Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Art des Dokuments: Abschlussbericht

Verfasser: **Dr. Klaus Edelmann**

Titel: **HyBLex – ASA Abschlussbericht**

Datum: **01.09.2025**

Berichtsumfang: 13 Seiten

HyBLex: Entwicklung von hoch- und tieftemperaturbeständigen Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffen zur kosteneffizienten Fertigung von hybriden Faserverbund-Metall-Bauweisen für zukünftige Leichtbau-Antriebskomponenten in extremen Umgebungsbedingungen

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

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

AIRBUS AEROSTRUCTURES	**Kennblatt:**

Titel: **HyBLex – ASA Abschlussbericht**

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Verbundbezeichnung:	HyBLex
Förderkennzeichen:	20T2105D
Vorhaben:	HyBLex
Vertragsdatum:	12.12.2022
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2023 – 31.12.2025

Zuwendungsempfänger:	Airbus Aerostructures GmbH
Dok-Nr.:	HyBLex - ASA Abschlussbericht
Datum:	29.02.2024
Verfasser:	Dr. Klaus Edelmann
Interne Auftrags-Nr:	01-0434937-DC-1Z
Project-Struktur-Plan-Nr:	T-S-00000125/10

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Zusammenfassung (Kurzübersicht und Ergebnis):

Nach dem Projektstart am 1. Jan 2023 sollten zunächst mit den Projektpartnern die Komponenten zur Validierung festgelegt werden. Aufgrund von dabei auftretenden Verzögerungen (MS1 und MS2; Bestimmung des Validierungsbauteiles & Validierung Strategie) fingen daher die Fertigungsarbeiten für die ASA mit ca. 4 Monaten Verspätung an. Es konnten trotzdem erste Ergebnisse bei der Komponentenherstellung generiert und das gewählte Fertigungsverfahren verifiziert werden. Außerdem wurde ein Konzept zur manuellen Tapeablage für die Preformherstellung entwickelt. In einem Workshop wurden erste wichtige Designfeatures für ein Bauteil auf Subkomponentenebene herausgearbeitet. Airbus Aerostructures stieg zum 01.06.2025 aus dem Projekt aus.

Stichworte: (Suchbegriffe) LuFo VI, Thermoplast, CFK, Core Fairing, Hydrostatisches Umformen, PEEK	Archivierungsempfehlung der Fachabteilung unter „Know-how“ – Aspekten (unabhängig von vertraglichen Vereinbarungen): 10 Jahre

	Projektleiter
Abteilung	KBZ4
Name	Dr. Klaus Edelmann
Datum	01.09.2025

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung ____ *4*

1.1 Wissenschaftliche/technische Ergebnisse ____ 4

1.2 Stand des Vorhabens ____ 4

1.3 Aussicht auf Erreichung der Ziele des Vorhabens ____ 4

1.4 Relevante Ergebnisse Dritter ____ 4

1.5 Änderungen in der Zielsetzung ____ Fehler! Textmarke nicht definiert.

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ____ 4

2. Technischer Bericht ____ *5*

2.1 HAP 1: Anforderungsprofil an hybride Leichbauweisen für den erweiterten Temperaturbereich ____ 5

2.2 HAP 3: Verarbeitungskonzepte für thermoplastische Tapes ____ 6

2.3 HAP 4: Verbindungstechnologien für hybride Metall-Faserverbundbauteile ____ 11

2.4 HAP 6: Exemplarische Umsetzung, Validierung und Transfer ____ 12

3. Veröffentlichungen, Vorträge ____ *13*

4. Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur ____ *13*

5. Liste der erstellten Dokumentation ____ *13*

1. Zusammenfassung

1.1 Wissenschaftliche/technische Ergebnisse

Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse.
Das Vorhaben wurde zum 01.01.2023 gestartet. Aufbauend auf den Ergebnissen aus dem ersten Halbjahr 2023, sind im vergangenen Jahr folgende Ergebnisse erzielt worden:

HAP 3: Verarbeitungskonzepte für thermoplastische Tapes

- Im AP3.2 wurde ein Konzept für ein „Pick & Place“ Ansatz erarbeitet und ein Lasten- und Pflichte-Dokument vorbereitet. Hier fehlen noch letzte Details bezüglich der Komplexität der abzulegenden Geometrie. Es wird nach Anbietern für die Implementierung der Ansätze gesucht.
- Im AP3.4 konnte das gewählte Fertigungsverfahren mit verringerten Prozesstemperaturen erfolgreich verifiziert werden.
- Im AP3.5 wurde ein erster Workshop zur Konstruktion einer Subkomponente durchgeführt.

HAP 4: Verbindungstechnologien für hybride Metall-Faserverbund Bauteile

- Im AP4.4 wurden Fortschritte in Form einer PFMEA, eines Riskregisters, sowie in der Ermittlung der KPIs gemacht.

HAP 6: Exemplarische Umsetzung, Validierung & Transfer

- Keine Aktivitäten in 2023

1.2 Stand des Vorhabens

Aufgrund der Erweiterung der Demonstratorbauteile um die Phase Units und der Rotorplatten wurde der Meilenstein 1 um ca. 4 Monate verzögert. Aufgrund dieser Verzögerung verschob sich auch der Beginn der Bestimmung des Einflusses des Fertigungsverfahrens (AP3.4, AP3.5), sowie alle weiteren darauf basierenden Arbeitspakete. Außerdem ist Airbus Aerostructures zum 30.06.2024 aus dem LuFo ausgestiegen. Laufende Arbeiten wurden zu einem übergabefähigem Stand zuende geführt.

1.3 Aussicht auf Erreichung der Ziele des Vorhabens

Alle, bis zum Austieg gesetzten, Projektziele wurden erreicht.

1.4 Relevante Ergebnisse Dritter

Es sind keine relevanten Ergebnisse Dritter bekannt geworden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Basierend auf einer regelmäßigen telefonischen Abstimmung der Projektpartner, auf strategisch-koordinativer als auch technischer Ebene, erfolgt eine enge Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern.

2. Technischer Bericht

2.1 HAP 1: Anforderungsprofil an hybride Leichbauweisen für den erweiterten Temperaturbereich

2.1.1 AP 1.2 Spezifikation der System- und Komponentenanforderung für den erweiterten Temperaturbereich

In einem Workshop mit Rolls Royce Deutschland und Rolls Royce Electrical wurden die Phase Unit und Rotorplatten als weitere Bauteile im Bereich der hybrid-elektrischen Antriebssysteme für CF-PEEK identifiziert. Hier wurden komponentenspezifische Anforderungsprofile unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Lasten für die Core Fairings, Phase Unit, so wie der Rotorplatten erstellt (s. Partnerbericht Rolls Royce Deutschland).

2.1.2 AP 1.3 Entwicklung der Validierungs- und Verifizierungsstrategie

Dieses AP wird mit Unterstützung durch Airbus Aerostructures hauptsächlich bei den Projektpartnern bearbeitet (s. Partnerbericht Rolls Royce Deutschland).

2.1.3 AP 1.4 Definition der Prozesskontrolle und Qualitätssicherung

Dieses AP wird mit Unterstützung durch Airbus Aerostructures hauptsächlich bei den Projektpartnern bearbeitet (s. Partnerbericht Rolls Royce Deutschland).

2.2 HAP 3: Verarbeitungskonzepte für thermoplastische Tapes

2.2.1 AP 3.1 Kontinuierliche Weiterentwicklung und Optimierung von thermoplastischen Tapes

Dieses AP wird hauptsächlich bei den Projektpartnern bearbeitet (s. Partnerbericht Teijin).

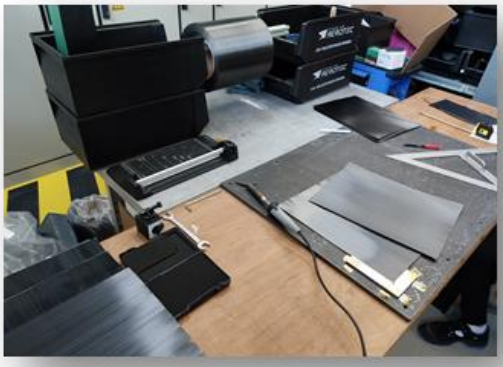
2.2.2 AP 3.2 Entwicklung einer automatisierten Tapeablage

Ein großes Augenmerk für alle CFRP-Fertigungsprozesse liegt auf dem Preforming. Insbesondere bei thermoplastischen Tapes erweist sich dies allerdings immer häufiger als große Herausforderung, da in gängigen AFP-Verfahren ein 12-24 Zoll breites Tape in schmale Streifen geschnitten wird (Slitting) und dann in einem sehr langsamen Prozess abgelegt wird. Aktuelle thermoplastische AFP-Verfahren erreichen Ablegegeschwindigkeiten von ca. 2 kg/h, während äquivalente Verfahren für Duroplastische Harze bis zu 27 kg/h erreichen können [1]. Diese große Differenz führt zu stark erhöhten Kosten für thermoplastische Harzsysteme. Um dem entgegenzuwirken soll ein Preformingsystem für thermoplastische Systeme entwickelt werden welches ähnliche oder sogar bessere Legegeschwindigkeiten als 30 kg/h erreicht.
Dazu soll im ersten Ansatz auf das Slitting verzichtet werden und durch einen „Pick & Place“ Prozess die volle Breite der Tapes ausgenutzt werden.
Solche Prozesse gibt es bereits für die Duroplast-Fertigung (RTM oder Autoklav) [2] für komplex geformte 3D Preforms. Allerdings gestaltet sich das Handling von entweder Dry-Fibre oder duroplastischem Prepreg deutlich einfacher als das von thermoplastischem Prepreg. Diese sind bei Raumtemperatur steif und können nicht drapiert werden [3]. Dies erschwert sowohl das Aufspannen auf eine Schneidevorrichtung als auch das Handling der einzelnen Plies. Diese Probleme können allerdings mit unterschiedlichen Spannmechanismen (Vakuum, Induzierte Spannung etc.) und gut konstruierten Greifern minimiert werden [4]. Auf einer 2-D Schneideanlage werden aus dem Tape passende Segmente ausgeschnitten und mithilfe eines Roboters via Vakuumgreifer aufgenommen. Anschließend werden die Zuschnitte auf einer Ablage hochpräzise positioniert und mit, im Greifer integrierten Sonotroden, via Ultraschallschweißverfahren punktgeschweißt. Dies ermöglich Zeiten von ca. 10s pro Ply (je nach Zuschnittgröße und Komplexität des Zuschnitts).
Mithilfe von intelligenten 2D-Zuschnitten können auch komplexere Geometrien ohne Faserwinkelabweichungen abgelegt werden und so auch der Verschnitt geringgehalten werden.

Eventuelle Verschnittabfälle können in kleingehäckselter Form mit einer gewissen Menge an beigemischtem Neumaterial als Spritzgussmasse weiterverwendet werden. Dieser Initiative wird als „Abfallfreie Produktion“ in LuFo VI-3 Projekt eKabKlima untersucht. In einem industrialisierten Prozess könnten die Preforms direkt auf ein Umformwerkzeug abgelegt werden während ein zweites Unterwerkzeug gerade in der hydrostatischen Presse ist. So kann die Rüstzeit auf ein Minimum reduziert werden und die Anlage ohne Probleme voll ausgelastet werden.
Für die ersten Fertigungsversuche, in denen einfache Platten hergestellt wurden, wurde aus Kostengründen das Handlegeverfahren mit einer Industrie-Lötspitze verwendet (siehe Abbildung 1).
Für die Implementierung dieser Ablegestrategien befindet sich die ASA zurzeit auf der Suche nach Anbietern.

Die Entwicklung der Strategien wurde intern durchgeführt.

Zeitplan: Durch die Mittelverschiebung wird die Entwicklung einer automatisierten Tapeablage parallel zu anderen APs laufen. Insbesondere mit AP 3.5 gibt es große Synergien.



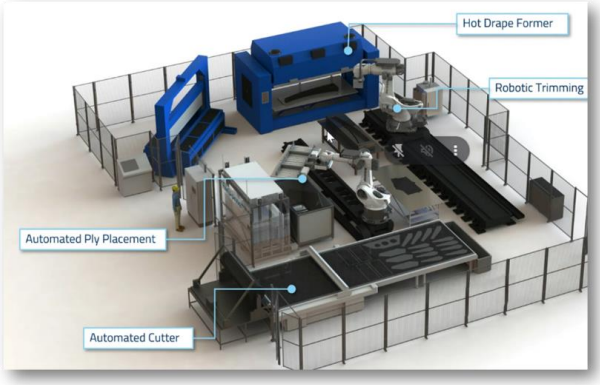


Abbildung 1: Handlegeverfahren und voll-automatisierte Pick & Place Fertigungszelle [2]

2.2.3 AP 3.4 Entwicklung von optimierten flächigen Pressformingsegmenten

Für dieses AP wurde nach der entwickelten Validierungs- und Verifizierungsstrategie von RRD in Zusammenarbeit mit RRD ein Auswahl an verschiedenen Lagenaufbauten in Plattenform mit einem festen Parametersatz hergestellt. Dieser Parametersatz wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, so wie einiger DSC-Analysen vom Rohmaterial ausgearbeitet.
Als Fertigungsverfahren wurde hier aufgrund der komplexen Geometrieanforderungen das „hydrostatische Pressen“ gewählt. Hierbei handelt es sich um ein neuartiges Fertigungsverfahren für thermoplastisch faserverstärkte Kunststoffe welches von der Fa. Siempelkamp im LuFo III Trumpf in Zusammenarbeit mit dem CTC entwickelt wurde.
Das Fertigungsverfahren wurde speziell für gekrümmte flächige (schalenförmige) Bauteile mit integrierten Versteifungselementen entwickelt. Es unterscheidet sich im wesentlichen in zwei Aspekten vom sehr verbeiteten Stamp Forming:
Zum einen ist lediglich das Unterwerkzeug formgebend (fest). Das Oberwerkzeug besteht aus einer dünnen Edelstahlmembran und einem dahinter befindlichem Ölkissen welches mit einem definierten Druck beaufschlagt werden kann (siehe Abbildung 2). Dieser Druck wirkt, im Gegensatz zu einem Stampformingprozess nicht nur in Pressenrichtung, sonderen überall orthogonal zur Oberfläche. Zum anderen wird das Halbzeug nicht in einem separaten Ofen über Schmelztemperatur gebracht, sondern im Werkzeug selber. Das Werkzeug durchläuft einen Temperaturzyklus mit definierten Heiz- und Abkühlraten und Haltephasen (siehe Abbildung 3).

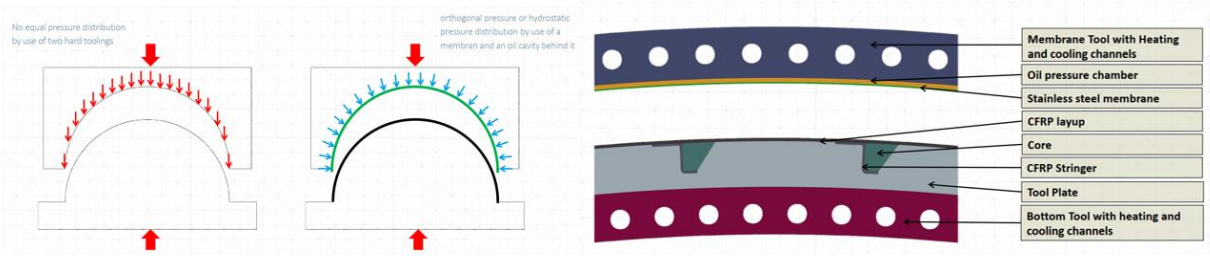


Abbildung 2: Konzept des hydrostatischen Pressens

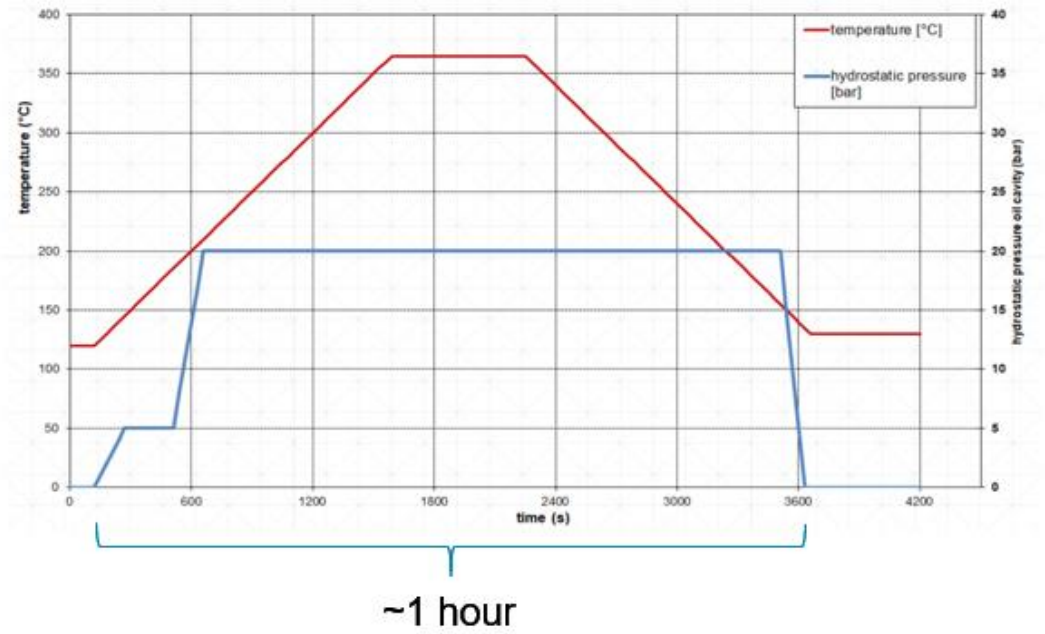


Abbildung 3: Beispiel einer Prozesskurve für das hydrostatische Pressen mit Druck (Blau) und Temperatur (Rot)

Der Zyklus ist vom thermoplastischen Autoklavprozess abgeleitet. Im Gegensatz dazu sind hier allerdings Prozesszeiten von ca. einer Stunde möglich [7]. Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht darin, dass beim hydrostatischen Pressen keinerlei Verbrauchsstoffe wie Trennfolien oder Dichtungsbänder benötigt werden.
Des Weiteren können durch Einleger im Werkzeug auch direkt Versteifungselemente wie zum Beispiel Stringer und Stiffener direkt mit an die Außenhaut konsolidiert werden (siehe Abbildung 4). Aufgrund dieser Aspekte wurde dieses Fertigungsverfahren für das Demonstratorbauteil „Core Fairing“ gewählt.

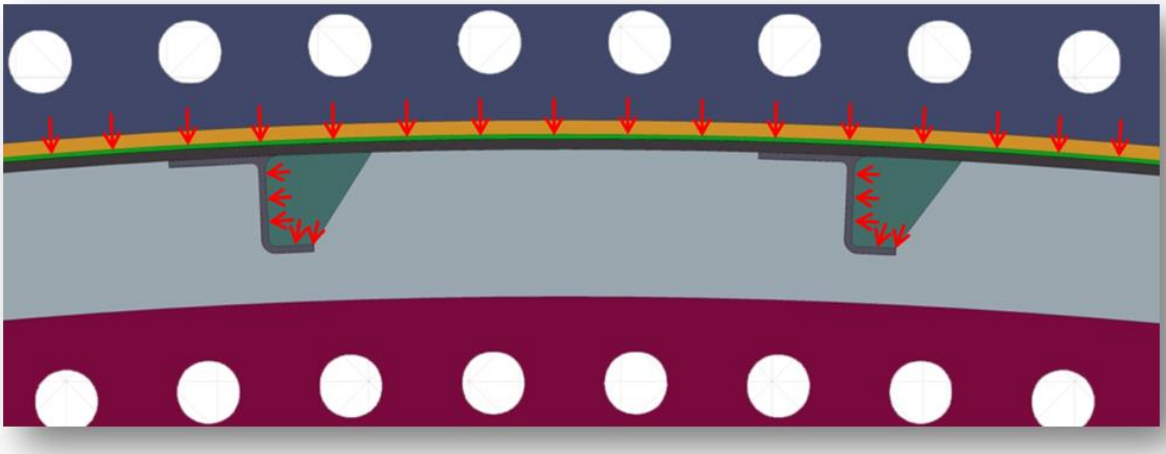


Abbildung 4: Gleichmäßige Druckverteilung auch auf Versteifungselmente durch Einleger

Aufgrund von technischen Limitationen können bei der Herstellung allerdings maximal 370°C erreicht werden. Dies hat mit Sicherheitsaspekten des verwendeten Thermoöls hinter der Edelstahlmembran zu tun. Die Verarbeitungstemperatur von PEEK liegt allerdings typischerweise bei ca. 390-400 °C. Daher galt es zu überprüfen ob eine Verarbeitung bei geringeren Temperaturen mit diesem Prozess möglich wäre. Die Begründung für die höheren Verarbeitungstemperaturen ist in der Regel ein „safety net“ für z. B. Transportzeiten aus dem Ofen in das Presswerkzeug.
Hierbei ist anzumerken, dass bei teilkristallinen Thermoplasten der Schmelzpunkt aus der Literatur nicht unbedingt den „Punkt“ kennzeichnet an dem der Kunststoff vollständig aufgeschmolzen ist, sondern eher

den Punkt an dem die größte Aktivität bei der Aufschmelzreaktion im Kunststoff vorhanden ist [8]. Das vollständige Aufschmelzen liegt bei einer etwas höheren Temperatur. Als Alternative zu dem aktuell verwendeten Thermoöl gäbe es noch ein weiteres Öl welches bis zu 400°C erhitzt werden kann. Allerdings kommt dieser erhöhte Temperaturbereich mit einigen Nachteilen in den Aspekten Sicherheit und Umweltverträglichkeit. Aus diesen Gründen liegt die Präferenz auf der Verarbeitung bei geringeren Temperaturen und umweltverträglicheren Ölen.

Das Herstellen der Platten verlief, aufgrund umfangreicher Vorbereitung durch die PFMEA, ohne nennenswerte Zwischenfälle.
Alle hergestellten Panels hatten jeweils drei Thermoelemente im Laminat. Diese Daten wurden vollständig aufgezeichnet und dienten der Verifikation des Erreichens der SOLL-Temperaturen über den Laminatquerschnitt (siehe Abbildung 5). Hier konnte sichergestellt werden, dass der Temperaturgradient bei Laminatstärken von ca. 2 mm vernachlässigbar klein ist. Mithilfe dieser Erkenntnis kann die Haltephase potentiell weiter verkürzt werden.

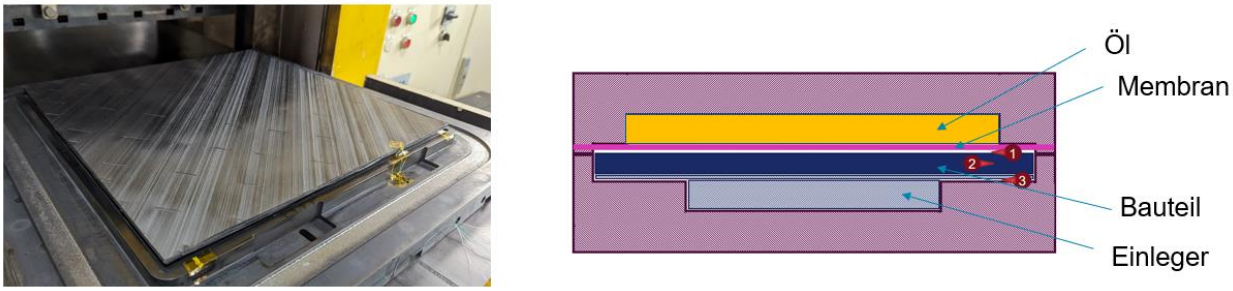


Abbildung 5: Messaufbau und Positionierung der Thermoleemente

NDT-Untersuchungen der Platten zeigen eine fehlerfreie „zero-porosity“ Konsolidierung. Da das Verfahren für Bauteile im Mantelstrombereich des Triebwerks verwendet werden soll muss des Weiteren eine hohe Güte der Oberfläche sichergestellt werden, da eine zu raue Oberfläche einen direkten Einfluss auf die Effizienz des Triebwerks hätte. Mittels des Tastschnittverfahrens wurden hier Oberflächenrauheiten von Ra=0,14 und RZ=0,95 im Durschschnitt erreicht (siehe Abbildung 6). Diese Werte entsprechen einer fein geschliffenen / geläppten Oberfläche und erfüllen die Anforderungen in vollem Umfang [9].

Abbildung 6: Beispiel für eine Rauheitsmessung via Tastschnittverfahren

Des Weiteren wurden bei einigen Platten Stichprobenartig die Dicken gemessen (siehe Abbildung 7). Hier gibt es lediglich in den Randbereichen Abweichungen > 0,2mm. Diese Randeffekte sind aus vorherigen Versuchen in diesem Verfahren bereits bekannt – beziehen sich aber lediglich auf einen schmalen Bereich am Bauteilrand. Unter Berücksichtigung eines ohnehin geplanten, nachgestellten Besäumungsprozesses können diese Randeffekte erstmal vernachlässigt werden. Alle weiteren Messwerte wiesen lediglich geringe Abweichungen vom Soll bei sehr niedriger Standardabweichung vor.

Proben-#		
6_1	2,16	2,21
6_2	2,23	2,21
6_3	2,28	2,19
6_4	2,23	2,24
6_5	2,26	2,22
6_6	2,26	2,28
6_7	2,34	2,26
6_8	2,26	2,22
6_9	2,26	2,21
6_10	2,25	2,21
6_11	2,26	2,19
6_12	2,21	2,28
Deviation	0,04	0,03
Durchschnitt	2,25	2,23

Proben-#		
7_1	2,28	2,27
7_2	2,31	2,31
7_3	2,26	2,27
7_4	2,28	2,27
7_5	2,32	2,29
7_6	2,29	2,32
7_7	2,33	2,32
7_8	2,28	2,3
7_9	2,29	2,28
7_10	2,29	2,28
7_11	2,29	2,32
7_12	2,24	2,31
Deviation	0,02	0,02
Durchschnitt	2,29	2,30

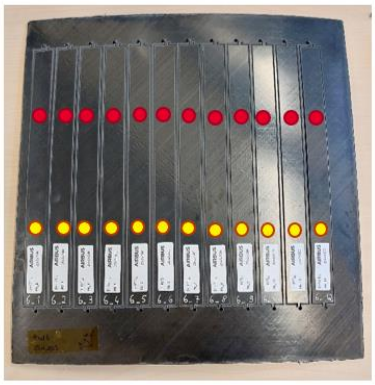


Abbildung 7: Dickenmessung bei Testpanel

Aus den Platten wurden im Anschluss auf einer Wasserstrahlanlage Probegeometrien ausgeschnitten. Diese werden für sogenannte „Back to Back“ Tests benötigt. Hier werden Probekörper unter verschiedenen Temperaturen und Auslagerungen mechanisch getestet und mit bereits bekannten Ergebnissen, aus im Autoklav herstellten Proben, verglichen. Mit diesen Ergebnissen kann nun ein Verfahrensspezifischer „Knock-Down“-Faktor für die Konstruktion ermittelt werden.
Beim Ausschneiden der Probekörper via Wassertrahlschneiden ist es allerdings zu leichten Ausrissen der untersten Lage gekommen. Die somit ausgeschnitten Probekörper wurden von Rolls Royce abgelehnt für die Ermittlung des Knock-Down-Faktors. Eine Weiterverwendung für Hochtemperaturtests ist jedoch weiterhin möglich. Allerdings müssen beim nächsten Pressentermin die Platten für die Back to Back Tests erneut gepresst werden. Um ein erneutes Ausreißen der untersten Lage zu vermeiden wird das LZS mit einer, speziell für Probegeometrien eingerichteten Anlage, ausschneiden.

Zur Ermittlung eines robusten Prozessfensters für das hydrostatische Pressen wurde eine statistische Versuchsplannung (Design of Experiments, DoE) durchgeführt. Der randomisierte Versuchsplan umfasste 13 Versuchspunkte zur systematischen Untersuchung der Prozessparameter- Dazu wurde ein weiterer Plan mit fünf zusätzlichen Versuchen zur Abbildung prozesstechnischer Grenzfälle, wie dem Ausfall der Haltezeit oder einer ungeplanten Prozessunterbrechung erstellt. Die Bauteile aus diesen Grenzfällen dienen als Grundlage für zukünftige „Effect of Defect“-Untersuchungen, um die Auswirkungen von Prozessabweichungen quantifizieren zu können. Die zerstörungsfreie Prüfung mittels Ultraschall (C-Scan) zeigte bei allen 13 Bauteilen des Kernversuchsplans eine defektfreie Konsolidierung. Auf Basis dieser Ergebnisse konnte ein stabiler Parametersatz für das weitere Vorgehen und die zukünftige Bauteilfertigung abgeleitet und validiert werden.

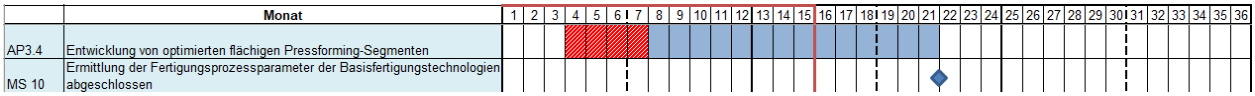
Die Untersuchung der prozesstechnischen Grenzfälle lieferte ebenfalls wichtige Erkenntnisse zur Prozessstabilität. Eine qualitative Abweichung zeigte sich ausschließlich beim vorzeitigen Öffnen des Werkzeugs unter hoher Temperatur. Hierbei wies die Matrix ein stark adhäsives Verhalten auf, was zu Matrixanhaftungen an der verwendeten Membran und zu Oberflächenfehlern am Bauteil führte. Die übrigen vier Grenzfälle zeigten in der qualitativen Bewertung keine signifikanten Unterschiede zu den Bauteilen aus dem Kernversuchsplan. Dieses Ergebnis unterstreicht die hohe Robustheit des untersuchten Pressverfahrens gegenüber potenziellen Prozessschwankungen.

Zur Validierung des etablierten Prozesses wurden aus den Bauteilen der DoE-Reihe Probekörper für eine umfassende mechanische Charakterisierung entnommen. Das von Rolls Royce durchgeführte Prüfprogramm umfasste Zug-, Druck-, Biege- und Scherversuche, einschließlich der Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit (ILS). Die vorläufigen Ergebnisse bestätigen durchgängig sehr gute mechanische Kennwerte der hergestellten Laminate, wobei eine detaillierte Auswertung dem separaten Partnerbericht zu entnehmen ist. Auf Basis dieser positiven Validierung kann der ermittelte Parametersatz für alle nachfolgenden Fertigungsschritte, einschließlich der Herstellung des finalen

Demonstratorbauteils, verwendet werden. Damit ist der Meilenstein MS 10 „Ermittlung der Fertigungsprozessparameter der Basisfertungstechnologien abgeschlossen“ erreicht.

Die Zusammenarbeit fand hier mit Siempelkamp (Bereitstellung der Anlage, sowie des Werkzeugs) und dem CTC (Legen der Preforms, so wie technische Unterstützung vor Ort) statt. Das Material (UD CF-PEEK) wurde von Teijin gestellt.

Zeitplan: Trotz eines verzögerten Starts dieses APs von ca. 4 Monaten durch MS1 und MS2 wurde MS 10 bereits vor dem Zeitplan erreicht:



UA: Siempelkamp (70k€), CTC (20k€)

2.2.4 AP 3.5 Entwicklung von Fertigungsverfahren für komplexe Strukturen

In AP 3.4 wurden einige Baselines für 2-D Geometrien in dem gewählten Fertigungsverfahren ermittelt. Das Core-Fairing beinhaltet allerdings herausfordernde 3-Dimensionale Geometrien. Um hier eine Baseline für die Konstruktionsdetails des finalen CFRP-Core-Fairing-Designs zu ermitteln wurde ein Workshop mit dem Konsortium durchgeführt um im ersten Ansatz potentiell und notwendige geometrische Features des Core Fairings auf ein kleineres Bauteil abzubilden. Dabei wurden folgende Details herausgearbeitet:

- Doppelte Krümmung: Zylindrisch (Durchmesser A) - konisch – zylindrisch (Durchmesser B)
- Verschiedene Versteifungselemente (in aufsteigender Komplexität).
    - Pictureframe
    - „I“-Stiffener
    - „L“-Stiffener
    - „Z“-Stiffener
    - „Ω“-Profil
- Leading Edge Radius

Mithilfe dieser Features soll in einem Folgeworkshop ein Schikanebauteil konstruiert werden und ein Versuchsplan mit diesen Bauteilen erstellt werden.
Mit den Ergebnissen aus diesen Versuchen wird dann eine Beurteilung für den (finanziellen) Aufwand dieser Features aufgestellt. Mit dieser Beurteilung kann das finale Bauteil (das Corefairing) dann so effizient wie möglich konstruiert werden. Häufig werden in der Konstruktion Designfeatures eingebracht welche nur sehr schwer zu fertigen sind. Dies führt in der Regel zu sehr hohen Zeit- und Energieverbräuchen und somit auch zu hohen Kosten.

Die Zusammenarbeit fand hier in einem Workshop mit allen Projektpartnern und Siempelkamp statt.

Zeitplan: Der Start von diesem AP wurde ebenfalls durch die 4 Monate Verzögerung von MS1 und MS2 beeinflusst. Nach aktuellem Stand ist es nicht absehbar, ob dieser verzögerte Start einen Einfluss auf die Erreichung von MS11 haben wird.

2.3 HAP 4: Verbindungstechnologien für hybride Metall-Faserverbundbauteile

2.3.1 AP 4.2 Entwicklung von Verbindungstechnologien für extreme Umgebungsbedingungen

Dieses AP wird bei den Projektpartnern bearbeitet (s. Partnerberichte).

2.3.2 AP 4.4 Erarbeitung einer Industrialisierungsstrategie

In enger Zusammenarbeit mit RRD wurde eine umfangreiche PFMEA für das Tapelegen, so wie das hydrostatische Pressen mit insgesamt über 60 einzelnen Punkten erstellt. Aufgrund dieser Analyse wurde eine realisitische Herangehensweise an die Planung gewählt, und die ersten Fertigungsversuche konnten fehlerfrei abgeschlossen werden.
Insbesondere die kritischen Fehler aus den Bereichen „Rüsten“, „Eintrennen“ und „Parameteraufzeichnung“ konnten durch Vorbereitungen direkt mitigiert werden.
Des Weiteren wurde ein Risk Register, so wie ein Prozesskontrollplan erstellt und Key Process Indicators ermittelt. Dies ist nicht nur eine Basis für höhere TRLs sondern auch eine Grundvoraussetzung für die Aufplanung eines fehlerfreien Prozesses.

Im Zuge der DoE-Studie wurde außerdem zur Steigerung der Prozesseffizienz ein zweites, identisches Presswerkzeug gefertigt, um das Rüsten eines Werkzeugs parallel zum laufenden Presszyklus des anderen zu ermöglichen. Der Rüstprozess ist von maßgeblicher Bedeutung, da eine präzise Vorbereitung sowohl die endgültige Bauteilqualität direkt beeinflusst als auch einen entscheidenden Beitrag zur Anlagensicherheit leistet, um Prozessfehler wie Leckagen zu vermeiden (Als klarer Fehlerpunkt in PFMEA identifiziert). Durch die Implementierung dieses Zwei-Werkzeug-Betriebs konnte der zeitliche Aufwand pro Bauteil nahezu halbiert werden. Für eine wirtschaftliche Serienfertigung wird dieses Vorgehen daher als unverzichtbar bewertet.

Zeitplan: Hier wurden einige Arbeiten vor geplantem Start des APs durchgeführt um ein „Gerüst“ für die Entwicklung des Fertigungsverfahrens zu bieten. Die Erreichung von MS13 wird dadurch nicht beeinflusst.

2.4 HAP 6: Exemplarische Umsetzung, Validierung und Transfer

Im HAP 6 fanden bis zum Austritt aus dem Projekt gemäß Balkenplan keine Arbeiten statt

3. Veröffentlichungen, Vorträge

Keine

4. Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur

[1] Zenker, Thomas, *Einfluss prozessspezifischer Designparameter des Thermoplastischen Automated Fiber Placements auf die Bauteilqualität in Abhängigkeit der Prozesskette,* Dissertation TU München, 2022, [Online] Verfügbar unter: https://mediatum.ub.tum.de/doc/1634382/1634382.pdf

[2] *Airborne introduces Automated Preforming by pick and weld* [Online] Verfügbar unter: https://www.airborne.com/airborne-introduces-automated-preforming-by-pick-and-weld/ Zugriff am: 26.04.24

[3] Lengsfeld, Hauke et al., *Faserverbundwerkstoffe: Prepregs und ihre Verarbeitung,* 2. Auflage München, Hanser Verlag, 2020

[4] Kühnel, M. et al., *AUTOMATISIERTES ENDKONTURNAHES PREFORMING CARBONFASER-VERSTÄRKTER THERMOPLASTE MITTELS ROBOTISCHER HALBZEUGABLAGE,* Veröffentlichung DLR, [Online] Verfügbar unter: https://www.dglr.de/publikationen/2015/340052.pdf

[5] *Automated preforming: Intelligent automation in pick-and-place systems* [Online] Verfügbar unter: https://www.compositesworld.com/articles/automated-preforming-intelligent-automation-in-pick-and-place-systems Zugriff am 22.04.2024

[6] *Automated Preforming, Part 1: Numbers and Landscape* [Online] Verfügbar unter: https://www.compositesworld.com/articles/automated-preforming-the-numbers-and-landscape Zugriff am 22.04.24

[7] *Hydrostatic membrane consolidation: Skin-stringer panels in 60 minutes* [Online] Verfügbar unter: https://www.compositesworld.com/articles/hydrostatic-membrane-consolidation-skin-stringer-panels-in-60-minutes- Zugriff am 18.04.2024

[8] Ehrenstein, Gottfried-Wilhelm, *THERMISCHE ANALYSE Brandprüfung, Wärme- und Temperaturleitfähigkeit, DSC, DMA, TMA,* 1. Auflage München, Hanser Verlag, 2020

[9] Fischer, Ulrich et al., *Tabellenbuch Metall,* 44. Auflage Haan-Gruiten, Europa Lehrmittel, 2008

5. Liste der erstellten Dokumentation

Im Berichtszeitraum wurden neben den Versuchsdokumenten keine weiteren Dokumente im offiziellen Ablagesystem erzeugt und abgelegt.