

Förderung im Rahmen der
Luftfahrtforschung und -technologie LuFo V – 3. Call (2018 – 2022)

Schlussbericht

Integrierbare Wasserstoffdrucktanks

im Verbund

Hydrotube

LUFOV-3-100317119 / FKZ 20W1716D

Laufzeit: 01.06.2019 – 31.12.2023

Juni 2024

Gefördert durch das



KVB Institut für Konstruktion und Verbundbauweisen gGmbH
Gärtitzer Str. 1, D-04720 Großweitzschen



Berichtsdatum:	27.06.2024
Berichtersteller:	Martin Semsch
Berichtszeitraum:	01.06.2019– 31.12.2023
Unterschrift PL:	

Inhaltsverzeichnis

1	Übersicht	4
1.1	Ziel und Inhalt des Abschlussberichts	4
1.2	Kurzfassung der wissenschaftlich-technische Ergebnisse	7
2	Technischer Bericht	8
2.1	AP2.5 - Tankstrukturentwicklung	8
2.1.1	Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP2.5	8
2.1.2	Technologieauswahl bei der Tankstrukturentwicklung	8
2.1.3	Fertigungsvorversuche zum Vergleich der Fertigungskonzepte	10
2.1.4	Materialauswahl	11
2.1.5	Prozessoptimierung	13
2.2	AP2.6 - Tankdichtung / Liner, Armaturenanschluss	15
2.2.1	Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP2.6	15
2.2.2	Festlegung von Tankdichtung und Armaturenanschluss	15
2.2.3	Gestaltung des Liners	17
2.3	AP2.7 - Polkappenanbindung an die Tankröhren	19
2.3.1	Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP2.7	19
2.3.2	Bedeutung der Polkappenanbindung	19
2.3.3	Design der Polkappe	19
2.3.4	Design der Polkappenanbindung	20
2.4	AP2.8 - Fertigung der Tankröhren und Testbauteile	24
2.4.1	Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP2.8	24
2.4.2	Herstellung von Vorversuchskörpern	24
2.4.3	Fertigungsstrategie	27
2.4.4	Herstellung Tankröhren	28
2.5	AP2.9 - Materialauswahl und Dimensionierung WingBox	30
2.5.1	Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP2.9	30
2.5.2	Abstimmung zur Materialauswahl, Herstellungstechnologie, Geometrie und Schnittstellen	30
2.5.3	Abstimmung zur Integration der Tanks in die WingBox	30
2.6	AP2.13 - Entwicklung und Fertigung der Werkzeuge für Autoklav-Fertigung	31
2.6.1	Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP.13	31
2.6.2	Werkzeuge zur Herstellung der Tankröhren und Vorversuchskörper	31
2.7	AP2.17 - Entwicklung von Tankperipherie und Betankungssystem	34
2.7.1	Abstimmung der Schnittstellen zwischen Betankungssystem und Tankstruktur	34
2.7.2	Risikoanalyse	34
2.7.3	Durchführung von Dichtigkeitstests	34
2.8	AP4.1 - Systemtests, Berstversuche, Schadensanalyse	36
2.8.1	Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP4.1	36
2.8.2	Statischer Test und Berstversuch an einem Vorversuchskörper	36
2.9	AP4.3 – Systemtest Brennstoffzelle, Tankperipherie, Betankungssystem	37
2.9.1	Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP4.3	37
2.9.2	Gesamtsystemtest	37
	Abbildungsverzeichnis	38
	Tabellenverzeichnis	39

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket/ Arbeitsschritt
APUS	APUS Aeronautical Engineering GmbH
CFK	kohlefaserverstärkter Kunststoff
HAP	Hauptarbeitspaket
KVB	KVB Institut für Konstruktion und Verbundbauweisen gGmbH
MS	Meilenstein
TUD	Technische Universität Dresden, Institut für Luft- und Raumfahrt
UA	Unterauftrag
UD	Unidirektional

1 Übersicht

1.1 Ziel und Inhalt des Abschlussberichts

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die durch das KVB Institut für Konstruktion und Verbundbauweisen gGmbH (KVB) im Zeitraum vom 01.06.2019 bis 31.12.2023 im Rahmen der Verbundprojekts Hydrotube bearbeiteten Arbeitspakete zusammen.

Ziel des Gesamtprojekts war die Entwicklung eines Flügels für ein Kleinflugzeug mit integrierten Röhrentanks für Wasserstoff und das dazugehörige Fertigungsverfahren in Prepreg-Autoklav-Technologie. Das Forschungsvorhaben des KVB umfasste die Herstellung der Röhrentanks, die aufgrund ihrer Beschaffenheit als integrale Strukturelemente einer Tragflügelstruktur fungieren und sich in einem speziell dafür entwickelten Fertigungsprozess der Flügelschalen mit diesen zu einem Flügelkasten verbinden lassen.

Der Inhalt des Abschlussberichts umfasst die Dokumentation der erzielten Ergebnisse sowie einen Abgleich mit den im Förderantrag geplanten Zielen des Forschungsprojekts. Basis der Dokumentation sind der Projektstrukturplan (siehe Abbildung 1), der Zeitplan für das Verbundprojekt (Abbildung 2) und der Meilensteinplan laut Antrag (Tabelle 1). Die für das KVB relevanten Arbeitspakete sind im Projektstrukturplan rot markiert.

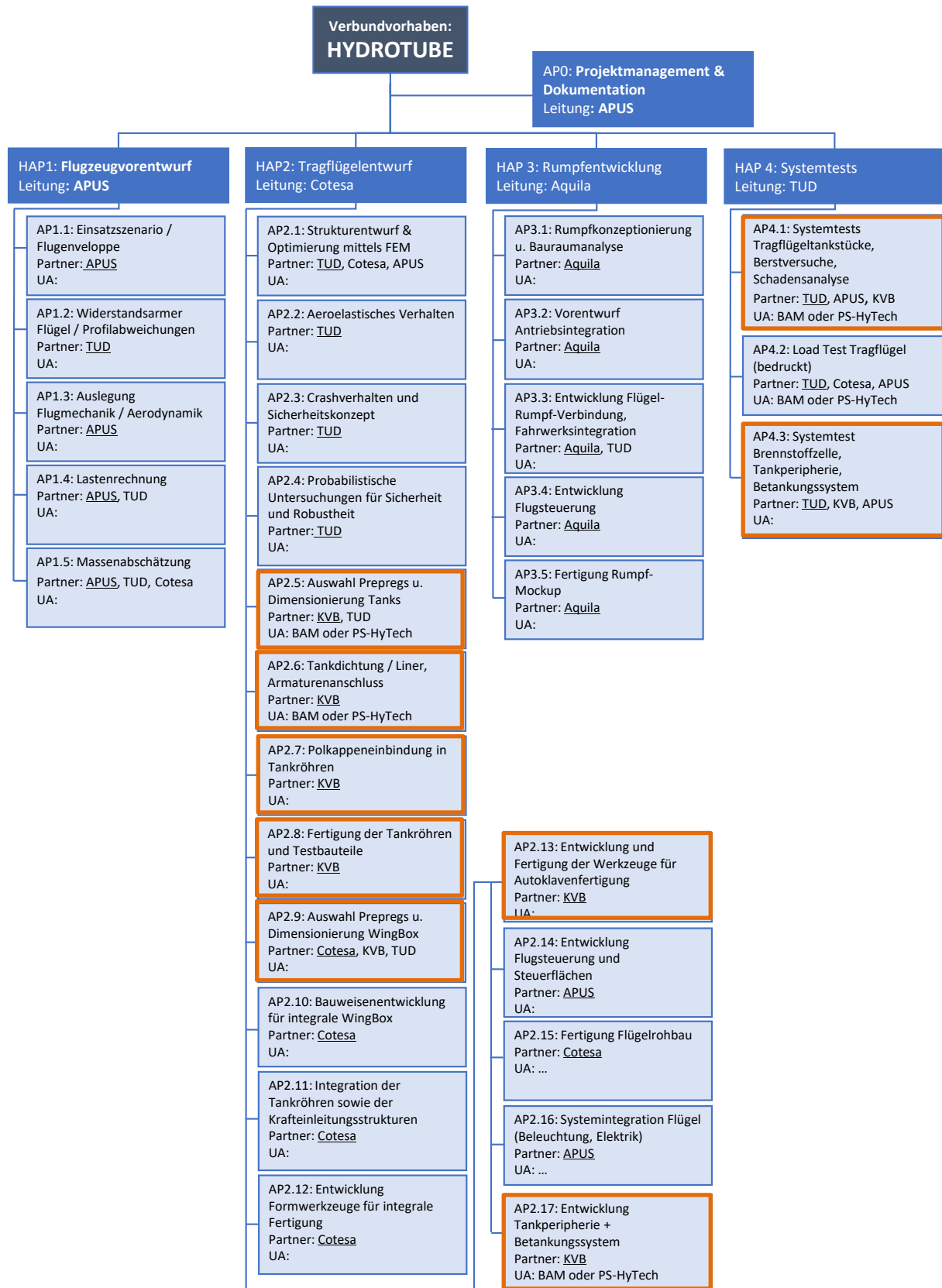


Abbildung 1 Projektstrukturplan

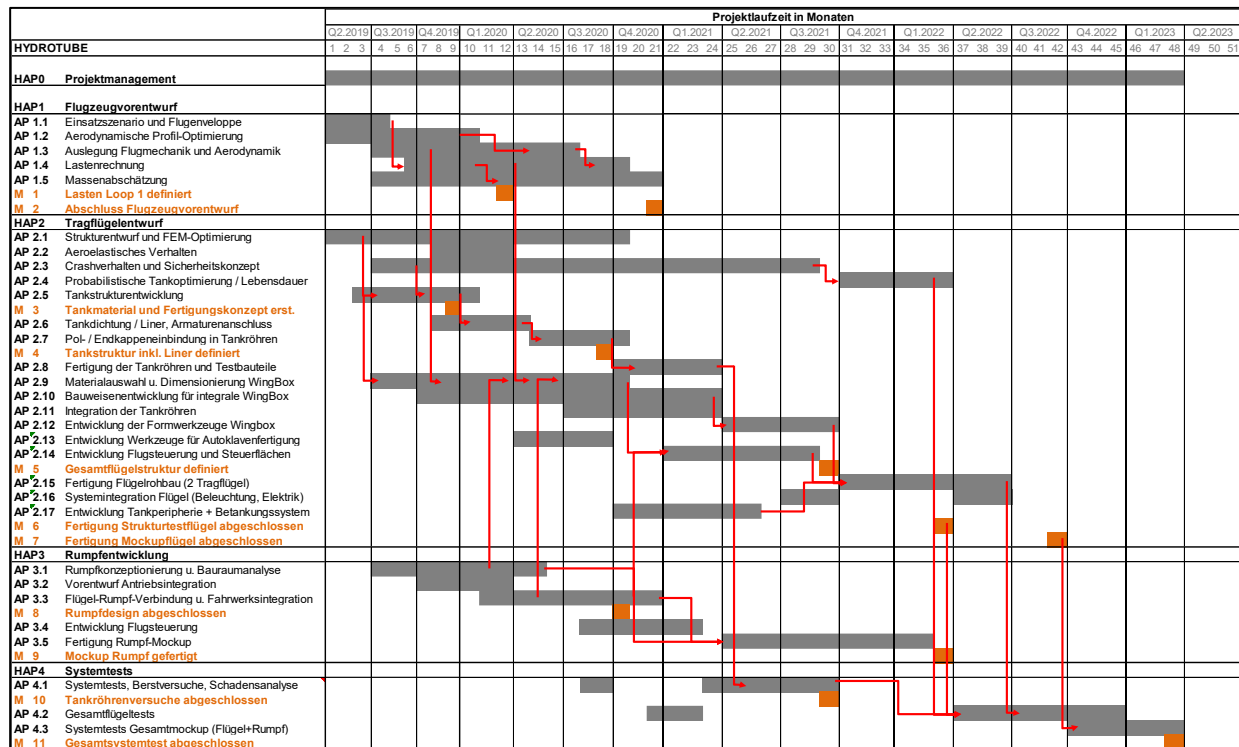


Abbildung 2 Zeitplanplan für das Verbundprojekt

Tabelle 1: Meilensteine laut Antrag

MS	Bezeichnung des Meilensteins (MS)	Datum
M1	Lasten Loop 1 definiert	03/2020
M2	Abschluss Flugzeugvorentwurf	12/2020
M3	Tankmaterial und Fertigungskonzept erstellt	12/2019
M4	Tankstruktur inkl. Liner definiert	09/2020
M5	Gesamtflügelstruktur definiert	09/2021
M6	Fertigung Strukturtestflügel abgeschlossen	03/2022
M7	Fertigung Mockup-Flügel abgeschlossen	09/2022
M8	Rumpfdesign abgeschlossen	10/2020
M9	Mockup-Rumpf gefertigt	03/2022
M10	Tankröhrenversuche abgeschlossen	09/2021
M11	Gesamtsystemtest abgeschlossen	03/2023

1.2 Kurzfassung der wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein Konzept für die Fertigung von Tankröhren zur Speicherung von Wasserstoff in Kleinflugzeugen erarbeitet. Die Besonderheit der Tankröhren besteht darin, dass sie gleichzeitig integraler Bestandteil der Flügelstruktur sind. Dieses innovative Konzept führt zu einer Erhöhung der Performance des Flugzeugs, da die integrale Bauweise einen signifikanten Vorteil mit Bezug zur Masse des Gesamtflügels hat.

Im Verlauf des Forschungsvorhabens wurde ein Design und Fertigungskonzept für die Tankröhren erarbeitet, insgesamt 9 Tankröhren (1 x Pilotröhre als Technologiedemonstrator, 2 Satz Tankröhren a 4 Stück für 2 Flügel) und eine Validierung des Konzepts durchgeführt. Die Validierung erfolgte dabei durch zwei Maßnahmen. Einerseits wurde die Festigkeitsanalyse rechnerisch mit Hilfe von FEM-Berechnungen durchgeführt. Andererseits erfolgte eine experimentelle Festigkeitsuntersuchung an einem Vorversuchskörper zur Überprüfung der rechnerischen Simulation als auch eine Festigkeitsanalyse an der kompletten Flügelstruktur. Der Test an der kompletten Flügelstruktur wurde im Auftrag des Konsortialpartners TU Dresden bei der IMA Dresden durchgeführt. Das vorrangige Ziel der experimentellen Festigkeitsanalyse war die Bewertung des gewählten Designs. Die Analyse der Ergebnisse ist Bestandteil der Dokumentation der TU Dresden.

Die Zusammenarbeit im Projekt erfolgte für den angegebenen Berichtszeitraum gemäß der bewilligten Verbundstruktur. Auf Grund von höherem Aufwand in der Design- und Fertigungsphase des Projekts als auch längeren Lieferzeiten beim ausgewählten Material kam es zu Verzögerungen im Projekt, die eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts zur Folge hatte. Die Projektverlängerung stellte sicher, dass alle Arbeitsinhalte des Forschungsvorhabens bearbeitet werden konnten. An Schnittstellen innerhalb von gemeinsamen Arbeitspaketen kam es Unterstützungsleistungen und inhaltlichen Verschiebungen von Arbeitspaketen. Dies betrafen die Tankabdichtung, den Armaturenanschluss und das Betankungssystem. Aufbauend auf den Ergebnissen des KVB wurden diese Arbeiten durch den Konsortialpartner APUS unterstützt und anschließend fortgesetzt.

Das Verbundprojekt wurde durch einen wöchentlichen Austausch im Rahmen einer Status-Telefonkonferenz, bilaterale Abstimmungen zwischen den Projektpartnern sowie zusätzliche Workshops zu einzelnen Themen inhaltlich gesteuert. Im Sinne von gemeinsam zu treffenden Entscheidungen wurden Reviews zu Design und Fertigungsprozess durchgeführt. Im Berichtszeitraum wurden unter anderem folgende Reviews/Workshops durchgeführt:

- Kick-Off-Meeting in Straußberg
- Workshop zum Design-Stand in Straußberg,
- Konzept-Review in Döbeln und
- Jahrestreffen mit dem Projektträger in Döbeln
- Abschlusstreffen und Ergebnispräsentation mit dem Projektträger in Dresden

2 Technischer Bericht

Der technische Bericht beinhaltet die Dokumentation der im Berichtszeitraum erzielten Ergebnisse und den Abgleich zu den im Förderantrag geplanten Forschungsschwerpunkten.

2.1 AP2.5 - Tankstrukturentwicklung

2.1.1 Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP2.5

Tabelle 2: Inhalte von AP2.5

Arbeitspakettitel: Tankstrukturentwicklung	AP-Nummer: AP2.5
Beteiligte Partner: KVB, TUD	Laufzeit: M3 – M9
Ziele des AP: Am Anfang der Materialauswahl steht die Definition von Auswahlkriterien. Diese umfassen sowohl mechanische Eigenschaften wie Steifigkeit, Festigkeit und Zähigkeit, als auch Verarbeitungseigenschaften wie Faserflächengewicht, Tack und die Kombinationsmöglichkeiten mit verschiedenen Fertigungsverfahren. Erstes Zwischenziel ist deren genaue Zusammenstellung und Wichtung. Im nächsten Schritt werden eine Vorauswahl von Materialien und eine Optimierung hinsichtlich der Geometrie und des Lagenaufbaus der Tankröhren vorgenommen.	
Ergebnisse des AP: Das Ergebnis des Arbeitspakets beinhaltet die Materialauswahl für die Tanks zusammen mit einer umfassenden Charakterisierung der mechanischen und verarbeitungsseitigen Eigenschaften des Materials. Zusätzlich dazu soll mit diesem Material eine Vorauslegung der Struktur erfolgen, die weitestgehend vollständig Materialstärken und Faserorientierungen einschließt.	

2.1.2 Technologieauswahl bei der Tankstrukturentwicklung

Im Rahmen der Tankstrukturentwicklung wurden unterschiedliche Materialien und Fertigungsverfahren für Tankröhren mit Bezug auf Verfügbarkeit, Eigenschaften und deren Performance untersucht. Konzeptbedingt kamen für die Herstellung der Tankröhren hauptsächlich Prepreg-Materialien infrage. Diese zeichnen sich durch ihre guten mechanischen Eigenschaften aus und sind aufgrund ihres hohen Qualitätsstandards für die Anwendung im Luftfahrtbereich prädestiniert. Um das Potential des Materials hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften voll ausschöpfen zu können, war es vorteilhaft die Faser möglichst ununterbrochen und gestreckt abzulegen. Aufgrund der großen Abmessungen der zu fertigenden Tankstrukturen und der Dickwandigkeit des Lagenaufbaus kamen klassische Laminiertechniken für dieses Projekt nicht in Frage. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zwei Technologien näher untersucht und gegenübergestellt. Beide Varianten vereint die grundlegende Idee die Faserlagen in ihre Hauptorientierung aufzuteilen und zu segmentieren. Aus diesem Ansatz und den zu berücksichtigenden mechanischen Lasten im Flugbetrieb ergeben sich Segmente mit überwiegend umfänglich und überwiegend axial orientierten Fasern.

In Abbildung 3 ist der schematische Aufbau der beiden untersuchten Technologien dargestellt. Die grün dargestellten Bereiche sind überwiegend parallel zur Achse des Tanks verstärkt, bei den blauen Segmenten sind die Fasern überwiegend umfänglich orientiert.

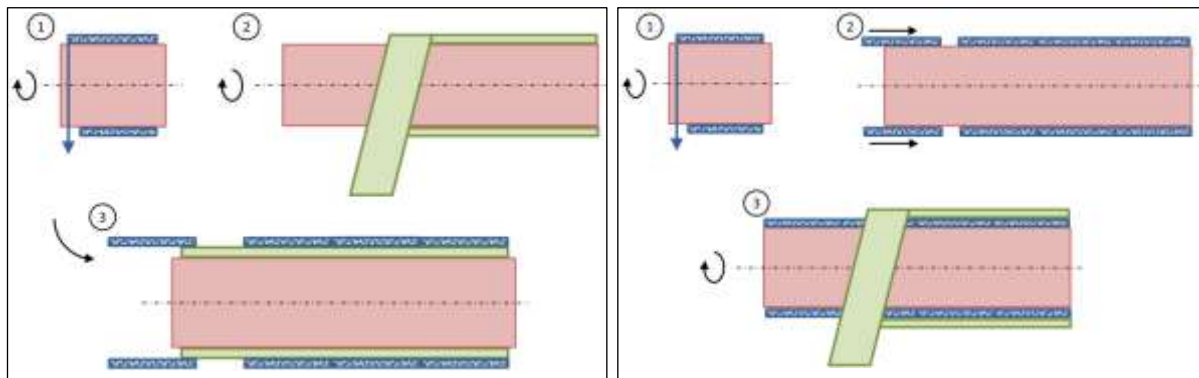


Abbildung 3 Schematische Darstellung beider Fertigungskonzepte, links: Konzept 1 - innenliegende Axialverstärkung, rechts: Konzept 2 - außenliegende Axialverstärkung

Die umfänglich verstärkten Segmente wurden dabei mit einer speziell auf das Material angepassten Wickeltechnologie hergestellt. Diese ermöglichten es, das Prepreg-Material teilautomatisiert mit einer hohen Ablagegeschwindigkeit und unter Vorspannung zu applizieren. Somit wurden die Fasern prozessbedingt quasi-endlos und gesteckt abgelegt. Die so hergestellten Teilsegmente wurden anschließend miteinander verbunden, um die benötigte Gesamtlänge zu erhalten.

In einem darauffolgenden Arbeitsschritt wurden axiale Verstärkungslagen integriert. Um die volle Leistungsfähigkeit des Prepreg-Materials nutzen zu können, müssen die axialen Verstärkungslagen über die gesamte Länge der Tankröhren verlaufen. Das Aufbringen dieser Lagen erfolgte deshalb in einem manuellen Laminiervorgang.

Die beiden in Abbildung 3 gezeigten Technologien unterscheiden sich hauptsächlich in der Fertigungsreihenfolge und der Anordnung der Segmente. Während bei Konzept 1 die einzelnen Umfangssegmente über die vorgelegten axialen Verstärkungslagen geschoben und während des Aushärtens des Harzsystems von innen nach außen verpresst wurden, sind bei Konzept 2 die Umfangssegmente bereits vorher gefertigt und miteinander verbunden worden. Anschließend wurden die axialen Verstärkungslagen von außen auf die Röhre laminiert.

Bei Konzept 1 wurde zur Ablage der axialen Verstärkungslagen ein Werkzeug benötigt, auf dem das Prepreg-Material vorgelegt wurde und welches die gesamte Länge der Tankstruktur umfasst. Gleiches gilt für das benötigte Außenwerkzeug, in welches die Perform des Tanks eingelegt wurde und während des Härtevorgangs formgebend für die Außenkontur der Röhre ist. Aufgrund der Größe des Bauteils erwies sich die Handhabung der so hergestellten Perform bereits bei einem Vorversuch mit geringer Länge als problematisch. Außerdem wirkte bei Konzept 1 eine hohe mechanische Belastung auf den Liner bereits während der Fertigung, da dieser konzeptbedingt gleichzeitig im Autoklav-Prozess als Blasschlauch fungieren muss.

Beim Konzept 2 lag der Liner in den bereits ausgehärteten umfänglich verstärkten Segmenten und war damit kein primäres Prozesshilfsmittel. Die einzelnen Rohrsegmente mussten zuvor einzeln ausgehärtet werden und ergaben anschließend einen formstabilen Wickelkern, welcher das kostenintensive Laminierwerkzeug von Konzept 1 ersetzte.

2.1.3 Fertigungsvorversuche zum Vergleich der Fertigungskonzepte

Die Entscheidung für die im Projekt zu nutzende Fertigungstechnologie wurde auf Grundlage verschiedener Vorversuche durchgeführt. Hierfür wurden einzelne Prozessschritte der beiden Konzepte losgelöst und in Kombination miteinander betrachtet.

Technologisch unterscheiden sich die jeweils ersten Prozessschritte der beiden Konzepte nicht wesentlich voneinander, weshalb diese mit den gleichen Vorversuchen abgedeckt werden konnten. Es wurden kleine Segmente testweise mit unterschiedlichen Materialien und Konfigurationen an der im KVB vorhandenen Wickelmaschine hergestellt. Abbildung 4 zeigt den teilautomatisierten Ablageprozess des Prepreg-Tapes unter erhöhter Temperatur auf einem dafür hergestellten Wickeldorn aus Aluminium sowie das ausgehärtete Faserverbundsegment.



Abbildung 4 links: Fertigungsversuch für überwiegend umfänglich verstärktes Segment, rechts: hergestellter Versuchskörper

Für Konzept 1 wurde die mit Hilfe der Faserwickeltechnologie hergestellte Preform vom Wickeldorn gezogen und in ein Außenwerkzeug gelegt (Abbildung 5 links). Parallel dazu wurden die hauptsächlich axial zur Tankachse orientierten Prepreg-Lagen manuell auf ein untermaßiges Wickelwerkzeug abgelegt. Zum Entformen der axial abgelegten Lagen vom Wickelwerkzeug und zur Stabilisierung der Preform wurde diese vor dem Entformen mit dem Werkzeug in die Kühlung gelegt. Die entformte Preform ist in Abbildung 5 in der mittleren Darstellung zu sehen. Anschließend wurden die axial verstärkten Lagen mit den Umfangslagen in das Außenwerkzeug eingelegt (Abbildung 5 rechts). In das Außenwerkzeug wurde anschließend ein Blasschlauch eingelegt und an den Enden zum Werkzeug hin abgedichtet. Mit Hilfe dieses Blasschlauches wurden die Prepreg-Lagen im Härteprozess mittels Vakuums auf der einen Seite und Überdruck auf der anderen Seite miteinander verpresst und an die Innenwand des Werkzeugs angelegt.



Abbildung 5 links: unausgehärtete Umfangslagen im Außenwerkzeug, mittig: unausgehärtete Preform der Axialverstärkung, rechts: eingelegte Preform im Außenwerkzeug

Bei diesem Verfahren hat sich das Verpressen der außenliegenden Umfangslagen als problematisch erwiesen, da diese sich gegen das Aufweiten durch den innen anliegenden Druck sperren und somit kein Gegendruck gegen die Werkzeuginnenwand entsteht. Infolge dessen waren diese Lagen weniger gut verdichtet und bildeten Trockenstellen auf der Oberseite aus. Die Anbindung der unterschiedlich orientierten Lagen war nach dem Verpressen trotz der beschriebenen Effekte sehr gut.

Bei Konzept 2 erfolgte die Ablage der umfänglichen Verstärkungslagen mittels Wickelmaschine analog zu Konzept 1. Allerdings wurden die Segmente auf dem Werkzeug gehärtet und anschließend an den Stirnseiten miteinander verbunden. Die axialen Verstärkungslagen wurden dann außen auf die ausgehärteten Umfangslagen appliziert, von außen verdichtet und anschließend gehärtet. In Abbildung 6 ist der mit dieser Technologie hergestellte Versuchskörper im Ganzen und im Querschnitt in Nahaufnahme zu sehen. In der rechts abgebildeten Darstellung sind die unterschiedlich orientierten Lagenpakete zu erkennen.



Abbildung 6 links: gehärtete Teststruktur, rechts: Nahaufnahme der Lagenstruktur im Querschnitt mit umfängliche Verstärkungslagen innen und axialen Verstärkungslagen außen

Um die in den Fertigungsversuchen erlangten Erkenntnisse hinsichtlich der Eignung für die Tankröhren bewerten zu können, wurden die beiden Technologien auf die Ebene von Vorversuchskörpern übertragen. Detaillierte Ausführungen sind in der Dokumentation zu AP2.8 dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Konzept 1 vor allem wegen seiner höheren Form- und Maßhaltigkeit der Außenkontur Vorteile bietet. Allerdings gestaltet sich die Ausführung der Polkappenanbindung als aufwändiger im Vergleich zu Konzept 2. Zudem sind bei Konzept 2 die benötigten Werkzeugkosten wesentlich geringer und das Risiko bei der Fertigung geringer. Für die Fertigung der Tankröhren wurde Konzept 2 gewählt.

2.1.4 Materialauswahl

Zur Umsetzung dieses Konzeptes wurden sowohl Prepreg, als auch Towpreg benötigt. Dazu wurden mehrerer Hersteller sowie Vertriebspartner wie Solvay, CIT Composite Materials Italy, SGL Carbon, Gurit, Hexcel, Biesterfeld AG, Torayca recherchiert und angefragt.

Numerische Analysen der TU Dresden haben gezeigt, dass das für die Tankstruktur kritische Auslegungskriterium der Zwischenfaserbruch darstellt. Aus diesem Grund wurde für die Tankstruktur ein Material mit möglichst hoher Querkzugfestigkeit gesucht und ausgewählt.

Die grundlegenden Untersuchungen zur Materialauswahl wurden auf Basis von Kennwerten durchgeführt, die aus technischen Datenblättern der Lieferanten stammten. Zur Sicherstellung der Materialkennwerte wurden Materialtests durchgeführt. Dabei wurde sich auf die Eigenschaft der für die Auslegung dominanten Querkzugfestigkeit des Materials konzentriert.

Die Bestimmung der Querkzugfestigkeit wurde in Anlehnung an die Norm DIN EN 2597 durchgeführt. Bei der Fertigung der Platten für die Herstellung der Prüfkörper kam ein autoklavähnlicher Prozess zum Einsatz. Dabei wurde zur Herstellung der Probekörper eine Platte mit einer Fläche von 300x300 mm² mit Hilfe eines Tauchkantenwerkzeug gefertigt. Der Grund für den Einsatz eines Tauchkantenwerkzeugs war, dass für die Bestimmung der Querkzugfestigkeit Platten mit unidirektionalen Fasern benötigt wurden. Ohne die Verwendung des Werkzeuges bestand das Risiko, dass ein starkes Verschwimmen und somit keine genaue Ausrichtung der Fasern bei den Probekörpern auftritt. Nach der Fertigung der Platten wurden aus diesen die benötigten Prüfkörper mit einer Geometrie von 25x200 mm² gefräst und entgratet. Bevor die Proben geprüft werden konnten, wurden Aufleimer zur Gewährleistung einer optimalen Krafteinleitung beidseitig an den Probenenden angebracht.

Um die Prüfung statistisch abzusichern und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden pro Material fünf Proben geprüft. Mit einer Prüfgeschwindigkeit von etwa 0,33 mm pro Sekunde wurden die Prüfkörper quer zur Faser gezogen. Die Prüfung galt nach Bruch der Probe als beendet. Proben mit einem Bruch im Abstand kleiner 5 mm vom Einspannbereich wurden nicht in der Auswertung berücksichtigt.

Als mögliche Prepreg-Materialien standen nach der vorangegangenen Recherche folgende Kandidaten zur Auswahl:

- HS300 T700 ER450 35% von CIT (Composite Materials Italy)
- Towpreg T700-24K/30%/KS001 von Torayca
- Cycom 977-2 von Solvay.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Querkzugprüfung für die Härtung nach Herstellerangaben zusammengetragen. Es ist zu erkennen, dass das Cycom 977-2 -Prepreg von Solvay die besten Querkzeugeigenschaften aufweist. Aus den strukturellen Berechnungen der TU Dresden geht eine geforderte Querkzugfestigkeit von mindestens 50 MPa hervor. Dieses Kriterium erreicht von den betrachteten Materialien nur das Cycom 977-2.

Tabelle 3: Ergebnisse der Querkzugprüfung

Prepreg	Minimum [MPa]	Mittelwert [MPa]
HS300 T700 ER450	30,3	38,8
Towpreg T700-24K	27,8	33,4
Cycom 977-2	66,1	78,1

2.1.5 Prozessoptimierung

Auf Basis der Technologieauswahl, den Erfahrungen der Vorversuche mit unterschiedlichen Materialien und der finalen Materialauswahl, erfolgte die Optimierung der Prozessparameter hinsichtlich der angestrebten Geometrie der Tanks.

Aufgrund der Dickwandigkeit der zu wickelnden Segmente kann es ja nach Prozessparametern zu starken Ondulationen der Fasern oder zu Poren im Material kommen. Um die passenden Prozessparameter zu ermitteln, wurde eine Versuchsreihe gestartet. Dabei wurden die Prozessparameter hinsichtlich des Porengehalts und des Grads der Ondulationen optimiert. Die untersuchten Prozessparameter waren dabei der Unterdruck am Vakuumsack, der Überdruck im Autoklav, die Temperatur bei der Tape-Ablage, die Verwendung von Zwischenlagen (Art und Position) und die Anzahl der Prozessstufen, in denen die Struktur hergestellt wird, sowie anlagenspezifische Einstellungen. Eine Übersicht der Versuche ist in Abbildung 7 zu sehen.

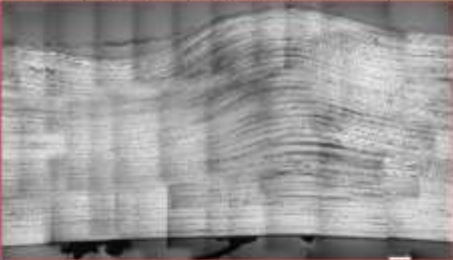
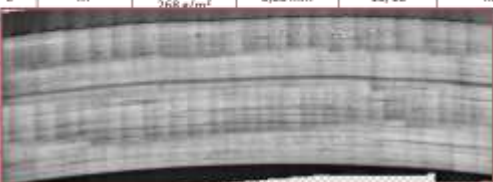
Versuch	Vakuum	Autoklav- druck	Härtetemp.	Ablagetemp.	Material/Flächen- gewicht	Bandbreite (Eimt.-Wert)	Härten nach X Lagen	Glaslage	Poren	Ondulat	
VV_ST_OA_020	ja	nein	125 °C		Cycom 977-2 / 268 g/m²	6,00 mm	10/10	nein	5,10%		
VV_ST_OA_023 ***	ja	nein	125 °C						5,00%		
VV_ST_OA_024	ja	nein	125 °C						4,3 %		
VV_ST_OA_025	ja	nein	125 °C						< 3 %	1-2	4,64 mm 0,129 mm
VV_ST_JA_001	ja	4 bar	125 °C						< 1 %	4	4,65 mm 0,129 mm
VV_ST_JA_002	ja	1 bar	125 °C		Cycom 977-2 / 268 g/m²	6,00 mm	10/10	nein	3,20%	2	4,65 mm 0,129 mm
VV_ST_JA_003	ja	2 bar	125 °C						1-2 %	3	5,0 mm 0,250 mm
VV_ST_JA_003_02	ja	2 bar	125 °C						~ 1,2 %	3	4,75 mm
VV_ST_JA_004	ja	2 bar	180 °C						< 1%	1	5,1 mm 0,255 mm
VV_ST_JA_005	ja	2 bar	180 °C						/	2	5,0 mm 0,250 mm

Abbildung 7 Übersicht der Versuche zur Prozessoptimierung

Bei einem einstufigen Prozess war vor allem der beim Härten wirkende Außendruck von großer Bedeutung. Ohne Überdruck im Autoklav wurde bei den geforderten Wanddicken zwar ondulationsfreie Bauteile gefertigt, die jedoch einen sehr hohen Porengehalt aufwiesen. Bei erhöhtem Druck konnten die Poren schrittweise reduziert werden, im gleichen Maße nahm aber die Ausprägung der Ondulationen zu. Erst die Aufteilung des Prozesses in mehrere Stufen führte zu einer signifikanten Steigerung der Bauteilqualität. Allerdings war damit auch eine deutliche Erhöhung des Fertigungsaufwandes verbunden. Durch die Erhöhung der Härtetemperatur konnte die Qualität weiter verbessert werden.

Die Verarbeitungstemperatur bei der Tape-Ablage oder weitere Zwischenlagen hatten dagegen nur sehr geringen Einfluss auf die Bauteilqualität.

Neben dem Faserwickelverfahren galt es auch geeignete Parameter für den Laminierprozess der axialen Verstärkungslagen zu ermitteln. Aufgrund der komplexen Geometrie ergab sich für die Schlaufen, die die Bandage an der Polkappe fixieren, eine mehrfach gekrümmter Ablagepfad, der in Abbildung 8 skizziert ist. Dafür mussten die axialen Verstärkungslagen zunächst auf die gekrümmte Polkappe laminiert werden, bevor anschließend die Bandage auf die Polkappe gesetzt wurde und die axialen Lagen um diese umgeschlagen werden konnten.

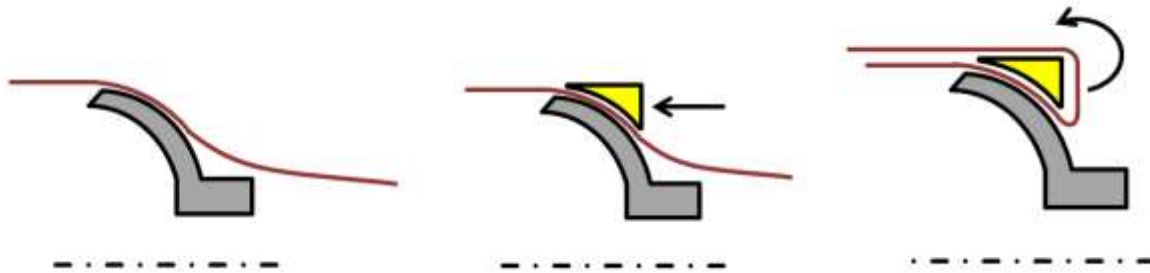


Abbildung 8 Ablagepfad der Schlaufen zur Polkappenanbindung

Für die Umsetzung dieser Schnittstelle wurden zahlreiche Versuche durchgeführt und die möglichen Faserwinkeln, die Lagenanzahlen und die Ablagereihenfolge untersucht. Im Ergebnis lagen eine detaillierte Fertigungstechnologie und Arbeitsanweisung für die Mitarbeiter vor.

2.2 AP2.6 - Tankdichtung / Liner, Armaturenanschluss

2.2.1 Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP2.6

Tabelle 4: Inhalte von AP2.6

Arbeitspakettitel: Tankdichtung / Liner, Armaturenanschluss	AP-Nummer: AP2.6
Beteiligte Partner: KVB	Laufzeit: M8 – M13
Ziele des AP: Ziel des Arbeitspaketes ist es, das Material, die Gestalt, die Anbindung, und die Integration einer durchgängigen Innenschicht für die Tankröhren in Form eines Liners festzulegen. Ferner soll ein Verbindungskonzept erarbeitet werden, das die Dichtigkeit der Tanks und insbesondere der Verbindungsstellen zwischen Armaturen und dem Liner sicherstellt.	
Ergebnisse des AP: Im Ergebnis des Arbeitspakets werden sowohl Liner-Material und dessen Form sowie eine Definition der konkreten Anschlüsse für die notwendigen Armaturen an der Polkappe festgelegt.	

2.2.2 Festlegung von Tankdichtung und Armaturenanschluss

Die konstruktive Ausgestaltung der Tankdichtung mit dem Armaturenanschluss, sowie die Liner-Integration war ein stark iterativer Prozess. Die Verifizierung der Funktionsweise erfolgte im Rahmen des AP 2.8. Die Festlegung der Schnittstelle zu den Armaturen und damit zum Flugzeugsystem erfolgte in einer intensiven Abstimmung mit APUS.

Auf Basis einer Literaturrecherche wurden eine Vielzahl von verfügbaren Liner-Materialien und den damit verbundenen Anschlusskonzepten ermittelt. Darauf aufbauend wurden mehrere Konzepte für die Schnittstelle zwischen der metallischen Polkappe, die als integrierter Bestandteil der Tankstruktur ausgelegt wurde, und dem Bossteil, welches den Anschluss für das später eingesetzte Ventil darstellt, erarbeitet.

Ein Konzept sieht ein Bossteil vor, welches durch ein Gewinde von innen in der Polkappe verschraubt wurde. Dabei sorgte ein Gewindedichtmittel für die Abdichtung zwischen Boss und Polkappe. Damit die Verbindung bei der späteren Montage des Ventils nicht gelöst werden kann, wurde das Gewinde an der Verbindung gegenläufig zum Gewinde am Ventil als Linksgewinde ausgeführt. Der Liner wurde mit dem Flansch am Boss mit einem Strukturklebstoff verbunden. In Abbildung 9 ist das Konzept sowohl als CAD-Modell als auch real umgesetzt zu sehen. Das Anschlusskonzept wurde mit einem Liner aus TUP umgesetzt.



Abbildung 9 Anschlusskonzept 1, links: CAD-Modell, rechts: Foto

Neben diesem Ansatz wurde im Rahmen des Projektes ein zweites Konzept in Betracht gezogen. Anders als bei Konzept 1 wurde das Bossteil nicht in die Polkappe geschraubt, sondern gesteckt und von außen mit einer Mutter fixiert. Um das Verdrehen des Bossteils bei der Montage der Ventile zu verhindern, wurde ein profilierter Absatz auf dem Boss vorgesehen, der in entsprechende Aussparungen in der Polkappe greift. Auch bei den Dichtungen unterscheidet sich das Konzept deutlich vom ersten Konzept. Die Verbindung zwischen Bossteil und Polkappe wurde mit einem O-Ring gedichtet, welcher mit Stützringen gegen die hohen Drücke gesichert wurde. Der Liner war am Bund mit einem PE-Ring verschweißt und auf das Bossteil gesteckt. Über die Mutter wurde das Bossteil gegen die Polkappe verspannt und so die Flachdichtung zwischen Boss und Polkappe verpresst. Das beschriebene Konzept ist in Abbildung 10 als Konstruktionsmodell und mit einem Mehrschichtverbund-Liner zu sehen.



Abbildung 10 Anschlusskonzept 2, links: CAD-Modell, rechts: Foto

Wie sich die unterschiedlichen Dichtkonzepte im Zusammenbau mit der Polkappe darstellen, ist in Abbildung 11 zu sehen. Die rot markierten Bereiche zeigen dabei die Dichtflächen. Die beiden linken Abbildungen zeigen unterschiedliche Ausführungen des ersten Konzeptes, rechts ist Konzept 2 dargestellt.

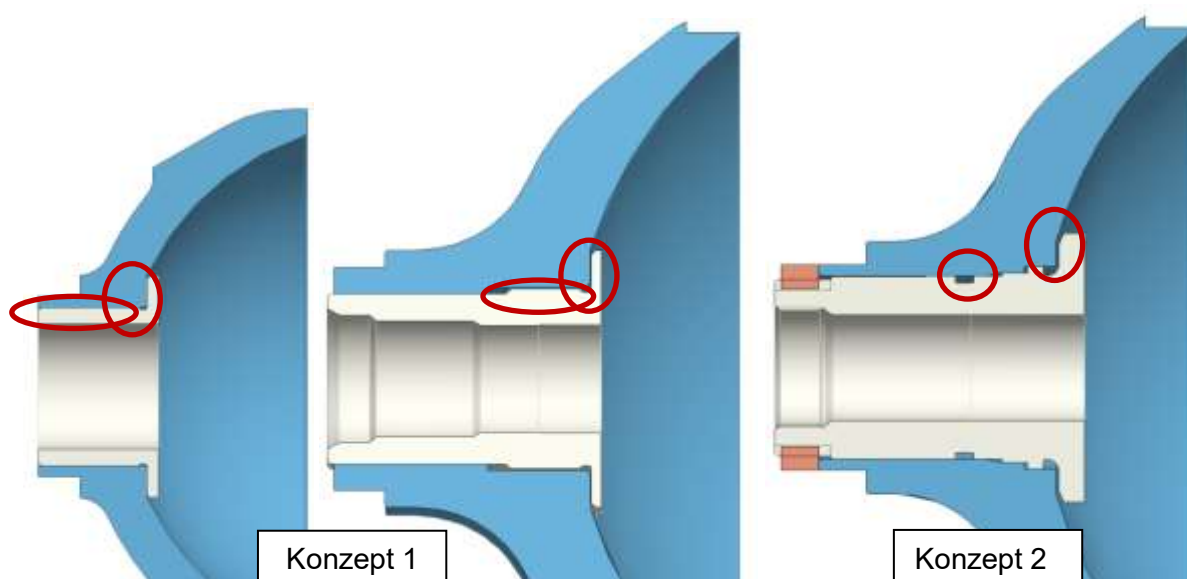


Abbildung 11 Dichtungskonzepte im Zusammenbau

Als letzte Option wurde die Änderung der Montagereihenfolge von Liner und Boss betrachtet. Die Schnittstelle zwischen der metallischen Polkappe und dem Bossteil wurde dabei komplett überarbeitet. Anders als bei den zuvor untersuchten Konzepten, bei denen der Liner mit dem Bossteil während der Tankfertigung integriert wurde, ermöglicht es dieses Konzept den Liner mit dem Bossteil nachträglich in den fertigen Tank zu montieren. Abbildung 12 zeigt das überarbeitete Konzept. Dieses Konzept wurde in Abstimmung mit APUS erarbeitet. Das Konzept eines austauschbaren Liners hat einen hohen Nutzen für den Endanwender.

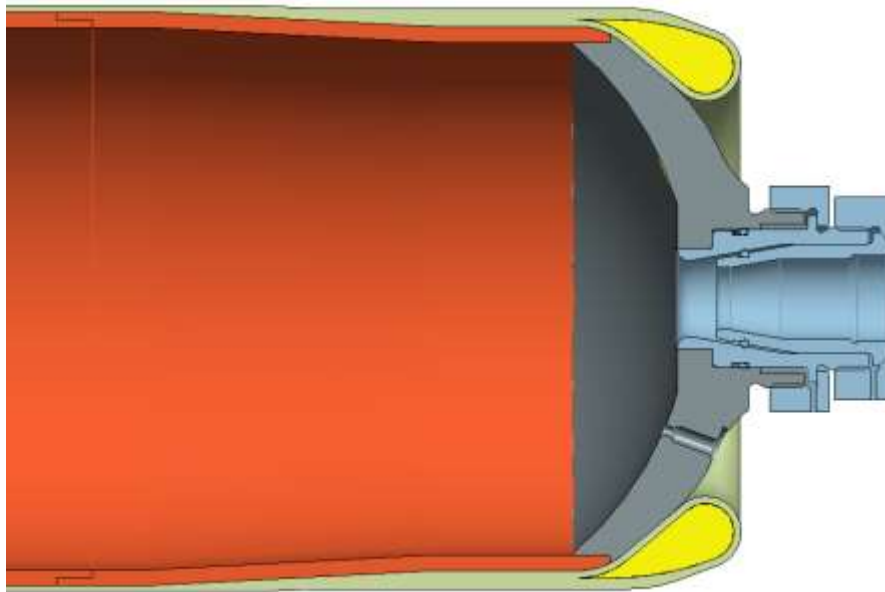


Abbildung 12 Polkappenkonzept im CAD-Modell mit Anschlussinterface

Die Polkappe wurde als fester Bestandteil der Faserverbundstruktur ausgebildet. Das Bossteil wurde als ein separates Bauteil konstruiert, welches von außen montiert werden kann. Es ist zweiteilig ausgeführt und besitzt in der Schnittstelle zwei konische Flächen. In die Trennfuge kann bei der Montage der Liner eingelegt. Durch das Verspannen beider Konusteile wird der Liner geklemmt und durch den eingelegten Dichtring abgedichtet.

Das Bossteil kann dann mit dem Liner in den Tank gesteckt werden, wobei das Bossteil durch eine Überwurfmutter an der Polkappe fixiert wird. Die Nuten stellen eine Verdrehsicherung dar. In jeder Polkappe ist hierbei zudem eine Entlüftungsbohrung vorgesehen, die benötigt wird, um die Luft zwischen Liner und Tankstruktur zu evakuieren. Wenn der Liner an der Struktur anliegt wird die Bohrung mit einer Schraube verschlossen, bevor der Tank mit höherem Druck beaufschlagt werden kann.

2.2.3 Gestaltung des Liners

Die Recherche nach einem geeigneten Liner für die Drucktanks war auf Grund der spezifischen Anforderungen als schwierig. Die Ursachen dafür lag an den hohen Anforderungen, die an den Liner sowohl bei der Montage, dem Fertigungsprozess und dem Betrieb gestellt wurden. Aus der Recherche haben sich unterschiedliche Folienmaterialien hervorgetan, die auf ihre Verfügbarkeit als Folie geprüft und teilweise für Versuche beschafft wurden. Dabei wurden neben Monolayer-Folien aus HDPE, PA, PP und TPU auch Mehrschicht-Verbundfolien mit Sperrschichten beispielsweise aus Aluminium und EVOH betrachtet.

Im Projekt wurden drei Optionen für die Liner näher untersucht. Die Varianten sind nachfolgend kurz erläutern.

Variante 1: TPU-Liner

Hierbei handelt es sich um einen Folienliner, bestehend aus einer dickwandigen (ca. 0,2 mm bis 0,4 mm) TPU-Folie, der durch seine hohe Dehnfähigkeit und der Temperaturbeständigkeit mechanisch sehr robust ist. Kennwerte zu Permeationseigenschaften bezüglich Wasserstoffs konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Daher bedarf es spezifischer Untersuchungen.

Variante 2: Mehrschicht-Verbund-Liner

Ein Liner aus einer Mehrschichtverbund-Folie wurde innerhalb des Arbeitspakets untersucht. Die eingesetzte Folie bestand aus einem Verbund von PE, Aluminium und PET. Die mit PE beschichtete Seite dient bei der Herstellung des Liners zum Verschweißen, die Aluminiumschicht im Inneren der Folie stellt eine Barrierschicht dar und das PET schützt die Verbund-Folie vor äußeren Einflüssen. Durch das verwendete Aluminium ist eine sehr hohe Wasserstoffdichtigkeit bereits bei sehr dünnen Schichtdicken gegeben. Dadurch ist das Leichtbaupotential bei dieser Variante besonders hoch. Nachteilig hat sich in Untersuchungen allerdings die vergleichsweise geringe Dehnfähigkeit erwiesen. Beim Handling kam es schnell zu Beschädigungen an der dünnen Aluminiumschicht.

Variante 3: funktionalisierte Beschichtung

Die Option einer Beschichtung wurde geprüft, welche nachträglich von innen in der Tankstruktur appliziert werden könnte. Diese betrachtete Schicht basiert auf einem Epoxidharz, welches mit Aluminiumpartikeln versetzt werden kann. Durch die spezielle Anordnung der Partikel wird dafür gesorgt, dass Wasserstoff nur sehr schlecht durch die Schicht dringen kann. Erfahrungswerte für ähnliche Anwendungen liegen vor. Aufgrund dessen, dass die Schicht in das bestehende Konzept integriert werden muss, entstehen allerdings große Aufwände bei der technologischen Umsetzung. Trotz des hohen Potentials dieser Technologie konnte auf Grund der hohen Kosten dieses Konzept innerhalb des Projekts nicht weiterverfolgt und umgesetzt werden.

Im Anschluss an die durchgeführten Einbautests wurde in Abstimmung mit dem Konsortialpartner APUS entschieden, den Liner nachträglich in den Tank zu integrieren. Die Integration des Liners wurde als Aufgabenpaket an APUS übergeben. Dadurch ergab sich zum einen der Vorteil, dass der Liner nicht den hohen Beanspruchungen während des Herstellungsprozesses ausgesetzt war, zum anderen ist ein nachträglicher Austausch des Liners jederzeit möglich. Als Material für den Liner wurde sich für TPU entschieden, wobei für zukünftige Forschungsvorhaben das Ziel besteht, einen TPU-Liner mit integrierter Sperrschicht zu verwenden.

2.3 AP2.7 - Polkappenanbindung an die Tankröhren

2.3.1 Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP2.7

Tabelle 5: Inhalte von AP2.7

Arbeitspakettitel: Polkappenanbindung an die Tankröhren	AP-Nummer: AP2.7
Beteiligte Partner: KVB	Laufzeit: M14 – M19
Ziele des AP: Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, eine Methode zur Fertigung und Integration bzw. zur integralen Fertigung von Polkappen der Drucktanks zu entwickeln. Dazu müssen zunächst Anforderungen an und Form der Polkappen geklärt werden. Anschließend müssen Form, Material und Schnittstellen zu anderen Bauteilen geklärt und anschließend das Design einschließlich der Verbindung mit der Tankröhre entwickelt werden	
Ergebnisse des AP: Die Ergebnisse des Arbeitspakets sind die Festlegung der Gestalt der Polkappen sowie die damit verbundene Wahl des Fertigungs- und Integrationsverfahrens.	

2.3.2 Bedeutung der Polkappenanbindung

Das Design der Polkappe und deren Anbindung an die Tankröhre waren eng verbunden mit der Tankstrukturentwicklung. Die Ergebnisse des Arbeitspakets flossen direkt in das Arbeitspaket AP2.5 ein. Der für die Auslegung dimensionierende Lastfall wurde innerhalb des durch die TU Dresden erarbeiteten Sicherheitskonzepts über den Nenndruck und einer Sicherheit gegenüber Versagen mit dem Faktor 2,25 definiert. Das Design der Polkappe und deren Anbindung erfolgte auf Basis von FEM-Berechnungen.

2.3.3 Design der Polkappe

Die Polkappen sind Bestandteil der Tankstruktur und bilden zusammen mit den zylindrischen Rohrstrukturen den Tank. Zusätzlich wurden in die Polkappen Bossteile zur Aufnahme der Anschlussarmaturen integriert. Im Bereich der Polkappenanbindung treten hohen mechanischen Belastungen auf. Wegen der Anforderungen an Funktion und Festigkeit wurde sich im Rahmen des Forschungsvorhabens für eine Aluminiumlegierung für die Polkappe entschieden.

Im Rahmen der Entwicklung der Polkappe und deren Anbindung wurden konstruktive Entwürfe erarbeitet und dimensioniert. Im Ergebnis wurde ein Polkappenkonzept, welches eine differentiale Fertigung von sehr langen und zylinderförmigen Druckbehältern aus Prepreg-Materialien zulässt, ausgewählt.

Die Geometrie der Polkappe wurde mit Hilfe von Optimierungsberechnungen angepasst, so dass eine gleichmäßige Spannungsverteilung im Bauteil wirkt. Zusätzlich zur Polkappengrundform wurde ein konischer Bereich für einen großflächigen Anschluss des Laminats an der Tankröhre vorgesehen. Der konisch zulaufende Bereich auf der Außenseite der Polkappe erzeugt ein Formschluss mit dem darüber liegenden Material und sichert somit die Anbindung der Polkappe an den zylindrischen Teil der Tankstruktur.

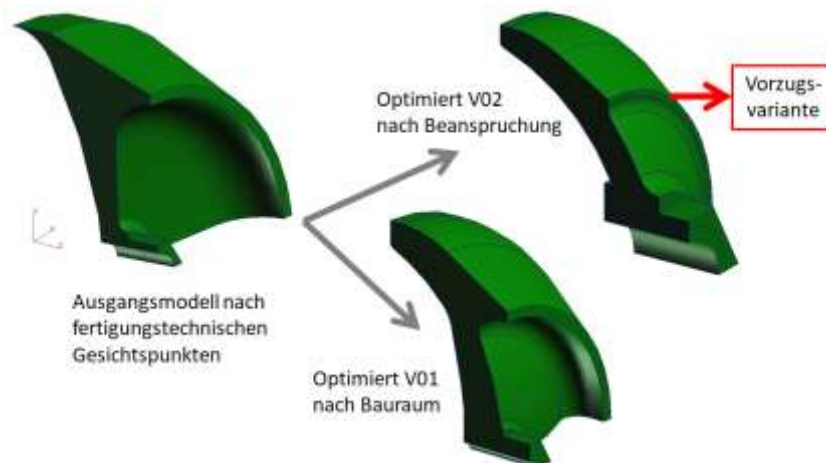


Abbildung 13 konstruktive Varianten für die Polkappe

Bei der Optimierung der Geometrie wurden mehrere Grundkonzepte erstellt und zwei favorisierte Varianten genauer untersucht (siehe Abbildung 13). Die Polkappe wurde so ausgelegt, dass die vorliegende Vergleichsspannung beim dimensionierenden maximalen Innendruck unterhalb der Streckgrenze des ausgewählten Materials (AW 7075) liegt. Die Geometrie des konischen Bereichs bewirkt, dass sich die Polkappe auch unter erhöhter Faserlängsspannung nicht vom Laminat lösen kann. Das Ergebnis der Optimierung und der ermittelten Polkappengeometrie ist in Abbildung 14 ersichtlich.

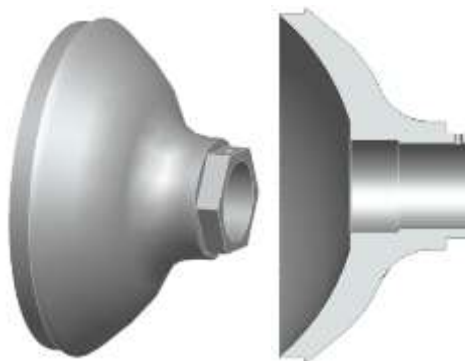


Abbildung 14 Geometrie der Polkappe

2.3.4 Design der Polkappenanbindung

Basis für das Design der Polkappenanbindung war der Lagenaufbau der Tankröhren. Der Lagenaufbau der Tankröhre wurde in enger Abstimmung zwischen den Projektpartnern ermittelt und auf Basis von Optimierungsrechnungen der TU Dresden festgelegt. Dabei gingen die grundlegenden Anforderungen an den Flügel, die erforderliche Speicherkapazität für die Tankröhren und die Performance des Flügels sowie des Flugzeugs in die durchgeführten Analysen mit ein.

Es wurden parallel zwei unterschiedliche Konzepte zur Anbindung der Polkappe verfolgt. In einem ersten Design-Entwurf lagen die axialen Verstärkungslagen im Inneren des Tanks und waren von den umfänglichen Verstärkungslagen umschlossen. Zur Anbindung der Polkappe wurden die axialen Lagen zulaufend über den Konus der Polkappe laminiert. Gegen das Aufweiten der axialen Lagen unter Innendruck wurden weitere umfänglich orientierte Lagen vorgesehen.

Ein Schema des Ausbaus ist in Abbildung 15 dargestellt.

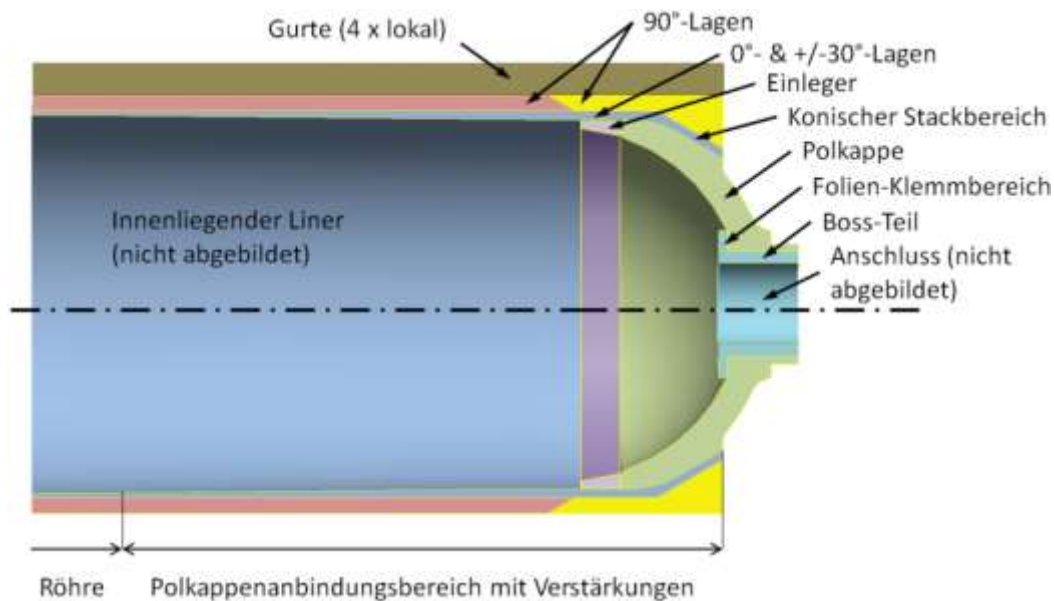


Abbildung 15 Design-Entwurf 1: Tankröhre mit Polkappe und Anbindungsbereich

Berechnungen zeigten jedoch, dass sich dieses Konzept durch ein sehr kritisches Versagensverhalten auszeichnet. Schon bei einem Innendruck deutlich unterhalb des Nenndrucks kommt es zu einem Ablösen der metallischen Polkappe von der CFK-Struktur. Dadurch rutscht die Polkappe dann nach außen, weshalb es durch die konische Form zum Aufbiegen der Struktur im Bereich der Anbindung kommt. Infolge dessen entstehen Zwischenfaserbrüche, die den gesamten Anbindungsbereich durchziehen. Abbildung 16 zeigt die Reservefaktoren der CFK-Struktur des Anbindungskonzepts bei 1,64-fachem Nenndruck gegenüber Zwischenfaserbruch.

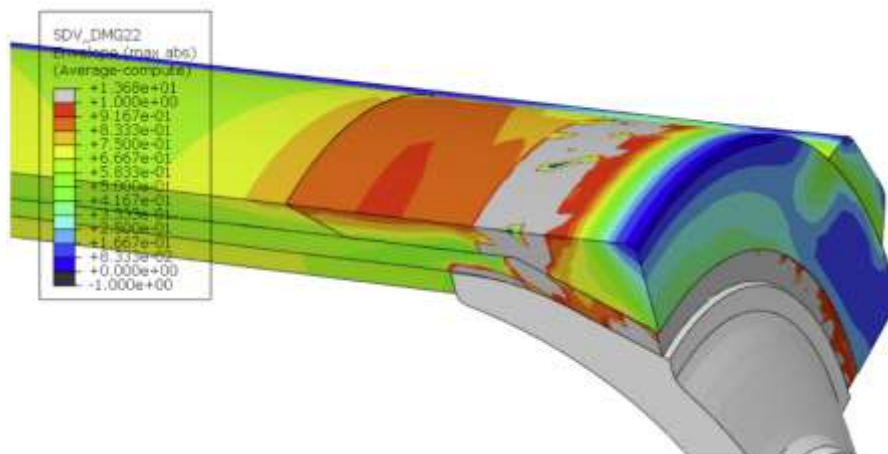


Abbildung 16 mit Zwischenfaserbrüchen durchsetzte Polkappenanbindung

Die in grau dargestellten Bereiche zeigen die großflächig auftretenden Zwischenfaserbrüche in diesem Bereich. Infolge dieser starken Schädigung kann die Integrität der Polkappenanbindung nicht mehr sichergestellt werden und es besteht die Gefahr des Ablöses der Polkappe.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde ein zweiter Design-Entwurf erarbeitet. Anders als zuvor wurde die Anordnung der Lagen verändert, was eine robustere Anbindung der Polkappe ermöglicht. Hierbei befinden sich die umfänglich verstärkten Lagen innen im Tank, die axialen Verstärkungslagen sind darüber liegend angeordnet. Das Design ist in Abbildung 17 dargestellt.

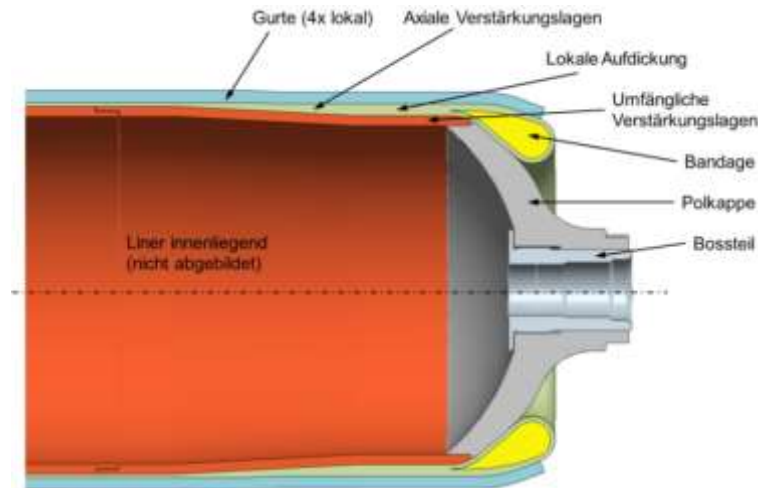


Abbildung 17 Querschnitt der Tankröhre mit Polkappe und angepasstem Anbindungsbereich

Die metallische Polkappe wird an ihren äußeren konischen Flächen von den axialen Verstärkungslagen formschlüssig gehalten. Um ein Aufweiten der Konusverbindung zu verhindern, wurde dieser Bereich zusätzlich mit einer Bandage verstärkt, welche aufgrund der zu einer Schlaufe umgeschlagenen axialen Verstärkungslagen am Abrutschen behindert wird.

Im Laminat der Tankröhre kommt es unmittelbar im Anbindungsbereich zur Polkappe bei Innendruckbelastung zu erhöhten Beanspruchungen. Daher war es zwingend notwendig, für diesen Bereich eine Verstärkung der Tankröhre vorzunehmen. Dies wurde über das Umschlagen der vorhandenen und das Einlegen zusätzlicher Verstärkungslagen in diesem Bereich realisiert.

Die Auslegung der Anbindung erfolgte unter Einbeziehung von FEM-Berechnungen. Die Simulationsrechnungen dienten zur rechnerischen Nachweisführung der Festigkeit. Eine Validierung der Ergebnisse wurde experimentell im Rahmen eines statischen Versuchs durchgeführt.

Die Basis für den numerischen Nachweis bildeten das 3D-Modell, die Materialkennwerte und die anliegenden Lasten und Sicherheitsfaktoren. Das vernetzte Berechnungsmodell ist aus den Konstruktionsdaten abgeleitet worden und in Abbildung 18 dargestellt.

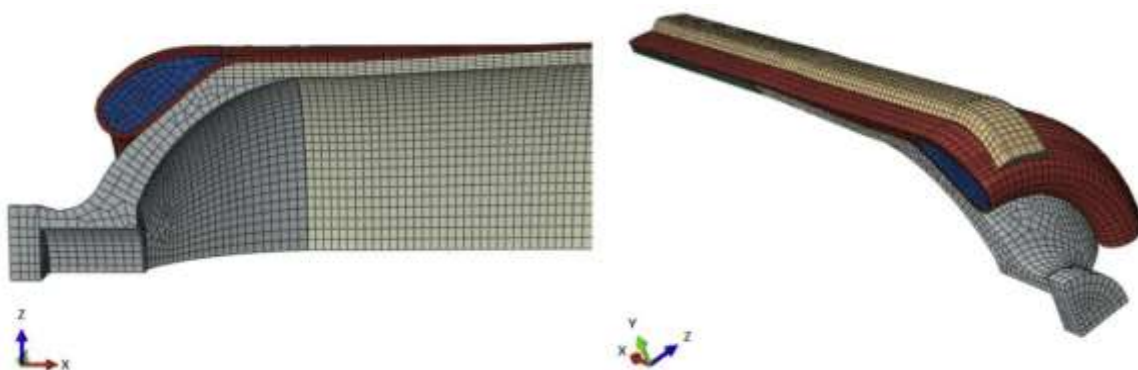


Abbildung 18 vernetztes FE-Modell zur Nachweisrechnung

In Abbildung 19 ist die Auslastung der Laminatstruktur gegenüber Zwischenfaserbruch bei einem Lastfaktor von 1,15-mal dem Nenndruck dargestellt. Im ungestörten zylindrischen Bereich treten die höchsten Spannungen quer zur Faser in den äußeren axialen Verstärkungslagen auf. Sie liegen mit weniger als 90 % Auslastung innerhalb der geforderten Sicherheit.

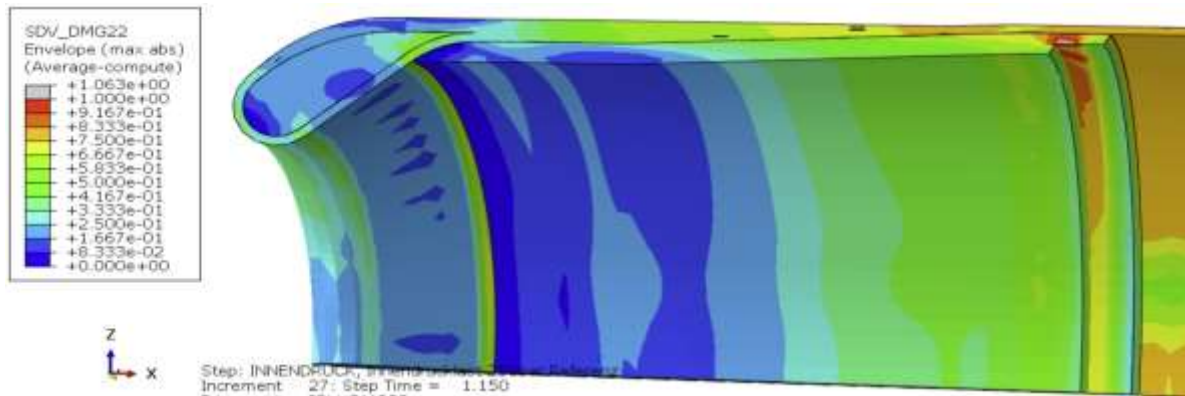


Abbildung 19 Auslastung gegenüber Zwischenfaserbruch bei Lastfaktor 1,15

Mit steigendem Innendruck wird die Laminatstruktur zunehmend mit Zwischenfaserbrüchen durchsetzt. In Abbildung 20 ist die Auslastung bei Erreichen des Berstdruckniveaus dargestellt.

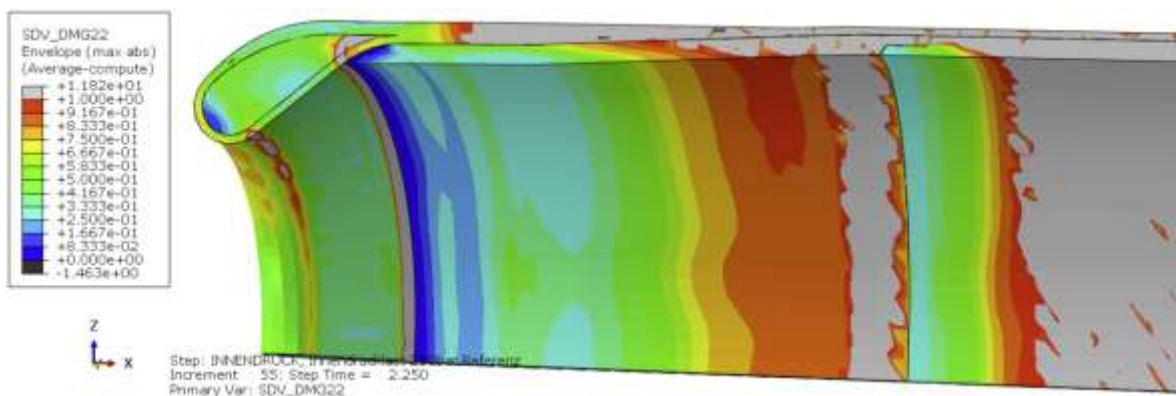


Abbildung 20 Auslastung gegenüber Zwischenfaserbruch bei Lastfaktor 2,25

Bei einem Druck von 2,25-mal dem Nenndruck treten im zylindrischen Bereich flächig Zwischenfaserbrüche auf. In Faserrichtung ist die Auslastung der Struktur dagegen relativ gering und liegt im Maximum bei ca. 64 % (siehe Abbildung 21). Im Bereich der Schlaufenanbindung ist rechnerisch kein Zwischenfaserbruch festzustellen.

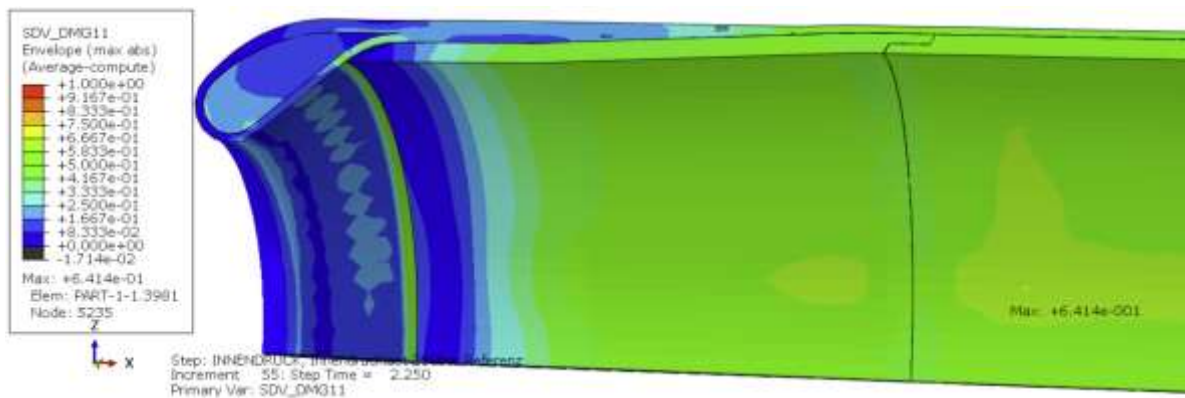


Abbildung 21 Auslastung gegenüber Faserbruch bei Lastfaktor 2,25

Die durchgeführten Berechnungen haben die Vorauslegung bestätigt und verdeutlichen die Annahme, dass das Versagen auf Zwischenfaserbruch das kritischere und dimensionierende Kriterium für diesen Anwendungsfall ist.

2.4 AP2.8 - Fertigung der Tankröhren und Testbauteile

2.4.1 Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP2.8

Tabelle 6: Inhalte von AP2.8

Arbeitspakettitel: Fertigung der Tankröhren und Testbauteile	AP-Nummer: AP2.8
Beteiligte Partner: KVB	Laufzeit: M19 – M24
Ziele des AP: Ziel dieses Arbeitspaketes ist es die Tankröhren zu fertigen. Dafür muss die gewählte Technologie erprobt, optimiert und angewendet werden. Ein Teil der Tankröhren wird für Testzwecke benötigt. Der andere Teil der Tankröhren wird zur Integration in den Gesamtflügel benötigt. Darüber hinaus werden Versuchskörper zur Validierung der Technologie und zum Nachweis der mechanischen Eigenschaften gefertigt.	
Ergebnisse des AP: Das Ergebnis des Arbeitspakets sind die Tankröhren und Versuchskörper.	

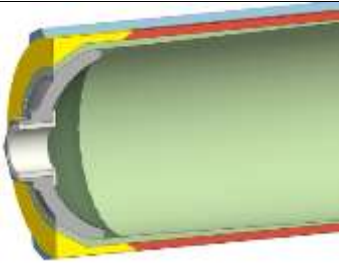
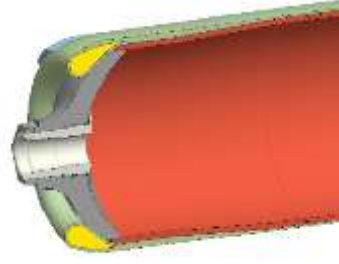
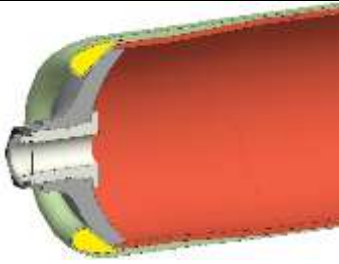
2.4.2 Herstellung von Vorversuchskörpern

Auf der Basis der in AP2.5 erarbeiteten Konzepte wurden Varianten abgeleitet und Fertigungsvorversuche durchgeführt. Diese Vorversuche wurden mit der Tankgeometrie der Holmgröße 2 und einer reduzierten Länge der Tanks von 1,5 m durchgeführt.

Im Fokus der Vorversuche stand die Erprobung der Fertigungsabläufe wie z.B. das Ausrichten und Verkleben der einzelnen Segmente, die Optimierung der Zuschnitt-Dateien für die Lamine sowie der Erstellung von Bauunterlagen, die die Basis für die Fertigung der kompletten Flügeltanks bildeten. Während der Vorversuche wurden mehrere Konfigurationen untersucht. Dabei wurden die zwei unterschiedlichen Strukturkonzepte, die Varianten zur Polkappenanbindung, verschiedene Liner-Konzepte und die Schnittstelle zwischen Polkappe und Boss mit dem daran gekoppelten Dichtungskonzept untersucht.

Tabelle 7 fasst die durchgeführten Vorversuche mit den jeweiligen Konfigurationen zusammen.

Tabelle 7: Übersicht der durchgeführten Versuche mit den jeweiligen Konfigurationen

Versuch	Konstruktion	Strukturkonzept	Liner	Dichtkonzept
#1		Außenliegende Umfangslagen	TPU-Liner (prozessintegriert)	Liner-Boss: verklebt Boss-Polkappe: Gewindedichtmittel
#2		Innenliegende Umfangslagen	TPU-Liner (prozessintegriert)	Liner-Boss: verklebt Boss-Polkappe: Gewindedichtmittel
#3		Innenliegende Umfangslagen	PE-AL-PET (prozessintegriert)	Liner-Boss: PE- Flachdichtung (verschweißt) Boss-Polkappe: O-Ring
#4		Innenliegende Umfangslagen	TPU-Liner (nachträglich eingebracht)	Liner-Boss: Liner durch O- Ring konisch geklemmt Boss-Polkappe: O-Ring

Versuchskörper 1

Die Umsetzung von Vorversuch #1 erfolgte nach Strukturkonzept 1 und einem TPU-Liner, der mit dem Bossteil verklebt war. Der Bau eines Tanks mit 1,5 m Länge wurde erfolgreich umgesetzt. Ein Nachteil bei dieser Bauform bestand darin, dass die Preform für die axialen Lagen auf einem separaten Werkzeug abgelegt werden mussten. Das dafür genutzte Werkzeug musste damit die Gesamtlänge des Tanks abbilden und ein Entformen der Preform zulassen. Vor allem Letzteres gestaltete sich im Vorversuch als schwierig. Die Prozesssicherheit bei langen Tankstrukturen (9,25 m) konnte nicht garantiert werden. Das Risiko für die Fertigung der kompletten Tankröhren wurde als zu hoch eingeschätzt.

Versuchskörper 2

Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen beim ersten Vorversuch wurde das Strukturkonzept überarbeitet und die Reihenfolge der Lagenpakete geändert.

Die nun innenliegenden Umfangssegmente wurden zunächst positioniert und verklebt. Anschließend konnten die axialen Verstärkungslagen von außen auf den gefügten Umfangssegmenten abgelegt werden. Die Umfangssegmente dienten dabei direkt als Werkzeug und ersetzten damit ein separates Werkzeug.

Die Erprobung dieses Strukturkonzeptes erfolgte mit dem Vorversuch #2. Dabei konnte das Konzept erfolgreich umgesetzt werden. Auch die Machbarkeit im Originalmaßstab auf 9,25 m Länge konnte im Rahmen des Arbeitspaktes erfolgreich demonstriert werden. Das Liner- und Dichtungskonzept blieb zum Vorversuch #1 unverändert. In einem ersten Versuch zeigte sich, dass die Dichtung zwischen dem Bossteil und der Polkappe bei der hohen Temperaturdifferenz während des Härteprozesses im Autoklav versagt. Dadurch strömte Luft in das Tankinnere zwischen den Liner und die Bauteilwand. Da der eingesetzte TPU-Liner bei den sehr hohen Prozesstemperaturen spröde und rissempfindlich wird, kam es infolge dessen zum Versagen des Liners. Im Rahmen des Fertigungsversuches zeigte sich auch, dass die erarbeitete Montagetechnologie des Liners Nachteile aufwies und die Prozesssicherheit nicht gewährleistet werden konnte. Durch das Verschrauben der Bossteile mit verklebtem Liner in die Polkappe ließ sich ein leichtes Verdrillen des Liners bei dem Zusammenbau nicht vollständig vermeiden. Infolge der Verdrillung des Liners kam es anschließend zur Faltenbildung. Beim Härteprozess im Autoklav unter Temperatur und Druck neigten diese Bereiche verstärkt zum Aufreißen des Liners.

Versuchskörper 3

Um die Faltenbildung des Liners zu verhindern wurde das Anschlusskonzept des Bossteils weiterentwickelt. Das Bossteil wird nicht mehr mit der Polkappe verschraubt, sondern gesteckt und mit einer Kontermutter gesichert. Des Weiteren wurde das Dichtungskonzept überarbeitet, um die Schnittstelle zwischen Boss und Polkappe auch bei großer Temperaturdifferenz zu realisieren. Am Vorversuchskörper #3 wurde ein weiteres Liner-Material erprobt. Der eingesetzte Mehrschichtverbundliner wies im Gegensatz zum TPU-Liner eine deutlich geringe Wanddicke auf. Die Permeationsrate von Wasserstoff ist bei dem Verbundliner durch die eingebrachte Sperrschicht geringer im Vergleich zum TPU-Liner ohne explizite Sperrschicht. In Vorversuch #3 konnte der Liner faltenfrei und ohne Verdrillung integriert werden. Auch die angepasste Dichtung zwischen Boss und Polkappe hielt den Bedingungen im Härteprozess stand. Allerdings reagierte der Verbundliner im Montage- und Aushärteprozess sehr sensibel auf Temperatur- und Druckeinflüsse und war nicht formstabil.

Versuchskörper 4

Zur Minimierung des Risikos bei der Herstellung, wurde im weiteren Verlauf das Konzept zur Liner-Integration optimiert. Da sich in den vorangegangenen Untersuchungen zeigte, dass die eingesetzten Liner sehr empfindlich auf die Kombination aus hoher Temperatur und Druck bei Härteprozess im Autoklav reagieren, wurde bei diesem Konzept die nachträgliche Integration des Liners in den vollständig gefertigten Tank vorgesehen. Somit lassen sich für den Liner zum einen die hohen Belastungen beim Härteprozess der CFK-Struktur vermeiden. Zudem erhöht sich mit dem Wegfall dieser Anforderungen grundsätzlich die Auswahl der infrage kommenden Liner-Materialien. Des Weiteren bietet dieser Ansatz die Chance, einen defekten Liner nachträglich zu tauschen. Zur Umsetzung dieses Konzeptes waren Anpassungen an den Bossteilen sowie den Polkappen notwendig. Die Aufgabe zur nachträglichen Integration der Liner wurde von APUS übernommen.

2.4.3 Fertigungsstrategie

Aus den Erkenntnissen der Fertigungsvorversuche wurde eine Variante für den Bau der Tankröhren abgeleitet. Die Tanks wurden durch mehrere Arbeitsschritte auf Basis von Einzelsegmenten hergestellt. Die CFK-Segmente wiederum wurden mittels Faser-Wickelverfahren gefertigt. Jedes Segment war ca. 1 m lang, was ein einfaches Handling ermöglichte. Für die Enden des Tanks waren – konstruktiv bedingt – leicht verjüngte Segmente notwendig. Um die bereits gehärteten Segmente miteinander verbinden zu können, wurden diese spanend bearbeitet und mit einer Schäftung versehen. Über die Schäftung konnten sich die Segmente auf einer entsprechenden Vorrichtung zueinander ausrichten lassen und wurden miteinander verkleben. Hierbei war die exakte Positionierung der Segmente wichtig, da dieser Arbeitsschritt großen Einfluss auf die Geradheit des fertigen Tanks hatte. In diesem Arbeitsschritt wurden auch die metallischen Polkappen mit der Verbundstruktur gefügt. Anschließend wurden die axialen Verstärkungslagen von außen auf die verklebten Segmente laminiert. Sie dienen zur Aufnahme der axialen Lasten und mussten deshalb über die gesamte Länge des Tanks ungeschnitten aufgebracht werden. Zur Sicherung der Polkappen wurden zusätzlich Bandagen auf die Polkappen gesteckt und mit zu Schlaufen gelegten axialen Lagen fixiert. Die Bandagen wurden wie die Segmente im Faser-Wickelverfahren hergestellt und waren vor der Montage am Tank bereits ausgehärtet. Abschließend wurden die Tanks mit den laminierten axialen Verstärkungslagen im Autoklav gehärtet.

Alle wesentlichen Prozessschritte zur Herstellung der Tankröhren sind in Abbildung 22 schematisch zusammengefasst.

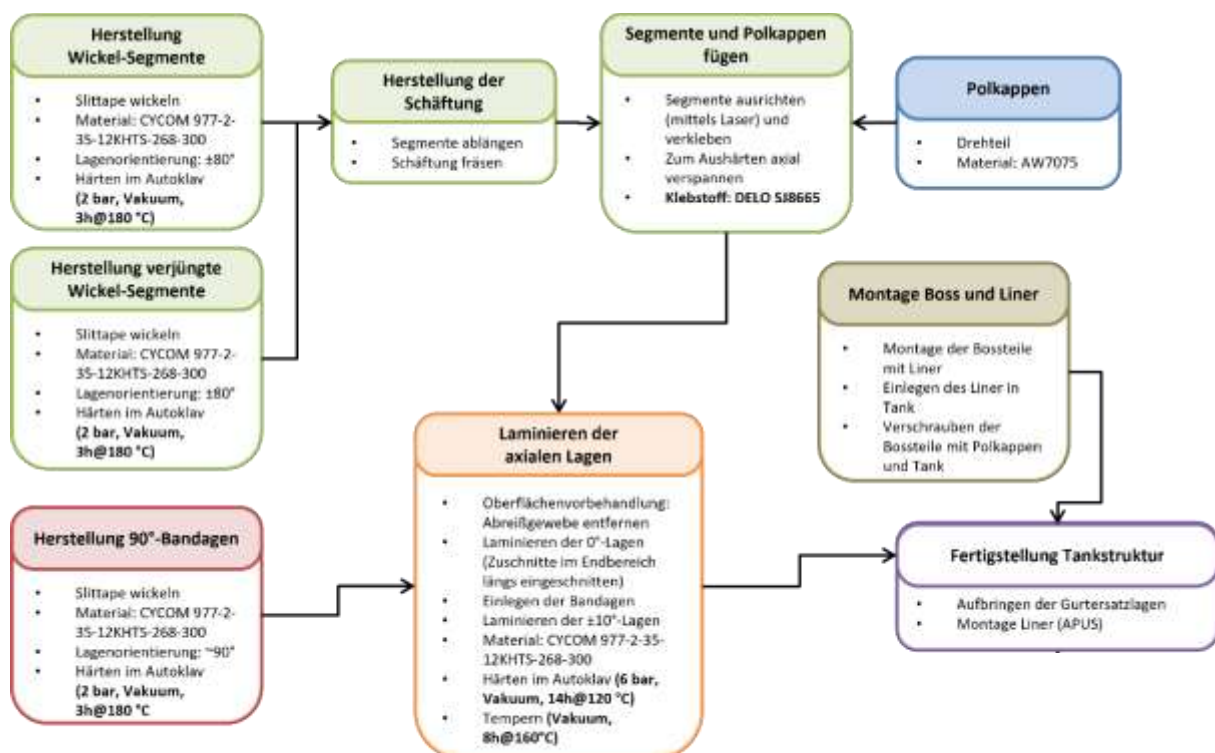


Abbildung 22 Prozessschema

2.4.4 Herstellung Tankröhren

Nach Abschluss der Arbeitspakete zur Tankröhrenentwicklung wurde zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der vorgelagerten Untersuchungen auf die finale Größe eine Pilotröhre mit 9,25 m Länge und dem Durchmesser entsprechend Holm 2 hergestellt. Ausgewählte Fertigungsschritte sind in Abbildung 23 dargestellt. Der Fokus bei der Fertigung lag zunächst auf der technischen Umsetzbarkeit.

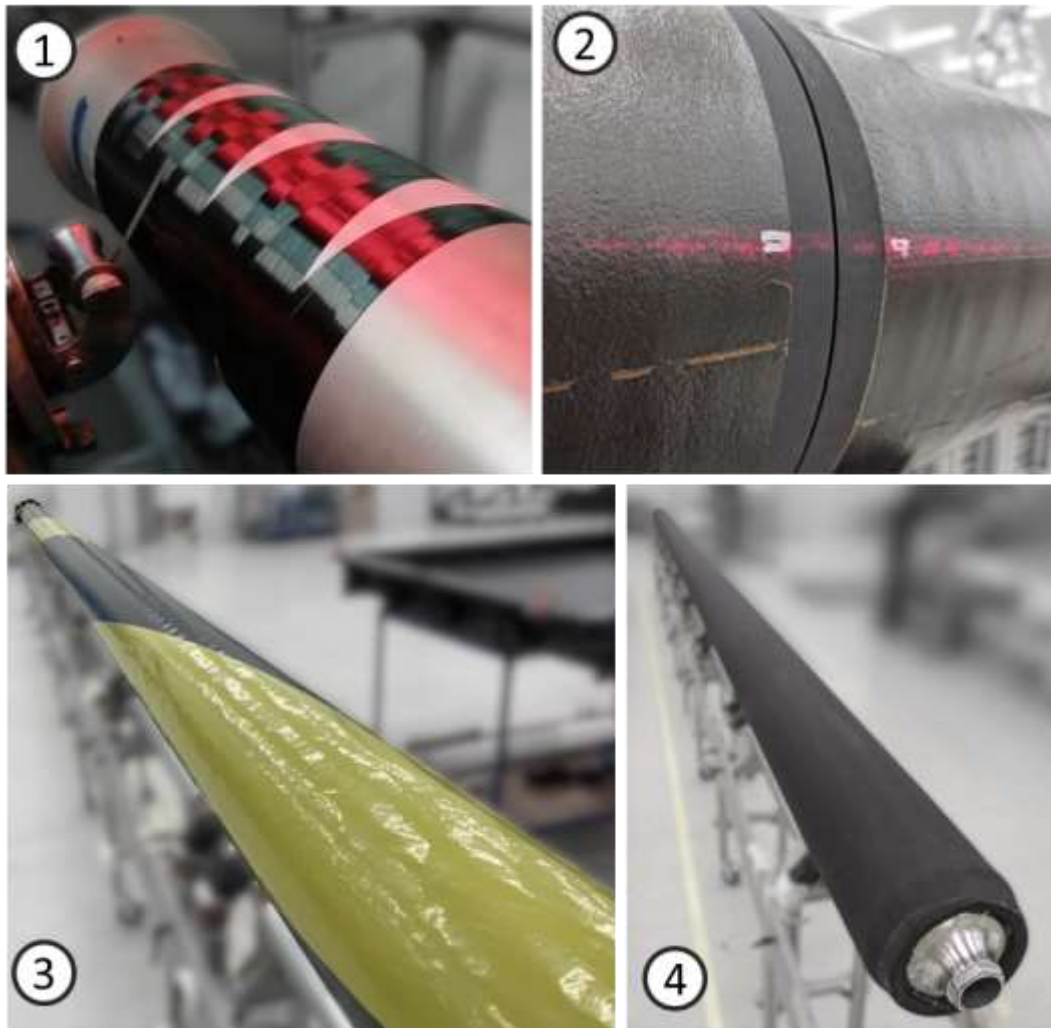


Abbildung 23: Prozess der Tankröhrenfertigung

① Wickelprozess der umfänglichen verstärkten Segmente ② Verkleben der Segmente ③ Laminieren der axialen Verstärkungslagen ④ Druckbehälter mit 9,25 m Länge

Ein weiterer Schwerpunkt bei der Herstellung der Pilotröhre lag auf der Erfassung von Form- und Lageabweichungen, welche während des Fertigungsprozesses auftreten.

Mithilfe des optischen Vermessungssystem ATOS Triple Scan wurde die Geometrie des Tanks vermessen, visualisiert und mit dem CAD-Modell der Sollgeometrie abgeglichen. Ein exemplarischer Abgleich ist in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt, wobei die Farbe Grau für das aufgenommene Geometrie und die Farbe Blau für die CAD-Sollkontur steht. In den Querschnitten der Z- sowie Y-Ebene ergaben sich überwiegend Abweichungen von unter zwei Millimetern über die gesamte Tanklänge (siehe Abbildung 24).

Im Rahmen der Analyse der Fertigungsgenauigkeit an einer 9,25 m langen Tankröhre konnte die Einhaltung der festgelegten Toleranzen und somit die technische Umsetzbarkeit der gewählten Fertigungskonzepts nachgewiesen werden. Die Pilotröhre als Demonstrationsobjekt ist beim KVB verblieben.



Abbildung 24: Abgleich des Ist-Geometrie mit dem CAD-Modell der Sollgeometrie

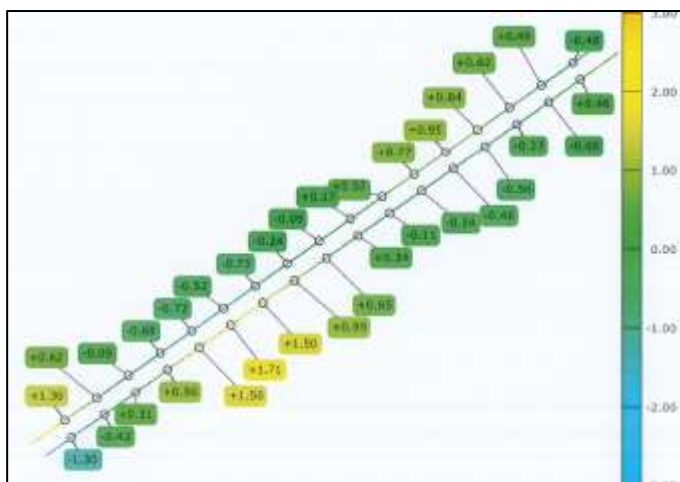


Abbildung 25: Abgleich Ist-Geometrie mit der Sollgeometrie im Querschnitt der Z-Ebene

Aufbauend darauf wurden die Tanks für den Einbau in die Flügel gefertigt. Insgesamt wurden für die 2 gepaltten Flügel 8 weitere Tankröhren gefertigt, wobei 3 verschiedene Geometrien umgesetzt wurden.

Die 8 gefertigten Tanks wurden für den Bau des Flügels an den Projektpartner COTESA übergeben.

2.5 AP2.9 - Materialauswahl und Dimensionierung WingBox

2.5.1 Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP2.9

Tabelle 8: Inhalte von AP2.9

Arbeitspakettitel: Materialauswahl und Dimensionierung WingBox	AP-Nummer: AP2.9
Beteiligte Partner: COTESA, KVB, TUD	Laufzeit: M04 – M19
Ziele des AP: Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Integration der Tankröhren in die WingBox, einschließlich der Abstimmung zur Materialauswahl, Herstellungstechnologie, Geometrie und Schnittstellen zu den anderen Arbeitspaketen der beteiligten Partner. In diesem Arbeitspaket steht KVB mit den für die Tankentwicklung und -herstellung verantwortlichen Ingenieuren als Partner zur Seite, um diesen bei der Entwicklung eines Konzepts zur Tankintegration zu unterstützen.	
Ergebnisse des AP: Das Ergebnis des Arbeitspakets ist die Zuarbeit von benötigten Informationen für COTESA.	

2.5.2 Abstimmung zur Materialauswahl, Herstellungstechnologie, Geometrie und Schnittstellen

Die Abstimmung zur Materialauswahl, Herstellungstechnologie, Geometrie und Schnittstellen zu den anderen Arbeitspaketen der beteiligten Partner erfolgte in wöchentlichen Meetings zwischen den beteiligten Partnern. Die wöchentlichen Abstimmungen wurden als Telefonkonferenz durchgeführt. Die ausgetauschten Informationen wurden dazu auf der Plattform von APUS gespeichert und waren somit allen Partnern zugänglich.

2.5.3 Abstimmung zur Integration der Tanks in die WingBox

Die Oberfläche der Tankröhren stellt die Schnittstelle zu der WingBox dar. Aufgrund der großen geometrischen Abmessungen sind Form- und Lageabweichungen besonders kritisch zu betrachten. Aufgrund dessen wurden die Tankröhren, mithilfe von COTESA, optisch vermessen. Auf Basis dieser Daten konnten reale 3D-Modelle jedes Tanks erzeugt werden. Somit ließen sich die Einbaubedingungen bereits vorab im Computermodell überprüfen.

Die Ergebnisse zeigten eine sehr gute Maßhaltigkeit der gefertigten Tankröhren. Abweichungen der geforderten Toleranzen konnten durch eine geeignete Positionierung der Tankröhren in der Flügelstruktur kompensiert werden.

2.6 AP2.13 - Entwicklung und Fertigung der Werkzeuge für Autoklav-Fertigung

2.6.1 Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP.13

Tabelle 9: Inhalte von AP2.13

Arbeitspakettitel: Entwicklung und Fertigung der Werkzeuge für Autoklav-Fertigung	AP-Nummer: AP2.13
Beteiligte Partner: KVB	Laufzeit: M13 – M18
Ziele des AP: Ziel des Arbeitspakets ist ein umfassendes Werkzeugkonzept für die Aushärtung der Tankröhren in einzelnen Zwischenschritten. Erst nach Abschluss von Vorversuchen kann entschieden werden, welcher Weg bezüglich des finalen Werkzeugkonzepts zur Tankherstellung eingeschlagen werden kann. Auch mögliche Schnittstellen zur Tankintegration müssen überprüft werden, um die notwendigen Transfer- und Handlings-Schritte auf ein Minimum zu beschränken. Toleranzen und Wärmeausdehnung während des Herstellungsprozesses müssen analysiert und im Konzept berücksichtigt werden.	
Ergebnisse des AP: Ergebnis dieses Arbeitspakets ist die Bereitstellung der für die Fertigung der Tanks benötigten Werkzeuge für den Autoklav-Prozess.	

2.6.2 Werkzeuge zur Herstellung der Tankröhren und Vorversuchskörper

Zur Herstellung der Vorversuchskörper wurden Werkzeuge benötigt. Diese wurden im Rahmen des Arbeitspaketes AP2.13 entworfen und gefertigt. Zu den benötigten Werkzeugen zählen Wickeldorne für die innenliegenden Segmente, Vorrichtungen zum Verkleben, zum Laminieren der äußeren Tankstruktur und zum Aushärten der Tankröhren. Weiterhin wurden für die Fertigung der Tanks Prozesshilfsmittel wie Trenn- und Vakuumfolien, Saugvlies, Dichtband und Vakuumanschlüsse benötigt. Die entsprechenden Prozessmittel wurden für das Prepreg-Material und den Härteprozess passend ausgewählt.

Bedingt durch das gewählte Herstellungskonzept wurden für den Bau der Tankröhren Wickelwerkzeuge benötigt, mit denen die einzelnen Segmente hergestellt wurden. In Abbildung 26 sind zum einen das zylindrische Wickelwerkzeug für die einzelnen Segmente (zur besseren Darstellung ohne die Aufnahmen für die Wickelmaschine) zu sehen, zum anderen ein mehrteiliges Werkzeug für die Fertigung der Bandagen zur Befestigung der Polkappen.

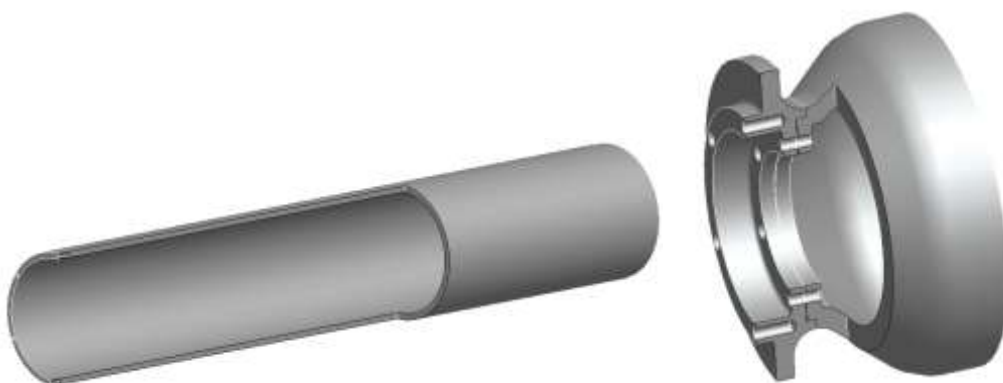


Abbildung 26 Wickelwerkzeuge zur Herstellung der Einzelsegmente im Viertelschnitt

Bei der Konstruktion der Werkzeuge galt es, das thermische Verhalten zu berücksichtigen. Für die Maßhaltigkeit der Faserverbund-Segmente musste sowohl die Ausdehnung des Werkzeuges beim Erwärmen im Ofen, als auch der Schrumpf des Bauteils beim Abkühlen auf Raumtemperatur beachtet werden. Übersichtlich lassen sich die Effekte mathematisch beschreiben. Die thermische Trägheit des Werkzeuges und den kontinuierlichen Aushärtvorgang des duroplastischen Harzsystems kann jedoch auf diese Weise allerdings nicht erfasst werden. Daher wurde ein semiempirischer Ansatz gewählt. Es konnten mit wenigen Vorversuchen die benötigten Erkenntnisse gesammelt werden, um anschließend die Werkzeuge für alle Baugrößen zu dimensionieren.

Weiterhin mussten die gewünschten Maß- und Formtoleranzen bei der Konstruktion der Werkzeuge berücksichtigt und spezielle Hilfsmittel entworfen und gefertigt werden. Zur Einhaltung der Toleranzen mussten die einzelnen Segmente, aus denen die gesamte Tankstruktur zusammengesetzt wird, exakt ausgerichtet werden. Für das exakte Ausrichten der Segmente wurden in den Werkzeugen zusätzlich Hilfsmarkierungen integriert, die auf die Bauteile übertragen werden konnten. Nachfolgend dienten die verbundenen Segmente wiederum als formgebender Kern für die äußeren Lagen. Vor dem Verkleben wurden die Segmente mit einer Schäftung versehen. Zum einen wurde dadurch eine größere Klebfläche geschaffen, um eine ausreichende mechanische Festigkeit der Fugestelle zu gewährleisten. Zum anderen ermöglichte diese eine Zentrierung der Segmente zueinander, welches für die Form- und Maßhaltigkeit der Tankröhre wichtig war.

Zum Verkleben der Segmente und zum Laminieren der äußeren Tankstruktur wurde eine gemeinsame Vorrichtung verwendet, siehe Abbildung 27. Auf dieser konnten die Segmente als auch die gesamte Tankröhre bewegt werden. Zum Verkleben musste eine Verschiebung in Achsrichtung und eine Höhenjustierung der einzelnen Segmente möglich sein. Realisiert wurde dies durch vier höhenverstellbare Rollen pro Segment. Mithilfe von Linienlasern und den Hilfsmarkierungen konnten die Segmente zueinander ausgerichtet werden. Um beim Fügen eine ausreichende Benetzbarkeit mit dem Klebstoff zu gewährleisten, kamen Stahlseile zum Einsatz, welche die Segmente gleichmäßig gegeneinanderpressen.

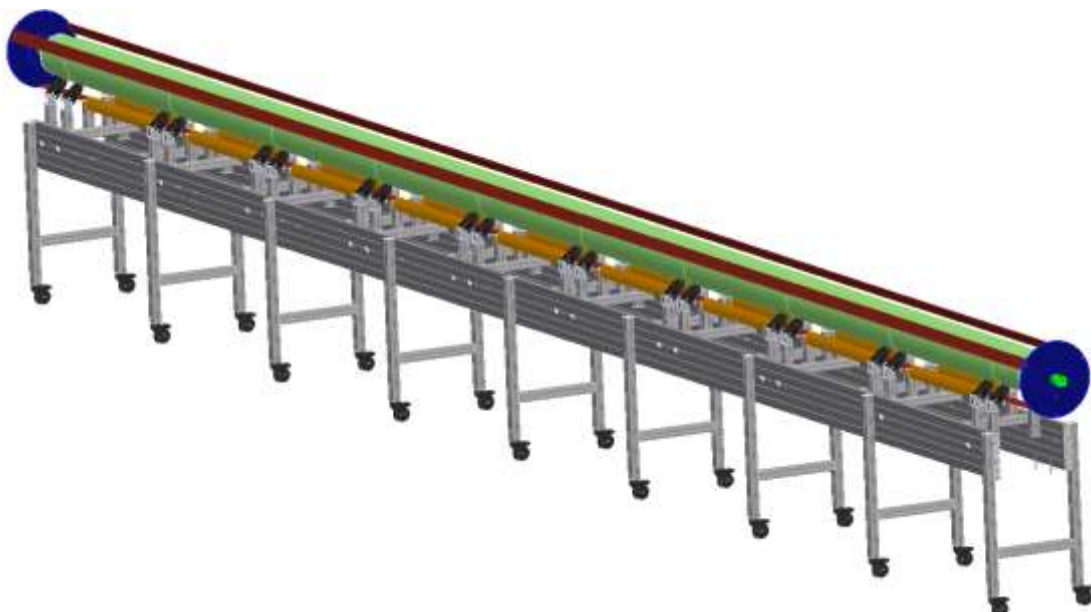


Abbildung 27 Kombinierte Kleb- und Laminiervorrichtung

Nach dem Aushärten des Klebstoffs wurde die innere Tankstruktur auf Tragrollen abgesetzt, welche eine Rotation um die eigene Achse ermöglichten. Während des Laminierprozesses konnte somit die Tankröhre rotiert werden, welches ein winkliges Ablegen der äußeren Lagen zuließ.

Nachdem die äußere Tankstruktur laminiert wurde, konnte die Tankröhre mithilfe der höhenverstellbaren Rollen angehoben werden. Anschließend konnte diese seitlich aus der kombinierten Kleb- und Laminiervorrichtung in die Aushärtevorrichtung geschoben werden. Zur Vermeidung von Druckstellen während des Aushärteprozesses wurde die Tankröhre flächig mit einer gewebeverstärkten PTFE-Folie aufgenommen, siehe Abbildung 28. Gleichzeitig verhinderte diese das Durchbiegen der Tankröhre infolge ihres Eigengewichts und sorgte für eine geringe Gleitreibung beim Transfer zwischen den Vorrichtungen.

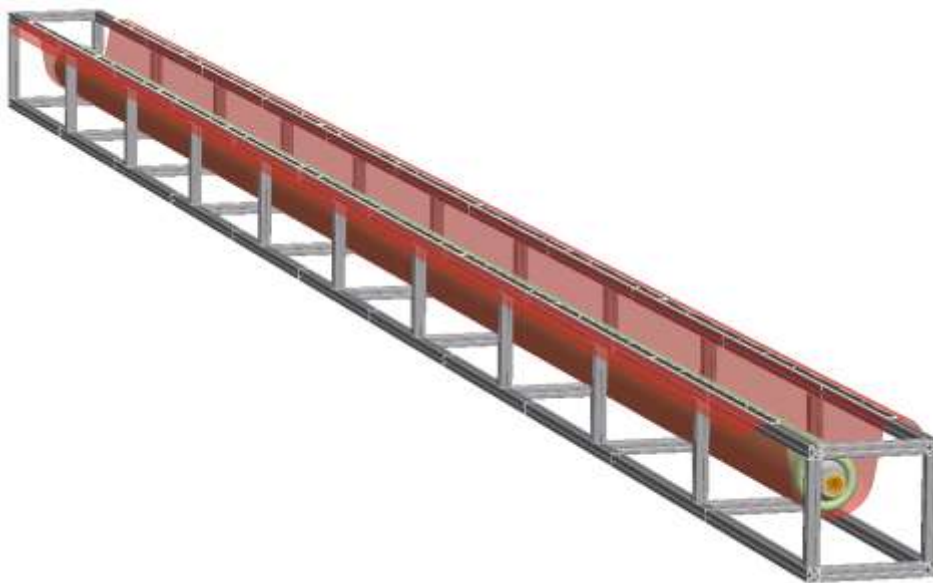


Abbildung 28 Aushärtevorrichtung

2.7 AP2.17 - Entwicklung von Tankperipherie und Betankungssystem

Tabelle 10: Inhalte von AP2.17

Arbeitspakettitel: Tankperipherie und Betankungssystem	AP-Nummer: AP2.17
Beteiligte Partner: KVB	Laufzeit: M19 – M26
Ziele des AP: Ziel des Arbeitspakets ist es, entsprechend geltender Sicherheitsbestimmungen die umliegenden Funktionselemente für die Zuleitung und Betankung zu entwickeln, die den Betrieb der Wasserstofftanks in möglichen Einsatzszenarien eines Kleinflugzeugs ermöglichen. Dazu muss zunächst ein genaues Anforderungsprofil ebenso wie ein Sicherheitskonzept erstellt werden, um zu klären, welche Aufgaben von der Peripherie zu erfüllen sind.	
Ergebnisse des AP: Als Ergebnis dieses Arbeitspakets wird die Bereitstellung eines Peripherie- und Betankungssystems erwartet, was sowohl geltenden Sicherheitsbestimmungen als auch möglichen Einsatzszenarien Rechnung trägt.	

2.7.1 Abstimmung der Schnittstellen zwischen Betankungssystem und Tankstruktur

Die Definition der Anforderungen zum Betankungssystem wurde durch den Partner APUS vorgenommen. Die Festlegung der Schnittstellen zum Betankungssystem erfolgte aus diesem Grund in enger Abstimmung mit APUS. Das KVB war im Rahmen des Arbeitspakets für die Auslegung und Beschaffung der unmittelbar mit der Polkappe verbunden Bauteile verantwortlich. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um das Bossteil. Die Beschaffung aller weiteren Komponenten des Betankungssystems lag in der Verantwortung von APUS.

2.7.2 Risikoanalyse

Die Risikoanalyse wurde in Zusammenarbeit mit allen beteiligten Partnern durchgeführt. Im Ergebnis dessen wurden von der TUD der Nenndruck und die Sicherheitsfaktoren für alle Komponenten festgelegt.

2.7.3 Durchführung von Dichtigkeitstests

Im Rahmen der Risikoanalyse der Tankröhren wurden verschiedene Dichtigkeitstests an den Vorversuchskörpern, Linern und der CFK-Struktur durchgeführt. Diese Dichtigkeitstests wurden einerseits an Linern vor dem Einbau durchgeführt, um Undichtigkeiten seitens Liner auszuschließen. Mithilfe von Druckluft wurde dieser aufgeblasen und auf Leckagen untersucht. Ein weiterer Test wurde nach dem Verkleben der einzelnen Segmente durchgeführt. Ziel des Tests war hierbei die Dichtigkeit des gesamten Tanks und der bereits integrierten Anschlüsse für die Wasserstoffzuführung festzustellen, bevor sich dieser in den Aushärteprozess begibt. Dabei wurde die Tankröhre aus Sicherheitsgründen mit Formiergas (95% Stickstoff, 5% Wasserstoff) bedruckt und der Druckabfall über der Zeit festgestellt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 29 veranschaulicht.

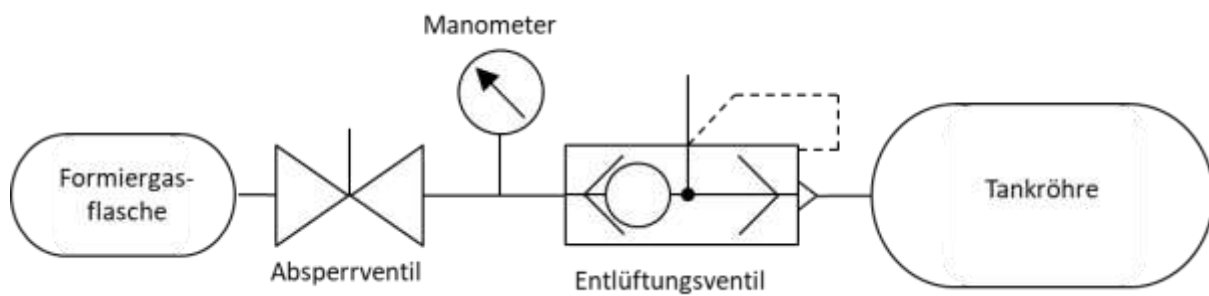


Abbildung 29: Schaltbild des Dichtigkeitstest der Tankröhre

Eventuell auftretende Leckagen konnten mit einem Lecksuchgerät geortet und an den äußeren Elementen des Einlasssystems nachgebessert werden. Da es während des Aushärte- und Temperprozesses zu einer starken Temperatur- und Druckbeanspruchung kam, erfolgte im Anschluss wiederholend ein Dichtigkeitstest. Mithilfe dieser Tests wurde sichergestellt, dass der Tank vor, während und nach dem Fertigungsprozess eine ausreichende Dichtigkeit aufwies.

Im Laufe des Projekts hat sich die Fertigungsreihenfolge dahingehend verändert, dass die Liner-Integration nach dem Aushärten der Tanks erfolgt. Die Montage des Liners übernahm der Projektpartner APUS.

2.8 AP4.1 - Systemtests, Berstversuche, Schadensanalyse

2.8.1 Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP4.1

Tabelle 11: Inhalte von AP4.1

Arbeitspakettitel: Systemtests, Berstversuche, Schadensanalyse	AP-Nummer: AP4.1
Beteiligte Partner: TUD, APUS KVB	Laufzeit: M17 & M18, M24 – M30
Ziele des AP: Ziel des Arbeitspakets ist der Test der Tankstruktur unter Berücksichtigung der in der Auslegung angenommenen Innendruck-Lastfällen. Die Untersuchungen des Strukturverhaltens umfassen Tests unterhalb der Berstgrenze sowie die Bedruckung bis zum Bersten einzelner Testbauteile. Mit den gewonnenen Daten kann die Auslegung hinterfragt und ggf. in einer frühen Phase noch angepasst werden.	
Ergebnisse des AP: Ergebnisse dieses Arbeitspakets werden eine detaillierte Bewertung des Strukturverhaltens der Tankstruktur unter vorgegebenen Belastungen sowie eine detaillierte Schadensanalyse der geborstenen Testbauteile sein.	

2.8.2 Statischer Test und Berstversuch an einem Vorversuchskörper

An einem Vorversuchskörper wurden zur Validierung des Fertigungskonzeptes und der Polkappenanbindung ein statischer Druckversuch und ein Berstversuch durchgeführt. Zur Vorbereitung der Tests wurde durch das KVB eine Testspezifikation erstellt und von allen Beteiligten bewertet.

Der Test wurde in Zusammenarbeit mit MAXIMATOR und der IMA Dresden GmbH erfolgreich durchgeführt. Bei der Belastung wurde der Vorversuchskörper mit etwas mehr als der lt. Anforderung zu ertragende Innendruck aufgebracht. Während des Versuchs wurden Dehnungen aufgezeichnet. Der Behälter hielt den Belastungen stand. Es wurde jedoch eine starke Undichtigkeit des Behälters während des Versuchs festgestellt.

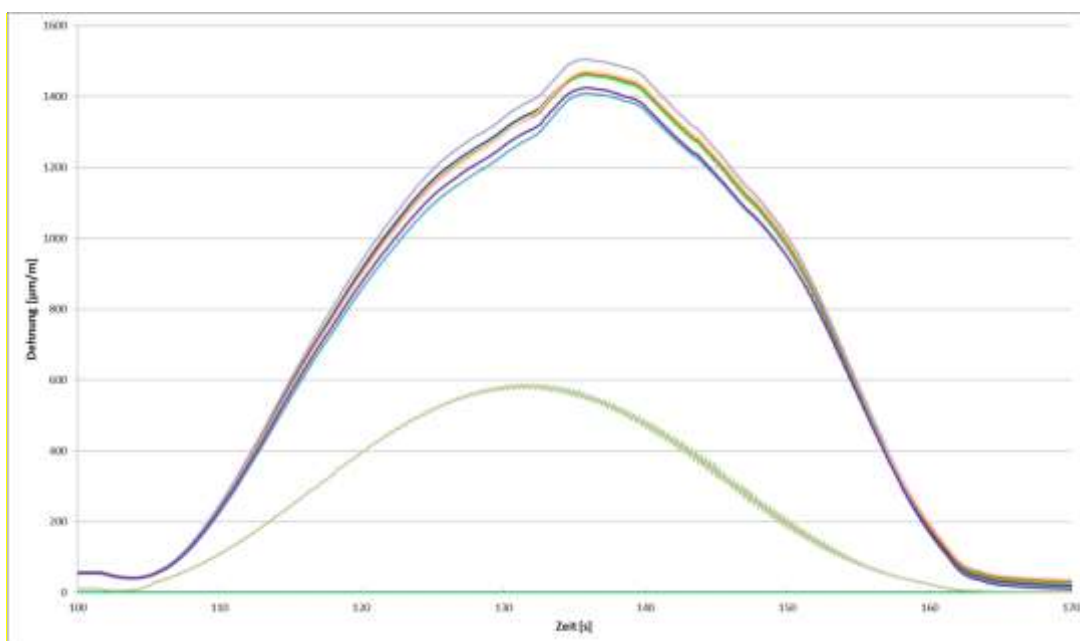


Abbildung 30: Dehnung-Zeit-Verlauf, Druck-Zeit-Verlauf

Die erzielten Ergebnisse ließen unterschiedliche Schlussfolgerungen zu. Die ermittelten Dehnungen wichen vom erwarteten Niveau ab. Eine Ursache könnte sein, dass die aufgetretene Leckage die Messung des erreichten Druckniveaus beeinflusst hat. Eine abschließende Bewertung der Festigkeitseigenschaften des Behälters war auf Basis dieses Berstversuchs nicht möglich.

Die Tests in Arbeitspaket AP4.2 wurden für eine abschließende Bewertung herangezogen. Die IMA Dresden hat im Auftrag der TU Dresden ein Test am Gesamtflügel durchgeführt. Die Bewertung erfolgte im Teilprojekt der TU Dresden.

2.9 AP4.3 – Systemtest Brennstoffzelle, Tankperipherie, Betankungssystem

2.9.1 Ziele und geplante Ergebnisse des Arbeitspakets AP4.3

Tabelle 12: Inhalte von AP4.3

Arbeitspakettitel: Systemtests, Berstversuche, Schadensanalyse	AP-Nummer: AP4.3
Beteiligte Partner: TUD, APUS KVB	Laufzeit: M43 – M48
Ziele des AP: Ziel des Arbeitspakets ist der Test des Gesamtsystems einschließlich der Betankung. Dieser wird am komplett montierten und in den Rumpf integrierten Flügel durchgeführt.	
Ergebnisse des AP: Als Ergebnis wird der Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Gesamtsystems erwartet.	

2.9.2 Gesamtsystemtest

Die IMA Dresden hat im Auftrag der TU Dresden ein Belastungsversuche am Gesamtflügel durchgeführt. Unterstützend wurden Daten zur Umsetzung des Tests bereitgestellt und der Test sowohl in Vorbereitung als auch bei der Durchführung begleitet. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte durch die TU Dresden.

Betankungstest wurden nicht durchgeführt. Weitergehende Untersuchungen zu Liner- und Armaturen-Integration sowie Betankung des Gesamtsystems wurden durch den Projektpartner APUS durchgeführt.

Untersuchungen zur Dichtigkeit des Systems wurden in Zusammenhang mit AP2.17 durchgeführt. Einflüsse und Beanspruchungen bedingt durch thermische Ausdehnung von Einzelkomponenten wurden in AP2.7 rechnerisch ermittelt, bewertet und bei der Auslegung berücksichtigt.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Projektstrukturplan	5
Abbildung 2	Zeitplanplan für das Verbundprojekt	6
Abbildung 3	Schematische Darstellung beider Fertigungskonzepte, links: Konzept 1 - innenliegende Axialverstärkung, rechts: Konzept 2 - außenliegende Axialverstärkung	9
Abbildung 4	links: Fertigungsversuch für überwiegend umfänglich verstärktes Segment, rechts: hergestellter Versuchskörper	10
Abbildung 5	links: unausgehärtete Umfangslagen im Außenwerkzeug, mittig: unausgehärtete Preform der Axialverstärkung, rechts: eingelegte Preform im Außenwerkzeug	10
Abbildung 6	links: gehärtete Teststruktur, rechts: Nahaufnahme der Lagenstruktur im Querschnitt mit umfängliche Verstärkungslagen innen und axialen Verstärkungslagen außen	11
Abbildung 7	Übersicht der Versuche zur Prozessoptimierung	13
Abbildung 8	Ablagepfad der Schlaufen zur Polkappenanbindung	14
Abbildung 9	Anschlusskonzept 1, links: CAD-Modell, rechts: Foto	15
Abbildung 10	Anschlusskonzept 2, links: CAD-Modell, rechts: Foto	16
Abbildung 11	Dichtungskonzepte im Zusammenbau	16
Abbildung 12	Polkappenkonzept im CAD-Modell mit Anschlussinterface	17
Abbildung 13	konstruktive Varianten für die Polkappe	20
Abbildung 14	Geometrie der Polkappe	20
Abbildung 15	Design-Entwurf 1: Tankröhre mit Polkappe und Anbindungsbereich	21
Abbildung 16	mit Zwischenfaserbrüchen durchsetzte Polkappenanbindung	21
Abbildung 17	Querschnitt der Tankröhre mit Polkappe und angepasstem Anbindungsbereich	22
Abbildung 18	vernetztes FE-Modell zur Nachweisrechnung	22
Abbildung 19	Auslastung gegenüber Zwischenfaserbruch bei Lastfaktor 1,15	23
Abbildung 20	Auslastung gegenüber Zwischenfaserbruch bei Lastfaktor 2,25	23
Abbildung 21	Auslastung gegenüber Faserbruch bei Lastfaktor 2,25	24
Abbildung 22	Prozessschema	27
Abbildung 23:	Prozess der Tankröhrenfertigung	28
Abbildung 24:	Abgleich des Ist-Geometrie mit dem CAD-Modell der Sollgeometrie	29
Abbildung 25:	Abgleich Ist-Geometrie mit der Sollgeometrie im Querschnitt der Z-Ebene	29
Abbildung 26	Wickelwerkzeuge zur Herstellung der Einzelsegmente im Viertelschnitt	31
Abbildung 27	Kombinierte Kleb- und Laminiervorrichtung	32
Abbildung 28	Aushärtevorrichtung	33
Abbildung 29:	Schaltbild des Dichtigkeitstest der Tankröhre	35
Abbildung 30:	Dehnung-Zeit-Verlauf, Druck-Zeit-Verlauf	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Meilensteine laut Antrag	6
Tabelle 2: Inhalte von AP2.5	8
Tabelle 3: Ergebnisse der Querkzugprüfung	12
Tabelle 4: Inhalte von AP2.6	15
Tabelle 5: Inhalte von AP2.7	19
Tabelle 6: Inhalte von AP2.8	24
Tabelle 7: Übersicht der durchgeführten Versuche mit den jeweiligen Konfigurationen	25
Tabelle 8: Inhalte von AP2.9	30
Tabelle 9: Inhalte von AP2.13	31
Tabelle 10: Inhalte von AP2.17	34
Tabelle 11: Inhalte von AP4.1	36
Tabelle 12: Inhalte von AP4.3	37