

FFS – THERMOPLASTISCHE BAUWEISEN FÜR SEKUNDÄRSTRUKTUREN

G.Doll, P. Dreher, S. Nowotny
DLR, Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie, Stuttgart, Deutschland

M. Calomfirescu
Airbus Defence and Space GmbH, Military Aircraft, Manching, Deutschland

Zusammenfassung

Neuartige Bauweisen für ein Medium Altitude Long Endurance (MALE) Fluggerät mit kleinen Stückzahlen erfordern entsprechende Technologien, um die Ziele im Bereich von Kosten, Gewicht und Flexibilität zu erreichen. Die aktuelle Bauweise für die Hecksektion (Tail Cone) des MALE sieht eine metallische Fachwerkbauweise im Inneren und eine äußere Beplankung vor. Die Beplankung dieser Fachwerkstruktur wird als Sekundärstruktur geführt.

Die Anforderungen für diese Struktur sind kostengünstige Herstellung und Betrieb des Tail Cones, eine maximal flexible Nutzung der Anlagentechnik und die Erfüllung der geforderten Gewichtsziele.

Im Rahmen von FFS werden für den Tail Cone verschiedene Bauweisen aus thermoplastischen Composites in einem Business Case aus Kostensicht betrachtet und anschließend miteinander verglichen. Hierbei zeigt sich, dass eine hochintegrale Bauweise aus thermoplastischen Composites ein hohes Potential bzgl. Kosteneinsparungen gegenüber einer herkömmlichen Bauweisen bietet.

Im Mittelpunkt steht die In-Situ Tapelege Technologie, welche eine werkzeugarme, kosteneffiziente und hochintegrale Bauweise ermöglicht. Begleitend werden verschiedene Materialuntersuchungen auf Prozessebene vorgestellt und dienen unterstützend einer ganzheitlichen Bauweisen-Bewertung vom Material über Prozess bis hin zu einer kosteneffizienten Bauweise für Sekundärstrukturen in geringen Stückzahlen.

1. EINLEITUNG

Neben den Duromeren Composite Werkstoffen und Fertigungstechnologien gewinnen thermoplastische Composites zunehmend an Bedeutung. In Sekundärstrukturen von Luftfahrzeugen finden diese Werkstoffe zunehmend Anwendungen. Beispielhaft sind thermoplastische Clips im A350 und die mit Rippen versteifte Leading Edge vom A380 zu nennen. Herausforderungen für thermoplastische Composites sind die häufig hohen Materialkosten und aufwendige Toolings für Temperaturen von bis zu 400°C und damit eingeschränkte Bauteilgrößen. Thermoplaste bieten jedoch großes Potential im Bereich von Verbindungen mittels Schweißtechnologien. Durch Verbesserungen der Anlagentechnik und stetige Optimierung von Lasersystemen, sowie deren Regelung können heutzutage mit Hilfe von Out of Autoklav (OoA) Technologien wie dem Tapelegen neue Bauweisen generiert werden. Mit dem Potential des Schweißens und OoA-Techniken können die hohen Materialkosten durch optimierte Bauweisen egalisiert werden. Mittels In-Situ Tapelege Technologien können größere Strukturen mit kostengünstigen Toolings realisiert werden, was neue Chancen mit neuen Herausforderungen eröffnet. Das Potential dieser Technologien und Werkstoffe spiegelt sich momentan in verschiedenen Forschungsprojekten und Vorhaben der Industrie wieder. Beispiele hierfür sind Clean Sky 2 Projekte im Bereich thermoplastischer Rumpf, und Demonstratoren der Firmen wie Steilja und Fokker. Mögliche Anwendungen für das Tapelegen werden in wickelbaren Rumpfkomponenten wie z.B. eines Tail Cones oder dem Herstellen von

einfach- bzw. doppeltgekrümmten versteiften Schalen gesehen. Die größte Herausforderung beim In-Situ Tapelegen gilt dem Einfluss der Poren auf die strukturelle Integrität und dem Einfluss der schichtweisen Wärmeeinbringung auf die Toleranz und Genauigkeit der Bauteile.

2. THERMOPLASTISCHE BAUWEISENKONZEPTE

Das Potential für thermoplastische Composites wird im Folgenden für verschiedene thermoplastische Bauweisenkonzepte für einen Tail Cone aufgezeigt und bewertet. Im Fokus steht eine kosteneffiziente Bauweise mit geringen Stückzahlen. Der Tail Cone ist ein Sekundärbauteil, welches mit Versteifungselementen ausgestattet ist. Neben den bekannten Strukturwerkstoffen wie PEKK und PEEK spielt PPS eine immer größere Rolle. PPS kann insbesondere aus Kostensicht und Verarbeitungstemperaturen deutliche Vorteile mit sich bringen.

Für den Tail Cone werden drei Bauweisen identifiziert. Konzept 1 sieht eine hochintegrale Bauweise vor. Versteifungselemente werden während der Hatherstellung mittels In-Situ Fügen mit der Haut verbunden. Für Konzept 2 erfolgt die Preform Herstellung automatisiert, z.B. mittels Pick & Place Prozessen oder einem Tape-Ablegen mittels Tapeleger ohne Konsolidierung, sondern lediglich durch eine punktuelle Fixierung der einzelnen Lagen. Versteifungselemente können während des Konsolidierungsschrittes im Vakuum (VCT) mit aufgeschweißt werden [1]. Konzept 3 sieht ein Pressprozess vor. Hier wer-

den Organobleche in einem Pressprozess umgeformt. Die Versteifungselemente müssen in einem zusätzlichen Schritt verschweißt werden.

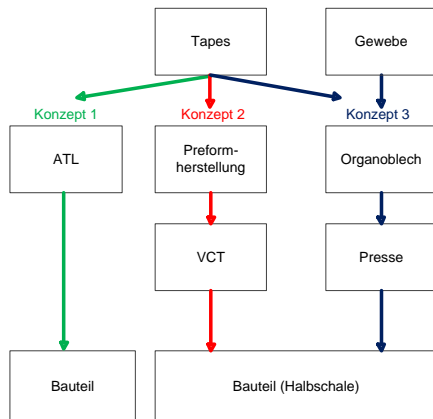


BILD 1. Konzeptbaum zur Fertigung eines Tail Cones

2.1. Vakuum Konsolidierung Technik (VCT)

Die Vakuum Consolidation Technique (VCT) gilt als eine kostengünstige Alternative zu bekannten Autoklav- oder Pressprozessen [2]. Für den VCT Prozess wird ein Thermoplast-Preform unter einem Vakuumsack auf die Verarbeitungstemperatur des Thermoplasts erwärmt. Die Erwärmung kann in einer beheizten Form oder einem Ofen erfolgen. Versteifungselemente können mittels Vakuumschweißen direkt mit der Haut verbunden werden [1].

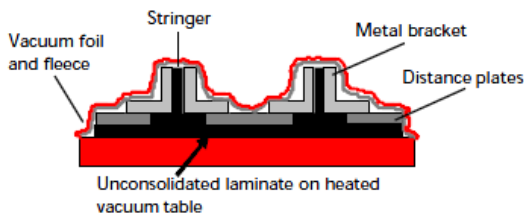


BILD 2. VCT Aufbau inkl. Integration von Versteifungselementen

BILD 2 zeigt ein solches Verfahren. Die Versteifungselemente werden mit dem eigentlichen Laminat in Kontakt gebracht. Bei der Erwärmung auf Verarbeitungstemperatur müssen die Versteifungselemente gestützt werden. Offene Profile bieten hier deutliche Vorteile gegenüber geschlossenen Profilen wie z.B. Omega-Profile. Der gesamte Aufbau wird in einem gemeinsamen Vakuumsack verpackt und auf Verarbeitungstemperatur erwärmt. Das Laminat wird konsolidiert und die Versteifungselemente werden gleichzeitig aufgeschweißt. Das Verfahren reagiert sehr sensibel auf unterschiedliche Herstellungsarten von Thermoplasttapes. Vorteile sind Einsparungspotentiale hinsichtlich Toolingkosten und dem einstufigen Prozess zur Integration der Versteifungselemente. Materialien für den Blitzschutz können ggf. bei Female Toolings bereits mit in das Laminat integriert werden. Für den Tail Cone wird für jede Seite ein eigenes Tooling benötigt. Der Va-

kuamaufbau erfordert manuelle Arbeit, sodass sich das Verfahren für geringe Stückzahlen eignet.

2.2. Hot Press Forming

Das Umformen von vorkonsolidierten Thermoplast-Laminaten (Organoblechen) stellt eine kostengünstige Alternative zur Preformherstellung auf einer Bauteilform dar. Organobleche können effizient auf Doppelbandpressen hergestellt werden. Für das Bauteil wird die abgewinkelte Kontur aus dem Organoblech herausgearbeitet und in einem Vorheizfeld auf Verarbeitungstemperatur erhitzt. Anschließend wird das erwärmte Organoblech in eine beheizte Pressform eingebracht. Unter Druck wird das Bauteil auf seine finale Geometrie gepresst. Sobald die Bauteiltemperatur unter die Kristallisationstemperatur abgesunken ist, kann das fertige Bauteil entnommen werden.

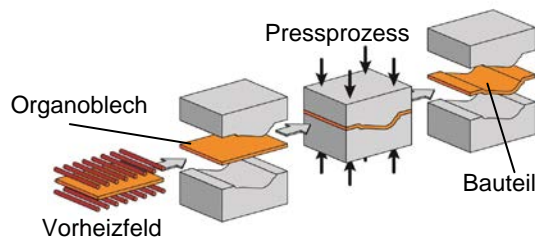


BILD 3. Darstellung des Umform Prozesses [ETH-Zürich]

Konzept 3 sieht einen solchen Hot Press Forming Prozess für die Hauterstellung vor. In einem zusätzlichen Schritt müssen Versteifungselemente mit der Schale verbunden werden. Thermoplastische Werkstoffe bieten hier das Potential des Schweißens, z.B. Widerstandsschweißen [5] oder Induktionsschweißen. Beide Füge-technologien haben mittlerweile einen gewissen Grad der Automatisierung erreicht [7]. Somit können die Fügungen zuverlässig und mit einer hohen Reproduzierbarkeit durchgeführt werden.

Typische Anwendungen für Pressbauteile sind Bauteile mit hohen Stückzahlen, wie z.B. Rippen für Versteifungen [3] oder Leitschaukeln im Triebwerksbereich [4].



BILD 4. li. gepresste Rippe aus CF-PEEK; re. CF-PEEK Leitgitter

Thermoplastische Umformprozesse benötigen geschlossene Werkzeuge, was mit hohen Toolingkosten verbunden ist. Weitere Herausforderungen sind die Werkzeugauslegung hinsichtlich Spring-In und Spring-Out, um eine möglichst gute Toleranz zu erzielen. Insbesondere für spätere Fügeprozesse ist die Toleranz von entscheidender Bedeutung. Der Pressprozess kann seine Vorteile

besonders bei hohen Stückzahlen ausspielen. Zudem gilt der Prozess als sehr robust und mit hohem Automatisierungspotential.

3. TAPELEGEPROZESS

Ein weiterer thermoplastischer Herstellungsprozess ist das sogenannte Tape Legen. Hierbei wird zwischen dem In-Situ Prozess und einem zweistufigen Prozess unterschieden. Der In-Situ Prozess sieht vor, dass das Laminat direkt mit dem Ablegen der Tapes hergestellt wird, ohne dass das Bauteil in einem Ofen, Autoklaven oder einer Presse nachkonsolidiert werden muss. Mit der Verwendung von speziellen Tapelegeköpfen sind neben der ebenen Ablage von Laminaten auch Wickelkonfigurationen möglich. Durch hochintegrale Wickelwerkzeuge mit integrierten Versteifungselementen kann die Werkzeuganzahl und damit Kosten reduziert werden.

3.1. Konzept 1 In-Situ Tapelegen

Konzept 1 sieht eine solche Wickelkonfiguration vor, wie in BILD 5 zu erkennen. Die Wickelform wird als Male Tooling ausgeführt. Die Integration der Versteifungselemente erfolgt über Sicken in der Form. Eine nachträgliche Integration von Versteifungselementen wird vermieden. Blitzschutzmaterial kann bis zu einer gewissen Art heute bereits ebenfalls mittels Tapeleger integriert werden [6].

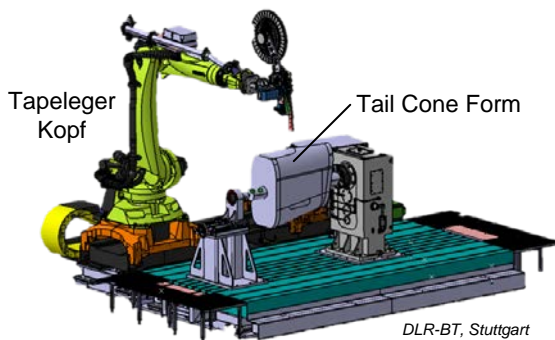


BILD 5. Konzept zur Fertigung des Tail Cones mittels In-Situ Tapelegen.

Die Tooling Anzahl wird auf ein einziges Wickeltooling reduziert, verglichen zu zwei Toolings bei Konzept 2 und vier Toolings bei Konzept 3. Speziell für Bauteile mit geringen Stückzahlen bieten sich bei Konzept 1 Kostenvorteile hinsichtlich Anzahl der Toolings und Integration der Versteifungselemente.

Mit der flexiblen Tapelege-Anlage bei DLR-BT in Stuttgart können neben dem Wickeln auch Tapes in Längsrichtung abgelegt werden. Hierdurch können die Faserlagen speziell an strukturelle Anforderungen angepasst werden. Die Anlage beschränkt sich nicht nur auf das Wickeln. Einfach und doppelt gekrümmte Bauteile können mit derselben Zelle gefertigt werden. Die Anlage ist somit vielfältig und flexibel anwendbar. Dies relativiert ggf. die höheren Investkosten, weil verschiedenste Bauteile gefertigt werden können. Insbesondere Baugruppen mit verschiedenen Komponenten können über einen längeren Zeitraum abwech-

selnd gefertigt werden. Ein teurer Stillstand der Anlage wird reduziert.

3.2. Einfluss Fertigungsparameter

Der Tapelege Prozess besitzt eine Vielzahl von möglichen Parametern, die variiert werden können. Zielerfordernisse an die Bauteile sind eine gute Abbildbarkeit der Geometrie, d.h. geringe Toleranzen und das Erzielen der geforderten Festigkeit und Steifigkeit. Wichtige Parameter sind die Regelung des Lasers, um die optimale Temperatur in die Tapes einzubringen und die bestmögliche Anbindung der Tapes zueinander zu gewährleisten. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Werkzeugtemperatur, um die thermischen Eigenspannungen zu reduzieren. Im Folgenden werden Einflüsse von verschiedenen Parametern an CF-PEEK-Material aufgezeigt.

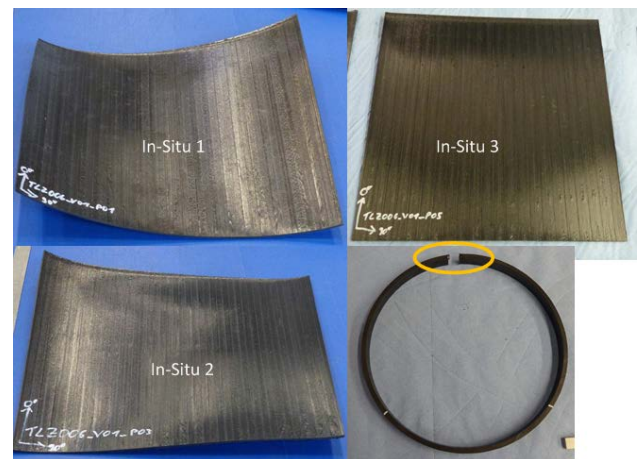


BILD 6. Einfluss der Werkzeugtemperatur und Fertigungsparameter auf die Ebenheit und Eigenspannungen bei Wickelkörpern.

BILD 6 zeigt den Einfluss von Fertigungsparametern auf die Ebenheit von UD-Platten und den Einfluss auf die Eigenspannungen bei gewickelten Komponenten. Die Bilder links zeigen eine deutliche Verformung beim schnellen Ablegen auf einem unbeheizten Werkzeug. Mit einer beheizten Form, definierter Ablegegeschwindigkeit und optimierten Regelparametern können ebene Platten gefertigt werden. Eine Besonderheit sind gewickelte Körper. Hier sind Eigenspannungen eingefroren. Erst mit dem Auftrennen des Ringes werden die Spannungen durch ein Aufbiegen des Ringens sichtbar.

Weitere wichtige Parameter für die Beurteilung des Tapelegeprozesses sind die mechanischen Kennwerte. Hierzu wurden im ersten Schritt an CF-PEEK Material ILSS (DIN ISO 14130) Versuche durchgeführt.

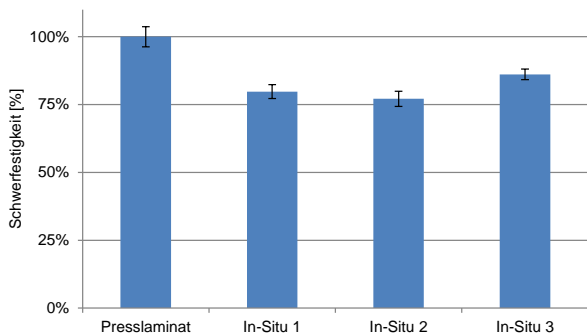


BILD 7. Scherfestigkeit von CF-PEEK mit verschiedenen Fertigungsparametern

BILD 7 zeigt die Ergebnisse der ILSS Versuche. Als Referenz diente ein verpresstes Laminat aus demselben CF-PEEK-Material. Mit der Optimierung von Fertigungsparametern und Werkzeugtemperaturen bei der Probenserie In-Situ 3 werden Festigkeiten von ca. 90% vom gepressten Laminat erreicht. Die Streuung der gemessenen Werte war gering.

3.3. Tape Material

Für das Tapelegen sind Thermoplast Tapes in speziellen Breiten notwendig. Meistens werden die geforderten Breiten von einer Mutterrolle heruntergeschnitten. Untersuchungen zeigten, dass die Tapedicke über die Tapebreite variieren kann. Schliffbilder in BILD 8 zeigen Poren (unten links) und eine undefinierte Faserverteilung (unten rechts). Hierfür muss der In-Situ Tapelegeprozess optimiert werden, um diese Materialinhomogenitäten zu kompensieren.

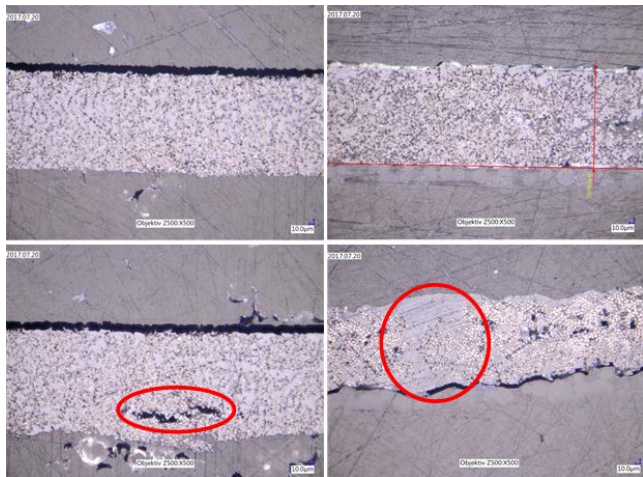


BILD 8. Qualität verschiedener Thermoplast Tapes

3.4. Prozess Monitoring und Online NDT

Die Tapelegeanlage beim DLR-BT bietet als eine der wenigen Anlagen die Möglichkeiten der ortsgebundenen Auswertung von Prozessdaten. Die Prozessdaten können an der jeweiligen Bauteilkoordinate ausgewertet werden. Der wichtigste Parameter des Tapelegeprozesses ist die Temperatur. Über eine Wärmebildkamera werden während des Prozesses die Temperatur vom Tape, Laminat und die Temperatur im Zwickel zwischen Tape und Lami-

nat aufgezeichnet. BILD 9 zeigt die über die Laminatdicke gemittelte Temperatur im Zwickel, die Control Temperature.

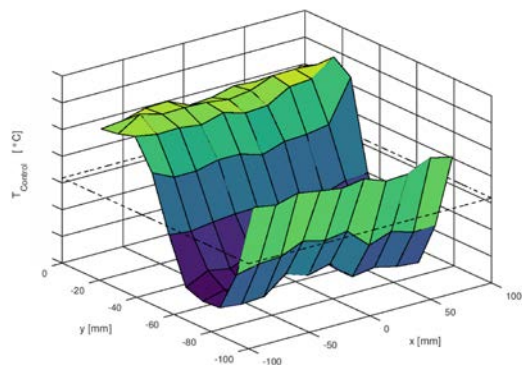


BILD 9. Gemittelte Verarbeitungstemperatur wird beispielhaft über Bereiche der Bauteil Geometrie geplottet

Über die Bauteilkoordinaten (x/y) wird die gemittelte Temperatur der Einzellagen aufgetragen. Erkennbar sind Temperaturschwankungen im Bereich des Anfahrts- und Abfahrtsweg und ein konstanter Temperaturbereich dazwischen. Bereiche, welche vom definierten Temperaturbereich abweichen, können so identifiziert werden. Hierdurch müssten bei der Bauteilprüfung ausgewählte Bereiche mittels NDT untersucht werden. Eine vollständige NDT-Untersuchung des Gesamtbauteils könnte entfallen.

4. KONZEPTBEWERTUNG

Insbesondere der Business Case zum Tail Cone zeigt das Potential der Thermoplast-Tapelege-Technologie. Wichtige Anforderungen an den Business Case sind die geringen Stückzahlen, günstige Materialkosten und effiziente Qualitätskontrolle. Die verschiedenen Thermoplastbauweisen bieten unterschiedliche Potentiale hinsichtlich Kosten. Die drei Konzepte werden mit einem generischen, duromeren Prepreg Konzept als Baseline verglichen.

CF-PPS dient als Material für die Thermoplastkonzepte. PPS ist bereits in der Luftfahrt im Einsatz und stellt eine günstige Alternative zu PEEK oder PEKK bei den geforderten Einsatztemperaturen dar.

Konzept 1 erlaubt das Arbeiten mit nur einem Tooling. Ebenfalls bietet die Integration der Versteifungselemente während des Wickelprozesses hohes Einsparpotential im Bereich der Lohnkosten. Das Prozess Monitoring kann weitere Kosten für spätere NDT-Untersuchungen reduzieren. Die Investition in Anlagen kann mit der flexiblen Nutzung der Anlage kompensiert werden.

Konzept 2 benötigt mindestens zwei Toolings. Eine Integration der Versteifungselemente in das Tooling bietet zusätzliches Einsparpotential. Die Herstellung der Preforms kann automatisiert erfolgen, sofern es sich für die geringen Stückzahlen amortisiert. Das Abdichten der Preforms mittels Vakuumsack für den VCT Prozess erfolgt noch manuell. Konzept 2 stellt eine gute Mischung zwischen Automatisierung und manueller Arbeit dar.

Konzept 3 bietet hohes Potential für große Stückzahlen. Für einen Pressprozess ist mit hohen Investitionen in Toolings zu rechnen. Mittels Thermoplast Schweißverfahren können Versteifungselemente angeschweißt werden. Ein Nieten oder Kleben wie bei duromeren Bauweisen ist nicht notwendig.

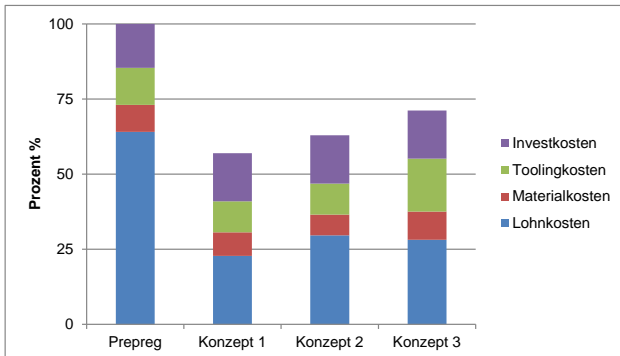


BILD 10. Vergleich der Kosten der unterschiedlichen Konzepte

Ein Vergleich der Konzepte untereinander zeigt, dass mittels In-Situ Tapelegen deutliche Einsparung gegenüber einem duromeren Prepreg-Prozess möglich sind. Ebenfalls wird das Potential gegenüber herkömmlichen Thermoplast-Prozessen deutlich. Der größte Benefit der automatisierten In-Situ Tapelege Technologie sind die Integration von Versteifungselementen und das Prozess Monitoring. Somit können aufwendige Prozesse wie das nachträgliche Fügen und NDT reduziert werden

5. AUSBLICK

Die bisherigen Arbeiten im Bereich des In-Situ Tapelegens dienen dazu, Möglichkeiten, Potentiale und Herausforderungen zu identifizieren. Die kommenden Schritte werden sich auf das Coupon-Level konzentrieren. Der Fokus liegt hier überwiegend auf der Prozessoptimierung u.a. mittels DoE. Weitere wichtige Punkte werden der Einfluss der Kristallinität und der schichtweisen Wärmeintrag sein. Neben praktischen Versuchen wird der Tapelegeprozess mit simulativen Ansätzen begleitet. Die Ergebnisse aus dem Prozess Monitoring und Online NDT werden mit den mechanischen Kennwerten verbunden, um weiteres Prozessverständnis aufzubauen. Darauf folgt die Skalierung des Prozesses auf einfach und doppelt gekrümmte Strukturen inklusive der Anbindung von Versteifungselementen.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

Ein Dank gilt an weitere Mitarbeiter vom DLR-BT in Stuttgart, Manuel Simone und Ashley Chadwick, ebenso an den Kollegen in Augsburg Mark Willmeroth.

Ebenfalls an die gute Zusammenarbeit im Rahmen von FFS mit den Kollegen Heinz Meister von Airbus D&S in Manching.

7. REFERENZEN

- [1] G. Kempe, L. Häberle: Vacuum consolidation technique as a cost effective manufacturing technology for continuous fibre reinforced thermoplastics. International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites, Gallipoli, Italy, 2003
- [2] M. Horn, R. Keck, M. Kaden: INFLUENCE OF PRODUCTION TECHNOLOGY ON THE CONSOLIDATION OF FIBRE REINFORCED HIGH PERFORMANCE THERMOPLASTICS. ECCM 14, Budapest, Hungary, 2010
- [3] M.Horn, A. Seitz, M. Schneider: Novel Tailored Skin Single Duct Concept for HLFC Fin Application. 7th EUCASS, Mailand, Italy, 2017
- [4] Kocian F.: Strukturelles Leitgitter mit thermoplastischen Leitschaufeln für Triebwerke, DLR Bauweisen-Kolloquium, Stuttgart, Deutschland, 2009
- [5] R. Keck, W. Maschunze, M. Kaden: DESIGN, ANALYSIS AND MANUFACTURING OF A THERMOPLASTIC UD CF-PEEK SLAT. 28th ICAS, Brisbane, Australia, 2012
- [6] Stelia Thermoplastic fuselage demonstrator: <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/thermoplastic-fuselage-demonstrator>; Juli 2017
- [7] DLR-BT: Wer schweißt, braucht keine Bolzen und spart Gewicht, JEC World 2017, <http://www.dlr.de/blogs/alle-blogs/Wer-schweisst-braucht-keine-Bolzen-und-spart-Gewicht.aspx/searchtagid-61487/>