

Förderung im Rahmen der
Luftfahrtforschung und -technologie LuFo V – 3. Call (2018 – 2023)

Abschlussbericht

Entwicklung und Validierung einer integralen Tragflügelstruktur für die Allgemeine Luftfahrt

im Verbund

Hydrotube

„Weiterentwicklung von bedruckbaren Röhrentanks als
strukturintegriertes System zum Zweck der
Druckwasserstoffspeicherung in Tragflügeln“

LUFOV-3-100317119 / FKZ 20W1716C

Laufzeit: 01.04.2019 – 31.12.2023

Jan. 2024

Gefördert durch das



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

COTESA GmbH
Bahnhofstr. 67
D-09648 Mittweida



Berichtersteller:
Unterschrift:

Dipl. Ing. Patrik Schulz

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	5
1. Zusammenfassung	6
1.1 Zusammenfassung des Projekts	6
1.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	6
1.3 Projektstrukturplan	7
2. Technischer Bericht	8
HAP 1 – Flugzeugvorentwurf	8
AP 1.5 – Masseabschätzung	8
HAP 2 – Tragflügelentwurf	9
AP 2.1 - Strukturentwurf und FEM-Optimierung	9
AP 2.9 - Materialauswahl und Dimensionierung WingBox	11
AP 2.10 - Bauweisenentwicklung für integrale Wingbox	13
AP 2.11 - Integration der Tankröhren	15
AP 2.12 - Entwicklung der Formwerkzeuge Wingbox	17
AP 2.15 - Fertigung Flügelrohbau	22
HAP 4 – Systemtests	28
AP 4.2 – Gesamtflügeltests	28
3. Veröffentlichungen & Vorträge	29

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Projektstrukturplan (PSP)</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 2: Herstellung des Tubestruct Flügels</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 3: Tubestruct Flügel mit applizierten DMS für dynamische Tests</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 4: Eigenschaften des ausgewählten Prepregs und Schaumkerns</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 5: Bauweise im differentiellen Konzept.....</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 6: Laminierung von Verdickungen und Bandagen auf Tankröhren.....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 7: Stahlplatte für Positionen (Positionierungshilfe).....</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 8: Vermessung der Tankröhrenpositionen mittel Lehre</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 9: Übermaß 3D-Messungen</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 10: Einteiliges Urmodel und 3-teiliges Urmodel.....</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 11: Infusion von OFS & UFS Formwerkzeug</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 12: Verstärkungsrippen für die Formwerkzeug UFS.....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 13: Nachhärtung der UFS- und OFS-Formwerkzeuge.....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 14: Oberfläche des OFS-Formwerkzeugs.....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 15: Positionierungshilfe im Formwerkzeug UFS.....</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 16: OFS laminieren</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 17: Vakuumaufbau des UFS mit Tankröhren</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 18: Kontrollieren der Toleranz.....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 19: Klebertest</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 20: Klebspalt Ermittlung mittels Bauschaum</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 21: Klebeapplikation durch Zeit.....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 22: Verklebung des Tankröhre H-2 mit der UFS</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 23: Tankröhre auf die UFS geklebt</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 24: Verklebung der OFS.....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 25: Flügel im Auslieferungszustand.....</i>	<i>28</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Inhalte von AP 1.5</i>	8
<i>Tabelle 2: Massenabschätzung der Flügelstruktur</i>	9
<i>Tabelle 3: Inhalte von AP 2.1</i>	9
<i>Tabelle 4: Inhalte von AP 2.9</i>	11
<i>Tabelle 5: Inhalte von AP 2.10</i>	13
<i>Tabelle 6: Inhalte von AP 2.11</i>	15
<i>Tabelle 7: Inhalte von AP 2.12</i>	17
<i>Tabelle 8: Inhalte von AP 2.15</i>	22
<i>Tabelle 9: Inhalte von AP 4.2</i>	28

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket/ Arbeitsschritt
CFK	kohlefaserverstärkter Kunststoff
CTS	COTESA GmbH
DMS	Dehnungsmessstreifen
EEOP	Engineering End of Part
HAP	Hauptarbeitspaket
MS	Meilenstein
OEM	Original Equipment Manufacturer / Originalausrüstungshersteller
OFS	Obere Flügelschale
PM	Projektmanagement
PSP	Projektstrukturplan
SST	Schnittstelle
TM	Technisches Personal
UA	Unterauftrag
UD	Unidirektional
UFS	Untere Flügelschale
WM	Wissenschaftliches Personal

1. Zusammenfassung

1.1 Zusammenfassung des Projekts

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die durch COTESA GmbH (CTS), im Zeitraum vom 01.04.2019 bis 31.12.2023 im Rahmen des Verbundprojektes Hydrotube, bearbeiteten Arbeitspakete zusammen. Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines Flügels für ein Kleinflugzeug mit integrierten Tankröhren für Wasserstoff und das dazugehörige Fertigungsverfahren in Prepreg-Autoklav Technologie.

1.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Als Ergebnis des gemeinsamen Projekts hat COTESA das Herstellungsverfahren für die integrale Flügelstruktur und die Tankröhren entwickelt und validiert. Als Ausgangsvoraussetzung für die flugzeugmechanische Auslegung und Lastermittlung wurde eine Massenabschätzung der gesamten Flügelstruktur einschließlich der Obere Flügelschale (OFS), der Untere Flügelschale (UFS), der Tankröhren, der Gurte und aller erforderlichen Strukturelemente vorgenommen. Als Ergebnis der Strukturauslegung wurden die notwendigen Randbedingungen für die Konzeption und Fertigungsauslegung der Flügelschale und der Tankröhre optimiert. Ergebnisse aus dem vorausgehenden Forschungsvorhaben "Tubestruct" wurde als Referenz für die weitere Entwicklung herangezogen. Anschließend wurde die voll definierte Struktur der WingBox mit dem geeigneten Material- und Lagenaufbau fertigungstechnisch umgesetzt.

Die entsprechenden Urmodelle wurden für die Prototypenfertigung hergestellt. Die Formwerkzeug Untere Flügelschale (UFS) wurde in einem Stück auf einem durchgehenden Urmodell UFS hergestellt. Die Bauweise wurde für die Realisierung der WingBox mit dem Fokus auf die Laminatfertigung der beiden Flügelschalen so entwickelt, dass die Laminat-Formwerkzeug als Aushärtewerkzeug für die integrale Fertigung genutzt werden kann. Dazu wurden die UFS & OFS separat ausgehärtet und anschließend mit den Tankröhren verklebt. Darüber hinaus wurden die Tankröhren mit Hilfe einer CNC-gelaserten Stahlplatte präzise in das UFS positioniert und integriert. Eine quadratische Welle sorgt für die exakte Ausrichtung der einzelnen Tankröhren und ermöglicht millimetergenaue Anpassungen. Anschließend wurden die Tankröhren mit dem UFS verklebt und gemeinsam auf die Helling transportiert. Dann wird die OFS ebenfalls mit Kleber ähnlich verklebt. Der Hauptgrund für die Verwendung der Helling besteht darin, dass sie Platz für den Anschluss an die Nasenleiste und für die Installation der Transportvorrichtung bietet.

COTESA hat schließlich in enger Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern die integralen Flügelstrukturen mit der Integration der Wasserstofftankröhren erfolgreich hergestellt und geliefert.

1.3 Projektstrukturplan

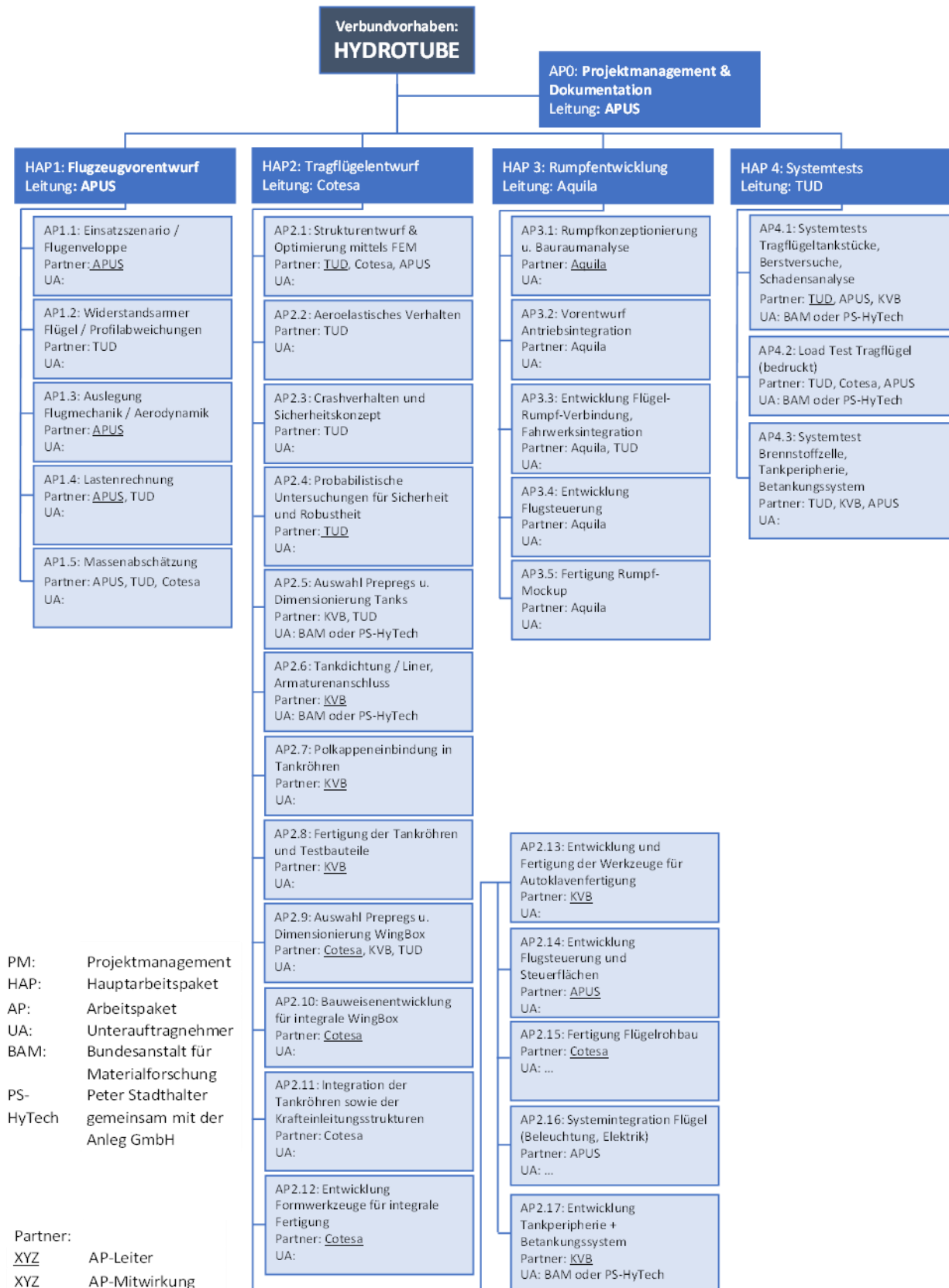


Abbildung 1: Projektstrukturplan (PSP)

2. Technischer Bericht

Im folgenden Kapitel wird nur auf jene Arbeitspakete mit Beteiligung von COTESA eingegangen.

HAP 1 – Flugzeugvorentwurf

AP 1.5 – Masseabschätzung

Die Arbeitsinhalte von AP1.5 sind in *Tabelle 1* zusammen mit dem planmäßigen Bearbeitungszeitraum und den beteiligten Projektpartnern aufgeführt.

Tabelle 1: Inhalte von AP 1.5

Arbeitspakettitel: Massenabschätzung	AP-Nummer: AP1.5
Beteiligte Partner: APUS (AP-Führer), COTESA, TUD-ILR	Laufzeit: M4 – M21
Ziele des AP:	
Ziel des Arbeitspakets ist die möglichst genaue Massenabschätzung und Massenverteilung im Flugzeug aller struktureller Massen sowie Systemkomponenten für deren jeweilige Detailauslegung. Da hierfür deren Gestaltung sowie Wandstärken bekannt sein müssen handelt es sich um einen iterativen Prozess. Zu Sicherstellung der Ergebnisse bringen die TUD sowie COTESA ihr jeweiliges Fachwissen aus Strukturentwurf und –optimierung sowie Fertigung von Faserverbundwerkstoffen mit ein.	
Ergebnisse des AP:	
Als Ergebnis des Arbeitspaketes wird eine möglichst exakte Massenabschätzung mit einer genauen Massenverteilung über das Flugzeug erwartet, die notwendig für den flugmechanischen Flugzeugentwurf sowie die Lastbestimmung ist.	
Arbeitsschritte, Schnittstellen, Risiken und Ressourcenplanung des AP	
In AP1.5 erfolgt eine iterative Masseberechnung unter Berücksichtigung der Einflüsse von Bauweisen und Auslegung der Einzelkomponenten sowie Randbedingungen aus Einsatzszenario	
Dieses Arbeitspaket ist sowohl von den Flugleistungen aus AP1.3 abhängig sowie auch von der Strukturauslegung in Hauptarbeitspaket 2. Gleichzeitig ist die Massenabschätzung notwendig für den flugmechanischen Entwurf in AP1.3 und die Lastenrechnung in AP 1.4. Ein kontinuierlicher Austausch zwischen den Arbeitspaketpartnern ist notwendig um die Massen- und Schwerpunkte der Einzelkomponenten zu erfassen.	
Ein Risiko besteht in der zu geringen Abschätzung der Massen. Dies führt zu schlechteren tatsächlichen Flugleistungen als eventuell erforderlich. Für die direkte Durchführung von HYDROTUBE spielt dies nur eine zweitrangige Rolle, da kein vollständig entwickeltes Flugzeug das Ziel ist. Ein Test der Tragflügelstruktur und Systemkomponenten können trotzdem erfolgen.	

Im Rahmen dieses Arbeitspakets lieferte COTESA den notwendigen Input für die Massenabschätzung im Hinblick auf die einzelnen Schichtdicken und Fertigungsrandbedingungen, die in der Folge Einfluss auf die Querschnitte und die Flügelmasse haben. *Tabelle 2* zeigt die Gesamtabmessungen und die geschätzte Masse der Flügelstruktur einschließlich der beiden Flügelshalen (UFS & OFS), des Schaumkerns, der Tankröhren, der Gurte und aller für die endgültige Struktur erforderlichen Elemente. Die Masse wird anhand des Tubestruct-Modells geschätzt und auf die erforderlichen Abmessungen skaliert. Hierzu gehören insbesondere empirische Mindestabstände für eine Vakuumaufbau, maximale Gurtquerschnitte und zu berücksichtigende Toleranzen, die ggf. kompensiert werden müssen.

Tabelle 2: Massenabschätzung der Flügelstruktur

	Tubestruct	Skalierungsfaktor	Demonstrator
Länge [mm]	2200	4,09	9000
Breite [mm]	433,33	3,34	1448
Gesamtmasse Struktur [kg]			406

Die Schaumdichte und das Faserflächengewicht des verwendeten Materials beeinflussen das Gewicht maßgeblich, da sich der globale Lagenaufbau weitgehend festgesetzt hat. Ein weiterer Einfluss ergibt sich aus dem erzielbaren Faservolumengehalt bei gleichem Faserflächengewicht. Im Rahmen der Massenabschätzung lieferte COTESA fortlaufend den erforderlichen Input in Form von Materialeigenschaften, Testergebnissen und möglichen Bauweisen. Zusätzlich zur Flügelstruktur betrifft dies insbesondere die Verbindungselemente, die allmählich definiert werden und ebenfalls in diese Berechnung einbezogen werden.

HAP 2 – Tragflügelentwurf

AP 2.1 - Strukturentwurf und FEM-Optimierung

Die Arbeitsinhalte von AP2.1 sind in *Tabelle 3* zusammen mit dem planmäßigen Bearbeitungszeitraum und den beteiligten Projektpartnern aufgeführt.

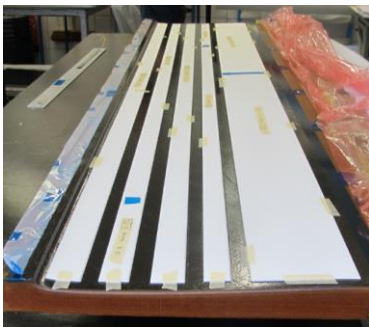
Tabelle 3: Inhalte von AP 2.1

Arbeitspakettitel: Strukturentwurf und FEM-Optimierung	AP-Nummer: AP2.1
Beteiligte Partner: TUD-ILR (AP-Führer), APUS, COTESA	Laufzeit: M1 – M19
Ziele des AP:	
Ziel des Arbeitspaketes ist ein umfassender Strukturentwurf des Gesamtflügels als Basis die fertigungstechnische Auslegung der WingBox sowie der Tankröhren. Die Optimierung der Struktur basiert auf Ergebnissen aus TUBESTRUCT H2.	
Ergebnisse des AP:	
Als Ergebnis der Strukturauslegung werden die notwendigen Randbedingungen für die Konzeptionierung und fertigungstechnischen Auslegung des Flügels (AP2.9) sowie der Tankröhren (AP2.5) erwartet.	
Arbeitsschritte, Schnittstellen, Risiken und Ressourcenplanung des AP	
Nach Abbildung der Flügelgesamtstruktur erfolgt die Definition lokaler Geometrien als Resultat von Optimierungsberechnungen, Sensitivitätsuntersuchungen und fertigungstechnischen als auch konstruktiven Aspekten. Nach Durchführen von Belastungsrechnungen werden Vorgaben für die Auslegung der Komponenten Flügel und Tank bereitgestellt.	
AP2.1 bildet die Grundlage für alle im HAP2 angesiedelten Arbeiten. Weiterhin stellt AP2.1 die Schnittstelle zwischen der Realisierung der integralen Tragflügelstruktur sowie der Masseabschätzung in AP1.5 dar, welche in einem iterativen Prozess zur Gesamtauslegung beiträgt. COTESA beteiligt sich neben APUS und federführend der TUD am Strukturentwurf um frühzeitig fertigungstechnische Aspekte einzubringen.	
Als grundlegenden Arbeitspunkt haben Verzögerungen bzw. Fehler im Strukturentwurf weitreichende Bedeutung für die Realisierung des Gesamtprojektes. Aufbauend auf den Ergebnissen aus TUBESTRUCT H2 und dem multidisziplinären Ansatz aus Strukturidealisation und FEM-Optimierung durch die TUD sowie die Einbringung von fertigungstechnischem Know-how seitens COTESA wird das Risiko reduziert.	

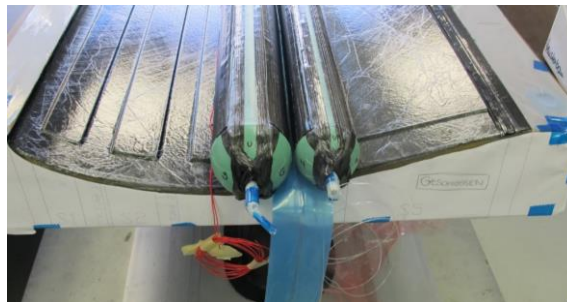
Die mechanischen Kennwerte wurden geschätzt und anhand von Datenblattwerten ermittelt, und die Fertigungstechnische Rahmenbedingungen dienten als Grundlage für den Strukturentwurf.

Cotesa fertigte ein maßstabsgetreues (3:1) Mockup und simulierte mit „Tubestruct“ das erstellte Montagekonzept. In diesem Mockup wurden beispielsweise Flügelschalenlaminat, die Schaumkernintegration und der gemeinsame Aushärtungsprozess mit den Tankröhre getestet, wie in *Abbildung 2* dargestellt. Dadurch werden der Laminierplan, die Verstärkung der Flügelschale, die Hinterkantenstruktur, die Klebeflächen und die Absatzgeometrie definiert.

Integration von
Schaumkernen



Integration Tankröhren



Assemblykonzept

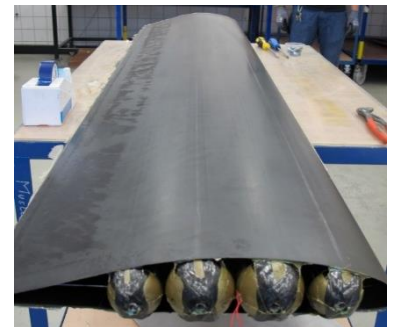


Abbildung 2: Herstellung des Tubestruct Flügels

Als weiteres Ziel bei der Erstellung dieses Mockups wurde es auch dynamisch getestet, um Daten zur Bestätigung der FE-Simulation zu sammeln. *Abbildung 3* zeigt den Tubestruct-Flügel mit appliziertem Dehnungsmessstreifen (DMS) für den dynamischen Test. Das Mock-up wurde nach dem dynamischen Test zur Demonstration in kleinere Abschnitte zerlegt. Obwohl die Herstellung des Mockups vergleichbare aufwändige Prozesse erforderte, wie die Herstellung eines maßstabsgetreuen Prototyps. Die wirtschaftliche Betrachtung in der Anfangsphase des Strukturentwurfs lieferte somit wesentliche Informationen und bildete eine Grundlage für die weitere Entwicklung.

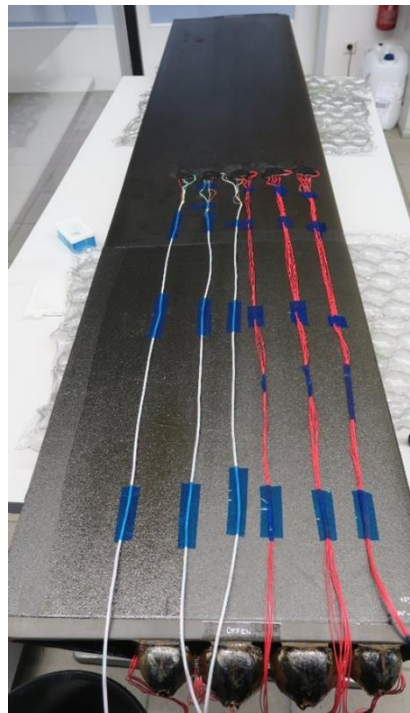


Abbildung 3: Tubestruct Flügel mit applizierten DMS für dynamische Tests

AP 2.9 - Materialauswahl und Dimensionierung WingBox

Die Arbeitsinhalte von AP2.9 sind in *Tabelle 4* zusammen mit dem planmäßigen Bearbeitungszeitraum und den beteiligten Projektpartnern aufgeführt.

Tabelle 4: Inhalte von AP 2.9

Arbeitspakettitel: Materialauswahl und Dimensionierung WingBox	AP-Nummer: AP2.9
Beteiligte Partner: TUD-ILR, COTESA (AP-Führer)	Laufzeit: M4 – M19
Ziele des AP:	
Für die Materialauswahl und die Dimensionierung der WingBox müssen zunächst alle Anforderungen an das Material und die Struktur geklärt sowie dazu geeignete Auswahlkriterien definiert und gewichtet werden. Diese umfassen sowohl mechanische und thermische als auch verarbeitungsseitige Eigenschaften. Die Auslegung der Wandstärken als auch Faserorientierungen in den einzelnen Flügelabschnitten erfolgt wechselseitig mit der Auslegung der Tankstruktur, da sich die zwei Bestandteile durch die integrale Bauweise gegenseitig beeinflussen und sich die Fluglasten auf beide entsprechend aufteilen.	
Ergebnisse des AP:	
Als Ergebnis des Arbeitspakets wird die vollständig definierte Struktur des Flügelkastens mit Material und Lagenaufbau zur fertigungstechnischen Umsetzung erwartet. Dies ist direkter Bestandteil des Meilensteins M5 und Grundvoraussetzung, damit nach Erreichen dieses Meilensteins weitergearbeitet werden kann. Die Ergebnisse der Auslegung fließen nahezu parallel in die Bauweisen Entwicklung der WingBox in AP2.10 ein.	
Arbeitsschritte, Schnittstellen, Risiken und Ressourcenplanung des AP	
Nach Festlegung und Wichtung der Auswahlkriterien erfolgt die Untersuchung geeigneter Materialien hinsichtlich dieser Kriterien mittels mechanischer Prüfung und Verarbeitungsstudien. Mit dem festgelegten Material erfolgt schlussendlich die Dimensionierung der Strukturelemente der einzelnen WingBox-segmente.	
Die Auslegung der WingBox erfolgt iterativ auf Basis des Strukturentwurfs aus AP2.1 unter Beteiligung der TUD im Zusammenspiel mit den Lasten aus AP1.4 und liefert Input an AP1.5 zur Masseabschätzung sowie AP2.14 zur Entwicklung der notwendigen Flugsteuerung samt Steuerflächen. Mit Fortschritt der AP3.1 und AP3.3 ergeben sich weitere, wesentliche Details zur Integration der WingBox an den Rumpf. Ferner muss, durch die integrale Bauweise, eine enge	

Abstimmung mit AP2.5 erfolgen, damit sowohl die Flügelschalen als auch die Tanks in deren Zusammenspiel aufeinander angepasst ausgelegt werden können.

Erfolgt die Materialauswahl als Kompromisslösung aus Preis, Leistungsfähigkeit, Verarbeitbarkeit, Verfügbarkeit sowie Beschaffungszeit auf Basis falscher bzw. unvollständiger Anforderungen ergibt sich eine für den Einsatzzweck nicht optimale Auslegung. Dies führt entweder zu einer überdimensionierten Struktur mit einhergehendem Mehrgewicht oder es besteht die Gefahr, dass die Systemtests in AP4.2 und AP4.3 nicht bzw. nur eingeschränkt bestanden werden. Weiterhin wirkt sich die Auslegung auf die nachfolgenden AP2.10 und AP2.12 aus, sodass bei falscher Auslegung die Entwicklung der Formwerkzeuge negativ beeinflusst wird (zu komplex, Kostenimpact) oder diese nachträglich zeit- und kostenintensiv modifiziert werden müssen.

Die Materialauswahl der Flügelschalen ist relativ flexibel, da sich die Materialanforderungen überwiegend von den Tankröhren ausgehen (mechanische Eigenschaften, Verfügbarkeit, Lieferform, Verarbeitungsmöglichkeiten). Hier ergeben sich vor allem Anforderungen an die mögliche Härtetemperatur, die die Beständigkeit aller in den Tankröhren verwendeten Materialien (CFK-Struktur, Liner, Polkappen, Dichtungen, etc.) nicht übersteigen darf. COTESA hat verschiedene Prepreg-Materialien der Hersteller Hexcel und Solvay mit unterschiedlichen Fasertypen, Faserflächengewichten, Harzsystemen und Aushärtungsbedingungen analysiert und charakterisiert. Gemäß den definierten Kriterien für die Materialauswahl auf der Grundlage der mechanischen und thermischen Eigenschaften wurde das Prepreg-Material des Herstellers Solvay mit dem Matrixsystem 977-2 und einer HTS-Kohlenstofffaser ausgewählt, dass bereits im vorangegangenen Tubestruct-Project verwendet worden war. Dieses Prepreg wird bei einer Temperatur von 180°C ausgehärtet und zeichnet sich durch allgemein gute mechanische Eigenschaften aus. *Abbildung 4* zeigt die Eigenschaften des ausgewählte Prepreg und Schaumkernmaterial. Die fertigungstechnischen Gegebenheiten, insbesondere bei der Herstellung der Tankröhren, erforderten die Betrachtung von Materialien, die sowohl als konventionelles Prepreg und als Slitape mit Harz imprägniert verfügbar sind.

Material		Cycom 977-2-35%-12K-HTS ** UD-Prepreg, 134g/m ²	Rohacell Hero Schaumkern ***
Eigenschaft	Einheit	IPS 05-01-001-07_4	
$E_{II} =$	N/mm ²	130000	95
$E_{\perp} =$	N/mm ²	10000	95
$G_{\#} =$	N/mm ²	5000	23
$\nu_{II\perp} =$	-	0,302	-
$\nu_{\perp II} =$	-	0,023	-
$R_{II\perp} =$	N/mm ²	1650	2,9
$R_{IIc} =$	N/mm ²	1135	0,6
$R_{IISS} =$	N/mm ²	95	-
$R_{\perp t} =$	N/mm ²	50	2,9
$R_{\perp c} =$	N/mm ²	170	0,6
$R_{II\perp} =$	N/mm ²	85	0,8
$\rho_{\text{Prepreg}} =$	g/cm ³	1,58	0,075
$t_{\text{Prepreg}} =$	mm	0,127	-
Rollenbreite =	mm	300	-

** Mindest-Anforderungen gemäß Luftfahrt-Materialspezifikation für 180°C Prepreg-Systeme

*** Mindest-Anforderungen gemäß Luftfahrt-Materialspezifikation für PMI-Schaumkerne

Abbildung 4: Eigenschaften des ausgewählten Prepregs und Schaumkerns

Nachdem das Material ausgewählt wurde, hat Cotesa den Fertigungsinput für die Dimensionierung der Wingbox bereitgestellt, indem es die Informationen über die Querschnitte, die Breite der Flügelschalenausschnitte, die Schichtstruktur der Gurtbänder und die Positionierung und Dimensionierung des Sandwichschaums im Nasenbereich des Flügels bereitgestellt hat.

AP 2.10 - Bauweisenentwicklung für integrale Wingbox

Die Arbeitsinhalte von AP2.10 sind in *Tabelle 5* zusammen mit dem planmäßigen Bearbeitungszeitraum und den beteiligten Projektpartnern aufgeführt.

Tabelle 5: Inhalte von AP 2.10

Arbeitspakettitel: Bauweisenentwicklung für integrale WingBox	AP-Nummer: AP2.10
Beteiligte Partner: COTESA (AP-Führer)	Laufzeit: M7 – M24
Ziele des AP:	
Ziel dieses Arbeitspakets ist die Entwicklung einer Bauweise zur Realisierung der WingBox als integrale Struktur im Prepreg-Autoklav-Verfahren. Der Schwerpunkt liegt an dieser Stelle auf der Laminatherstellung der Flügelschalen in der Weise, dass die Laminierformen als Härtewerkzeuge zur integralen Fertigung genutzt werden können und die Bedingungen für die Aushärtung von Prepreg wie Setzwegausgleich und gleichmäßige Verpressung gestaltungsseitig überall gewährleistet sind. Mögliche im Bauteil verbleibende oder verlorene Stützstrukturen müssen ebenfalls berücksichtigt werden, so diese fertigungsseitig notwendig sind.	
Ergebnisse des AP:	
Als Ergebnis wird eine sowohl aus fertigungstechnischer als auch mechanischer Sicht optimierte Bauweise des Flügelkastens als Bestandteil des Meilensteins M5 erwartet.	
Arbeitsschritte, Schnittstellen, Risiken und Ressourcenplanung des AP	
Auf Basis einer Analyse des bevorzugten Fertigungsverfahrens sowie der Struktur auf ihre geometrischen Erfordernisse werden die Eckpunkte der fertigungsgerechten Struktur definiert und die WingBox im Detail ausgestaltet. Diese werden mittels geeigneter Werkzeugformen verifiziert und validiert.	
Für die Bauweisenentwicklung der WingBox müssen sowohl die Gestalt und Dimensionierung der Drucktanks (AP2.5) als auch die notwendigen Materialdicken, Strukturelemente und Faserorientierungen der WingBox (AP2.9) vorliegen. Zusätzlich wird das definierte Flügelprofil aus AP1.2 benötigt, um die geometrischen Gegebenheiten und damit die Realisierbarkeit bestimmter Bauweisen bestimmen zu können.	
Das Risiko innerhalb dieses Arbeitspakets besteht in der Notwendigkeit, für die integrale Fertigung Kompromisse hinsichtlich mechanisch optimaler und herstellbarer Geometrien einzugehen. Dies kann dazu führen, dass notwendige Wandstärken nicht oder nur in verminderter Qualität zu fertigen sind oder Verbindungsstellen zwischen den Einzelelementen überarbeitet werden müssen, wodurch ein Teil der Gewichtseinsparung durch lokale Überdimensionierung aufgehoben wird oder die Belastbarkeit der WingBox eingeschränkt wird.	

Ziel des Arbeitspaketes ist es, ein Konstruktionsverfahren zur Realisierung des Flügelkastens als integrale Struktur im Autoklavenprozess zu entwickeln, indem die Laminatfertigung der Flügelschalen so fokussiert wird, dass die Laminier-Formwerkzeug als Aushärtewerkzeug für die integrale Fertigung der UFS, OFS und Tankrohre genutzt werden können.

Die entsprechenden Urmodelle wurden für die Prototypenfertigung hergestellt. Die UFS-Formwerkzeug wurde in einem Stück auf einem durchgehenden UFS-Urmodell hergestellt. Das Design wurde für die Realisierung der WingBox mit Fokus auf die Laminatfertigung der beiden Flügelschalen so entwickelt, dass das Laminatformwerkzeug als Aushärtewerkzeug für die integrale Fertigung genutzt werden kann. Abbildung 5 zeigt die konzeptionelle Bauweise zur Herstellung der Flügel mit

der Integration der Tankröhren. Im Projektverlauf wurde aber von einer vollintegralen Fertigung der gesamten Wingbox abgesehen. D.h. ungehärtete Flügelschalen wurden nicht mit vorgehärteten Röhren in einem Autoklavschritt (one-shot) gehärtet und mit einander verklebt (co-bonding – hart-weich Verbindung im Autoklav). Dies wurde vornehmlich durch eine gewünschte Inspizierbarkeit der Tankröhren und ihrer strukturelevanten Holmgurte getrieben. Es erfolgt nach der Härtung die Kaltverklebung der Tankröhren mit den Flügelschalen. Durch den erzeugten Stoffschluss kann aber weiterhin von einer integralen Wingbox gesprochen werden.

Zu diesem Zweck wurden UFS und OFS separat ausgehärtet, gefolgt vom Integrations- und Klebprozess der Tankröhren auf UFS. Die Toleranzen zwischen den Tankröhren und den Flügelschalen werden durch Gurte ausgeglichen. Die Gurte werden bei der Herstellung der Tankröhren an der vorgesehenen Stelle auf die Tankröhren laminiert. Durch im Projektverlauf beannt gewordener Spannungsriss der Gurtlagen auf den Tankröhren, wurde von der strikten 0°-Ausrichtung der Fasern im Holmgurt abgewichen und stattdessen +10° Fasern helix-förmig um die Röhren gewickelt. *Abbildung 6* zeigt das konzeptionelle Modell der auflaminierten verdickten Bänder auf Tankröhren zum Toleranzausgleich. UFS und Tankröhren härten zusammen in den Autoklaven aus, und alle nicht ausgehärteten Teile werden mit einer Trennfolie abgetrennt (pseudo one shot). Dadurch wird gewährleistet, dass die Teile sich bereit im Autoklav an einander angleichen, durch die Trennfolie wird ein Verkleben verhindert und ein theoretischer Klebespalt hergestellt. Der UFS mit den verklebten Tankröhren wird dann auf eine Verklebevorrichtung (Helling) gebracht, wo der OFS mit dem Klebstoff auf die Tankröhren und den UFS geklebt wird. Der Hauptgrund für die Verwendung der Helling ist, dass sie Platz für die Verbindung zur Vorderkante und für die Installation der Transportvorrichtung bietet, und die Positionierung der Ober- und Unterschale gewährleistet.



Abbildung 5: Bauweise im differentiellen Konzept

Laminieren von Verdickungen und Bandagen

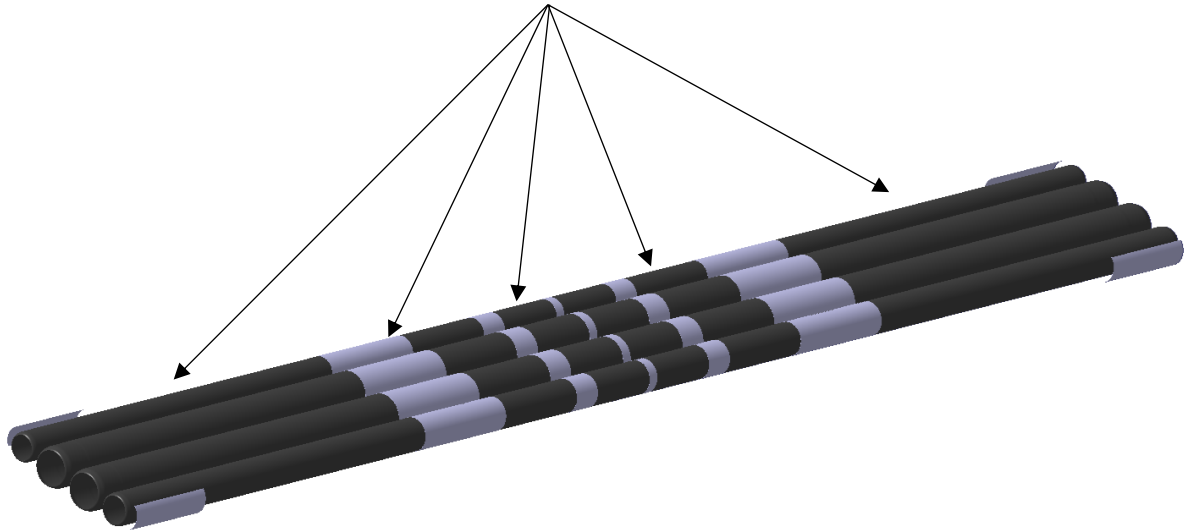


Abbildung 6: Laminierung von Verdickungen und Bandagen auf Tankröhren

AP 2.11 - Integration der Tankröhren

Die Arbeitsinhalte von AP2.11 sind in *Tabelle 6* zusammen mit dem planmäßigen Bearbeitungszeitraum und den beteiligten Projektpartnern aufgeführt.

Tabelle 6: Inhalte von AP 2.11

Arbeitspakettitel: Integration der Tankröhren	AP-Nummer: AP2.11
Beteiligte Partner: KVB, TUD-ILR, COTESA (AP-Führer)	Laufzeit: M16 – M24
Ziele des AP:	
Ziel des Arbeitspakets ist die Entwicklung und Validierung eines Konzeptes zur Integration der Tankröhren zusammen mit den Flügelschalen zur WingBox. Die Möglichkeit einer Co-Curing, also „nass in nass“ Fertigung wird zwar auch in Betracht gezogen, allerdings erscheint die Machbarkeit nach ersten Betrachtungen als zu schwierig. Vielmehr wird sich auf eine Integration durch einen gemeinsamen Autoklavzyklus der ausgehärteten Wasserstofftanks zusammen mit den unausgehärteten Flügelschalen konzentriert. Dieses Co-Bonding genannte Verfahren bietet weiterhin höhere Festigkeitswerte als eine klassische Klebung zweier ausgehärteter Komponenten. Somit wird an dieser Stelle der Vorteil der integralen Fertigung gewahrt. Die zur Lastübertragung zusätzlich zum theoretischen Linienkontakt zwischen der Außenfläche des Tanks und den Innenflächen der Flügelschalen notwendigen Elemente, z.B. in Form von Zwickeln und Dopplern sowie allen anderen Verbindungsstellen und Lasteinleitungselemente müssen ebenfalls, so effizient wie möglich, in das Fertigungskonzept eingebunden werden.	
Ergebnisse des AP:	
Als Ergebnis wird das Integrationskonzept der Tankröhren in die Flügelstruktur erwartet. Dies beinhaltet sowohl die Positionierung der vorgefertigten Tankröhren (ausgehärtet oder nicht) ebenso wie die Gestaltung der Anbindung zur Übertragung von Lasten. Die Ergebnisse fließen unmittelbar in Meilenstein M5 ein.	
Arbeitsschritte, Schnittstellen, Risiken und Ressourcenplanung des AP	

Zunächst werden alle erforderlichen Anschlussstellen für Lasteinleitung und Drucktanks in der WingBox aufgestellt und geeignete Fügekonzepte für jede dieser Anschlussstellen erarbeitet. Im Anschluss werden die Fügekonzepte mit dem Fertigungsverfahren und der Bauweise abgestimmt in das Fertigungsverfahren integriert.

Um das Integrationsverfahren zu definieren wird die genaue Geometrie sowohl der Tankröhren als auch der Flügelschalen aus den Arbeitspaketen AP2.5 und AP2.9 und die Bauweise der integralen Flügelbox aus AP2.10 benötigt. AP2.11 wird unter Beteiligung vom KVB, verantwortlich für die Tankstrukturen, als auch der TUD, verantwortlich für die Strukturauslegung, realisiert.

Risiken bestehen vor allem darin, dass die Bauweisen aus AP2.10 nur eingeschränkt/ nur mit Modifikation umsetzbar sind, weil sie der Integration der Tankröhren entgegenstehen und/ oder nicht die erforderliche Qualität ergeben. Hier sind im Besonderen die Geometrie- und Positioniergenauigkeiten, d.h. Spaltmaße und Toleranzketten, durch die Einwirkung von Zusatzelementen zu nennen. Weiterhin besteht das Risiko von Mehrgewicht durch Zusatzelemente beim Co-Bonding Verfahren.

Die Tankröhren sind präzise in der UFS positioniert, indem sie durch eine CNC-lasergeschnittene Stahlplatte geführt werden, wie in *Abbildung 7* dargestellt. Eine quadratische Welle sorgt für eine genaue Ausrichtung für jeden Tankröhre und ermöglicht millimetergenaue Anpassungen. Diese Vorrichtung gewährleistet, dass alle Tankröhren mit dem Schaumkern auf den Schalen übereinstimmen.

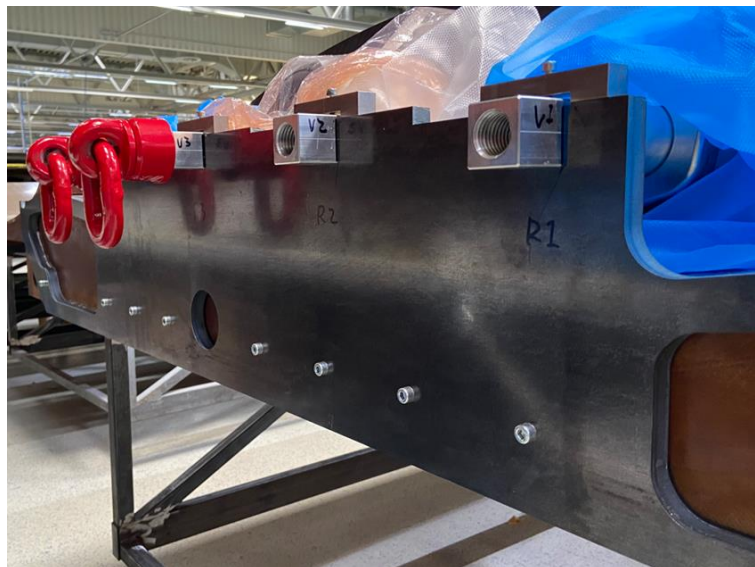


Abbildung 7: Stahlplatte für Positionen (Positionierungshilfe)

Wie bereits erwähnt, werden die Tankröhren in den UFS positioniert und mit Hilfe von Trennfolien zusammen in den Autoklaven ausgehärtet, um ein Zusammenkleben zu verhindern. Im Anschluss an das Aushärten kann somit jedes Teil für sich inspiziert werden. Im Anschluss erfolgt eine Kaltverklebung der Komponenten. Die Positionierung erfolgte durch die an der Formwerkzeug UFS angebrachten Stahlblenden und Markierungen. Durch Fertigungsabweichungen an den Tankröhre wurde der vorhandene Toleranzbereich überschritten, wodurch sich Probleme bei der Montage in AP2.15 ergaben. *Abbildung 8* und *Abbildung 9* zeigen die Abweichung an den Tankröhre und die 3D-Messung.

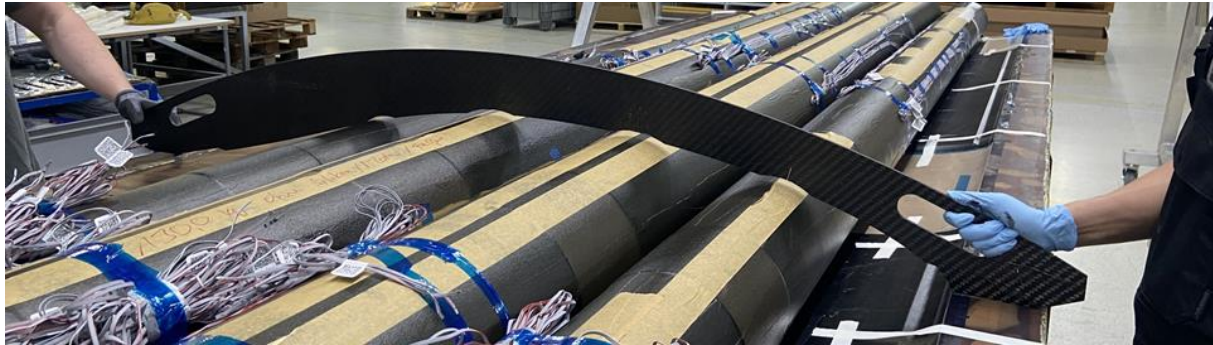
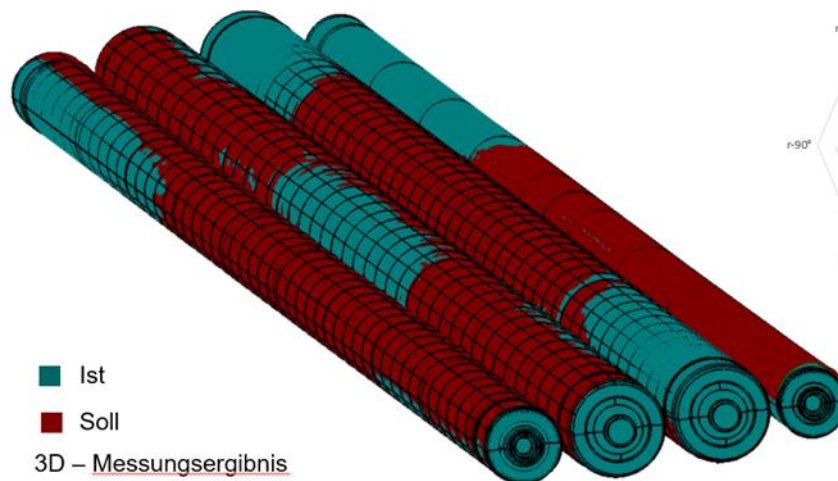


Abbildung 8: Vermessung der Tankröhrenpositionen mittel Lehre

Röhrengometrie:



H1 Abweichung Total (Radius + XZ)

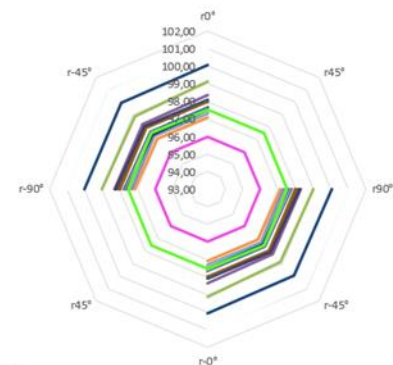


Abbildung 9: Übermaß 3D-Messungen

AP 2.12 - Entwicklung der Formwerkzeuge Wingbox

Die Arbeitsinhalte von AP2.12 sind in *Tabelle 7* zusammen mit dem Planmäßigen Bearbeitungszeitraum und den beteiligten Projektpartnern aufgeführt.

Tabelle 7: Inhalte von AP 2.12

Arbeitspakettitel: Entwicklung der Formwerkzeuge WingBox	AP-Nummer: AP2.12
Beteiligte Partner: COTESA (AP-Führer)	Laufzeit: M25 – M30
Ziele des AP:	
Ziel des Arbeitspakets ist es, ein Werkzeugkonzept für die integrale Fertigung der WingBox zu entwickeln und zu validieren. Eingeschlossen sind hierbei sowohl die Härtewerkzeuge für die Fertigung im Autoklaven als auch mögliche Laminierwerkzeuge und Hilfsvorrichtungen, die benötigt werden, um den Laminataufbau und die Form der Flügelschalen sowie Übergänge zwischen diesen und den Tanks zu realisieren.	
Ergebnisse des AP:	
Als Ergebnis des AP2.12 werden die Werkzeuge zur Herstellung der integralen WingBox im Rahmen des Meilensteins M5 bereitgestellt. Im weiteren Projektverlauf sind die Werkzeuge allerdings ebenfalls essentielle Bestandteile zur Erreichung der Meilensteine M6 und M7.	
Arbeitsschritte, Schnittstellen, Risiken und Ressourcenplanung des AP	
Auf Basis einer Analyse des bevorzugten Fertigungsverfahrens sowie der Struktur auf ihre geometrischen Erfordernisse werden die Eckpunkte der fertigungsgerechten Struktur definiert und die WingBox im Detail ausgestaltet. Diese werden mittels geeigneter Werkzeugformen verifiziert und validiert.	
Für die Bauweisenentwicklung der WingBox müssen sowohl die Gestalt und Dimensionierung der Drucktanks (AP2.5) als auch die notwendigen Materialdicken, Strukturelemente und Faserorientierungen der WingBox (AP2.9) vorliegen. Zusätzlich wird das definierte Flügelprofil aus AP1.2 benötigt, um die geometrischen Gegebenheiten und damit die Realisierbarkeit bestimmter Bauweisen bestimmen zu können.	
Das Risiko innerhalb dieses Arbeitspakets besteht in der Notwendigkeit, für die integrale Fertigung Kompromisse hinsichtlich mechanisch optimaler und herstellbarer Geometrien einzugehen. Dies kann dazu führen, dass notwendige Wandstärken nicht oder nur in verminderter Qualität zu fertigen sind oder Verbindungsstellen zwischen den Einzelelementen überarbeitet werden müssen, wodurch ein Teil der Gewichtseinsparung durch lokale Überdimensionierung aufgehoben wird oder die Belastbarkeit der WingBox eingeschränkt wird.	

Die Formwerkzeuge OFS & -UFS wurden aus dem CAD-Modell BT von Cotesa entwickelt. Entsprechend dem Konstruktionsdesign sind die Oberflächen des CAD-Modells die Referenz für die Formwerkzeuge und die Formwerkzeuge sind die Referenz für das Urmodell. Das Urmodell wird dann intern entsprechend hergestellt, und schließlich wurden die Formen UFS und OFS jeweils über das Urmodell UFS und OFS laminiert. Bei diesem Verfahren stellte eine niedrigtemperaturbeständige Urmodell-Struktur ein gutes Zwischenprodukt für Formwerkzeuge dar, und die Formwerkzeuge konnten einen separaten Nachhärtungsprozess bei 180 °C durchlaufen, um einem Hochtemperatur-Autoklavenzyklus standzuhalten.

Abweichend vom ursprünglichen Konzept für den Formwerkzeugbau für die UFS, welches dem für die OFS entsprach, wurde im Projekt-Zeitraum die Entscheidung getroffen, das Formwerkzeug UFS auf einem Urmodell (-UFS) in voller Länge in einem Stück zu fertigen. Der Hauptgrund dafür ist, dass ein UFS Formwerkzeug in voller Länge eine gute Grundlinie für ein 3-teiliges OFS Formwerkzeuge bietet, außerdem ist es auch einfacher und genauer, die Tankröhren in den Flügelschalen zu positionieren. *Abbildung 10* präsentiert die Urmodelle für die OFS und die UFS.

Einteiliges Formwerkzeug UFS
(Material: ebaboard EP 138)



3-teiliges Formwerkzeug OFS
(Material: ebaboard 1400)

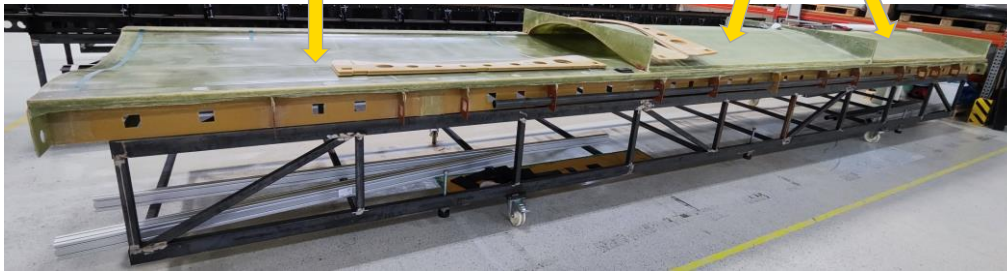
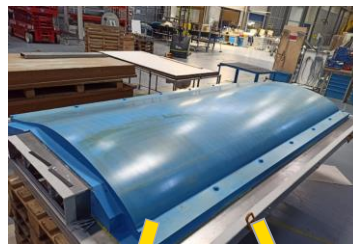


Abbildung 10: Einteiliges Urmodel und 3-teiliges Urmodel

Abbildung 11 zeigt die Formwerkzeugherstellung mit der Handlaminierung und anschließender Vakuuminfusionstechnik. Es begann mit dem Handlaminieren einer dünnen Hautschicht aus 163 g/m^2 Glasfaser-Gewebe, dann wurden alle nachfolgenden Schichten (9-10 Schichten) aus 970 g/m^2 Quadriaxial hergestellt. In der Infusion wurde das Epoxidharzsystem HTG-200 angewendet. Dieses Harzsystem hat eine Topfzeit von über 3 Stunden bei einer Temperatur von $50 \text{ }^\circ\text{C}$, während es nach dem Nachhärten einem Autoklavenprozess bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$ standhalten kann.



Abbildung 11: Infusion von OFS & UFS Formwerkzeug

Nach dem Trennen des Vakuumfoliensystems werden die vorlamierten GFK-Rippen auf die Rückseite der Formwerkzeuge laminiert, wie in *Abbildung 12* dargestellt. Alle Rippen werden mit einem Laserprojektor kalibriert, um die Ebenheit der Formoberfläche zu gewährleisten. Die Rippen gewährleisten die Steifigkeit der Formwerkzeuge, sorgen für eine gute Oberflächenqualität und halten das Eigengewicht während des Hebevorgangs für das Schließen der beiden Formhälften oder beim Transport in den Autoklav.

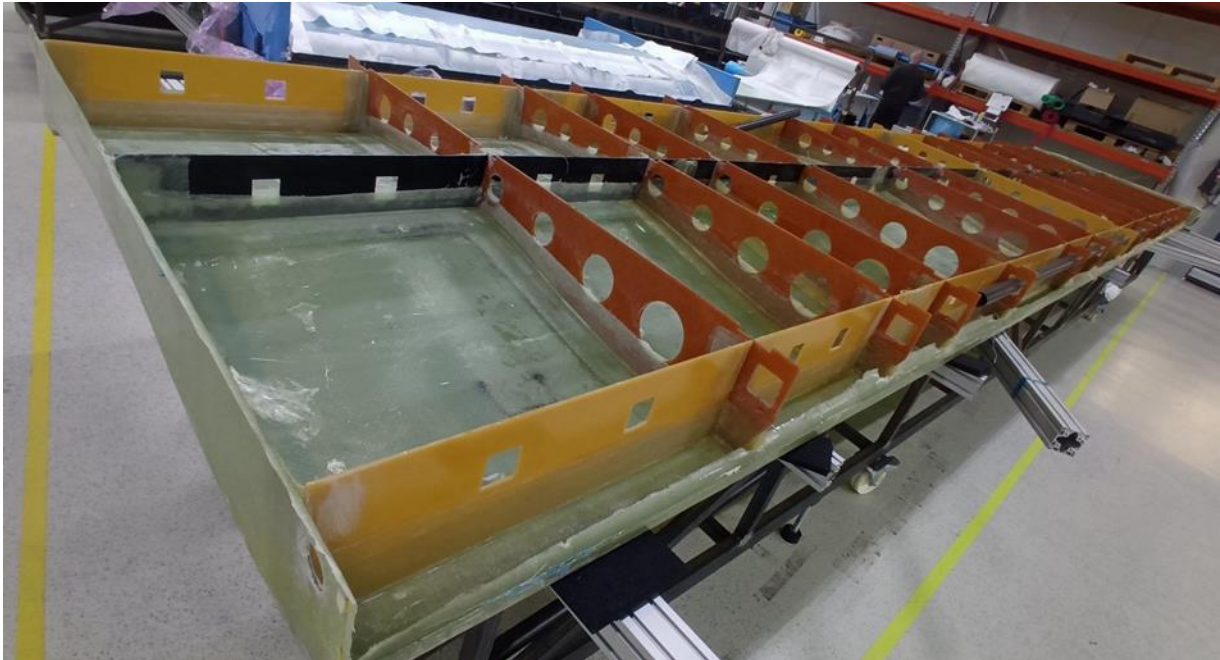


Abbildung 12: Verstärkungsrippen für die Formwerkzeug UFS

Sowohl die UFS- als auch die OFS-Formwerkzeuge werden 16 Stunden lang bei 180 °C in einem Autoklav nachgehärtet, und gleichzeitig wird die Dichtheitsprüfung durchgeführt. Anschließend wird die mechanische Bearbeitung fortgesetzt, um die herausragende Fasern zu entfernen und die Oberflächenfehler zu reparieren durch spachteln. Die Farbveränderung zwischen vor und nach der Nachhärtung ist in *Abbildung 12* und *Abbildung 13* zu vergleichen: von hellgrün zu dunkelbraun.



Abbildung 13: Nachhärtung der UFS- und OFS-Formwerkzeuge

Nach der Qualitätsprüfung wird eine Schicht PTFE-Gewebe auf die Oberfläche beider Formwerkzeuge geklebt, um die Entformung zu erleichtern und den Aufwand für das Polieren der Oberfläche zu verringern, wie in Abbildung 14 gezeigt. Anschließend wurden die Positionierungshilfen aus Stahl für die Tankröhre eingebaut, die EEOP-Markierungen für den Handbeschnitt werden ebenfalls mit temperaturbeständigem Klebeband vorbereitet, und auch die Aussparungen an der Flügelschale wurden in ihrer Position fixiert. Damit waren die Formwerkzeuge für die endgültige Fertigung der Flügelschalen vorbereitet. (Siehe Abbildung 15)



Abbildung 14: Oberfläche des OFS-Formwerkzeugs

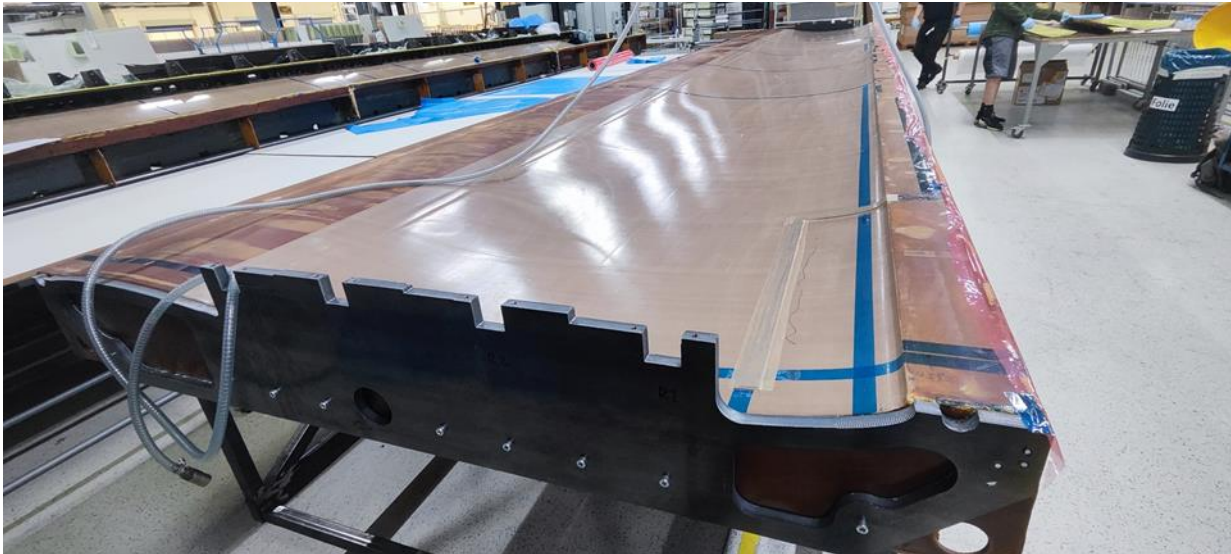


Abbildung 15: Positionierungshilfe im Formwerkzeug UFS

AP 2.15 - Fertigung Flügelrohbau

Die Arbeitsinhalte von AP2.15 sind in *Tabelle 8* zusammen mit dem planmäßigen Bearbeitungszeitraum und den beteiligten Projektpartnern aufgeführt.

Tabelle 8: Inhalte von AP 2.15

Arbeitspakettitel: Fertigung Flügelrohbau (2 Tragflügel)	AP-Nummer: AP2.15
Beteiligte Partner: COTESA (AP-Führer)	Laufzeit: M31 – M39
Ziele des AP:	
Ziel des Arbeitspakets ist es, mit den entwickelten Fertigungsverfahren und den vorgefertigten Wasserstofftanks zwei Demonstratoren herzustellen, die den kompletten Flügelrohbau mit allen notwendigen Strukturelementen und Anschlüssen umfassen.	
Ergebnisse des AP:	
Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist die fertige Rohstruktur zweier Tragflügel. Dies bildet die Grundlage für Meilenstein M6.	
Arbeitsschritte, Schnittstellen, Risiken und Ressourcenplanung des AP	
Die Arbeitsschritte umfassen alle zur Herstellung des Flügelrohbaus notwendigen Tätigkeiten wie Materialbeschaffung des Prepregs und der Hilfsstoffe für die Fertigung, Einrüsten von Maschinen und Hilfsvorrichtungen, Laminieren der Flügelschalen, Integration der Tanks und Anschlusselemente sowie schlussendlich die Aushärtung im Autoklaven und Entformung.	
Für den Flügelrohbau werden die fertigen Wasserstofftanks aus AP2.8 benötigt, ebenso wie die Werkzeuge zur Integration und Flügelherstellung aus AP2.12 und AP2.13.	
Liegen die Wasserstofftanks oder die Werkzeuge zum planmäßigen Beginn des AP2.15 nicht vor, kommt es zu Projektverzögerungen bei der Prototypenbereitstellung für die geplanten Tests. Da in diesem AP erstmals alle Komponenten ohne Skalierung zum gesamten Flügelrohbau zusammengefügt werden bzw. die Werkzeuge entsprechend eingesetzt werden, kann deren Verhalten erst hier vollständig verifiziert und validiert werden (Dichtigkeit, Setzwege, Toleranzen, etc.). Es besteht das Risiko, dass auf Basis der Ergebnisse Modifikationen im Bereich der Bauweise / Auslegung und oder der Werkzeuge notwendig werden und zur erfolgreichen Realisierung mehr als zwei Prototypen gefertigt werden müssen.	

Im ersten Teil des Fertigungszyklus wurden die UFS und OFS entsprechend den Spezifikationen laminiert und in den Autoklaven ausgehärtet. Anschließend wurden ein Zuschnitt auf die Endkontur durchgeführt. Für den Zusammenbau der beiden Flügelschalen und der Tankröhren wurden zunächst die Tankröhren mit Hilfe von Fixpunkten an der Form in der UFS Formwerkzeug positioniert. Die OFS wurde dann mit den entsprechenden Vorrichtungen zusammengeklebt.

Wie in *Abbildung 16* dargestellt, wurde der OFS nachfolgendem Verfahren laminiert: Initiallagen, Schaumverklebung, Finallagen, Vakuumaufbau. Bei jedem Schritt sollten eine Qualitätskontrolle und eine Vakuumverdichtung durchgeführt werden. Dadurch wird gewährleistet, dass alle Laminare den Zeichnungen entsprechen und die Laminare so vollständig wie möglich verdichtet werden. Nach dem Autoklavieren werden die Vakuumfolien entfernt und alle Kanten auf die richtige Größe gemäß der EEOP (Engineering End of Part Linie) zugeschnitten.

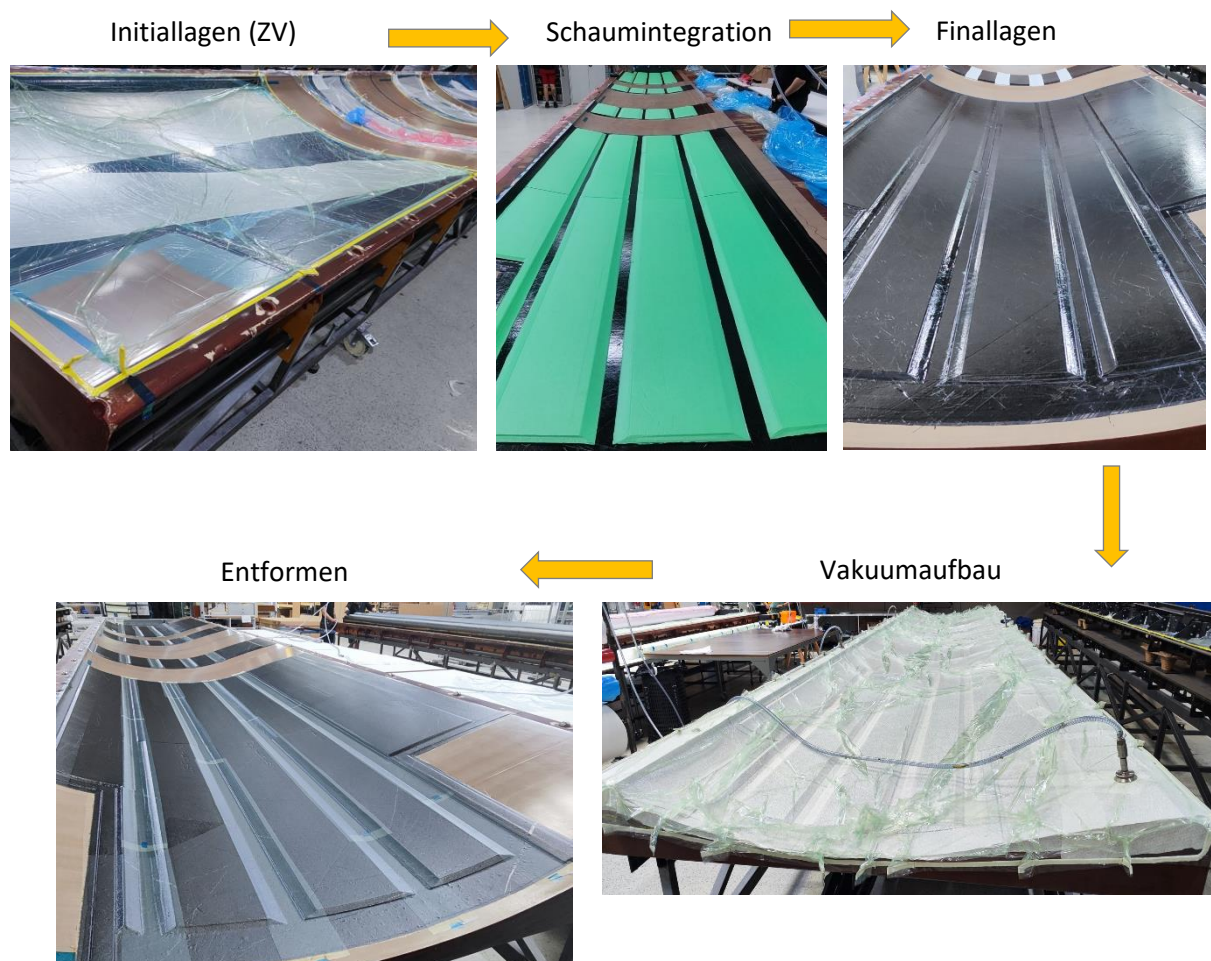


Abbildung 16: OFS laminieren

Die UFS wurde ebenfalls ein ähnlicher Ansatz wie die OFS hergestellt, mit dem Unterschied, dass nach dem Vakuumaufbau die 4 Tankröhren (H1 - H4) über der UFS angebracht und gemeinsam ausgehärtet wurden, dies gewährleistet eine ordentliche Verdichtung und damit Laminatqualität der einzelnen Bauteile. Gleichzeitig können sich die Bauteile aneinander angleichen und die vorhandenen Maßabweichungen können ein Stück weit kompensiert werden, zudem wird auch das Verkleben der

Bauteile im Autoklaven verhindert und die Inspektion der Holmgurtlagen ist gewährleistet. Durch dieses partielle Co-Curing passt sich die Schaumstoffposition viel besser an das Tankröhre an und die Vakuum-Folien bieten die notwendige Dicke für die anschließende Verklebung.



Abbildung 17: Vakuumaufbau des UFS mit Tankröhren

Eine Vorprüfung wird durchgeführt, bevor der UFS verklebt wird. Hier wird abschließend geprüft, ob die Position stimmt und ob die Toleranz für die Verklebung des UFS ausreicht. Die rechte Seite des Formwerkzeugs wird als Referenz eingestellt, alle Tankröhren werden auf die gleiche Position ausgerichtet, die Tankröhre wird gedreht und die obere Toleranz auf 10 mm eingestellt, und alle Lehren im Klebespiel werden überprüft. Abbildung 18 zeigt das entsprechende Kontrollverfahren für die Positionstoleranz der Tankröhren.

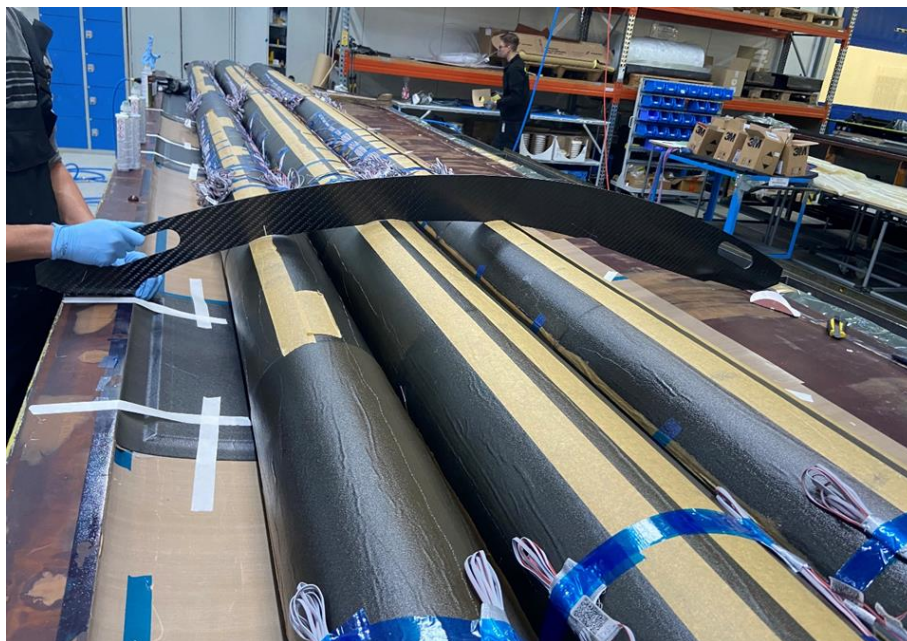


Abbildung 18: Überprüfung der Toleranz

Der Auftragstest des Klebstoffes wurde im Voraus durchgeführt, es wurden S-förmige und I-förmige Klebstoffaufträge durchgeführt und auch in den verschiedenen Positionen der Schäumen aufgetragen. Die Ergebnisse zeigten, dass ein Auftrag in S-Linien zu Poren führen kann und dass ein präziser, zentrierter Auftrag für die Füllung und Verteilung des Klebstoffs sehr wichtig ist. *Abbildung 19* zeigt die Porenbildung und die Klebstoffverteilung während des Klebetests in der S-Linie.



Abbildung 19: Klebertest

Um die Ermittlung der benötigten Klebstoffmenge wurde der Intervall zwischen den laminierten Schäumen mit PU-Schaum ausgefüllt, so konnten auch stark variierenden Klebstoffvolumen Bereiche präzise ausgefüllt werden, wie in *Abbildung 20* demonstriert. Dies zeigte starke Abweichungen vom theoretischen Klebspalt und war damit nötig um ausreichend Klebstoff in die Fügeverbindung einzubringen.

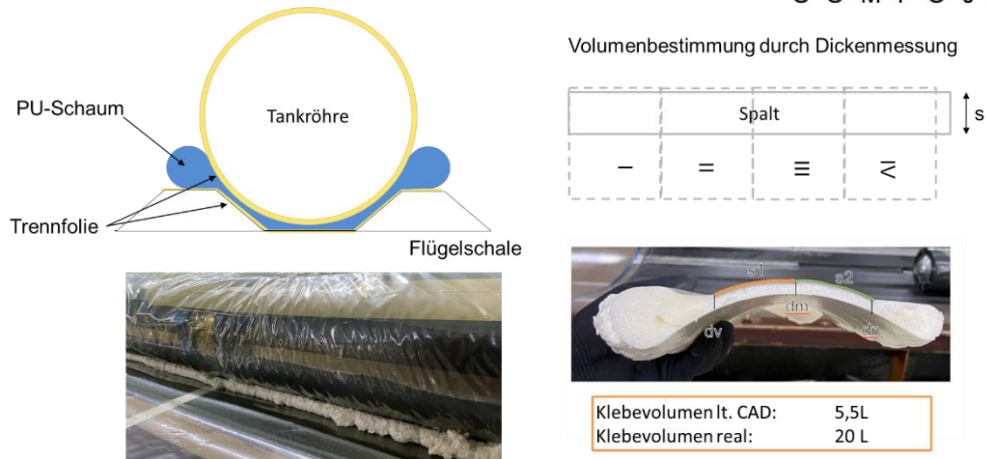


Abbildung 20: Klebspalt Ermittlung mittels Bauschaum

Bei der Berechnung des Klebevolumens kann der Kleberauftrag zeitlich pro 10 cm gesteuert werden. DP 490 Klebstoff tritt mit einer Menge von 1 g/s aus der kartusche aus, so kann in dem gewählten 10cm Intervall die entsprechende Klebstoffmenge ausgebracht werden. Damit wird das endgültige Ergebnis so präzise wie möglich mit den Klebspaltvolumenbestimmung sichergestellt. Abbildung 21 zeigt das Konzept und die Realisierung des Kleberauftrags.

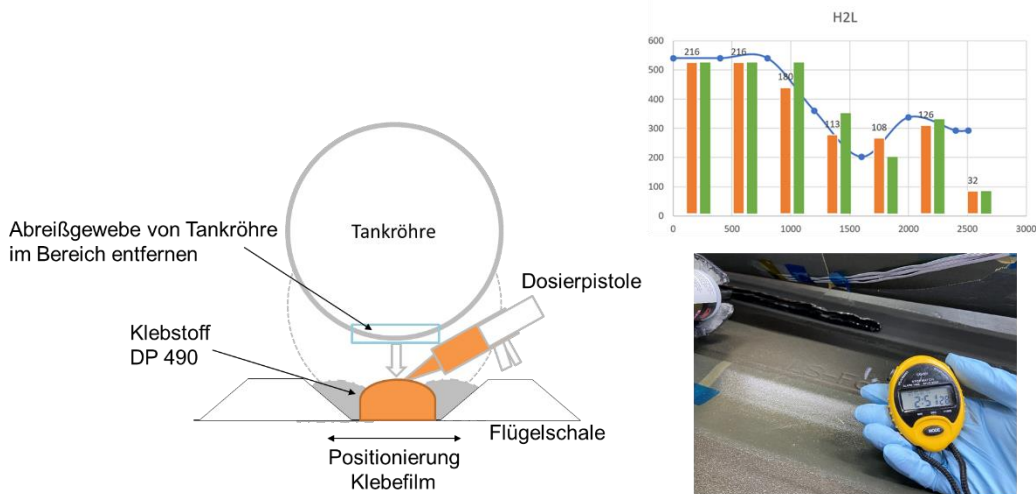


Abbildung 21: Klebeapplikation durch Menge pro Zeit

Beim Ablegen der Tankröhre wurde der DP 490 Kleber komprimiert und füllte Bereich zwischen dem UFS und der Tankröhre wie erwartet aus. Bei einem unvorhergesehenen Überschuss kann die Spachtelmasse entfernt und der nicht abgedeckte Fläche von der Seite her wieder aufgefüllt werden. Der Klebprozess begann zunächst mit Tankröhre H-2, der den größten Durchmesser hat, da beide Seiten erreicht werden können, und dann mit Tankröhre H-3, H-1 und H-4 bis zum Ende. Mit dieser Vorgehensweise kann die größtmögliche Fläche abgedeckt werden, und auch die Haltbarkeit würde auch für jede Tankröhre-Verklebung ausreichen. Abbildung 22 zeigt die Verklebung des Tankröhre Nr. 2 mit der UFS.



Abbildung 22: Verklebung des Tankröhre H-2 mit der UFS

Am Ende wurden die Markierungen erneut überprüft. Abbildung 23 zeigt, dass alle Tankröhren korrekt positioniert sind. Anschließend werden alle Verschlüsse mit Schrauben befestigt, so dass die Tankröhre befestigt bleibt, bis der Klebstoff vollständig ausgehärtet ist (mindestens 48 Stunden).



Abbildung 23: Tankröhre auf die UFS geklebt

Der UFS wird mit der Tankröhre zusammen auf die Helling übertragen. Anschließend wird der OFS mit dem Klebstoff auf die Tankröhre geklebt, der einzige Unterschied besteht darin, dass das Gewicht der Sandsäcke verwendet wird, um die OFS auf die Tankröhre zu drücken, wie in *Abbildung 24* gezeigt. Die Nasenleiste wird dann auf vorgesehenen Recessen der OFS und UFS geklebt. Der Grund für die

Verwendung von Helling liegt hauptsächlich darin, dass es Platz für die Verbindung zur Naseleiste bietet, außerdem bietet es Platz für die Installation der Transport-Vorrichtung.



Abbildung 24: Verklebung der OFS



Abbildung 25: Flügel im Auslieferungszustand

HAP 4 – Systemtests

AP 4.2 – Gesamtflügeltests

Die Arbeitsinhalte von AP4.2 sind in *Tabelle 9* zusammen mit dem planmäßigen Bearbeitungszeitraum und den beteiligten Projektpartnern aufgeführt.

Tabelle 9: Inhalte von AP 4.2

Arbeitspakettitel: Gesamtflügeltests	AP-Nummer: AP4.2
Beteiligte Partner: TUD-ILR (AP-Führer), APUS, COTESA	Laufzeit: M21 – M23 / M37 – M45
Ziele des AP:	

Im Rahmen des Gesamtflügeltests soll dessen tatsächliches Verhalten unter Betriebsbedingungen gegenüber dem Lastenheft sowie der Auslegung verifiziert und validiert werden.

Ergebnisse des AP:

Als Ergebnisse entsteht das Gesamtverständnis der realen Tragflügelstruktur unter Betriebslasten mit denen dessen Leistungsfähigkeit gegenüber den Erwartungen aus AP2.1, AP2.2, AP2.3 und AP2.4 beurteilt werden kann.

Arbeitsschritte, Schnittstellen, Risiken und Ressourcenplanung des AP

Zunächst erfolgt in der ersten AP-Phase die Definition eines geeigneten Prüfkonzepes und des Prüfablaufs in Form eines Prüfprotokolls. Dabei werden erforderlicher Messungen, Messstellen sowie die messtechnische Ausstattung des Flügelprüflings festgelegt. In der zweiten Phase wird der Testflügel in den Versuchsstand integriert und messtechnisch ausgestattet. Die Durchführung der Versuche Aufzeichnung der Daten erfolgt gemäß dem Prüfprotokoll. Nach Aus- und Bewertung der Messdaten wird das erwartete mit dem tatsächlichen Strukturverhalten verglichen und Bewertung der Leistungsfähigkeit abgeschlossen.

Die Definition des Prüfkonzepes sowie der Prüfablaufs orientieren sich an den Ergebnissen und Bedürfnissen aus AP2.1, AP2.2, AP2.3 und AP2.4. Bevor mit der messtechnischen Ausstattung der Prüflinge sowie mit dem Test begonnen werden kann, ist deren prototypische Umsetzung aus den Meilensteinen M6 und M7 notwendig. Die AP-Leitung obliegt der TUD. Neben der COTESA als Verantwortliche für die Flügelrohstruktur ist auch APUS als Verantwortlicher für die Flugsteuerung und elektrische Ausstattung des Flügels am AP4.2 beteiligt.

Es besteht zum einen das Risiko, dass die Strukturtestflügel zu spät bereitgestellt und die Tests nur mit Verzögerung durchgeführt werden können. Zum anderen können Unterschiede im tatsächlichen Verhalten gegenüber den Erwartungen festgestellt werden, welche zu einer Reduzierung der Leistungsfähigkeit führen.

Es wurden von COTESA keine Arbeiten innerhalb des AP4.2 durchgeführt.

3. Veröffentlichungen & Vorträge

Es gab keine Veröffentlichungen oder Vorträge innerhalb des angegebenen Berichtszeitraumes.