werkzeugschneiden beobachtet, die auf relativ hohe und dynamische Axialkräfte, verglichen mit dem konventionellen Bohren, zurückzuführen sind. Eine Verbesserung der Zerspanbarkeit ist somit nur in einem gewissen Prozessfenster gegeben über dessen Grenzen bisher keine hinreichenden Kenntnisse bestehen.

Durch die überlagerte Sinusschwingung ergibt sich beim Vibrationsbohren eine Vielzahl an möglichen Schnittparameterkombinationen und daraus resultierenden Eingriffsbedingungen, die neben weiteren Randbedingungen, wie der Kühlung/Schmierung, der Werkzeuggeometrie und der Steifigkeit der Aufspannung einen entscheidenden Einfluss auf die Spanabfuhr und das Arbeitsergebnis haben. Um in Zukunft eine gezielte Auswahl geeigneter Schnittparameter treffen zu können, wurden zunächst Kenngrößen eingeführt die sowohl die geometrischen Verhältnisse des berechneten Spanungsprofils charakterisieren (max. Zahnvorschub  $f_z$ , max. Spanungsbogenmaß  $\alpha_c$  und Spanungsquerschnitt  $A_s$ ) als auch weitere Prozessbeschreibende Größen wie die axiale Vorschubgeschwindigkeit im Moment des Werkzeugeintritts  $v_f$ , Eintritt und das Verhältnis zwischen Schnitt und Totzeit  $R_s$ .

Mit Hilfe eines auf Matlab basierenden kinematischen Modells zur Berechnung der Spanungsquerschnitte wurden die oben beschriebenen Kenngrößen in Abhängigkeit unterschiedlicher Schnittparameter ermittelt. Anhand von Diagrammen lassen sich Schnittparameter auswählen die beispielsweise zu möglichst geringen Spanungsbogenmaßen bei gleichzeitig niedrigem max. Zahnvorschub führen.

In weiterführenden experimentellen Untersuchungen ist zu klären, welche Werte der beschriebenen Kenngrößen einen störungsfreien Prozess (gute Spanabfuhr, keine Werkzeugschädigung durch zu hohe mechanische Last, Bohrungsqualität im Rahmen der vorgeschriebenen Toleranzen etc.) ermöglichen.

Zur Validierung der CNC-Ergebnisse werden die aussagekräftigsten Versuche mit der piezoelektrischen Vibrationseinheit validiert.

Ein übergeordnetes Ziel des Arbeitspaketes besteht darin, beim Bohren in geschlossenen Strukturen wie beispielweise Landeklappen, eine Kontamination des Innenraums mit Spanresten zu vermeiden. Hierzu müssen alle beim Bohrerdurchbruch auftretenden Späne am Bohrungsaustritt prozesssicher abgesaugt werden. Gerade in Faser-Metall-Werkstoffverbunden wie CFK/Al kommt es aufgrund der im Aluminium auftretenden Lang- bzw. Wirrspäne zu einer Verstopfung der Spannuten, wodurch die Absaugung am Bohrungsaustritt nicht mehr gewährleistet werden kann. Um die Langspanbildung zu vermeiden wurde ein Vibrationsbohrprozess angewendet. Hierbei wird der Vorschubbewegung des Bohrers eine axiale Sinusschwingung überlagert wodurch es zu einem kinematisch erzwungenen Spanbruch kommt. Die vorangegangene Untersuchungen haben ergeben, dass die Form und Größe der entstehenden Spanstücke eine entscheidende Auswirkung auf die Qualität der Spanabfuhr besitzen. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden in 2015 gezielt Schnittparameter und Werkzeuge ausgewählt, die sich als besonders gut geeignet darstellten.

In Nordenham wurden Bohrversuche in CFK/Al und CFK/Ti-Werkstoffverbunden durchgeführt. Abb.40 zeigt den Versuchsstand der Roboterzelle.

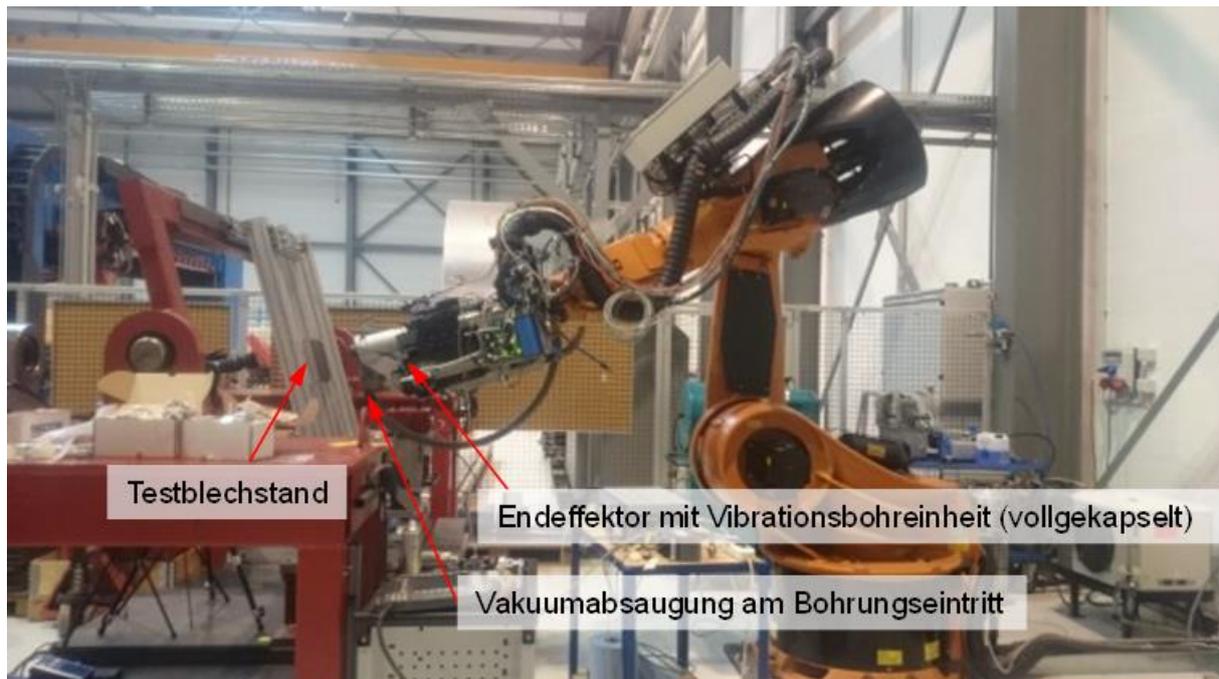


Abb.40: Roboterzelle mit Versuchsstand zum Vibrationsbohren

Die im Folgenden dargestellten Späne wurden während der Integration auf dem Roboter erzeugt.

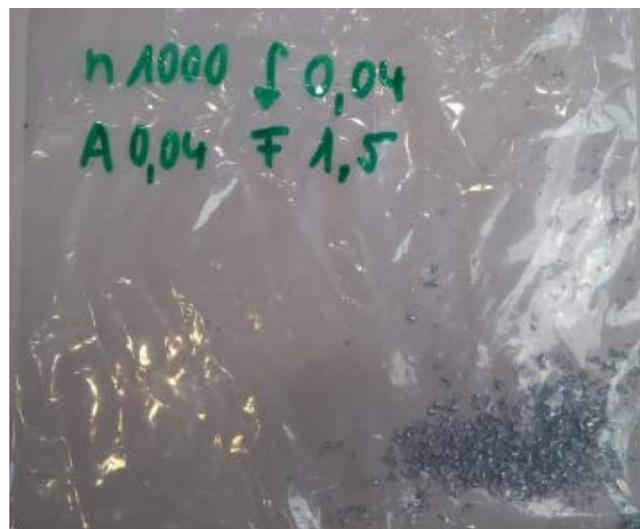


Abb.41: Späne nach dem Bohren mit dem piezo-elektrischen Werkzeughalter

Die axialen Schwingungen wurden durch ein piezoelektrisches Bohrfutter der Fima AGI erzeugt. Der Vorteil gegenüber bisherigen mechanischen Systemen besteht darin, dass die Schwingfrequenz vollkommen Drehzahlunabhängig eingebracht wird und die Schwingung nur im Bedarfsfall zu- bzw. abgeschaltet werden kann. Die Schwingungsparameter werden in einer speziell dafür entworfenen Software und über eine Steuereinheit an den Signalverstärker weitergeleitet Abb.42. Der Verstärker

ist direkt mit dem piezoelektrischen Bohrfutter verbunden und versorgt diesen mit der nötigen Spannung zur Schwingungserzeugung.

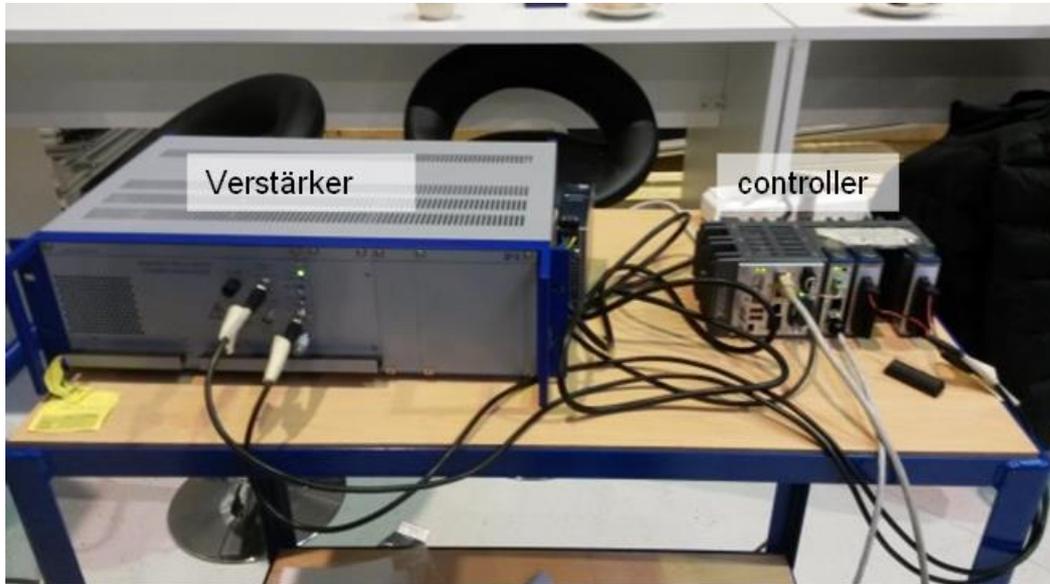


Abb.42: Signalverstärker und Steuereinheit

Abb.43 zeigt Hochgeschwindigkeitsaufnahmen eines konventionellen Bohrprozesses (one-shot), ohne Vibrationsunterstützung in CFK/Al2024 (mit Cladschicht), im Moment des Bohreraustritts. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich ein massiver Grat ausbildet und Spanstücke infolge der verstopften Spannuten nicht vollständig abgesaugt werden können.

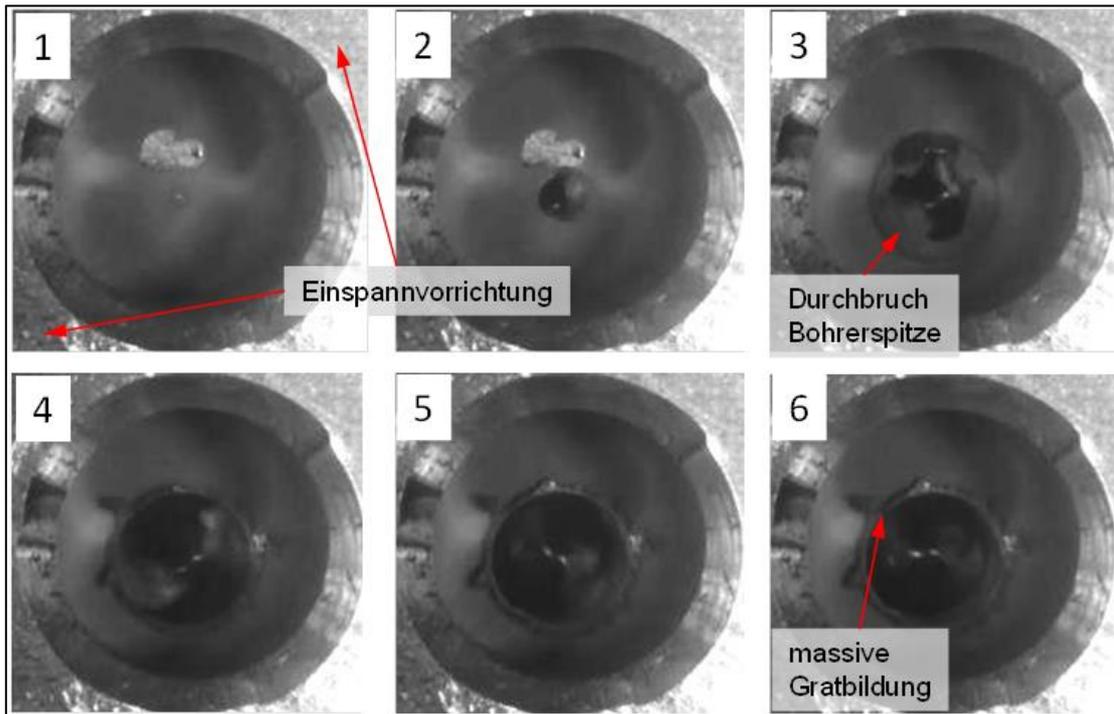


Abb.43: Bohreraustritt beim konventionellen Bohren in Al2024 (Cladschicht)

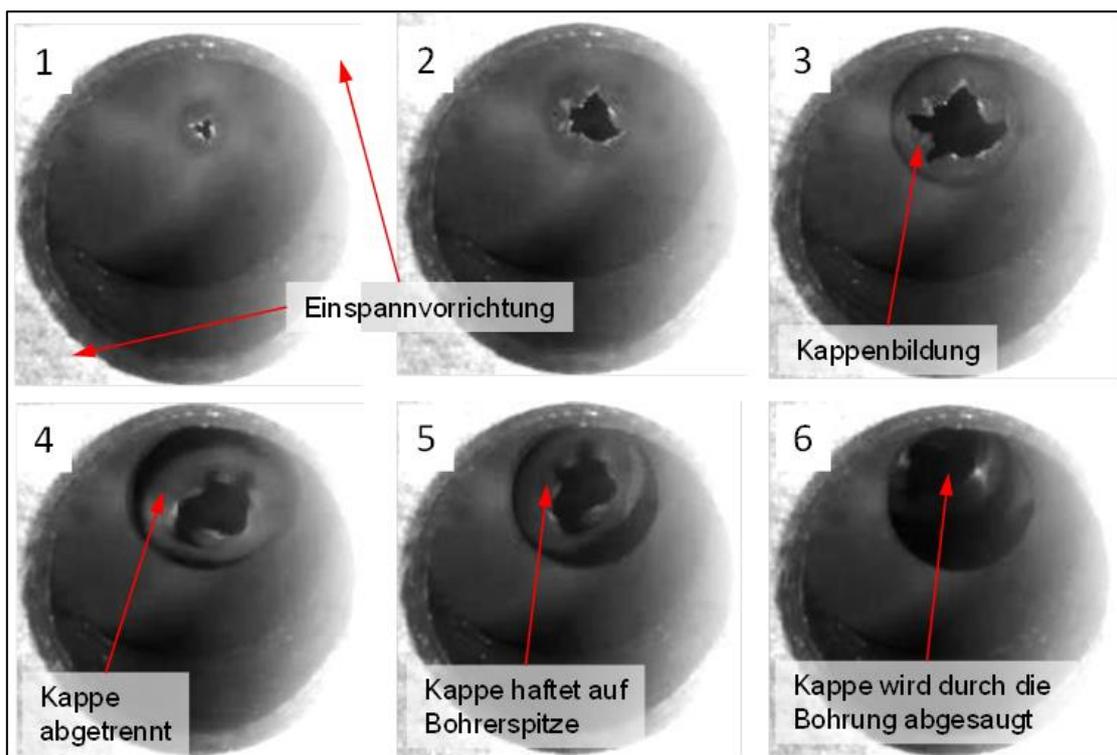


Abb.44: Bohrer Austritt beim vibrationsunterstützten Bohren in Al2024 (Cladschicht)

Abb.44 zeigt den Bohrer Austritt unter gleichen Randbedingungen jedoch mit Vibrationsunterstützung. Es entsteht eine definiert abgetrennte Kappe, die durch den Luftstrom der Vakuumsaugung (bohrungseintrittsseitig) auf die Spitze des Bohrwerkzeugs gesaugt wird. Diese wird beim Rückzug des Werkzeugs durch die Bohrung abgeführt. Alle Spanstücke konnten wiederholbar durch die Bohrung abgesaugt werden.

Beim vibrationsunterstützten Bohren befinden sich während des Prozesses kaum Späne in den Spannuten, wodurch das am Bohrungseintritt anliegende Vakuum zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten am Bohrungsausstritt führt. Diese Luftströmung ist notwendig um am Austritt entstehende Späne und Kappenstücke abzusaugen. Sind die Spannuten hingegen durch lange Späne verstopft, kann sich am Bohrungsausstritt kein oder nur ein sehr geringer Luftstrom ausbilden.

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden an einer CNC-Maschine mit magnetgelagerter Spindel bei der Firma LTI-Motion sowie mittels piezoelektrischen Bohrfutters an einem Roboter bei der Firma Brötje ausgeführt. Als Materialkombinationen wurden CFK/Al2024 und CFK/Ti6Al4V eingesetzt. Insgesamt wurden 22 unterschiedliche Werkzeugvarianten getestet und die Bohrungsqualitäten ausgewertet.

Es stellte sich heraus, dass durch die Vibrationsunterstützung erheblich verbesserte Ergebnisse betreffend der Rauheit, Gratbildung und Absaugbarkeit der Späne am Bohrungsausstritt zu erzielen sind.

### 2.1.5.2 Bohren mit keramischen Werkzeugen

In der Luft- und Raumfahrtbranche werden zur Bohrungserzeugung in CFK/Al-Werkstoffverbunden typischerweise Bohrwerkzeuge aus beschichtetem und/oder nichtbeschichtetem Vollhartmetall eingesetzt.

Das Ziel der hier vorgestellten Arbeiten besteht darin, die Eignung von Bohrwerkzeugen aus keramischen Schneidstoffen für die Zerspanung von CFK/Aluminium Verbundwerkstoffen zu prüfen. Zu diesem Zweck werden die Bohrungsqualität (Bohrungsdurchmesser, Grathöhe und Rauheit) und die auftretenden Vorschubkräfte analysiert und mit denen eines nichtbeschichteten Vollhartmetallbohrers gleicher Geometrie verglichen.

Abb.45 zeigt einen keramischen Bohrer aus Aluminiumoxid beim Bohren eines CFK/Aluminium Verbundwerkstoffes.

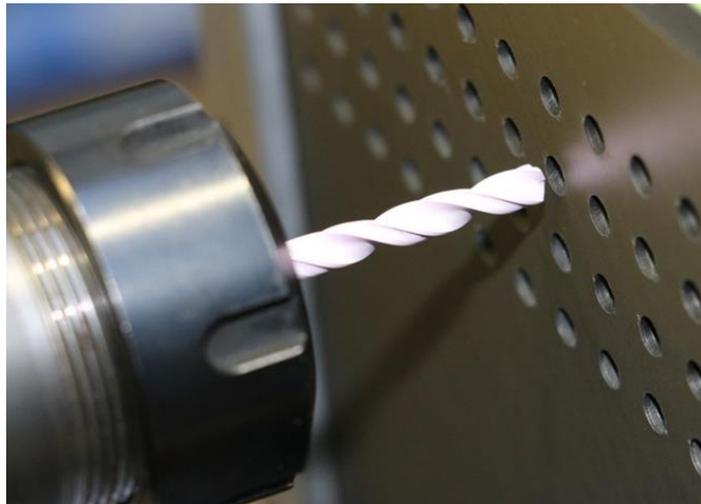


Abb.45: Keramikbohrer bei der Zerspaltung von CFK/Aluminium Verbundwerkstoffen

### Versuchsmatrix

Für die Untersuchungen kommen drei Bohrwerkzeuge aus unterschiedlich keramischen Schneidstoffen zum Einsatz. Ein unbeschichtetes Werkzeug aus  $Al_2O_3$ , und zwei diamantbeschichtete Werkzeuge aus SiN und SiAlON. Als Referenz wird ein unbeschichteter Vollhartmetallbohrer verwendet. Alle Werkzeuge weisen die gleiche Geometrie auf. Es wurden drei Schnittparameterkombinationen gewählt. Insgesamt wurde pro Werkzeug und Parametersatz eine Anzahl von 60 Bohrungen hergestellt, um den Verschleiß und dessen Auswirkungen auf das Arbeitsergebnis und die Prozesskräfte zu untersuchen.

### Axialkräfte

Abb.46 zeigt die auftretenden maximalen Axialkräfte  $F_{z,max}$  während des Zerspaltungsprozesses in der CFK- und der Aluminiumschicht. Grundsätzlich ist festzustellen, dass beim Bohren in Aluminium höhere Axialkräfte, im Vergleich zum CFK, auftreten.

Für die erste Parameterkombination ( $v_c = 95$  m/min,  $f = 0,13$  mm), kommt es bei den diamantbeschichteten Keramiken SiN und SiAlON jeweils bereits in der ersten Bohrung zu einem Werkzeugbruch. Beide Werkzeuge zeigen deutlich erhöhte Vorschubkräfte im Vergleich zu den unbeschichteten Werkzeugen aus  $Al_2O_3$  und Vollhartmetall. Dies könnte auf die, durch die Diamantbeschichtung hervorgerufene, Verrundung der Schneidkanten zurückzuführen sein. Es ist nicht klar zu beantworten, ob die Werkzeugbruch dieser Bohrer durch den Schneidstoff oder die resultierenden, höheren Axialkräfte verursacht wurden.

Die zweite Parameterkombination ( $v_c = 285$  m/min,  $f = 0,13$  mm) wurde lediglich mit unbeschichteten Werkzeugen aus  $Al_2O_3$  und Vollhartmetall durchgeführt, da aufgrund des vergleichbaren Vorschubs von  $f = 0,13$  mm ebenfalls ein Werkzeugbruch für die beschichteten keramischen Werkzeuge zu erwarten ist. Bei den Versuchsergebnissen fällt auf, dass die gemessene

Vorschubkraft des keramischen Bohrers aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  deutlich unterhalb der des Bohrers aus Vollhartmetall liegt.

Um die mechanische Beanspruchung der Werkzeuge zu reduzieren und damit den Einsatz der beschichteten Keramikbohrer zu gewährleisten wurde für den dritten Parametersatz ein deutlich geringerer Vorschub von  $f = 0,07 \text{ mm}$  bei einer moderaten Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 95 \text{ m/min}$  gewählt. Leider standen für diesen Parametersatz keine Neuwerkzeuge aus Hartmetall zur Verfügung, weshalb ein Vergleich hier nicht stattfinden kann.

Trotz des um 50% geringeren Vorschubs kam es bei den diamantbeschichteten Keramikbohrern erneut, bereits nach wenigen Bohrungen zu einem Werkzeugbruch. Im Vergleich zu dem unbeschichteten Keramikbohrer aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  werden, wie auch bei einem Vorschub von  $f = 0,13 \text{ mm}$ , deutlich höhere Vorschubkräfte gemessen. Der kleinere Vorschub führte demnach nicht zu dem gewünschten Effekt einer reduzierten mechanischen Belastung der beschichteten Bohrwerkzeuge. Im Vergleich dazu sinkt die Axialkraft für den unbeschichteten Keramikbohrer im Vergleich zu einem Vorschub von  $f = 0,13 \text{ mm}$  um ca. 100 N. Dies ist ein deutliches Indiz dafür, dass die größeren Schneidkantenradien der beschichteten Bohrer für die hohen Kräfte verantwortlich sind und schließlich auch zu einem Werkzeugbruch führen.

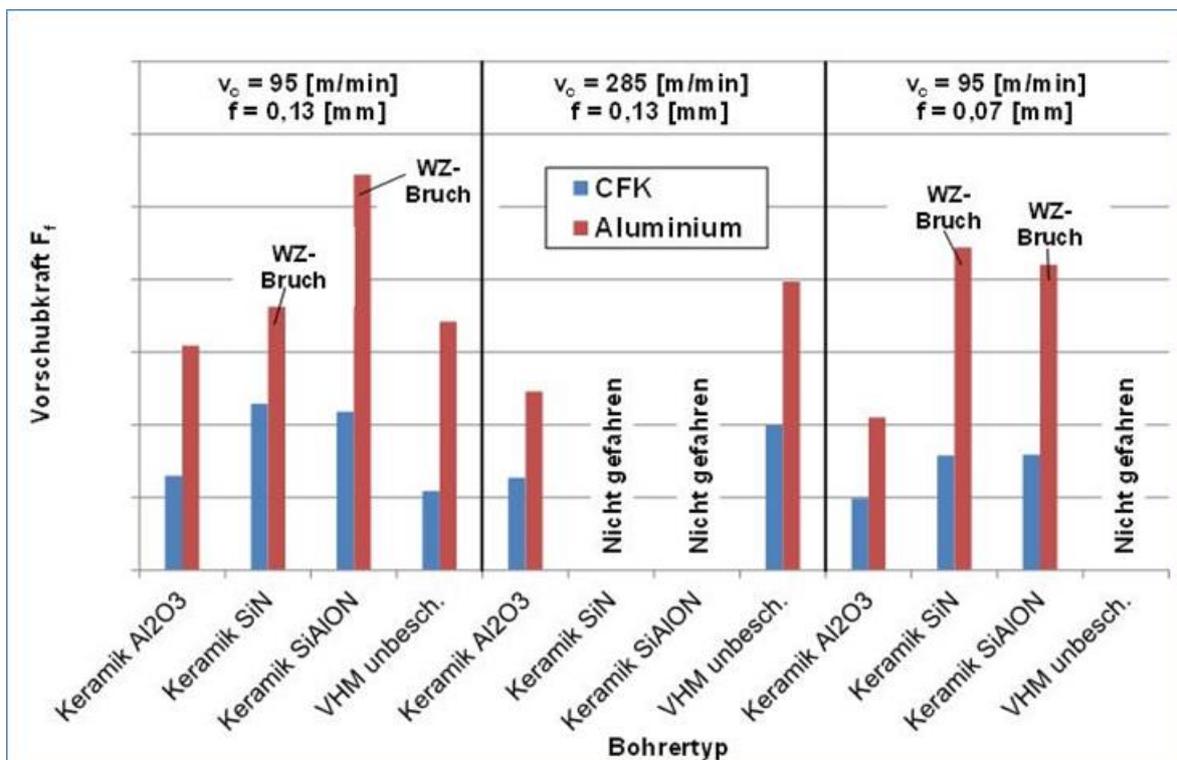


Abb.46: Max. Axialkräfte  $F_{zmax}$  bei unterschiedl. Prozessparam. und Werkstoffen

## Grathöhen

Abb.47 zeigt die durchschnittliche Grathöhe  $h$  (über 60 Bohrungen gemessen), die an der Austrittsseite des Aluminiumwerkstoffs aufgetreten ist. Für die diamantbeschichteten keramischen Werkzeuge aus SiN und SiAlON können aufgrund der Werkzeugbrüche keine Grathöhen ermittelt werden.

Bei dem ersten Parametersatz ( $v_c = 90$  m/min,  $f = 0,13$  mm) wurden für das unbeschichtete keramische Werkzeug aus  $Al_2O_3$  geringfügig höhere Grathöhen, verglichen zu dem Vollhartmetallwerkzeug gemessen. Jedoch unterliegen die Messergebnisse der Bohrungen des VHM einer größeren Messwertstreuung. Diese Verhältnis dreht sich bei einer höheren Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 285$  m/min um. Hier wurden für das keramische Werkzeug deutlich geringere Grathöhen, im Vergleich zu dem Vollhartmetallwerkzeug gemessen. Dies korreliert mit den in Abb.46 dargestellten gemessenen Vorschubkräften.

Bei einem geringeren Vorschub von  $f = 0,07$  mm (bei einer Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 90$  m/min) steigen die Grathöhen für das keramische Werkzeug aus  $Al_2O_3$  drastisch gegenüber den übrigen Parameterkombinationen an, obwohl hier die geringsten Vorschubkräfte gemessen wurden. Es ist zu vermuten, dass die Spannungsdicke zu ungünstigen Zerspanungsbedingungen und erhöhtem Wärmeeintrag führt.

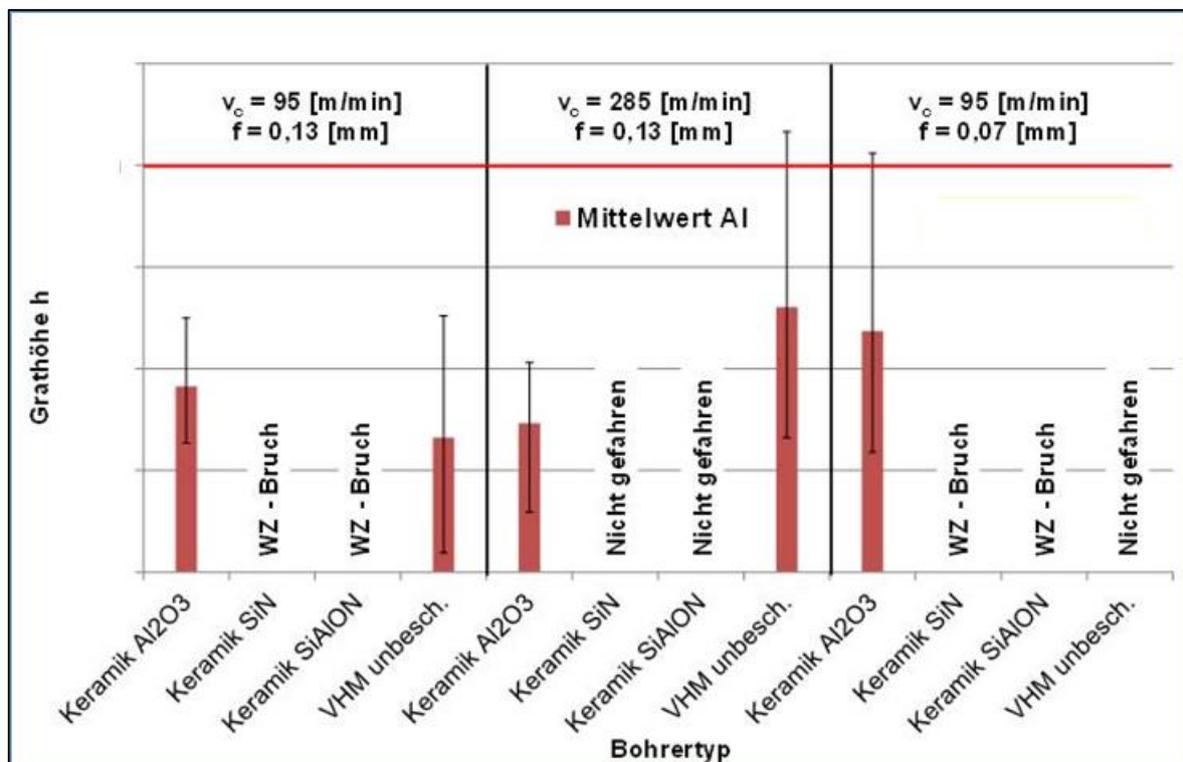


Abb.47: Durchschnittl. Grathöhen  $h$  bei unterschiedl. Prozessparam. und Werkstoffen

## Rauheit

Abb.48 zeigt die durchschnittlichen Rauheiten Ra der Bohrschichten in CFK und Titan. Es wurde eine Taststrecke von 1,75 mm, mittig in der Bohrung gewählt.

Für die ersten beiden Parametersätze ( $v_c = 90 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,13 \text{ mm}$  /  $v_c = 285 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,13 \text{ mm}$ ) wurden relativ geringe mittlere Rauheiten von  $Ra < 1 \text{ }\mu\text{m}$  gemessen. Die Rauheitswerte für das keramische Werkzeug aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  liegen dabei geringfügig unterhalb derer des Vollhartmetallwerkzeugs. Auch die Streuen der Messwerte fällt für das keramische Werkzeug geringer aus.

Bei kleineren Vorschüben ( $f = 0,07 \text{ mm}$ ) werden hingegen deutlich höhere Ra-Werte von durchschnittlich  $3 \text{ }\mu\text{m}$  in CFK und  $2 \text{ }\mu\text{m}$  in Aluminium erreicht. Auch die Streuungen nehmen hier deutlich zu. Zusammen mit den hohen Werten des Austrittsgrates, bestätigt dies die Vermutung, dass es bei diesem Parametersatz zu Prozessstörungen z.B. in Form von ungenügender Spanabfuhr und/oder hohen Prozesstemperaturen in Folge einer ungünstigen Spanbildung gekommen sein könnte.

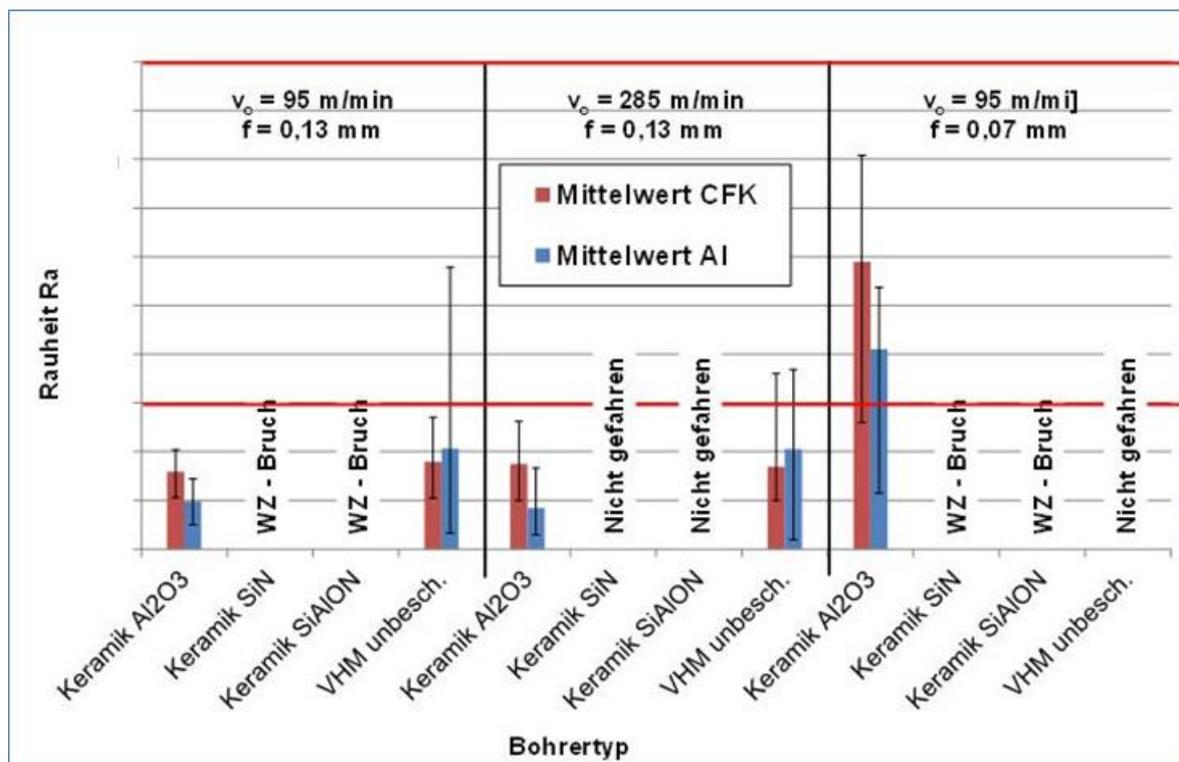


Abb.48: Durchschnittl. Rauheiten Ra bei unterschiedl. Prozessparam. und Werkstoffen

## Prozesskapazitätsindex Cp

Abb.49 zeigt den Prozesskapazitätsindex Cp in der CFK- und Aluminiumschicht. Für den ersten Parametersatz ( $v_c = 90 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,13 \text{ mm}$ ) erreicht das keramische Werkzeug im Vergleich zum

Vollhartmetallwerkzeug einen geringeren Cp-Wert in CFK, jedoch einen höheren Cp-Wert in der metallischen Aluminiumschicht.

Bei einer höheren Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 285$  m/min, steigen die erreichten CP-Werte für das nichtbeschichtete keramische Werkzeug in beiden Werkstoffschichten deutlich an. Im Gegensatz dazu sinken die Cp-Werte für den Hartmetallbohrer, gegenüber denen der geringeren Schnittgeschwindigkeit stark.

Konform zu den Untersuchungsergebnissen der Grathöhe und der mittleren Rauheit ergeben sich bei einem geringen Vorschub von  $f = 0,07$  mm die geringsten Prozesskapazitätswerte.

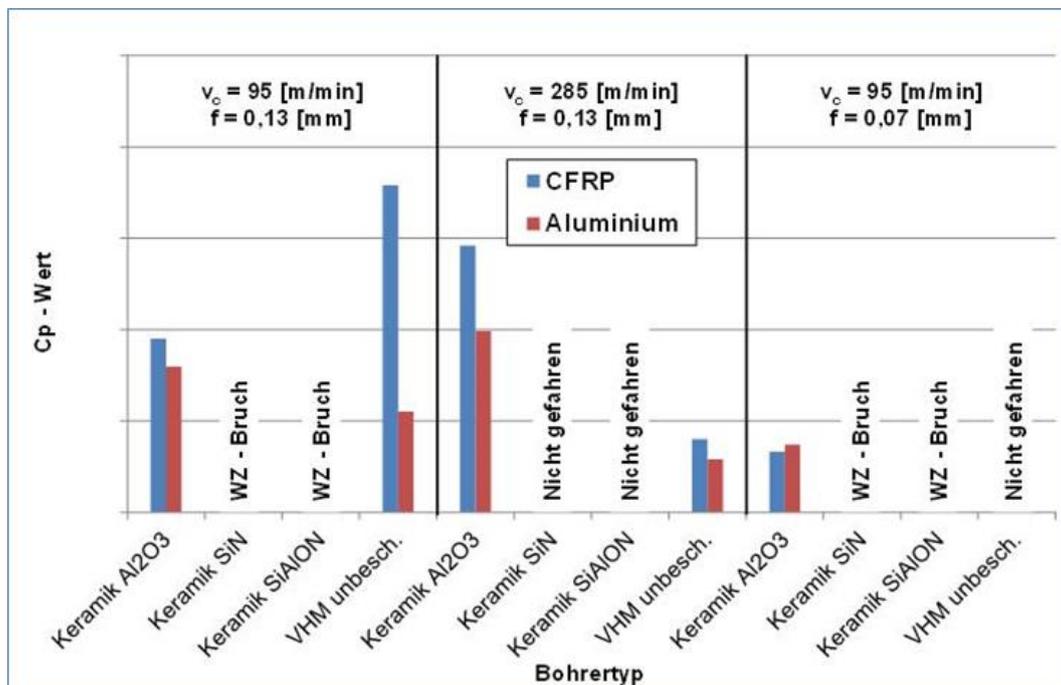


Abb.49: CP- Wert bei unterschiedlichen Prozessparametern und Werkstoffen

### Werkzeugverschleiß

Die folgenden Tabellen zeigen stirnseitige Mikroskopaufnahmen der verwendeten Bohrwerkzeuge jeweils nach 20 und 60 Bohrungen. Die Untersuchungen zeigten, dass die Bohrer bei einer Schnittparametervariation unterschiedlich stark zu Aufbauschneidenbildung und Adhäsion neigen. Zudem ist bei einigen Bohrern ein starker Verschleiß der Querschneide zu beobachten. Ein Ausbrechen der Schneidkanten ist jedoch bei keinem der Bohrer zu erkennen.

### Bohrungsschädigungen in CFK

Die folgenden Tabellen zeigen jeweils die Austrittsseite der Bohrungen in CFK. Es ist zu erkennen, dass es bei einigen Schnittparametern zu starken Aufreibungen durch die metallischen Späne gekommen ist.

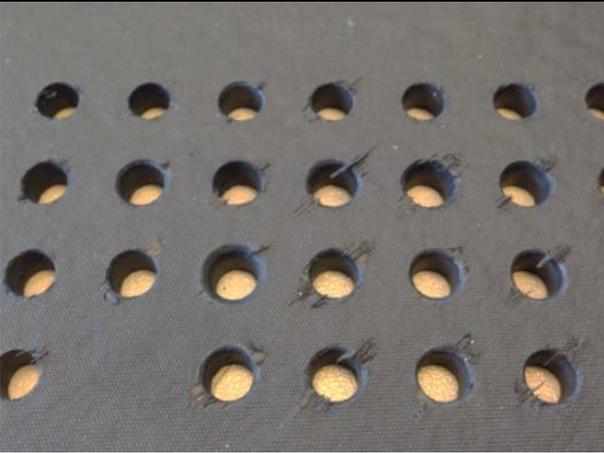
	Bohrer- typ	Bohrungsqualitäten
Drehzahl-Vorschub-Variation 1	Keramik Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	Keramik SiN	WZ - Bruch
	Keramik SiAlON	WZ - Bruch
	VHM unbesch.	

Tabelle 2: Bohrlochqualitäten an Austrittsseite CFK-Layer (Drehzahl-Vorschub-Variation1)

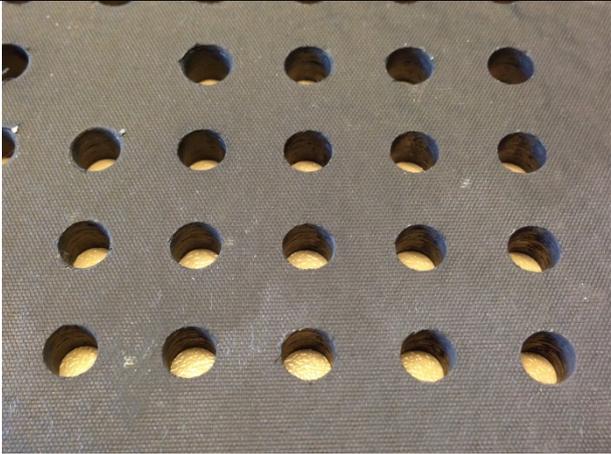
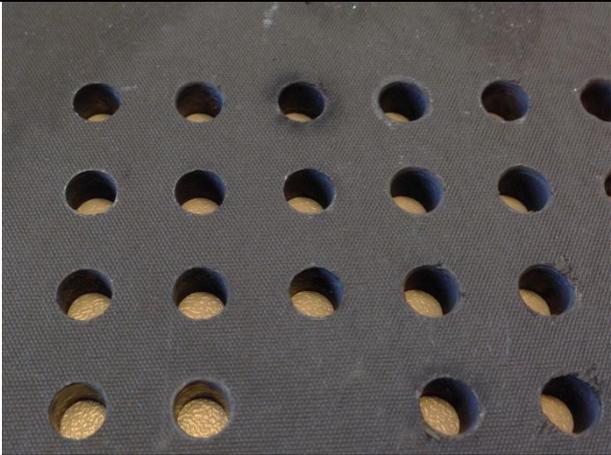
	Bohrer- typ	Bohrungsqualitäten
Drehzahl-Vorschub-Variation 2	Keramik Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	Keramik SiN	Nicht gefahren
	Keramik SiAlON	Nicht gefahren
	VHM unbesch.	

Tabelle 3: Bohrlochqualitäten Austrittsseite CFK-Layer (Drehzahl-Vorschub-Variation 2)

	Bohrer- typ	Bohrungsqualitäten
Drehzahl-Vorschub-Variation 3	Keramik Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	Keramik SiN	WZ - Bruch
	Keramik SiAlON	WZ - Bruch
	VHM unbesch.	Nicht gefahren

Tabelle 4: Bohrlochqualitäten Austrittsseite CFK-Layer (Drehzahl-Vorschub-Variation3)

### 2.1.5.3 Automatisierte Bohrungsherstellung

Das vibrationsunterstützte Bohren bietet aufgrund der hohen Prozesssicherheit und des Ausschlusses von Spänestau hervorragende Voraussetzungen für eine hochautomatisierte Fertigung. Aus diesem Grund wurde die Firma thyssenkrupp System Engineering damit beauftragt ein Bohrrobotersystem für die Nutzung der Technologie des Vibrationsbohrens zu entwickeln und herzustellen. In enger Abstimmung mit den am Projekt beteiligten Parteien wurde ein Konzept aufgestellt, das die Integration einer magnetisch gelagerten Vibrationsbohrspindel vorsieht und gleichzeitig alle Voraussetzungen für die Anwendung eines „CleanDrilling“ Prozesses (Entfernung der am Bohrungsaustritt entstehenden Späne für eine OneWayAssembly) bedient

Bei der magnetisch gelagerten Bohrspindel handelt es sich um einen Prototyp der Firma LTI-Motion. Die technischen Spezifikationen wurden speziell auf die Anwendung in der Luftfahrtindustrie abgestimmt. Durch die magnetische Lagerung wird, im Gegensatz zu mechanischen Systemen, eine freie Einstellung der axialen Schwingung, unabhängig von der Drehzahl, ermöglicht. Zusätzlich lassen sich über eine Auswertung des Magnetlagerstroms Schichtübergänge in Werkstoffverbunden wie beispielsweise in CFK/Titan-Verbunden, Werkzeugverschleiß und/oder –Bruch und eine sichere Schnittunterbrechung detektieren. Weiterhin sind von der Sinusform abweichende Schwingungsformen umsetzbar, wodurch z.B. die mechanische Belastung der Werkzeuge reduziert werden kann.

Der Endeffektor soll zur Positionierung auf einem Robotersystem (siehe) montiert werden. Das Robotersystem ist zusätzlich auf einer linearen Achse befestigt um die Erreichbarkeit an großflächigen Bauteilen, wie Landeklappen, zu gewährleisten.

### Voruntersuchungen - neue Magnetlagerspindel

Um den spezifischen Anforderungen der Bohrungserzeugung in der Luftfahrt gerecht zu werden, wurde von der Firma LTI Motion eine neue magnetisch gelagerte Bohrspindel mit entsprechenden Spezifikationen entwickelt und angefertigt. Wie bereits erwähnt, soll die Bohrspindel in naher Zukunft auf in einem Endeffektor eines Robotersystems zur vollautomatischen Bohrungsherstellung integriert werden. Vorab wurde die neue Bohrspindel auf einer CNC-Maschine bei der Firma LTI Motion in Wasserburg getestet. Im Vordergrund der Untersuchungen standen die erreichbaren Toleranzen der Bohrungsdurchmesser, die Senktiefenwiederholgenauigkeit, die Messung von Prozesskräften und die Kontrolle der Vibrationsparameter.

#### Versuchsplan

Es war das Ziel der geplanten Untersuchungen die Funktionsfähigkeit der Magnetgelagerten Spindel zu prüfen. Zu diesem Zweck wurden vier unterschiedliche Materialkombinationen (siehe Tabelle unten) bestehend aus CFK, Aluminium und Titan bearbeitet. Da zum Großteil neue, bis dahin noch nicht weiter getestete Werkzeuge zum Einsatz kamen, wurden mehrere Schnittparametervariationen durchgeführt.

## Untersuchungsergebnisse

CFK/Ti6Al4V-Werkstoffverbund: Die Vibrationsunterstützung erfolgt erst bei Erreichen der Titanschicht. Ein Großteil der CFK Schicht wird daher rein konventionell bearbeitet. Die Bohrungsdurchmesser wurden in jeder Materialschicht mittig unter 0 und 90° gemessen. Die Bohrungsdurchmesser in Titan liegen in etwa 10 µm über denen in der CFK-Schicht, was auf die grundlegend unterschiedlichen Materialeigenschaften beider Werkstoffe zurückzuführen ist. Bohrloch-Aufweitungen, die auf eine Prozessstörung durch Späne-Stau hinweisen, konnten bei den gegebenen Randbedingungen nicht beobachtet werden. Die Grathöhen und Rauheiten liegen im Rahmen der in der Luftfahrt gängigen Toleranzen.

Ti6Al4V mit anschließendem Senken in einem „Schuss“ mittels Bohrseker durchgeführt. Die Durchmesser schwanken um ca. 20 µm. Grathöhen und Rauheiten liegen innerhalb der Toleranzen. Die Senktiefenwiederholgenauigkeit liegt in diesem Fall bei ca. ±10µm.

CFK/Al/Al2024 mit einem diamantbeschichteten Werkzeug. Die Durchmesser aller Werkstoffschichten liegen in einem Bereich von ca. 20 µm. Die Rauheitswerte von CFK und Aluminium sind innerhalb der Toleranz von 5.0 µm für CFK bzw. 1,6 µm für Aluminium. Die mittlere Grathöhe beträgt 140 µm, und liegt damit leicht über der Grenze von 100 µm. Allerdings konnten mit demselben Bohrwerkzeug bei abgeänderten Prozessparametern sehr viel geringere Grathöhen von ca. 14 µm erreicht werden. Darüber hinaus wurden unter den gegebenen Prozessrandbedingungen sehr geringe Rauheiten in Aluminium von Ra < 0,1 µm (Rz < 0,5 µm) gemessen, wodurch sich spiegelnde Bohrungsoberflächen bilden. Die kinematische Schnittunterbrechung führt zu kleinen, gut abführbaren Spänen, wodurch eine Beeinflussung der Bohrungswandung z.B. durch reibende Späne ausbleibt.

## Nachweisuntersuchungen

Nach Abschluss aller geplanten Voruntersuchungen und Testreihen in 2016 haben in 2017 Nachweisuntersuchungen in echter Produktionsumgebung begonnen.

Da bei Airbus eine neue Produktionsanlage bei der Firma ThyssenKrupp beschafft worden ist, ist die Vibrationsbohrereinheit nicht, wie ursprünglich geplant, in einem Demonstrator bei Broetje – Automation integriert worden, sondern es wurden zur Absicherung der transnationalen Harmonisierung die neuen Roboter mit Endeffektor für den Einsatz der neuen Technologie modifiziert. Dadurch war ein extra Demonstrator bei Broetje nicht mehr notwendig.

Nach erfolgreichem Abschluss der Nachweisuntersuchungen ist eine Einführung der Bohrtechnologie mit magnetisch gelagerten Bohrspindeln in die laufende Produktion vorstellbar.

## 2.2 NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE

Im Rahmen eines Airbusinternen Projektes ist geplant die im **AP 1.1** entwickelten Technologien und Konzepte auf eine Serienanlage für den A350 Flügel zu transferieren. Der Technologietransfer auf weitere Komponenten wird untersucht.

Die Fertigungs- und Montagetechnologien für den Integral-Spant wurden im **AP 1.2 & 4** auf den technologischen Reifegrad TRL4 gebracht. Aufbauend auf diesen Entwicklungsgrad werden diese Technologien im LuFoV-3 Projekt IMPULSE-RASANT auf den technologischen Reifegrad TRL6 entwickelt. Damit wäre eine anschließende zeitnahe Serieneinführung denkbar. Die Montagetechnologien lassen auch auf andere Anwendungen wie z.B. differenzielle Spante applizieren.

Im **AP2** wurde die Entwicklung eines optimierten Prozessablaufes zur Trocknung von Luftfahrzeugbeschichtungen basierend auf dem Einsatz von kontaktlosen Spektroskopie-Messvorrichtungen in Kombination mit Infrarotaushärtung bis zum technologischen Reifegrad TRL3 erweitert. Aufgrund der hohen Risiken wurden gemäß Änderungsantrag die Aktivitäten in diesem AP gestoppt.

Es ist geplant, in einem möglichen Nachfolgeprojekt (Projektacronym: BisCona), auf die im Rahmen des Arbeitspaketes **AP 3.1** erzielten Ergebnisse, aufzusetzen. Alle beteiligten Partner haben in gemeinsamer Übereinkunft dazu einen entsprechenden Antrag formuliert und eingereicht.

Die Ergebnisse aus **AP3.2** haben gezeigt, dass eine Einführung der Bohrtechnologie in die laufende Produktion mit magnetisch gelagerten Bohrspindeln für die Erzeugung von Nietbohrungen ist zeitnah vorstellbar. Eine Prüfung auf welche nationalen und transnationalen Anwendungen diese Technologie transferiert werden soll läuft gerade.

## 2.3 RELEVANTE ERGEBNISSE DRITTER

Relevante Ergebnisse Dritter sind nicht bekannt.

### 3. LITERATURVERZEICHNIS

- [Jut-2007] Jutta Saatweber: Kundenorientierung durch Quality Function Deployment: Systematisches Entwickeln von Produkten und Dienstleistungen ; [mit allen Checklisten und Matrizen auf CD-ROM] 2., überarb. Aufl. Düsseldorf: Symposion, 2007
- [Gab-2004] Gabler: Wirtschaftslexikon. 16. Auflage, Gabler-Verlag, Wiesbaden, 2004
- [Eve-1992] Eversheim, W.: Flexible Produktionssysteme. In: Freese, E. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation, 3. Auflage, Stuttgart, Schaeffer-Poeschel Verlag, 1992
- [Wal-2014] Walz, Mark: *Ermittlung der Trockenzeit von Lacken mittels NIR-Spektroskopie*, 2014
- [Bac-2014] Bachelorarbeit, FH Isny – Airbus Operations GmbH, 2014
- [See-2014] Seegel H., C. Barlag, C. Jacob, T. Rissmann.: Versuchsbericht Blisterpanel#2. Interner Bericht, Airbus Operations GmbH, 2014
- [Ris-2015] Rissmann, T.: „Entwicklung von Abdichtkonzepten für einen neuartigen Vakuumaufbau zur Herstellung von CFK-Schalenbauteilen - Bachelorarbeit,“ Airbus Operations GmbH, Stade, 2015
- [Müh-2014] Mühle, F. /Von Schröder, P.: Measurement for Paint Dryness - TRL3 Review, Hamburg: Airbus Internal Review, 2014
- [Dru-2015] Drummer, D.: „Prüfbericht, Auftragsnummer AP15-02-17,“ Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [Bri-2002] Brinksmeier, E./Janssen, R.: Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminium alloys. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 51, 2002
- [Bri-2011] Brinksmeier, H. /Fangmann, S./ Rentsch, R.: Drilling of composite and resulting surface integrity. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 60, 2011
- [Cha-2009] Chatterjee, A.: Thermal degradation analysis of thermoset resins. Journal of Applied Polymer Science, Volume 114, 2009
- [Cha-2010] Chang, S.S.F. / Bone, G.M.: Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6, Precision Engineering, 34-3 ,2010
- [Fan-2012] Fangmann, S.: Orbitalbohrstrategien in seriellen Werkstoffverbunden, Aachen, Dissertation Universität Bremen, Shaker Verlager, 2012
- [Gui-2008] Guibert, N. /Paris, H. / Rech, J.: A numerical simulator to predict the dynamical behavior of the self-vibratory drilling head, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 48-6 , 2008

- [Han-2000] Hanke, H.: Analyse und Optimierung des Bohrprozesses von metallischen Schichtverbunden unter besonderer Berücksichtigung der Minimalmengen-Schmiertechnik, Aachen, Dissertation Universität Bremen, Shaker Verlag, 2000
- [Jan-2003] Janssen, R: Bohren und Zirkularfräsen von Schichtverbunden aus Aluminium, CFK und Titanlegierungen, Aachen, Dissertation Universität Bremen, Shaker Verlag, 2003
- [Jah-2012] Jahn, B. / Karl, D.: Composites-Marktbericht 2012. Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, Oktober 2012
- [Kim-2004] Kim, D. / Ramulu, M.: Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks. Composite Structures, Volume 63, 2004, Pages 101-114
- [Pec-2012a] Pecat, O. /Rentsch, R. /Garbrecht, M. / Brinksmeier, E.: Modeling and simulation of the machining of unidirectional CFRP. 2. WGP-Jahreskongress 2012
- [Pec-2012b] Pecat, O. /Rentsch, R. / Brinksmeier, E.: Influence of milling parameters on the surface integrity of CFRP. Procedia CIRP, Volume 1, 2012, Pages 466-470
- [Pha-2013] Phadnis, V.A. / Makhdum, F. / Roy, A. / Silberschmidt, V.V.: Experimental and Numerical investigations in conventional and ultrasonic assisted drilling of CFRP laminate. Procedia CIRP1, 2012, Pages 455-459
- [Ram-2001] Ramulu, M. /Branson, T. / Kim, D.: A study on the drilling of composite and titanium stacks. Composite Structures, Volume 54, 2001, Pages 67-77
- [Ren-2010] Rentsch, R. / Pecat, O. / Brinksmeier, E.: Macro and micro process modeling of the cutting of carbon fiber reinforced plastics using FEM. Procedia Engineering, 2011, Pages 1823-1828

## 4. ABKÜRZUNGEN

<i>3D</i>	<i>Dreidimensional</i>
<i>AP</i>	<i>Arbeitspaket</i>
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CFK</i>	<i>Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff</i>
<i>DoE</i>	<i>Design of Experiments</i>
<i>DoF</i>	<i>Degree of Freedom (Freiheitsgrade)</i>

<i>FEM</i>	<i>Finite-Elemente-Methode</i>
<i>GLARE</i>	<i>Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy</i>
<i>HSU</i>	<i>Helmut-Schmidt-Universität</i>
<i>IFAM</i>	<i>Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung</i>
<i>KOS</i>	<i>Koordinatensystem</i>
<i>KVP</i>	<i>Kontinuierliche Verbesserungsprozess</i>
<i>MCA</i>	<i>Major Component Assembly</i>
<i>MES</i>	<i>Manufacturing Execution System</i>
<i>MTM</i>	<i>Methods-Time Measurement</i>
<i>NRC</i>	<i>Non-Recurrent Cost</i>
<i>ONB</i>	<i>Orthonormalbasis</i>
<i>PDM</i>	<i>Product and Document Management</i>
<i>REFA</i>	<i>Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung (Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung)</i>
<i>TCP</i>	<i>Tool Center Point</i>
<i>VDI</i>	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>
<i>VDE</i>	<i>Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik</i>
<i>VONS</i>	<i>vollständiges Orthonormalsystem</i>
<i>XWB</i>	<i>extra wide body</i>
<i>ZAL</i>	<i>Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung GmbH</i>

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN <i>entfällt</i>	2. Berichtsart <p style="text-align: center;">Schlussbericht</p>
3. Titel <p style="text-align: center;"><b>EPROC</b> Evolutionäre Prozesse für CFK-Rumpfstrukturen (Verbund EITEC)</p>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Kütemeier, Uwe	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2017
	6. Veröffentlichungsdatum <i>entfällt</i>
	7. Form der Publikation <i>entfällt</i>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Airbus Operations GmbH Kreetslag 10 21129 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution <i>entfällt</i>
	10. Förderkennzeichen 20W1304A
	11. Seitenzahl 110
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 24
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 49
16. Zusätzliche Angaben <i>entfällt</i>	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) <i>entfällt</i>	
18. Kurzfassung Das Verbundvorhaben EITEC verfolgte im Wesentlichen die technologischen Schwerpunkte Optimierung der Integrationsschritte bei der Herstellung von komplexen Strukturkomponenten und die Effizienzsteigerung entlang der Montageprozesskette für Flugzeugkomponenten. Im Rahmen des Airbus-Vorhabens EPROC wurde hierzu auf Technologieansätze fokussiert die ein hohes Optimierungspotential hinsichtlich Kostenreduktion und Produktionsratenerhöhung haben. Die Arbeiten teilten sich in folgende Schwerpunkte auf: Die Entwicklung einer prozesssicheren und kostenoptimierten Lösung zur industriellen Herstellung von integrierten Hochleistungs-CFK-Komponenten mit dem Fokus Stringer-Integration und Integralspant-Fertigung. Entwicklung und Validierung einer neuen Messmethode zur Online Detektion und Überwachung des Trocknungszustandes von Lacken Identifizierung und Minimierung nicht produktiver Arbeitsschritten entlang der Montagekette durch intelligente Werkzeuge und Algorithmen zur Bewertung und Gestaltung von Prozessabläufen und Prozessketten. Entwicklung und Validierung des Vibrationsbohrens als innovativer Ansatz zur Effizienzsteigerung und zur Optimierung des Bohrprozesses. Hochautomatisierte Montagetechnologie für den Integralspant.	
19. Schlagwörter Stringer-Integration, Vakuumaufbau, Integral-Spant, Spant-Montage, Oberflächentechnologie, Aushärtegrad, Infrarottrocknung, Spektroskopie, Flugzeuglack, Trocknungsfortschritt, berührungslos, Messverfahren, Trocknungszustand, dry-to-tape, Vibrationsbohren, Span-Form, Span-Nut, Bohrstaub, Montageprozess, Clip, Rumpfschalen, Bohr-Prozess	
20. Verlag <i>entfällt</i>	21. Preis <i>entfällt</i>

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN N/A	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title  <div style="text-align: center;">EPROC Evolutionäre Prozesse für CFK-Rumpfstrukturen (Verbund EITC)</div> <div style="text-align: center;">EPROC Evolutionary Processes for CFRP Fuselage Structures (EITEC consortium)</div>	
4. author(s) (family name, first name(s))  Kütemeier, Uwe	5. end of project 30.09.2017
	6. publication date N/A
	7. form of publication N/A
8. performing organization(s) (name, address)  Airbus Operations GmbH Kreetslag 10 21129 Hamburg	9. originator's report no. N/A
	10. reference no. 20W1304A
	11. no. of pages 110
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 24
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 49
16. supplementary notes N/A	
17. presented at (title, place, date) N/A	
18. abstract The joint project EITEC mainly pursued two technological focal points: The optimisation of integrations steps during the manufacturing of complex structural components as well as the efficiency enhancement during the assembly process chain for aircraft components. In the course of the Airbus project EPROC there was a focus on the technology approaches which bear a high optimisation potential for cost reduction and increase of the production rate. The work activities are divided as follows: <ul style="list-style-type: none"> <li>- The development of a reliable und cost-optimised solution for the industrial manufacturing of integrated High-Performance-CFRP-components with a focus on stringer integration and manufacturing of integral frames.</li> <li>- Development and validation of a novel testing method for online detection and monitoring of the drying state of paint.</li> <li>- Identification and minimisation of non-productive working steps in the assembly process chain using intelligent tools and algorithms for the evaluation and design of process chains and workflows.</li> <li>- Development and validation of vibration-drilling as an innovative approach for efficiency enhancement and optimisation of the drilling process.</li> <li>- Highly automated assembly technology for integral frames</li> </ul>	
19. keywords Stringer integration, vacuum bagging, integral frames, frame assembly, surface technology, degree of cure, infrared drying, spectroscopy, aircraft paint, drying process, contactless, measurement methods, drying state, dry-to-tape, vibration-drilling, chip geometry, chip groove, drilling dust, assembly process, clip, fuselage shells, drilling process	
20. publisher N/A	21. price N/A