



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Sean Butler

# **Entwicklung der Fertigungseinrichtung zur Nutzlast- verkleidung der hochfliegenden unbemannten Plattform im DLR Projekt HAP-alpha**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*

**Sean Butler**

**Entwicklung der Fertigungseinrichtung zur  
Nutzlastverkleidung der hochfliegenden unbe-  
manneden Plattform im DLR Projekt HAP-alpha**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen des Bachelorstudiums

im Studiengang Flugzeugbau  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit  
der Abteilung Sichere Systeme und Systems Engineering  
des Instituts für Flugsystemtechnik  
des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V.

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Markus Linke  
Zweitprüfer: M.Sc. Daniel Rothe

Abgabedatum: 30.09.2024

# **Zusammenfassung**

**Sean Butler**

## **Thema der Bachelorthesis**

Entwicklung der Fertigungseinrichtung zur Nutzlastverkleidung der hochfliegenden unbemannten Plattform im DLR Projekt HAP-alpha.

## **Stichworte**

unbemannte hochfliegende Plattform, Fertigung, Fertigungsvorrichtung, Leichtbau, Steifigkeitsanalyse

## **Kurzzusammenfassung**

Für die unbemannte hochfliegende Plattform im Projekt HAP-alpha des DLR e.V. soll die Nutzlastverkleidung gefertigt werden. Dafür werden Konzepte entwickelt und anhand der gegebenen Anforderungen bewertet. Das erfolgversprechendste Konzept wird ausgearbeitet. Für die Fertigung der Nutzlastverkleidung muss eine Fertigungsvorrichtung konzipiert und konstruiert werden.

**Sean Butler**

## **Title of the paper**

Development of the production facility for the payload fairing of the high-flying unmanned platform in the DLR project HAP-alpha.

## **Keywords**

High Altitude Platform, manufacturing, manufacturing device, lightweight construction, stiffness analysis

## **Abstract**

The payload fairing is to be manufactured for the unmanned high-flying platform in the DLR HAP-alpha project. Concepts are being developed for this and evaluated based on the given requirements. The most promising concept will be developed. A manufacturing device is needed for the construction of the payload fairing. It must be developed and created.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Liste der Abkürzungen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Liste der Symbole</b> .....	<b>X</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Projekt HAP-alpha des DLR .....	1
1.3 Inhalt der Arbeit.....	3
<b>2. Grundlagen</b> .....	<b>4</b>
2.1 Fertigungsverfahren.....	4
2.1.1 Fräsen .....	4
2.1.2 3D-Druck .....	4
2.1.3 Kleben .....	6
2.2 Finite-Elemente-Methode.....	6
2.3 Steifigkeitsanalysen.....	7
<b>3. Konzept</b> .....	<b>8</b>
3.1 Aufbau der Nutzlastverkleidung .....	8
3.2 Anforderungen.....	12
3.3 Fertigungskonzepte.....	13
3.3.1 „Außen → Innen“ .....	13
3.3.2 „Innen → Außen“ .....	14
3.4 Bewertung der Konzepte .....	15
3.5 Diskussion der Konzepte .....	18
<b>4. Ausarbeitung</b> .....	<b>19</b>
4.1 Fertigungsvorbereitung an der Nutzlastverkleidung .....	19
4.2 Erläuterung der Fertigungsvorrichtung .....	21
4.3 Diskussion der Fertigungsvorrichtung .....	27
4.4 Nachweis der Fertigungsvorrichtung .....	28
4.1 Diskussion des Nachweises der Fertigungsvorrichtung.....	32
<b>5. Zusammenfassung</b> .....	<b>33</b>
<b>6. Ausblick</b> .....	<b>34</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>1</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>2</b>
<b>Anhang A</b> .....	<b>4</b>
<b>Anhang B</b> .....	<b>5</b>
<b>Anhang C</b> .....	<b>8</b>
<b>Anhang D</b> .....	<b>13</b>
<b>Anhang E</b> .....	<b>15</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Visualisierung während der Konzeptphase der hochfliegende unbemannte Plattform [B1].....	2
Abbildung 2: Darstellung aus der Konstruktionsphase. In orange ist die Struktur der Nutzlastverkleidung und der Anschluss an den Rumpf hervorgehoben. [B2].....	2
Abbildung 3: Darstellung im CAD der Nutzlasten von HAP am Rumpf befestigt; Bild A: FTI; Bild B: MACS-HAP; Bild C: HAPSAR. ....	3
Abbildung 4: Bild A: Einlass einer Sechskantmutter in ein 3D-Druckteil; Bild B: Einlass einer Vierkantmutter in ein 3D-Druckteil [B3].....	5
Abbildung 5: Gewindeeinsätze in verschiedenen Größen [B4]. ....	5
Abbildung 6: Darstellung der Nutzlastverkleidung am Rumpf im CAD. Bild A zeigt den Hauptteil der Nutzlastverkleidung; Bild B zeigt die Sekundärklappe für die FTI. ....	8
Abbildung 7: Isometrische Darstellung der Nutzlastverkleidung mit in orange hervorgehobenen Hauptstringern A, B und C. ....	8
Abbildung 8: Bild A: Position der drei Verbindungspunkte zwischen Nutzlastverkleidung und Rumpf; Bild B: Draufsicht auf einen Hauptverbindern.....	9
Abbildung 9: Isometrische Darstellung der Nutzlastverkleidung mit in orange hervorgehobenen Hauptspanten. ....	9
Abbildung 10: Bild A zeigt den Spitzenverbinder (grün) in einer isometrischen Ansicht und Bild B in der Draufsicht von vorne. ....	10
Abbildung 11: Isometrische Darstellung der Sekundärklappe der FTI.....	10
Abbildung 12: Positionen der Verbindungsmechanismen (rot eingekreist) zwischen NLV und Sekundärklappe. ....	11
Abbildung 13: Darstellung des Verbindungsmechanismus.....	11
Abbildung 14: Konzept der Negativform mit Nuten für Spante und Stringer. ....	13
Abbildung 15: Konzept des Standrohres mit Stützen und Armen. ....	14
Abbildung 16: Bild A: Ausschnitte der Spanten und der Stringer; Bild B: Ausschnitte im hinteren Hauptspant, Bohrungen für den Anschluss an den Hauptspantträger ro markiert. ....	19
Abbildung 17: Bild A: Hauptstringer B durchdringt den hinteren Hauptspant; Bild B: In rot sind Kontaktflächen zwischen Hauptspant und Hauptstringer markiert.....	20
Abbildung 18: Bild A: Spant mit gefrästem Ausschnitt für die Positionierung der Bolzenhalterung; Bild B: Bolzenhalterung (grün) mit Positionierungsgeometrie, die dem Ausschnitt im Hauptspant entspricht.....	20
Abbildung 19: Beispiel senkrechter Standrohrhalter [B5]. ....	21
Abbildung 20: Waagerechter Halter in der Dreiseitenansicht und einer isometrischen Darstellung (oben links). ....	22
Abbildung 21: Fertigungsvorrichtung in waagerechter Position. ....	22
Abbildung 22: Bild A: Isometrische Darstellung des hinteren Winkels; Bild B: Draufsicht von unten auf den hinteren Winkel; Bild C: Winkel für den hinteren Hauptspantträger und die Positionierungsplatte der Hauptverbinder.....	23

Abbildung 23: Bild A: Isometrische Darstellung des vorderen Winkels; Bild B: Draufsicht von unten auf den vorderen Winkel. ....	23
Abbildung 24: Bild A: Draufsicht des hinteren Hauptspanträgers; Bild B: Draufsicht des vorderen Hauptspanträgers. ....	24
Abbildung 25: Bild A: Spitzenhalter über eine Schelle am unteren Teil des Stantrohres befestigt; Bild B: Isometrische Darstellung des Spitzenhalters. ....	24
Abbildung 26: Draufsicht eines Spanhalters. ....	25
Abbildung 27: Spanträger in der Fertigungsvorrichtung positioniert. ....	25
Abbildung 28: Isometrische Darstellung der Positionierungsplatte mit Nachbildung der Hauptverbinder des Rumpfes. ....	26
Abbildung 29: Nutzlastverkleidung und Sekundärklappe in der Fertigungsvorrichtung. ....	26
Abbildung 30: Vereinfachte Darstellung des Querschnitts der Fertigungsvorrichtung; Bild A: Last Fall; Bild B: Querkraftverlauf; Bild C: Momentenverlauf. ....	28
Abbildung 31: Spannungen im Winkel durch 100 N; Bild A: Isometrische Darstellung der hinteren Winkel; Bild B: Draufsicht von unten auf die hinteren Winkel; Bild C: Isometrische Darstellung des vorderen Winkels; Bild D: Draufsicht von unten den vorderen Winkel. ....	29
Abbildung 32: Verschiebungen im Winkel durch 100 N; Bild A: Isometrische Darstellung der hinteren Winkel; Bild B: Draufsicht von unten auf die hinteren Winkel; Bild C: Isometrische Darstellung des vorderen Winkels; Bild D: Draufsicht von unten den vorderen Winkel. ....	29
Abbildung 33: Darstellung der Verschiebung der Fertigungsvorrichtung unter Last von Fall A und Fall B. ....	31
Abbildung 34: Standrohr mit Führungsschienen in waagerechter Position. ....	5
Abbildung 35: Standrohr in waagerechter Position mit Winkeln und Hauptspanträgern. ....	6
Abbildung 36: Fertigungsvorrichtung mit Stopperscheibe für den Spitzenverbinder. ....	6
Abbildung 37: Positionierungsplatte mit Gegenstück der Hauptverbinder. ....	7
Abbildung 38: Bild A: Hinterer Hauptspant am entsprechenden Hauptspanträger; Bild B: Vorderer Hauptspant am entsprechenden Hauptspanträger. ....	8
Abbildung 39: Rot eingekreist: Winkel für den Positionierungsspant des Spitzenverbinders. ....	8
Abbildung 40: Spitzenverbinder mit Positionierungsspant. ....	9
Abbildung 41: Die „unteren T-Stücke“ der Hauptstringer in den Hauptspanten und Spitzenverbinder. ....	9
Abbildung 42: Positionierungsplatte über Kugelsperrbolzen mit den Hauptverbindern der NLV verbunden. ....	10
Abbildung 43: Spanthalter für den Hauptteil der NLV mit Bezeichnung in der Fertigungsvorrichtung. ....	10
Abbildung 44: Nebenspannte durch Ausschnitte in den Stegen der Hauptstringer und Spanthalter positioniert. ....	11
Abbildung 45: Abschluss der Fertigung des Hauptteils der Nutzlastverkleidung. ....	11
Abbildung 46: Verbinder an Haupt- und Nebenspannten passend ihren Ausschnitten hinzugefügt. ....	12
Abbildung 47: Spanthalter der Sekundärklappe mit Bezeichnung in der Fertigungsvorrichtung. ....	13

Abbildung 48: Beispiel eines Spantes mit angebrachtem Verbindungsmechanismus und Winkeln für die Randstringer.....	13
Abbildung 49: Positionierung der Spante anhand der Spanthalter und Verbinder zum Hauptteil der NLV.....	14
Abbildung 50: Stringer an den Ausschnitten der Spant positioniert. ....	14

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht des Flächenträgheitsmoment bei rechteckigen Querschnitten [21]. .....	7
Tabelle 2: Bewertung der Fertigungskonzepte (fortlaufend).....	15
Tabelle 3: Übersicht der Steifigkeiten bei homogenen Querschnitten [20] .....	4
Tabelle 4: Werkstoffkennwerte: F3 PA-CF Pro [25] .....	15
Tabelle 5: Werkstoffkennwerte: Multiplexplatten aus Birke [26].....	16
Tabelle 6: Werkstoffkennwerte: Stahl Rundrohr nach Norm: EN 10219 / EN 10220 .....	16

## Liste der Abkürzungen

<b>Kürzel</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>CFK</b>	Kohlestofffaser verstärkter Kunststoff
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
<b>FSP</b>	Flächenschwerpunkt
<b>FTI</b>	Flight Test Instrumentation
<b>HAP</b>	High Altitude Platform/hochfliegende unbemannte Plattform
<b>HAPS</b>	High Altitude Platform Station
<b>HAPSAR</b>	High Altitude Platform Synthetic Aperture Radar
<b>MACS-HAP</b>	Modular Aerial Camera System for High Altitude Platform
<b>NLV</b>	Nutzlastverkleidung

## Liste der Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
$A$	Flächeninhalt	$\text{mm}^2$
$b$	Breite	mm
$c_w$	Widerstandsbeiwert	
$E$	Elastizitätsmodul	$\text{N/m}^2$
$G$	Schubmodul	$\text{N/m}^2$
$h$	Höhe	mm
$I_{\square}$	Flächenträgheitsmoment	$\text{mm}^4$
$I_T$	Torisonsträgheitsmoment	$\text{mm}^4$
$I_y$	Flächenträgheitsmoment um die y-Achse	$\text{mm}^4$
$I_z$	Flächenträgheitsmoment um die y-Achse	$\text{mm}^4$
$S$	Benetzte Oberfläche	$\text{m}^2$
$S_b$	Steifigkeit gegen Biegung	N
$S_s$	Steifigkeit gegen Schub	N
$S_t$	Steifigkeit gegen Torsion	N
$S_{z,d}$	Steifigkeit gegen Zug und Druck	N
$v$	Geschwindigkeit	m/s
$W$	Luftwiderstand	N
$\gamma$	Schubwinkel	rad
$\varepsilon$	Dehnung	
$\rho$	Dichte	$\text{kg/m}^3$
$\sigma$	Spannung	$\text{N/m}^2$
$\tau$	Schubspannung	$\text{N/m}^2$

# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Für eine konstante stationäre Erdbeobachtung kommen Stand 2024 lediglich zwei Optionen in Frage: geostationäre Satelliten oder ein flächendeckendes Satellitennetzwerk. Seit der Veröffentlichung eines Fotos durch damaligen US-Präsidenten Donald Trump auf Twitter im August 2019, dass von einem Satelliten stammt, ist bekannt, dass eine Auflösung von mindestens zehn Zentimetern pro Pixel möglich ist [1]. Dieses Auflösungsvermögen von sogenannten Spionagesatelliten hängt maßgeblich vom Quotienten aus der Entfernung zum beobachteten Objekt und Durchmesser des Hauptspiegels ab [2]. Aus diesem Grund befinden sich Satelliten zur Aufklärung auf Höhen zwischen 200 bis 1.200 Kilometern. So z.B. das deutsche Aufklärungssystem SAR-Lupe der Bundeswehr, welches auf einer Höhe von 500 Kilometern fliegt [3]. Auf diesen Höhen bewegen sich Satelliten mit Geschwindigkeiten von ca. 7 km/s über Grund. Eine längere Erdbeobachtung ist damit nicht möglich. Damit ein Satellit konstant über einem Punkt der Erdoberfläche verweilen kann, muss er sich in einer geostationären Umlaufbahn befinden. Dieser Orbit befindet sich in Höhen zwischen 35.800 bis 41.700 Kilometern [4] und ist für eine genaue Erdbeobachtung zu weit entfernt.

Die Alternative zum geostationären Orbit wäre ein Satellitennetzwerk, das groß genug wäre, sodass sich immer mindestens ein Satellit über dem zu beobachtenden Gebiet befindet. Für diese Strategie bedarf es vieler kostspieliger Satelliten und ist daher für zivile Projekte kaum zu realisieren.

Dennoch gibt es großen zivilen Bedarf an Erdbeobachtungen und konstanten Erdmessungen. So z.B. für Koordinierung von Schifffahrtsverkehr in vielbefahrenen Gewässern, die Beobachtung zusammenbrechender Gletscher an den Polen, das Überwachen illegaler Abholzung von Wäldern, die exakte Vorhersage von Sturmfluten, genaue Aufklärungsbilder von Erdbebenregionen und Waldbränden oder das Lokalisieren von Quellen erhöhter Stickstoffemissionen [5].

Dezember 2005 begann Airbus Defence and Space mit ersten Testserien ihres Projektes „Zephyr“ [6]. Dabei handelt es sich um ein unbemanntes, solarelektrisch betriebenes Fluggerät oder auch High Altitude Platform Station (HAPS) genannt. Das erklärte Ziel dieser Plattform ist, in der Stratosphäre über dem Wetter und Monate lang bei geringen Geschwindigkeiten zu fliegen. Dies ermöglicht eine konstante stationäre Erdbeobachtung. Am 19. August 2022 schaffte der Zephyr-8 einen 64-tägigen Rekordflug, bevor dieser in Arizona abstürzte [7].

Solche hochfliegenden Solarplattformen stellen eine kostengünstige Möglichkeit zur stationären Erdbeobachtung da. Deshalb forschen viele weitere Unternehmen und Einrichtungen an dieser neuartigen Technologie. So auch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) [8].

## 1.2 Projekt HAP-alpha des DLR

Im Rahmen des Projekts „hochfliegende unbemannte Plattform“ (HAP) entwickelt DLR institutsübergreifend mit programmatischen Mitteln ein solarelektrisches Stratosphärenflugzeug [vgl. Abb. 1]. Es ist vorgesehen, das Flugzeug dauerhaft in Höhen von 20 km zu stationieren [8]. HAP soll als Versuchsträger für neu entwickelte Sensoren dienen sowie das Forschen an Höhenplattformen selbst ermöglichen. Der Erstflug ist für Mitte 2025 vorgesehen.



**Abbildung 1:** Visualisierung während der Konzeptphase der hochfliegende unbemannte Plattform [B1].

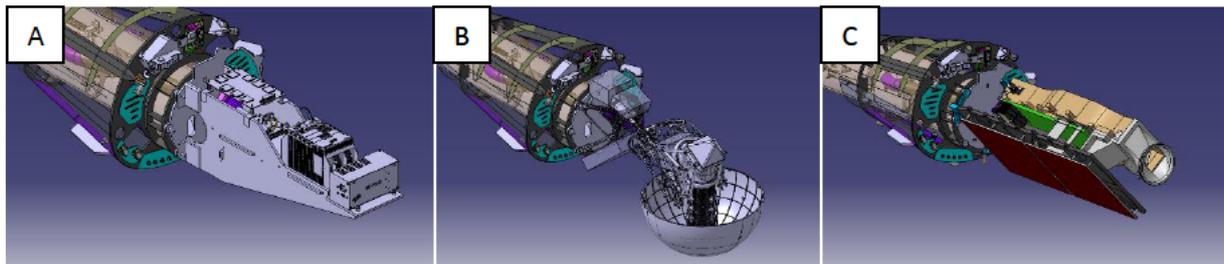
Auf der Oberseite der Flügel befinden sich Solarzellen, die die Systeme, die Antriebe und die Nutzlast des Fluggeräts versorgen. Überschüssige Energie wird in Lithium-Ionen-Akkumulatoren für den Nachtflug gespeichert. Solche Akkumulatoren tragen einen großen Teil zum Gesamtgewicht bei. Unter Berücksichtigung des solarelektrischen Betriebs sowie der geplanten Flugdauer ist es von essenzieller Bedeutung, dass die Struktur des Flugzeugs möglichst wenig zur Masse des Gesamtflugzeugs beiträgt.

Die Nutzlast sitzt in der Nase des Flugzeugs und wird am Rumpf befestigt. Sie wird von der Nutzlastverkleidung (NLV) zur Umgebung hin abgedeckt. Um eine gute Zugänglichkeit zur Nutzlast zu gewährleisten, befindet sich im unteren Teil der NLV eine entfernbare Klappe (Sekundärklappe). Somit bildet die NLV gemeinsam mit der Sekundärklappe den äußeren Nasenteil des Flugzeugs. Zu dem Zwecke der Gewichtsminimierung bei gleicher aerodynamischer Außenkontur erfolgt der Aufbau der NLV-Struktur aus dünnen CFK-Platten/-Stäben, CFK-Sandwich und kleinen 3D-Druck-Teilen [9]. Im Anschluss wird die besagte Struktur bespannt [vgl. Abb. 2].



**Abbildung 2:** Darstellung aus der Konstruktionsphase. In orange ist die Struktur der Nutzlastverkleidung und der Anschluss an den Rumpf hervorgehoben. [B2]

Es wurden drei verschiedene Nutzlasten für HAP entwickelt, von denen immer nur eine gleichzeitig eingebaut werden kann. Eine Option ist die Flight Test Instrumentation als Nutzlast [vgl. Abb. 3 Bild A]. Dieser protokolliert unter anderem die Kommunikation der fluginternen Systeme, des C2-Links, sowie auf die Struktur gebrachte Dehnungsmessstreifen. Sie wird seitens der Flugentwicklung entworfen und adaptiert an dieselben Schnittstellen wie die anderen Nutzlasten. Für spätere Flüge wurden eine hochauflösende Luftbildkamera (MACS-HAP) [5] und ein Radarinstrument (HAPSAR) [10] für die hochfliegende Plattform entwickelt [vgl. Abb. 3 Bild B und Bild C].



**Abbildung 3:** Darstellung im CAD der Nutzlasten von HAP am Rumpf befestigt; Bild A: FTI; Bild B: MACS-HAP; Bild C: HAPSAR.

Jede Nutzlast benötigt eine zugeschnittene Nutzlastverkleidung. Die FTI benötigt als einzige keine Anpassungen der NLV und passt in die Nase des Fluggeräts. Die MACS benötigt für die Kamera einen kreisrunden Ausschnitt auf der Unterseite. Die Planarantennen des HAPSA sind schräg zur Seite ausgerichtet (siehe Abb. 3 Bild C, die schräge rote Ebene) und werden leicht durch Strukturen gestört.

Damit nicht für jede Nutzlast eine neue NLV gebaut werden muss, werden lediglich verschiedene Sekundärklappen für jede Nutzlast entworfen. Der Hauptteil der NLV muss nur einmal entworfen und gebaut werden. Aufgrund der schrägen Ausrichtung der HAPSA verläuft der Hauptteil der NLV asymmetrisch. Für den anstehenden Erstflug im nächsten Jahr wird die FTI eingebaut. Aufgrund dessen wird sich diese Arbeit auf die Sekundärklappe der FTI konzentrieren.

Ein Fertigungsprozess für die Nutzlastverkleidung samt Sekundärklappe ist zu entwickeln. Die dünnen CFK-Platten/-Stäbe, CFK-Sandwich-Teile und kleinen 3D-Druck-Teile werden miteinander zur NLV verklebt. Hierfür ist eine Fertigungseinrichtung notwendig, in der die Einzelteile positioniert und während des Aushärtungsprozesses des Klebers fixiert werden.

### 1.3 Inhalt der Arbeit

Das Ziel der Bachelorarbeit besteht in der Entwicklung des Fertigungsprozesses und der Fertigungseinrichtung zur Nutzlastverkleidung samt Sekundärklappe. Vor dem Beginn der Fertigung ist die Struktur der NLV und der Sekundärklappe vorzubereiten, indem Bohrungen, Ausschnitte und nötige Winkel hinzugefügt werden. Die Fertigung der NLV und der Sekundärklappe soll in einer gemeinsamen Vorrichtung stattfinden. Die Fertigungsschritte werden detailliert erläutert. Weiter ist zu zeigen, dass die Fertigungsvorrichtung die geforderte Steifigkeit aufweist. Im Rahmen der gesamten Fertigung ist darauf zu achten, dass sowohl die Anforderungen an die fertige Nutzlastverkleidung als auch die Anforderungen an den Fertigungsprozess eingehalten werden.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Fertigungsverfahren

#### 2.1.1 Fräsen

Gemäß der DIN 8589-3 wird der Prozess des Fräsens als spanabhebender Prozess mit einem kreisförmigen, i.d.R. mehrzahnigen Werkzeug beschrieben. Die Vorschubrichtung kann sowohl senkrecht als auch vertikal zur Rotationsachse des Werkzeugs stehen. Dadurch ist die Fertigung komplexer Werkstückkonturen und -ausschnitten möglich. Es können Metalle, Kunststoffe und Holz bearbeitet werden. Der Durchmesser des Fräskopfes entscheidet über die minimal möglichen Innenradien [11].

Vorrangig wird mit einer CNC-Fräse (Computerized Numerical Control) gearbeitet. Hier übernimmt ein Mikrocomputer, der in der Werkzeugmaschine integriert ist, die Steuerung der Fräse. Dies ermöglicht eine schnelle und präzise Herstellung von CAD konzipierten Bauteile [12].

#### 2.1.2 3D-Druck

Der 3D-Druck wird der Kategorie der additiven Fertigung zugeordnet. Bei diesem Fertigungsverfahren wird Material Schicht für Schicht aufgetragen, um dreidimensionale Bauteile zu erzeugen. Jede Schicht entspricht der exakten 2D-Form eines Abschnittes des Bauteils. Die Erstellung dieser Abschnitte erfolgt in einer sogenannten Slicer-Software, die das 3D-Objekt in Ebenen unterteilt [13].

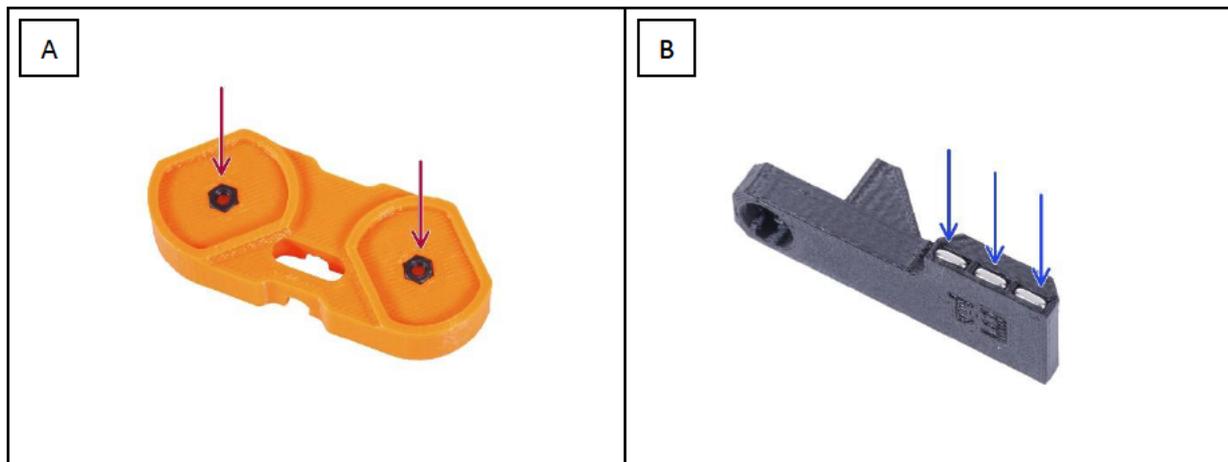
Es gibt verschiedene Druckverfahren und Druckmaterialien. Die meist verwendete Druckertyp ist ein Fused Deposition Modeling (FDM) Drucker für Kunststoffe [14].

Das FDM-Verfahren, im Deutschen auch als Schmelzschichtung bzw. Düsenschmelzverfahren bezeichnet, basiert auf dem Verschmelzen und anschließenden schichtweisen Auftrag eines Kunststoffes. Der zu verarbeitende Kunststoff wird als Filament bezeichnet. Er befindet sich meist auf einer Spule in Form einer Faser mit einem Durchmesser von 1,75 mm oder 2,85 mm. Im Rahmen des FDM-Drucks wird das Filament einem Extruder zugeführt, dort geschmolzen und durch ein Hotend und einer Düse (Nozzle) auf ein meist beheiztes Druckbett aufgetragen [15].

In Abhängigkeit vom Modell des FDM-Druckers sind dabei Düse, Druckbett oder beide Elemente beweglich. Je nach gewähltem Material werden bestimmte Düsen, Druckbette und Druckeinstellungen benötigt.

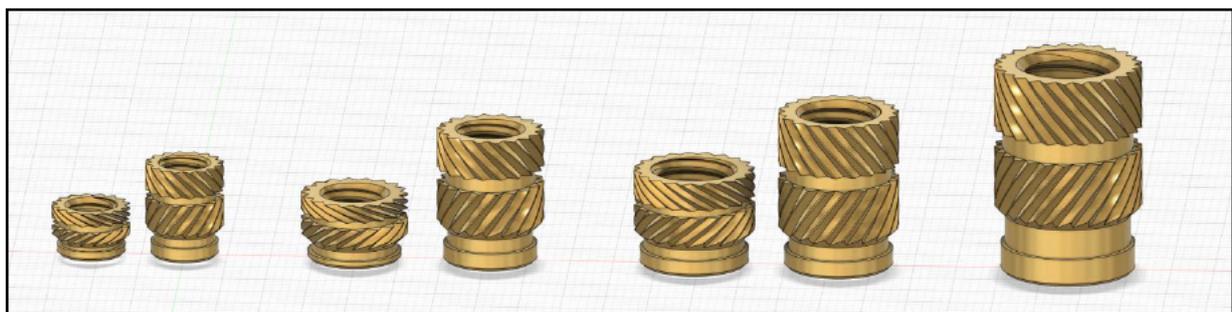
Für gute und lang haltende Schraubenverbindungen von 3D-Druckteilen mit weiteren Bauteilen bestehen im Allgemeinen zwei Möglichkeiten: Eine Mutter oder ein Gewindeeinsatz.

Oft kommt es vor, dass der Zugang zur Mutter baulich bedingt nicht möglich ist. In solchen Fällen ist die Mutter direkt in das 3D-Druckteil integriert werden. Dafür können verschiedene Muttern verwendet werden, meist werden Sechskantmutter oder Vierkantmutter verwendet [vgl. Abb. 4]. Für die Mutter muss im Design ein Zugang von der Seite oder unten berücksichtigt werden.



**Abbildung 4:** Bild A: Einlass einer Sechskantmutter in ein 3D-Druckteil; Bild B: Einlass einer Vierkantmutter in ein 3D-Druckteil [B3].

Wenn kein Zugang von außen für eine Mutter besteht, dies kann vor allem bei großen 3D-Druckteilen vorkommen, kann ein Gewindeeinsatz in das 3D-Druckteil eingeschmolzen werden. Die Gewindeeinsätze bestehen für die Wärmeleitfähigkeit meist aus Messing und verfügen für einen guten Halt im Bauteil über gegenläufige Verzahnung auf der Außenseite [vgl. Abb. 5]. Das Einschmelzen der Gewindeeinsätze in das Bauteil erfolgt über einen passenden Aufsatz an einem herkömmlichen Lötkolben.



**Abbildung 5:** Gewindeeinsätze in verschiedenen Größen [B4].

### 2.1.3 Kleben

Unter dem Begriff Kleben wird ein Fügeverfahren zusammengefasst, bei dem mindestens zwei Werkstoffe mithilfe eines organischen oder anorganischen Zusatzes (Klebstoff) verbunden werden. Der Klebstoff durchläuft nach dem Auftragen einen Aushärtungsprozess, wodurch die Oberflächen der Werkstoffe miteinander verbunden werden. Es lassen sich metallische wie auch nicht metallische Werkstoffe mit einem Klebeprozess verbinden. Physikalisch und chemisch betrachtet handelt es sich bei einer Klebung um die Adhäsion verschiedener Stoffe untereinander und der Kohäsion des verfestigten Klebers [16].

Der Begriff Adhäsion bezeichnet die Haftkräfte, die zwischen zwei Kontaktflächen wirken. Des Weiteren wird zwischen einer spezifischen und einer mechanischen Adhäsion unterschieden. Im Rahmen der spezifischen Adhäsion findet eine Berücksichtigung der Summe aller chemischen und physikalischen Adhäsionserscheinungen statt. Dabei handelt es sich um die auf Haupt- und Nebervalenzkräften basierenden Adhäsionskräfte. Die mechanische Adhäsion bezeichnet die Summe der Verklammerungskräfte der Klebeschicht in Poren, Kapillaren, Vertiefungen und Unebenheiten der Werkstoffoberfläche [17].

Kohäsion kann als „innere Festigkeit“ gesehen werden. Hierbei handelt es sich um Anziehungskräfte gleichartiger Atome und Moleküle innerhalb desselben Stoffes. Für die Klebung ist die Summe der Bindungskräfte zwischen den einzelnen Molekülen des ausgehärteten Klebstoffes entscheidend [18].

Eine optimale Klebeverbindung ist gegeben, wenn Adhäsion und Kohäsion im Gleichgewicht stehen. Die Größe und Qualität der benetzten Oberfläche durch den Kleber sind entscheidend. Der Aushärtprozess kann viel Zeit in Anspruch nehmen, je nach verwendetem Klebemittel. Dabei ist auf ein homogenes Umfeld in Bezug auf Temperatur, Feuchtigkeit und Licht über die Zeit zu achten [18].

## 2.2 Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode (FEM), auch Finite Elemente Analysen (FEA) genannt, ist eine Simulationsmethode, bei dem bestimmte physikalische Verhalten von Bauteilen numerisch berechnet werden. Im ersten Schritt erfolgt die Diskretisierung des zu berechnenden Bauteils. Für jedes dieser diskreten Elemente wird eine einfache Ansatzfunktion gewählt und eingesetzt. Das physikalische Verhalten des Gesamtkörpers wird nachgebildet, indem die Reaktion der Elemente auf die einwirkenden Kräfte sowie die Randbedingungen berücksichtigt werden. Zudem wird die Ausbreitung von Lasten und Reaktionen beim Übergang von einem Element zum benachbarten Element durch Stetigkeitsbedingungen geregelt, die die Ansatzfunktionen erfüllen müssen [19]

Die Finite-Elemente-Methode approximiert die Lösung eines komplexen Systems aus Differentialgleichungen durch die Verwendung von Differenzenquotienten und deren numerische Auswertung. Diese Vorgehensweise basiert auf Näherungen[19].

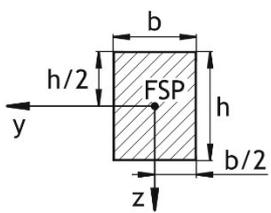
Die sinnvolle Berechnung des Verfahrens erfordert seitens des Anwenders die Kenntnis der Belastungssituation sowie die Werkstoffeigenschaften der zu untersuchenden Bauteile.

### 2.3 Steifigkeitsanalysen

In der Technischen Mechanik bezeichnet die Steifigkeit den Widerstand eines Körpers, sich durch äußere Einwirkungen elastisch zu verformen. Die Steifigkeit eines Körpers hängt von der Geometrie des Werkstoffes und den wirkenden Kräften und Momenten ab [20]. Je nach Wirkrichtung der Kräfte wird nach Dehn- und Schubsteifigkeit unterschieden. Bei Momenten wird zwischen Biege-, und Torsionssteifigkeit unterschieden [vgl. Anhang A, Tab. 3].

Bei der Steifigkeit gegenüber Kräften ist der Flächeninhalt ausschlaggebend. Hingegen ist bei der Steifigkeit gegenüber Momenten das Flächenträgheitsmoment, auch Flächenmoment 2. Grades genannt, entscheidend [vgl. Anhang A, Tab. 3]. Das Flächenträgheitsmoment  $I$  steht wiederum in Abhängigkeit der Rotationachse des wirkenden Moments. Es gilt für rechteckige Querschnitte Tabelle 1:

**Tabelle 1:** Übersicht des Flächenträgheitsmoment bei rechteckigen Querschnitten [21].

Querschnittsform	Momente um die y-Achse	Momente um die z-Achse
	$I_y = \frac{bh^3}{12}$	$I_z = \frac{b^3h}{12}$

Als Werkstoffgrößen fließen der Elastizitätsmodul  $E$  bei Belastung unter Normalkraft bzw. Biegung und der Schubmodul  $G$  bei Querkräften bzw. Torsion in die Steifigkeit mit ein. Es gilt im linear-elastischen Bereich:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = konst. \quad (1)$$

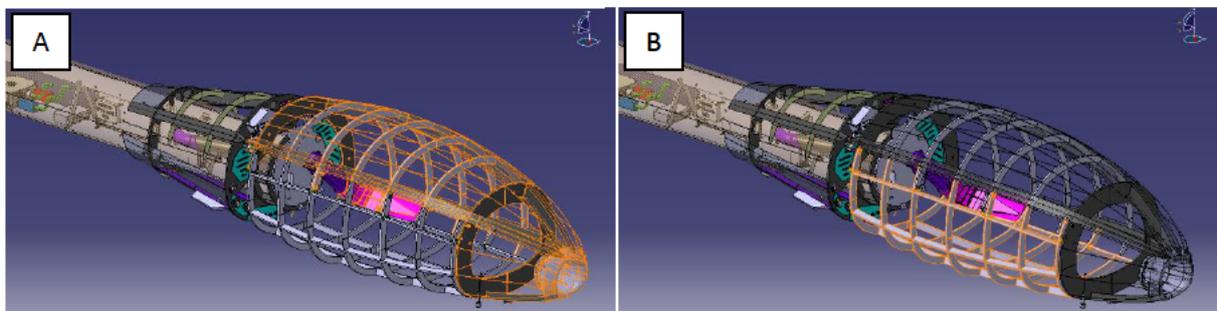
$$G = \frac{\tau}{\tan \gamma} = konst. \quad (2)$$

### 3. Konzept

#### 3.1 Aufbau der Nutzlastverkleidung

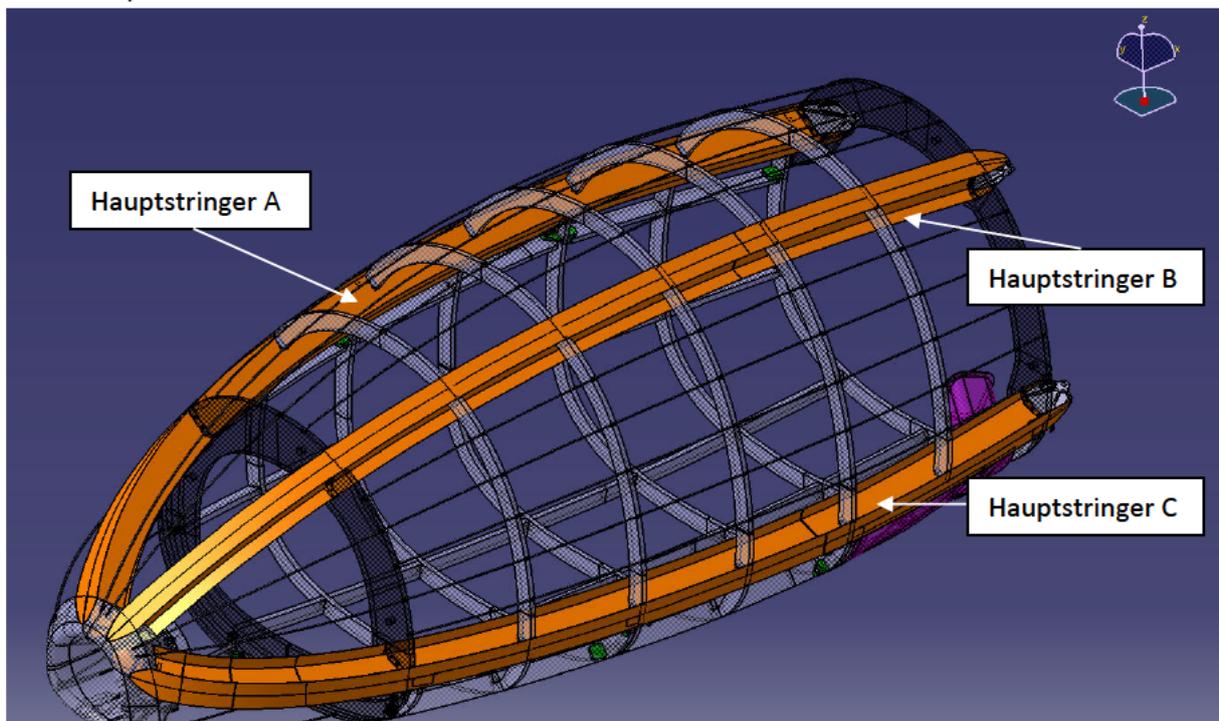
Alle Abbildungen der Nutzlastverkleidungen zeigen den aktuellen Stand der Entwicklung und sind nicht final.

Die Nutzlastverkleidung besteht aus zwei Komponenten: Dem Hauptteil der NLV (siehe Abb. Bild A orange hervorgehoben) und einer entfernbaren Sekundärklappe (siehe Abb. 7, Bild B orange hervorgehoben).



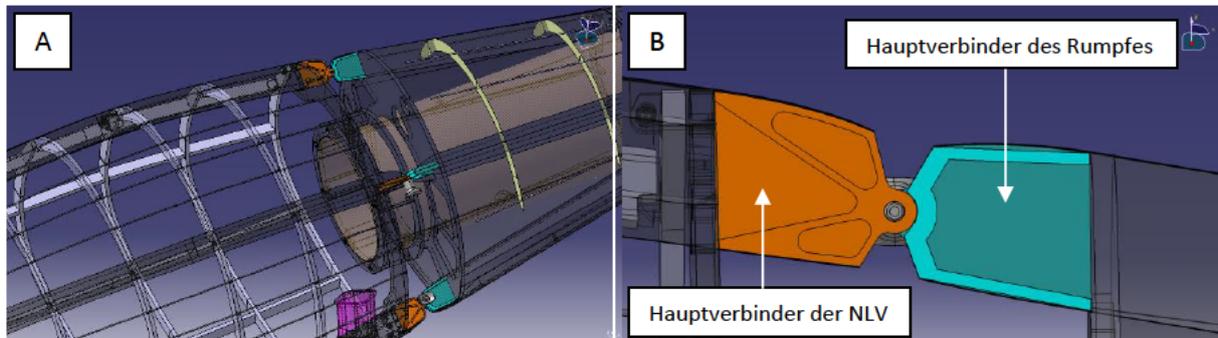
**Abbildung 6:** Darstellung der Nutzlastverkleidung am Rumpf im CAD. Bild A zeigt den Hauptteil der Nutzlastverkleidung; Bild B zeigt die Sekundärklappe für die FTI.

Der Hauptteil der NLV wird durch drei Hauptstringer [vgl. Abb. 7] und zwei Hauptspanten definiert. Die Hauptstringer bestehen jeweils aus drei gefrästen CFK-Platten, die einen gekrümmten Doppel-T-Träger bilden. Der Gurt auf der Unterseite steht orthogonal zum Steg und das Band auf der Oberseite folgt der aerodynamischen Kontur der Hülle.



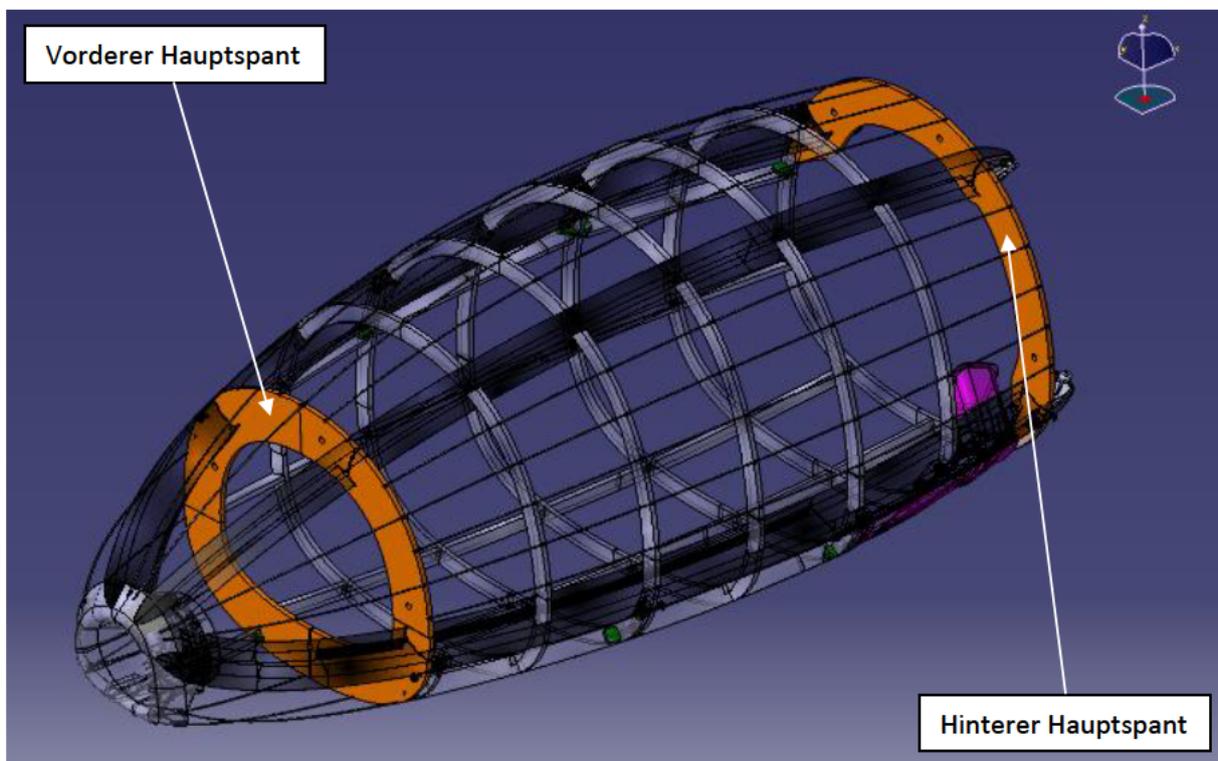
**Abbildung 7:** Isometrische Darstellung der Nutzlastverkleidung mit in orange hervorgehobenen Hauptstringern A, B und C.

Mittels drei Hauptverbindern werden die Hauptstringer am Rumpf mit einem Kugelsperrbolzen befestigt. Diese Hauptverbinder werden jeweils formschlüssig auf das Ende des Steges der Hauptstringer geklebt [vgl. Abb. 8].



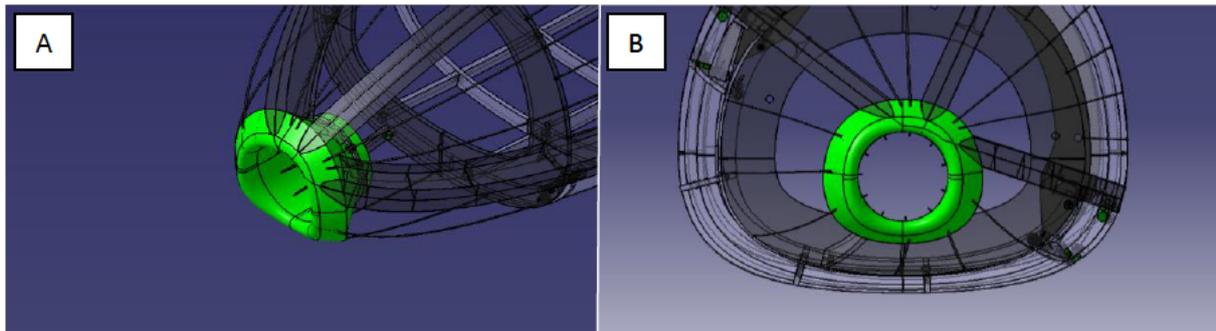
**Abbildung 8:** Bild A: Position der drei Verbindungspunkte zwischen Nutzlastverkleidung und Rumpf; Bild B: Draufsicht auf einen Hauptverbinder.

Die Haupt- und Nebenspannten bestehen aus einem gefrästeten Sandwich-Werkstoff bestehend aus zwei CFK-Platten und einem Schaumstoffkern. Die Hauptstringer durchdringen die Hauptspante und werden an den Durchdringungspunkten miteinander verklebt. Der Hauptverbinder endet am hinteren Hauptspant und definiert den Abstand der NLV zum Rumpf [vgl. Abb. 8, Bild B]. Der vordere Hauptspant ist der einzige durchlaufende Spant. Die restlichen Spanten sind zur unteren Seite offen und bieten damit Platz für die Sekundärklappe [vgl. Abb. 9]. Die Nebenspannten durchdringen im Gegensatz zu den Hauptspannten den oberen Teil des Steges des Hauptstringers.



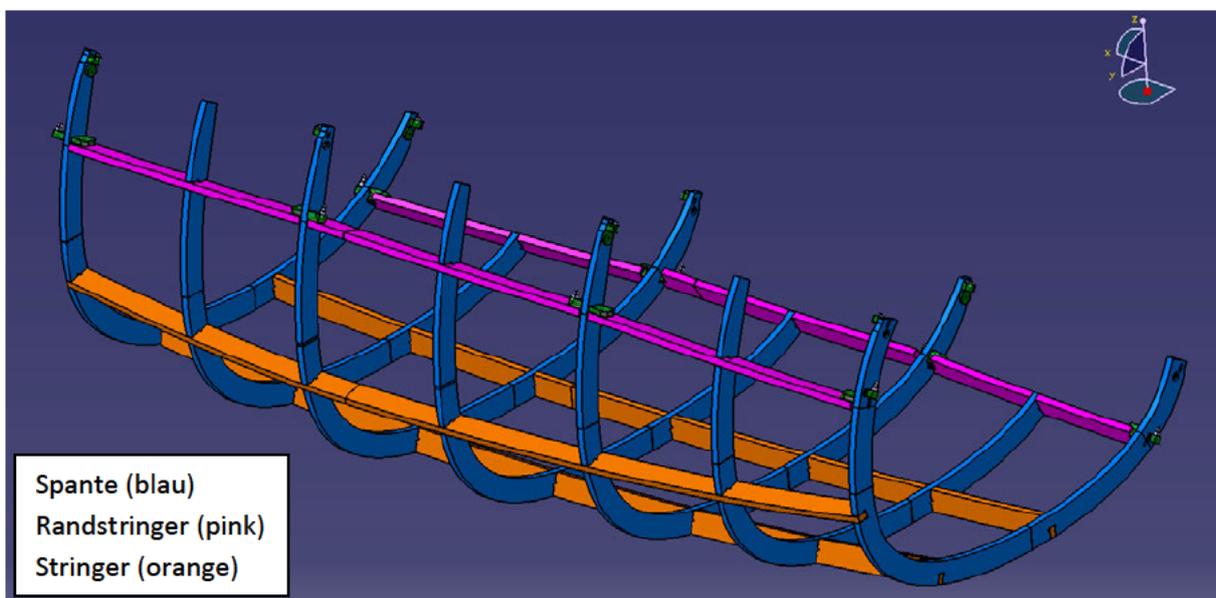
**Abbildung 9:** Isometrische Darstellung der Nutzlastverkleidung mit in orange hervorgehobenen Hauptspannten.

Zwischen den Hauptstringern befinden sich eine Vielzahl von Nebenstringern aus dünnen CFK-Stäben, die es der Bespannung ermöglichen, der aerodynamischen Außenkontur zu folgen. Der Spitzenverbinder bildet den vordersten Teil des Fluggeräts und wird aus Polyamid mit 15% Carbonfasern (PA-CF) gedruckt. Für die Kühlung der Nutzlast befindet sich in der Mitte des Spitzenverbinders ein Lufteinlass. Kleine Finnen im Einlass sorgen für einen kontrollierten Luftstrom [vgl. Abb. 10]. Die Hauptstringer positionieren den Spitzenverbinder eindeutig.



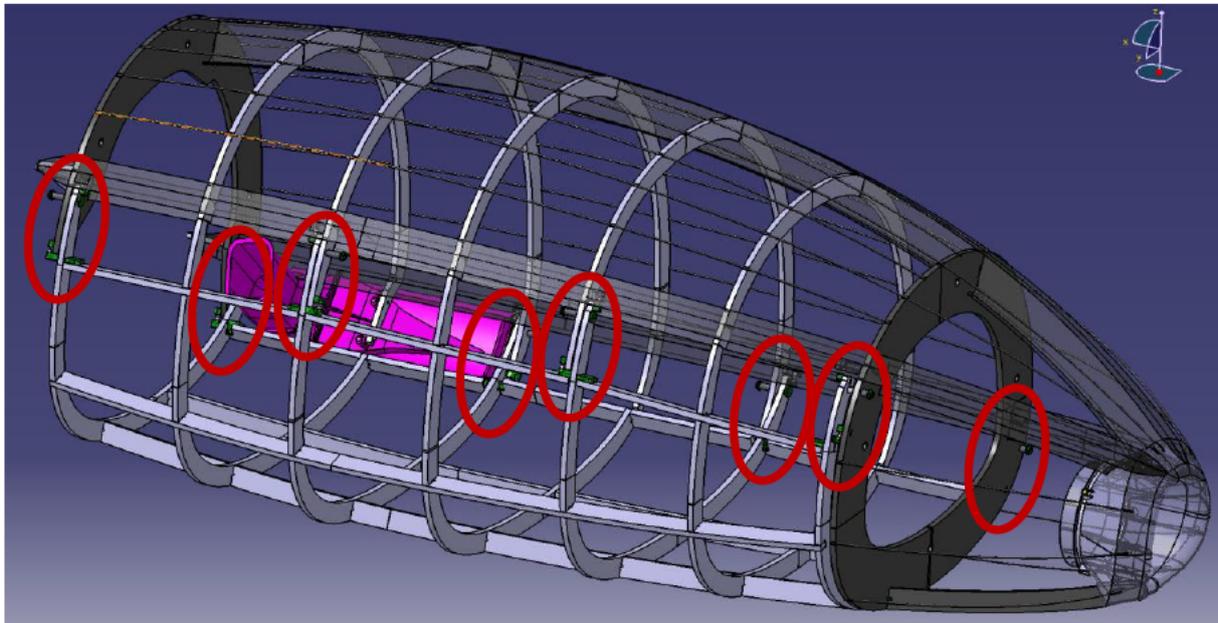
**Abbildung 10:** Bild A zeigt den Spitzenverbinder (grün) in einer isometrischen Ansicht und Bild B in der Draufsicht von vorne.

Die Sekundärklappe für die FTI besteht aus sieben Spanten, drei Stringern und zwei Randstringern. Diese bestehen aus demselben CFK-Sandwich-Werkstoff wie die Hauptspante. Die Randstringer sind im Gegensatz zu den Stringern nicht durchlaufend und in vier Abschnitte unterteilt [vgl. Abb. 11]. Die Spanten und Stringer besitzen an ihrem Durchdringungspunkt jeweils einen Ausschnitt bis zur Hälfte der Tiefe, sodass sie ineinandergesteckt und verklebt werden können.



**Abbildung 11:** Isometrische Darstellung der Sekundärklappe der FTI.

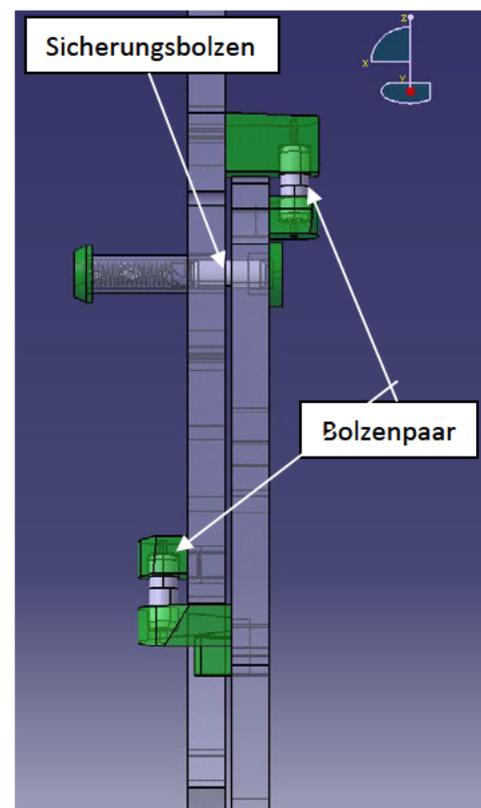
Die Verbindung der Sekundärklappe und des Hauptteils der NLV erfolgt über acht Verbinder, jeweils vier auf jeder Seite. Entsprechend befinden diese sich am Ende der Hauptspante und der Nebenspannte 3 und 5 [vgl. Abb. 12].



**Abbildung 12:** Positionen der Verbindungsmechanismen (rot eingekreist) zwischen NLV und Sekundärklappe.

Jeder Verbinder besteht aus drei Bolzen. Zwei der Bolzen (Bolzenpaar) sind über alle acht Verbindungspunkte in dieselbe Richtung orientiert. Ein dritter Bolzen (Sicherungsbolzen) ist in x-Richtung positioniert und fixiert die Bewegung in Richtung der Bolzenpaare. Der Sicherungsbolzen ist über eine Feder gesichert. Mit Kevlarseilen werden alle Sicherungsbolzen einer Seite verbunden. Ein Zug am Seil spannt die Feder und löst die Sicherungsbolzen. Die Sekundärklappe kann daraufhin in die Richtung der Bolzenpaare herausgenommen werden [vgl. Abb. 13].

Die Bolzen und deren Gegenstücke werden über eine gedruckte Fassung aus PA-CF an der Struktur der Nutzlastverkleidung positioniert.



**Abbildung 13:** Darstellung des Verbindungsmechanismus.

## 3.2 Anforderungen

Die Anforderungen unterscheiden sich zwischen Anforderungen an das fertige Produkt und Anforderungen an die Fertigung. Weiter werden sie in primäre und sekundäre Anforderungen eingeteilt. Die primären Anforderungen sind zwingend einzuhalten, während die sekundären Anforderungen Richtlinien darstellen.

Alle Anforderung entstammen aus Projektmeetings und sind vom technischen Leiter des Projektes bestätigt worden [22].

### Anforderungen an die Nutzlastverkleidung für die Fertigung:

Primäre Anforderung:

1. Für einen guten Anschluss der NLV an den Rumpf muss die Position der Hauptverbinder der NLV auf 0,2 mm genau auf den Hauptverbinder des Geräteträgers passen.
2. Für einen guten Anschluss der Sekundärklappe an den Hauptteil der NLV muss der Verbindungsmechanismus auf 0,5 mm genau sein.
3. Die äußere Geometrie muss der berechneten aerodynamischen Form, zur Widerstandsminimierung mit einer Genauigkeit von < 5 mm folgen.

### Anforderungen an die Fertigung und Fertigungsvorrichtung:

Primäre Anforderung:

4. Es steht nur begrenztes Personal zur Verfügung, deshalb ist die Fertigung von maximal drei Personen zu verrichten.
5. Die Nutzlastverkleidung muss mehrere Tage während der Aushärtung in der Fertigungsvorrichtung gelagert werden können.
6. Das Budget für das Projekt HAP-alpha ist begrenzt und die Kosten des Fertigungsprozesses sind in einem vernünftigen Rahmen zu halten.

Sekundäre Anforderungen:

7. Damit nur eine Fertigungsvorrichtung gebaut werden muss, sollen Sekundärklappen in derselben Fertigungsvorrichtung gebaut werden können.
8. Der Fertigungsprozess ist simpel zu halten, um Fehler zu vermeiden und Zeit zu sparen.
9. Projektintern besteht der Zugriff auf eine 2-Achsen Fräse, mit der es möglich ist Bohrungen und Ausschnitte zu Fräsen und einen 3D-Drucker mit einem Druckvolumen von 250×210×220 mm. Alle Bauteile, die mit den vorhandenen Gerätschaften gefertigt werden können, sind zu präferieren. Das Anfertigen von Bauteilen, die von dieser Vorgabe abweichen, ist möglich, aber mit hohen Kosten und Zeitaufwand verbunden.
10. Die Fertigung der NLV findet in begrenzten Räumlichkeiten statt, die ggf. schnell für andere Projekt zugänglich gemacht werden müssen. Die Fertigungsvorrichtung samt Nutzlastverkleidung, muss deshalb von zwei Personen zu transportieren sein.
11. Der Fertigungsprozess dient als Orientierung für die spätere Fertigung des Rumpfanschlusses. Das verringert die Entwicklungszeit der Fertigung des Rumpfanschlusses und erhöht im besten Fall die Genauigkeit der NLV zum Rumpfanschluss.

### 3.3 Fertigungskonzepte

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, bestehen die Einzelteile der Nutzlastverkleidung aus drei Komponenten:

1. Frästeile aus CFK-Platten mit einer Dicke von 0,2 mm.
2. Frästeile aus CFK-Sandwich-Platten mit einer Gesamtdicke von 6 mm, wobei die CFK-Deckplatten je eine Dicke von 0,5 mm haben.
3. 3D-Druckteile mit einer Größe von ca. 1 cm<sup>3</sup>, mit der Ausnahme des Spitzenverbinders.

Es folgt die Konzeptentwicklung zur Reihenfolge, in der diese Bauteile sinnvollen zusammengebaut werden können. Die NLV erhält ihre nötige Stabilität und Steifigkeit erst im zusammengebauten Zustand. Insofern ist die Entwicklung einer Fertigungsvorrichtung von zentraler Bedeutung, die die Einzelteile zueinander positioniert und während des Aushärtungsprozesses fixiert.

Während der Design- und Konstruktionsphase kann die Beziehung verschiedener Bauteile zueinander, mit einem CAD-Programm, schnell und einfach hinsichtlich Größe, Abstand, Integration etc. abgeschätzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit CATIA V5-6R2022 gearbeitet. Es wird für die exakte Erstellung von zwei- und dreidimensionalen-Elementen verwendet. Auf Basis dieser Elemente werden Konstruktionszeichnungen für die Fertigung erstellt und eine Finite-Elemente-Analyse durchgeführt.

#### 3.3.1 „Außen → Innen“

Zur Erfüllung der primären Anforderungen an die Nutzlastverkleidung für die Fertigung bietet sich das Arbeiten von außen nach innen an. Dadurch ist die äußere Kontur der NLV fest durch die Fertigungsvorrichtung definiert. Es ist eine Negativform der NLV notwendig. Die Form muss exakte Ausschnitte

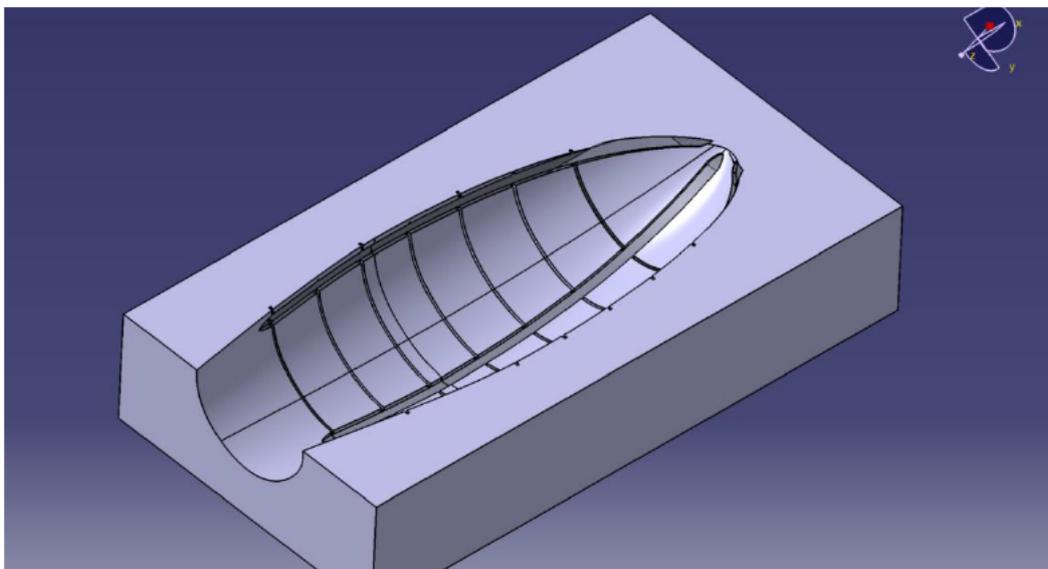


Abbildung 14: Konzept der Negativform mit Nuten für Spante und Stringer.

und Nuten besitzen, in denen Hauptspanten, Nebenspanten, die oberen Gurte der Hauptstringer und Nebstringer positioniert werden [vgl. Abb. 14].

Zuerst wird der Spitzenverbinder positioniert. Im Anschluss werden die oberen Bänder der Hauptstringer und die Nebstringer in die dafür vorgesehenen Ausschnitte gelegt. Die Bänder der Hauptstringer A und C müssen aufgrund der Position mit Klemmen fixiert werden. Es folgt die Positionierung und Klebung der Haupt- und Nebspante. Separat auf einer Vorrichtung wird der Steg der Hauptstringer mit seinem unteren Gurt verklebt. Auf dieses „untere T-Stück“ werden die Hauptverbinder geklebt und über den hinteren Hauptspant bis in den Spitzenverbinder geschoben.

Die Negativform muss mit einer Genauigkeit entsprechend der Anforderungen gefräst werden. Diese aus einem einzelnen Block zu fräsen ist durch das viel Abtragen des Materials kosten- und zeitintensiv. Es gestaltet sich in der praktischen Handhabung durch das hohe Gewicht und Größe als schwierig. Eine Lösung hierfür wäre die Unterteilung dieses einzelnen Blockes in viele kleinere Blöcke, die der Negativform nach gefräst und anschließend miteinander verschraubt werden. Dies begünstigt den Transport der Vorrichtung und ermöglicht ein leichteres Entfernen der NLV nach ihrem Zusammenbau.

Für die Fertigung der Sekundärklappe muss ein Stützgerüst in die Negativform konstruiert werden. Alternativ könnte die Fertigung der Sekundärklappe mit einer zweiten Negativform erfolgen.

### 3.3.2 „Innen → Außen“

Für eine gute Zugänglichkeit während des Fertigungsprozesses ist das Arbeiten von innen nach außen sinnvoll. Den Kern dieses Konzepts bildet ein Stahlrohr. Die Positionierung der Einzelteile der NLV erfolgt durch Stützen oder Arme zwischen Standrohr und Bauteil [vgl. Abb. 15].

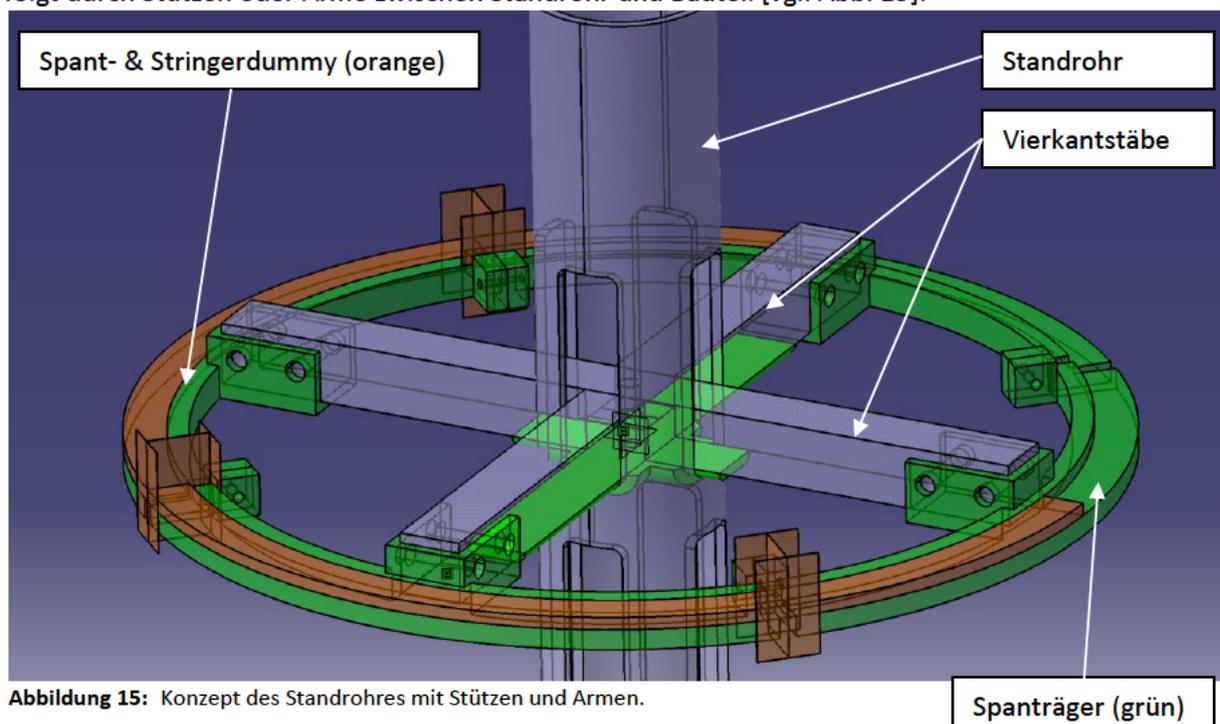


Abbildung 15: Konzept des Standrohres mit Stützen und Armen.

Aluminium-Vierkantstäbe werden am Standrohr befestigt. Am Ende dieser Vierkantstäbe sorgt ein 3D-gedrucktes Verbindungselement für die Positionierung der Hauptspante. Der Spitzenverbinder wird über das Standrohr durch seinen Lüftungseinlass gezogen. Der Durchmesser des Standrohres darf den Durchmesser des Lüftungseinlasses des Spitzverbinders nicht überschreiten.

Separat von der Fertigungsvorrichtung werden die „unteren T-Stücke“, bestehend aus dem Steg und dem untere Gurt des Hauptstringer, mit die Hauptverbinder verklebt. Die Hauptstringer werden von oben durch die Hauptspanten in den Spitzenverbinder geführt und verklebt. Nach der Aushärtung folgt die Positionierung der Nebenspanten an den Hauptstringern und ggf. an Stützen und Armen der Fertigungsvorrichtung. Zum Schluss werden die oberen Bänder der Hauptstringer und Nebenstringer anhand aller Spanten positioniert.

Die Positionierung der Hauptspanten ist bei diesem Konzept entscheidend, da sich alle weiteren Bauteile an den Hauptspanten orientieren.

### 3.4 Bewertung der Konzepte

Im folgenden Abschnitt werden die Fertigungskonzepte basierend auf den Anforderungen untersucht und bewertet.

Die Kennzeichnung der Bewertung erfolgt in den Kategorien:

Sehr gut	++
Gut	+
Ausreichend	0
Schlecht	-
Sehr schlecht	--

**Tabelle 2:** Bewertung der Fertigungskonzepte (fortlaufend).

Außen → Innen		Innen → Außen	
Die Position der Hauptverbinder muss auf 0,2 mm genau auf den Hauptverbinder des Geräteträgers passen.			
Die Genauigkeit der Position des Hauptverbinders hängt von der Fräsqualität der Nuten ab. Eine hohe Fräsgenauigkeit ist gut umzusetzen.	++	Die Lage der Hauptverbinder ist von der Positionierung der Spante abhängig, die wiederum von den Stützen und Armen der Fertigungsvorrichtung bedingt wird. Die Genauigkeit ist beeinflusst durch die elastische Verformung der Arme und in geringem Maße von der elastischen Verformung des Hauptspantes.	0

Außen → Innen		Innen → Außen	
Die Verbinder zwischen NLV und Sekundärklappe müssen auf 0,5 mm genau sein.			
Für den Bau der Sekundärklappe ist eine Unterstützungsvorrichtung notwendig. Diese sollte sich über mögliche Bohrungen in der Negativform positionieren lassen. Eine weitere Möglichkeit wäre es, die Sekundärklappe in einer zweiten Negativform zu fertigen.	+	Die Sekundärklappe wird genau wie der Hauptteil der NLV an denselben Stützen und Armen gefertigt. Dadurch ist eine hohe Genauigkeit gegeben.	++
Die äußere Geometrie muss der berechneten aerodynamischen Form mit einer Genauigkeit von < 5 mm folgen.			
Die Genauigkeit der äußeren Geometrie ist von der Fräsqualität abhängig.	++	Die äußere Geometrie ergibt sich erst gegen Ende der Fertigung. Sie steht in Abhängigkeit zu der Positionierung der Hauptspante und der daraus resultierenden Lage der Hauptstringer. Die Steifigkeit der Verbindung zwischen Hauptspant und Standrohr ist ausschlaggebend.	0
Die Fertigung ist von maximal drei Personen zu verrichten.			
Alle Bauteile liegen in einer Negativform. Die Fertigung kann leicht von zwei bis drei Personen durchgeführt werden und lediglich die Fertigung der Sekundärklappe erfordert mehrere Personen.	++	Durch das teilweise Freihängen der Bauteile und für die Signifikanz der Positionierung der Einzelteile ist das Arbeiten von mehreren Personen zwingend erforderlich. Hierbei sind drei Personen ausreichend.	+
Die Nutzlastverkleidung muss mehrere Tage in der Fertigungsvorrichtung gelagert werden können.			
Die NLV liegt in einer Negativform und ist zur Umgebung hin abgeschirmt.	++	Sobald die Einzelteile positioniert wurden, ist ihre Bewegung nur noch von der Steifigkeit der Fertigungsvorrichtung abhängig.	+
Die Kosten des Fertigungsprozesses sind in einem vernünftigen Rahmen zu halten.			
Das Anfertigen der Negativform ist mit hohen Material- und Fertigungskosten verbunden. Das Fräsen muss wegen im Projekt fehlender Gerätschaften extern geschehen.	--	Alle Bauteile der Fertigungsvorrichtung können direkt als Normteile gekauft werden oder können aus einer Platte gefräst werden. Die Erstellung der 3D-Druck-Teile ist mit mittlerem Entwicklungsaufwand verbunden.	+

<b>Außen → Innen</b>		<b>Innen → Außen</b>	
In der Fertigungsvorrichtung können Sekundärklappen gebaut werden.			
Benötigt ein Zusatzgerüst.	0	Ist gegeben.	++
Der Fertigungsprozess ist simpel zu halten			
Die Positionierung der Einzelteile ist aufgrund der Nuten einfach und genau. Die Zugänglichkeit für Arbeiten, wie das Aufbringen des Klebers oder das Ansetzen von Zwingen während des Aushärtungsprozesses, kann sich schwierig gestalten, da hier nur der Zugriff von innen besteht.	0	Durch die Möglichkeit der Umpositionierung der Fertigungsvorrichtung und des Zugriffs von innen sowie außen während des gesamten Prozesses, ist eine gute Zugänglichkeit gegeben. Die freie Gestaltung der Stützen und Arme kann notwendigen für Raum das Anbringen von Zwingen während des Aushärtungsprozesses schaffen. Bei dem Fertigungsprozess ist auf die Positionierung der Einzelteile besonders zu achten und bedarf ggf. mehrere Halterungen oder Zwingen.	0
Alle benötigten Teile für die Nutzlastverkleidung, samt Sekundärklappe und den Bauteilen der Fertigungsvorrichtung, sollen projektintern gefertigt werden.			
Ist nicht gegeben und muss extern gefertigt werden.	--	Ist gegeben.	++
Die Fertigungsvorrichtung samt Nutzlastverkleidung ist von zwei Personen transportierbar.			
Die Negativform hat ein hohes Gewicht. Die Unterteilung der Form in kleinere Blöcke lässt einen Transport durch zwei Personen zu, aber das Ab- und Aufbauen ist komplex und zeitintensiv.	0	Die Fertigungsvorrichtung ist sperrig, bietet aber eine gute Tragmöglichkeit über das Standrohr.	+
Der Fertigungsprozess dient als Orientierung für die spätere Fertigung des Rumpfanschlusses.			
Für die spätere Fertigung des Geräteträgers wäre eine starke Anpassung der Negativform unerlässlich, was den Fertigungsaufwand der Vorrichtung deutlich erhöht.	-	Bestimmte Elemente können vom Rohr getrennt werden und als Orientierung des Geräteträgers dienen. Vor allem die Orientierung für die Hauptverbinder kann der Fertigungsvorrichtung entnommen werden. Dies wird in Kapitel 4.2 vertieft.	+
<b>Ergebnis</b>			
4 x (++); 1 x (+); 3 x (0); 1 x (-); 2 x (--)		3 x (++); 5 x (+); 3 x (0); 0 x (-); 0 x (--)	

### 3.5 Diskussion der Konzepte

In der Bewertung ist das Konzept „Innen → Außen“ positiver ausgefallen. Es hat allerdings keine Gewichtung der einzelnen Anforderungen stattgefunden. Bei den Anforderungen an die fertige NLV schneidet das Konzept „Innen → Außen“ schlechter ab als sein Kontrahent. Dies wird allerdings durch eine bessere Umsetzbarkeit beim Bau der Fertigungsvorrichtung und während des Prozesses kompensiert. Es stellt sich die Frage, ob ein vermeintlich schlechtes Endergebnis in Relation zur Vereinfachung des Fertigungsprozesses steht.

Zum ersten Kriterium der Positionsgenauigkeit der Hauptverbinder lässt sich feststellen, dass es sich um eine relative Genauigkeit der Verbindungspunkte zwischen der NLV und des Geräteträgers handelt. So hat das Konzept „Innen → Außen“ eine geringere absolute Genauigkeit, kann aber als Fertigungsvorlage des Geräteträgers dienen. Damit kann eine hohe Genauigkeit zwischen den Hauptverbindern der NLV zu den Hauptverbindern des Geräteträgers erreicht werden.

Die Genauigkeit der äußeren Geometrie an der aerodynamisch errechneten Nasengeometrie ist beim Konzept „Außen → Innen“ immer höher im Vergleich. Das begründet sich auf die Baurichtung, indem sich kleine Positionierungsfehler im Verlauf der Fertigung potenzieren. Im Konzept „Innen → Außen“ wird innen angefangen, was zu einer größeren Ungenauigkeit der aufzubauenden Bauteile führt. Wie ausschlaggebend ist eine erhöhte Genauigkeit der Außengeometrie? Die Formgebung bei bespannten Strukturen ist abhängig vom zugrundeliegenden Strukturskelett und nicht deckungsgleich mit der aerodynamisch errechneten Nasengeometrie. Des Weiteren ist eine geringe Abweichung der aerodynamisch optimalen Form bei kleinen Geschwindigkeiten weniger relevant als bei großen Geschwindigkeiten. Denn die Geschwindigkeit geht quadratisch in den Luftwiderstand  $W$ :

$$W = c_w S \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

Es wird mit einer Geschwindigkeit von ca. 10 m/s geflogen [23]. Bei einer Genauigkeit von < 5 mm zum aerodynamischen Optimum wird es zu keiner merklichen Abweichung der Flugeigenschaften kommen.

Die erhöhte Genauigkeit der NLV im Konzept „Außen → Innen“ ist zu vernachlässigen, solange die Abweichungen von 5 mm nicht überschritten werden. Die Vorteile der einfachen Fertigung des Konzeptes „Innen → Außen“ überwiegen. Unter Betrachtung der Bewertung der Konzepte und den soeben genannten Aspekten, ist das Konzept „Innen → Außen“ daher zu präferieren und soll in den folgenden Kapiteln ausgearbeitet werden. Bei der Ausarbeitung dieses Konzeptes muss vor allem auf die Stützen und Arme geachtet werden. Sie sind für die Positionierung der Hauptspante entscheidend und daher von höchster Wichtigkeit.

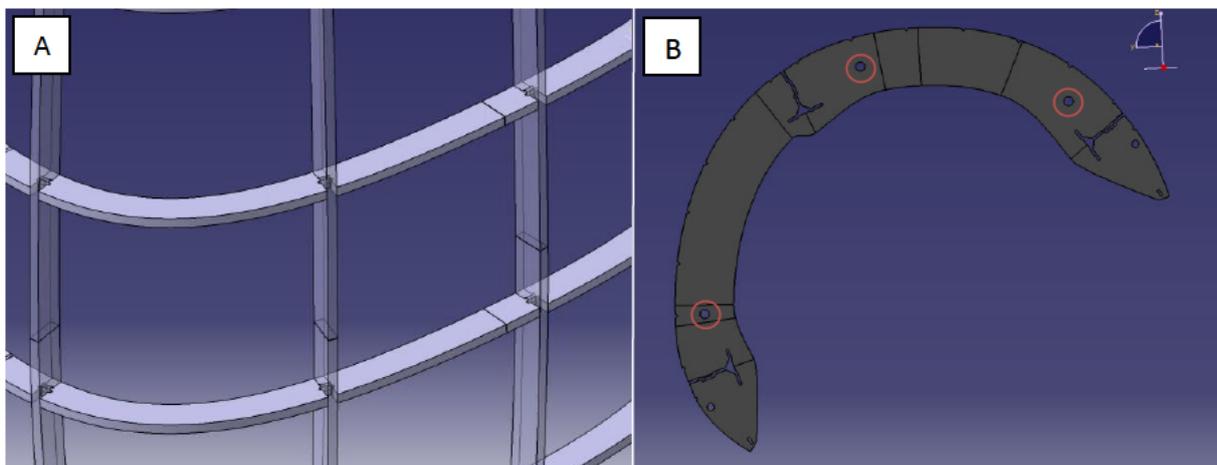
## 4. Ausarbeitung

Während der Fertigung kann auf Schweißtischen zurückgegriffen werden. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sich in regelmäßigen Abständen Löcher über die gesamte Tischplatte befinden. Dies ermöglicht die exakte Positionierung von Bauteilen und Hilfsvorrichtungen wie Hilfswinkel oder der Fertigungsvorrichtung.

### 4.1 Fertigungsvorbereitung an der Nutzlastverkleidung

Durch die Wahl des Konzeptes „Innen → Außen“ ergeben sich Konsequenzen für den Aufbau der NLV. Zuerst müssen die Ausschnitte zwischen Spanten und Stringer so gewählt werden, dass sie der Aufbauichtung innen nach außen gerecht werden. Dazu muss die Reihenfolge in der die Bauteile hinzugefügt werden bekannt sein. Im Fall der Sekundärklappe werden zuerst die Spanten positioniert und darauf folgen die Stringer von außen eingesetzt. Daraus ergeben sich nach außen gerichtete Ausschnitte für die Spanten und nach innen gerichtete Ausschnitte für die Stringer [vgl. Abb. 16, Bild A].

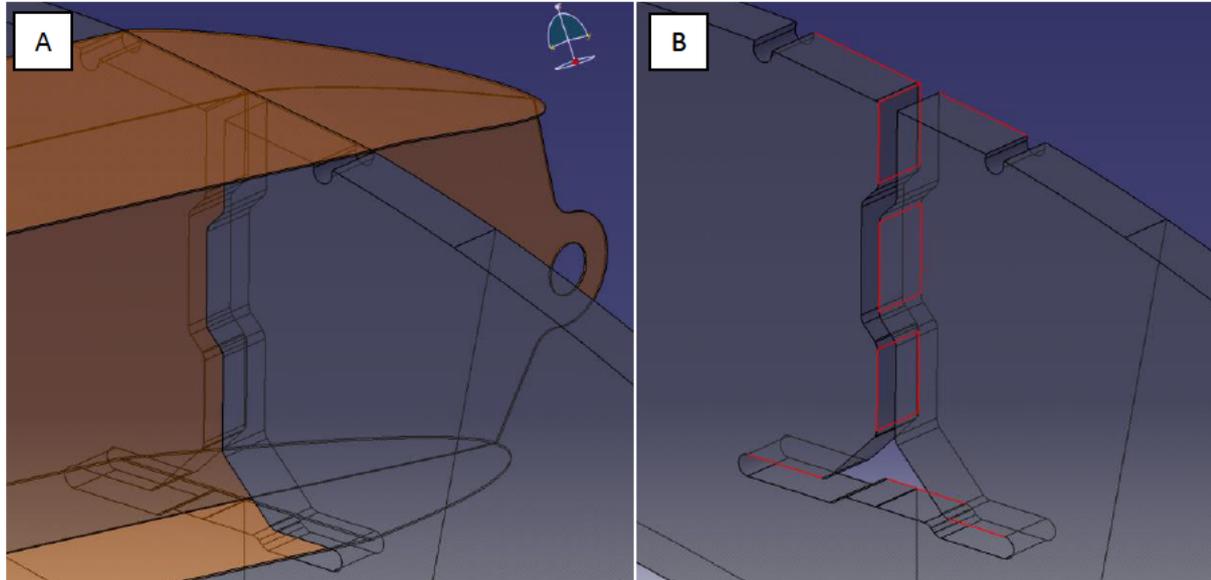
Die Positionierung der Hauptspanten entscheidet über die Genauigkeit des Endproduktes. Deshalb werden in den beiden Hauptspanten Löcher gebohrt, worüber eine exakte Positionierung möglich wird [vgl. Abb. 16, Bild B].



**Abbildung 16:** Bild A: Ausschnitte der Spanten und der Stringer; Bild B: Ausschnitte im hinteren Hauptspant, Bohrungen für den Anschluss an den Hauptspanträger ro markiert.

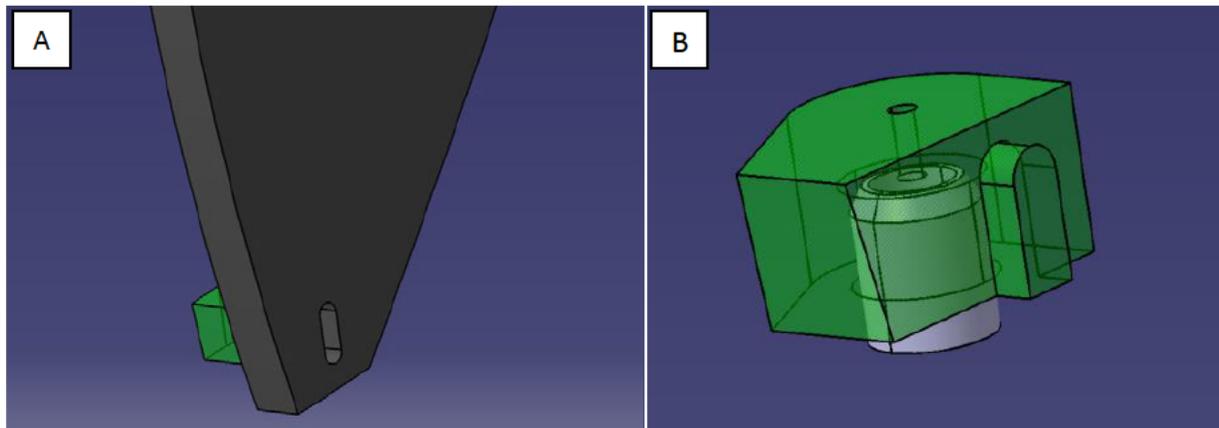
Die CFK-Platten des Stringers haben eine Dicke von 0,2 mm. Es ist in der Praxis nicht möglich einen Ausschnitt in dieser Größe zu fräsen. Es wird angenommen, dass mit einem minimalen Fräserdurchmesser von 2 mm gearbeitet wird. Die Ausschnitte für die Stringer in den Hauptspanten werden daher so designt, dass der Stringer durch mehrere S-Kurven beidseitigen Kontakt zum Hauptspant erhält. Damit ist seine Position eindeutig definiert.

In Abbildung 17 ist die Durchstoßung des Hauptstringers B mit dem hinteren Hauptspant zu erkennen. Die rot markierten Flächen stellen die Kontaktflächen zwischen Hauptstringer und Hauptspant da.



**Abbildung 17:** Bild A: Hauptstringer B durchdringt den hinteren Hauptspant; Bild B: In rot sind Kontaktflächen zwischen Hauptspant und Hauptstringer markiert.

Die 3D-gedruckten Bauteile für den Verbindungsmechanismus können nur schwer über die Fertigungseinrichtung positioniert werden. Demzufolge erhalten diese Bauteile eine Positionierungsgeometrie [vgl. Abb. 18], die einem dafür vorgesehenem Ausschnitt in den Spanten entspricht.



**Abbildung 18:** Bild A: Spant mit gefrästem Ausschnitt für die Positionierung der Bolzenhalterung; Bild B: Bolzenhalterung (grün) mit Positionierungsgeometrie, die dem Ausschnitt im Hauptspant entspricht.

## 4.2 Erläuterung der Fertigungsvorrichtung

Bei der Ausarbeitung des Konzeptes „Innen → Außen“ hat sich gezeigt, dass es besser ist, Platten für die Positionierung der Hauptspante als Aluminium-Vierkantstäbe zu verwenden. Dies hat den Vorteil, dass diese aus einem Stück gefräst werden können und somit eine hohe Genauigkeit besitzen. Die Platten werden dann über 3D-gedruckte Winkel an das Standrohr befestigt. Dadurch vereinfacht sich der Zusammenbau der Fertigungsvorrichtung bei gleichzeitiger Erhöhung der Genauigkeit. Als Materialien bieten sich Metall oder Holz an.

Die Konstruktion der Stützen und Arme erwies sich als nicht praktikabel, da es nur unter großen Aufwand möglich ist sehr genaue Bohrungen in das Standrohr zu bekommen. Ohne diese präzisen Bohrungen ist es schwierig, viele einzelne Stützen oder Arme am Standrohr zu genau positionieren.

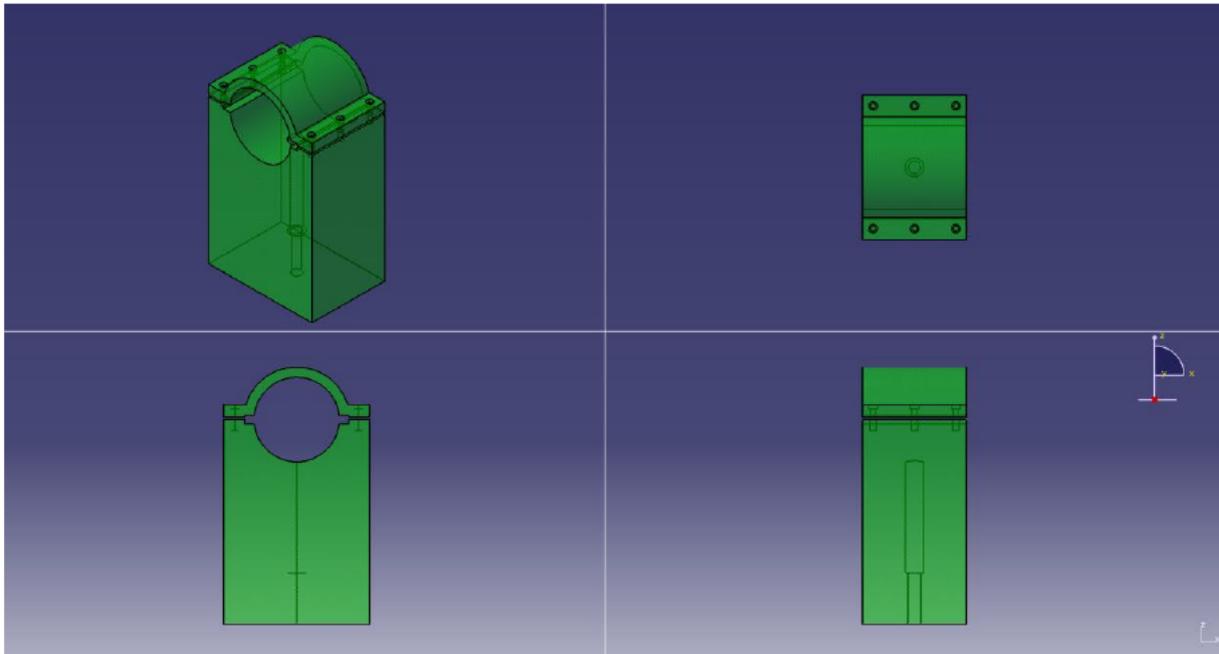
Für die Positionierungsplatten der Hauptspante wurden Multiplex-Platten aus Birke gewählt. Dieser Werkstoff besitzt den Vorteil, dass viele Einzelteile der Fertigungsvorrichtung aus einer Platte in einem Arbeitsvorgang gefräst werden können. Projektintern werden Multiplex-Platten vielseitig verwendet. Daher bestehen bereits Erfahrungen im Umgang mit diesem Werkstoff, was die Anfertigung der Fertigungsvorrichtung weiter vereinfacht und beschleunigt.

Es folgt eine Beschreibung der Funktion der Einzelteile. Der exakte Zusammenbau und die spätere Fertigungsdurchführung liegen dem Anhang bei (Anhang B: Zusammenbau der Fertigungsvorrichtung, Anhang C: Zusammenbau des Hauptteils der NLV, Anhang D Zusammenbau der Sekundärklappe für die FTI).

Der Kern der Fertigungsvorrichtung bildet das Standrohr. Es kann je nach Fertigungsschritt oder Bedarf in waagerechter oder senkrechter Position gebracht werden. Für die senkrechte Positionierung eignet sich ein Baumständer, dessen Stammaufnahme der Standrohrdicke entspricht und ggf. mit Betonplatten im Sockel beschwert werden kann [vgl. Abb. 19]. Die waagerechte Positionierung erfolgt über 3D-gedruckte Halter, die wiederum auf dem Schweißstisch mit einer M12 Zylinderkopfschraube befestigt werden können [vgl. Abb. 20].

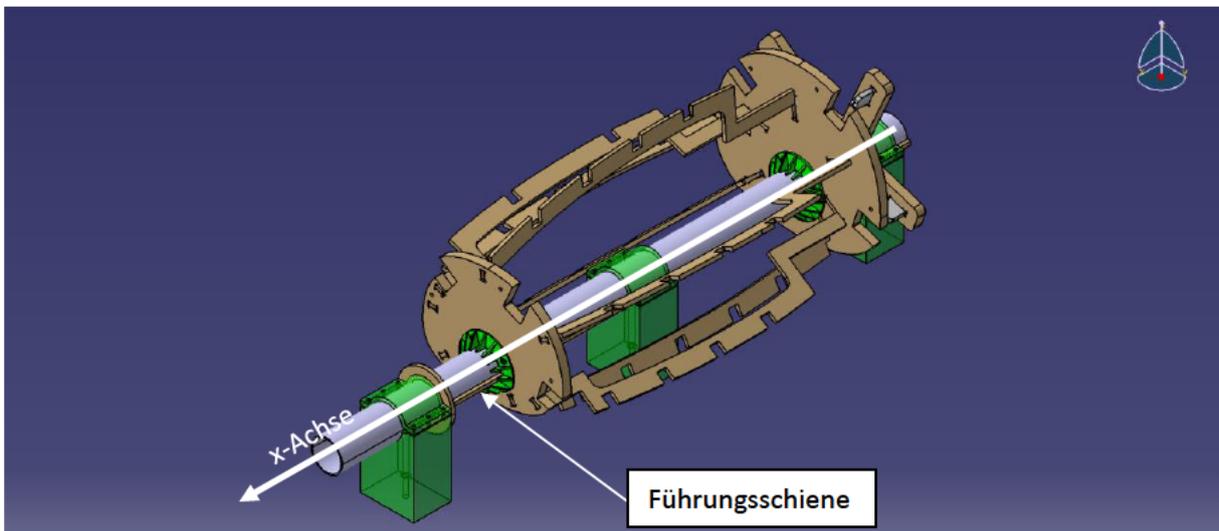


Abbildung 19: Beispiel senkrechter Standrohrhalter [B5].



**Abbildung 20:** Waagerechter Halter in der Dreiseitenansicht und einer isometrischen Darstellung (oben links).

Das Standrohr benötigt genügend Abstand für die Hauptspanträger zum Schweißstisch in der waagerechten Position [vgl. Abb. 21]. Die Klemmung des Rohres erfolgt über sechs M5 Zylinderkopfschrauben, drei an jeder Seite. Zur Aufnahme der Schrauben werden Gewindeeinsätze in das 3D-Druckteil eingeschmolzen.

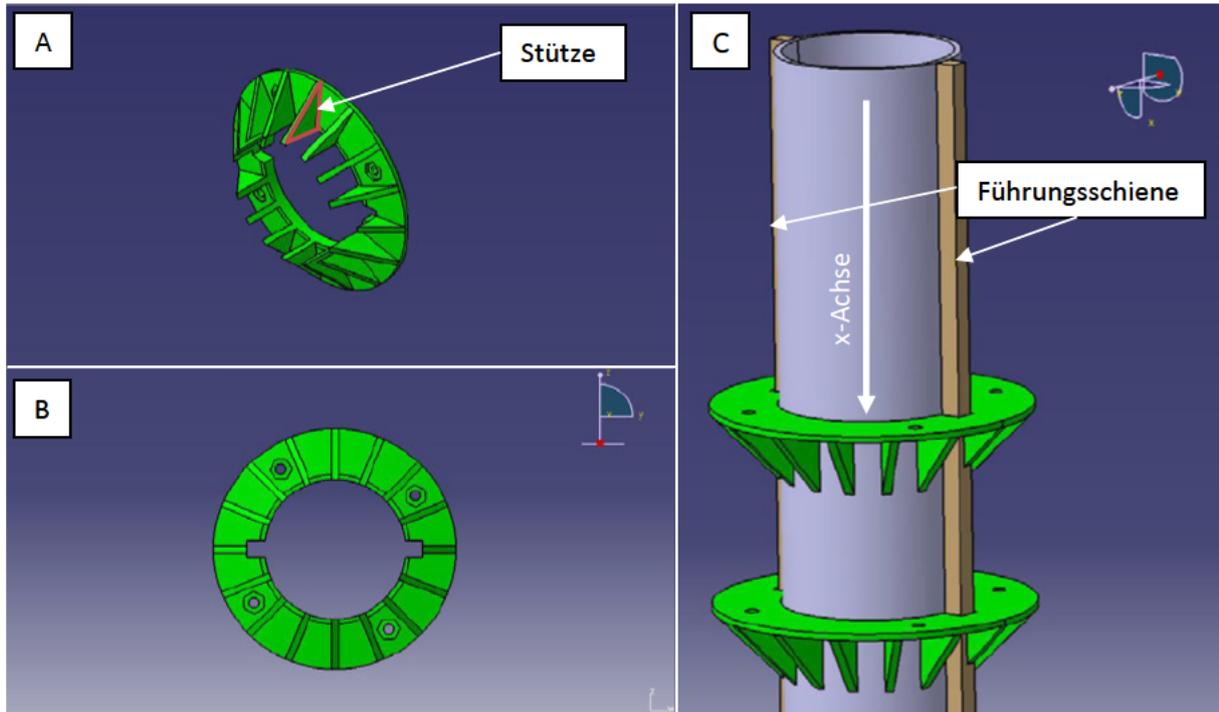


**Abbildung 21:** Fertigungsvorrichtung in waagerechter Position.

An das Standrohr werden zwei Führungsschienen gebracht, die das Verdrehen weiterer Bauteile um die x-Achse verhindern [vgl. Abb. 21 und Abb. 22, Bild C]. Diese Führungsschienen werden aus einer Multiplexplatte gefräst und besitzen daher eine hohe Genauigkeit. An den Seiten der

Klemmvorrichtung der Halterung ist Platz für die Führungsschienen, dass das Ausrichten für das Kleben der Schiene an das Standrohr ermöglicht. Dadurch wird eine exakte Position der Führungsschienen gewährleistet.

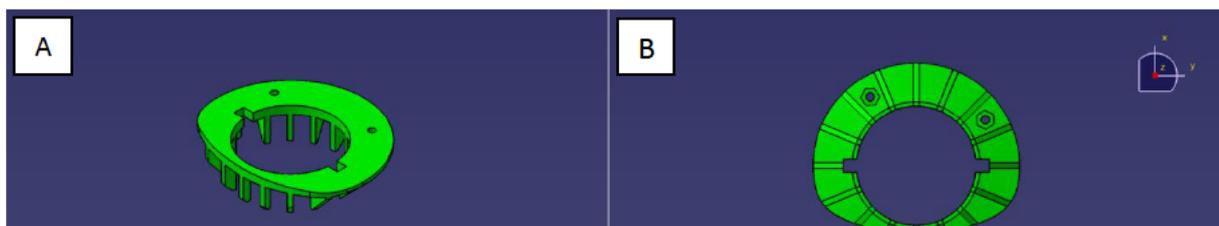
Für die Verbindung der Hauptspanträger zum Standrohr werden 3D-gedruckte Winkel an das Standrohr geklebt. Sie besitzen einen Ausschnitt für die Führungsschienen und auf der Unterseite Ausschnitte für vier M6 Sechskantmutter [vgl. Abb. 22].



**Abbildung 22:** Bild A: Isometrische Darstellung des hinteren Winkels; Bild B: Draufsicht von unten auf den hinteren Winkel; Bild C: Winkel für den hinteren Hauptspanträger und die Positionierungsplatte der Hauptverbinder.

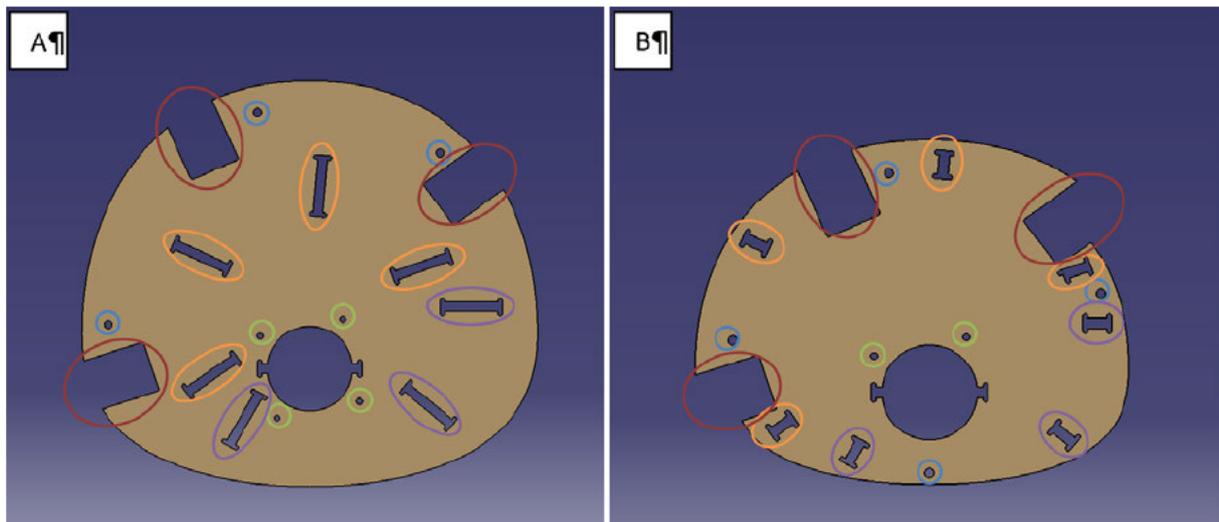
Eine Vielzahl an Stützen soll das Abkippen des Winkels unter Last verhindern. Gegenüber einer durchgehenden 45 Grad Stütze haben die vielen kleinen Stützen den Vorteil, dass sie nicht nur Gewicht und Material sparen, sondern vor allem eine kürzere Druckzeit haben.

Der vordere Hauptspant ist durchlaufend und kleiner als der hintere Hauptspant. Daher benötigt der Winkel für den vorderen Hauptspanträger eine andere Geometrie. Der hintere Teil des Winkels wird verkleinert. Es besteht kein Platz für vier Schrauben [vgl. Abb. 23]



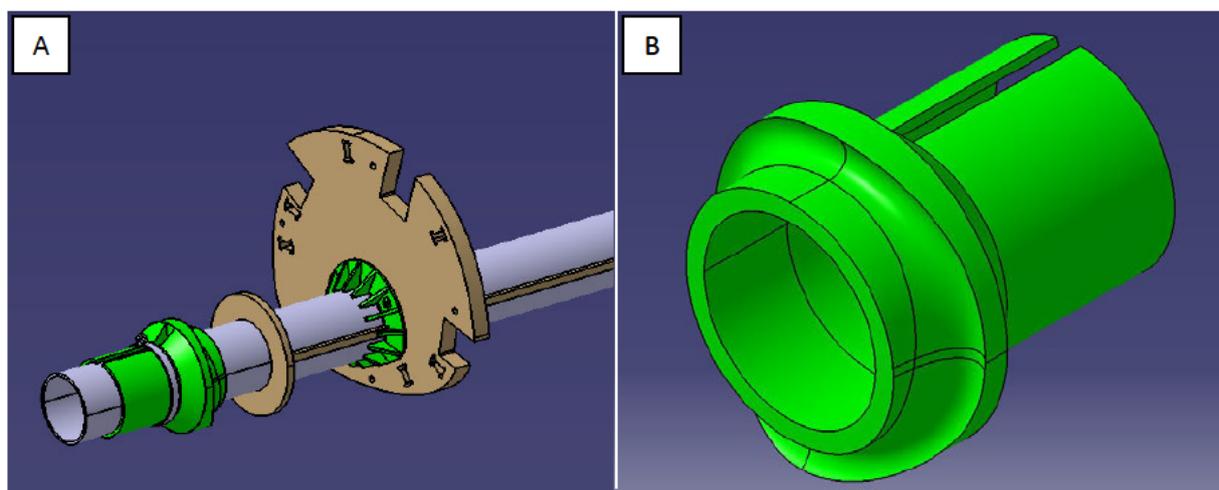
**Abbildung 23:** Bild A: Isometrische Darstellung des vorderen Winkels; Bild B: Draufsicht von unten auf den vorderen Winkel.

Die Hauptspanträger werden mit den Winkeln verschraubt. In der Abbildung 24 sind diese folgendermaßen dargestellt: für die Hauptstringer (orange), die Nebenspanhalterung (lila), Bohrungen für die Befestigung an den Winkeln (grün), Platz für die Hauptstringer (rot) und Bohrungen für die Befestigung der Hauptspante (blau). Der untere Hauptspanträger hat auf der Rückseite eine Kürzung für die Sekundärklappe.



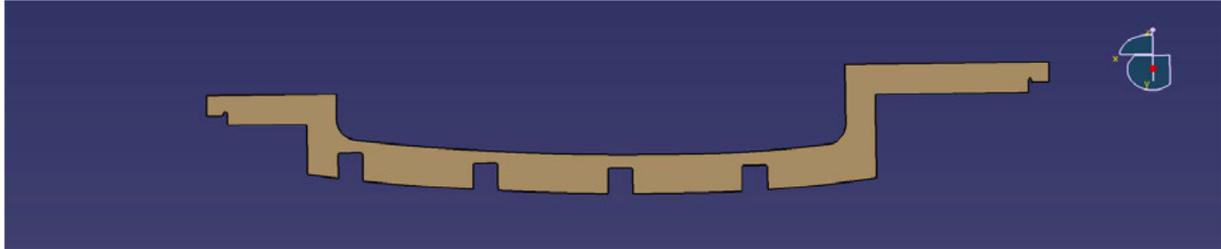
**Abbildung 24:** Bild A: Draufsicht des hinteren Hauptspanträgers; Bild B: Draufsicht des vorderen Hauptspanträgers.

Eine Positionierungsscheibe für den Spitzenverbinder befindet sich am unteren Ende der Führungsschienen und definiert die x-Position des Spitzenverbinders. Von unten wird der Spitzenverbinder von einer 3D-gedruckten Negativform, dem Spitzenhalter, fixiert. Diese Form wird mit einer Schelle gesichert [vgl. Abb. 25]. Die Position des Spitzenverbinders wird durch den vorderen Nebenstringer und den „unteren T-Stücken“ der Hauptstringer eindeutig definiert und durch den Spitzenhalter fixiert.



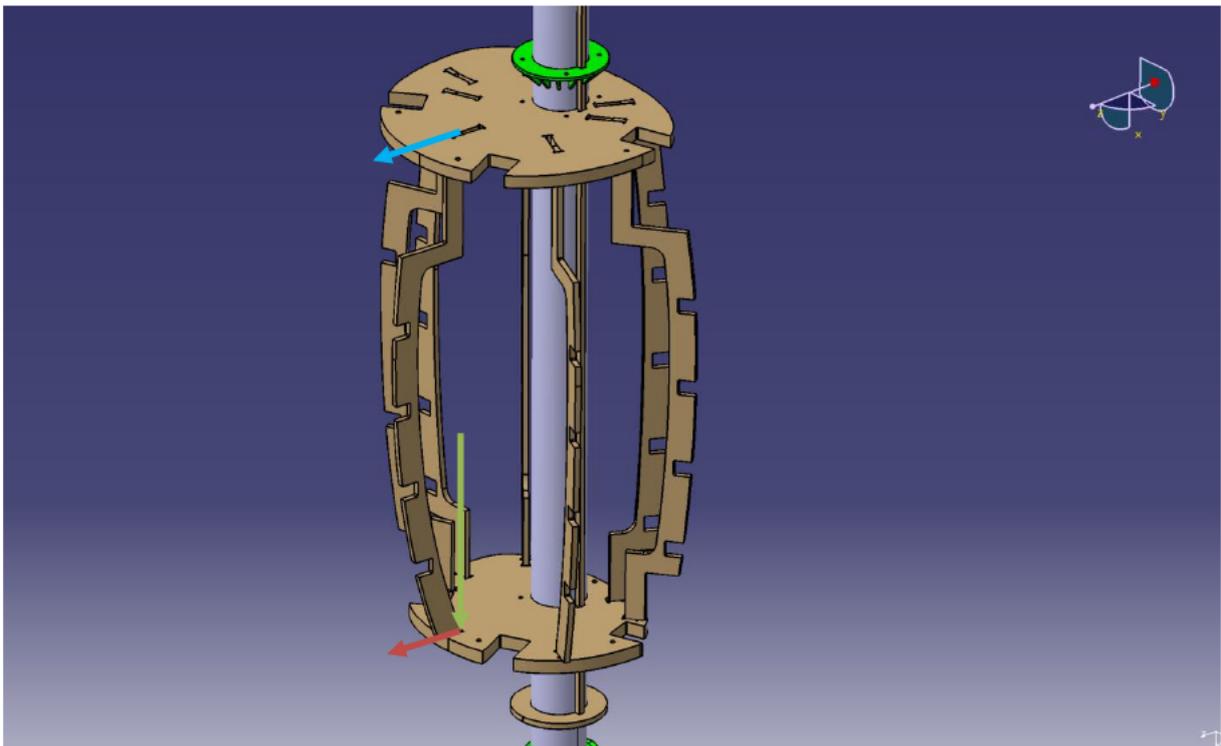
**Abbildung 25:** Bild A: Spitzenhalter über eine Schelle am unteren Teil des Stantrohres befestigt; Bild B: Isometrische Darstellung des Spitzenhalters.

Zwischen den Hauptspanträgern sind vier Spanträger der NLV und drei Spanträger der Sekundärklappe angebracht [vgl. Abb. 26].



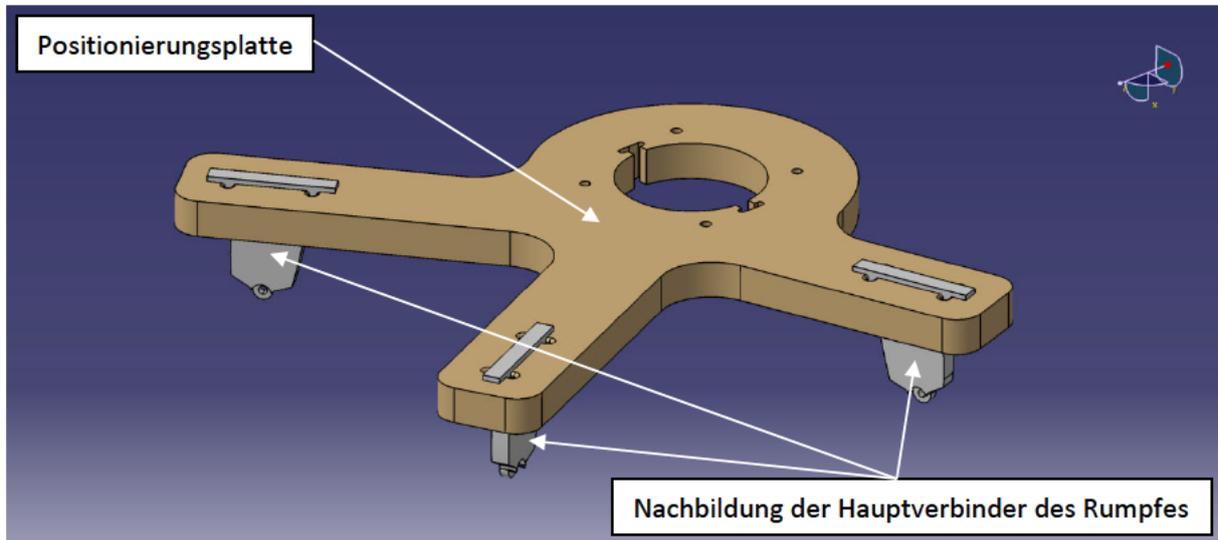
**Abbildung 26:** Draufsicht eines Spanhalters.

Die Spanträger werden schräg in dem vorderen Hauptspanträger gesteckt (siehe Abb. 27, grüne Pfeile). Danach wird er oben in den Ausschnitt geschoben (siehe Abb. 27, rote Pfeile). In dieser Position kann der Spanträger nach außen bis zum Anschlag geschoben (siehe Abb. 27, rote Pfeile) und mit Keilen gesichert werden. Dieses ermöglicht es, während des gesamten Fertigungsprozesses die Spanträger auf- und abzubauen.



**Abbildung 27:** Spanträger in der Fertigungsvorrichtung positioniert.

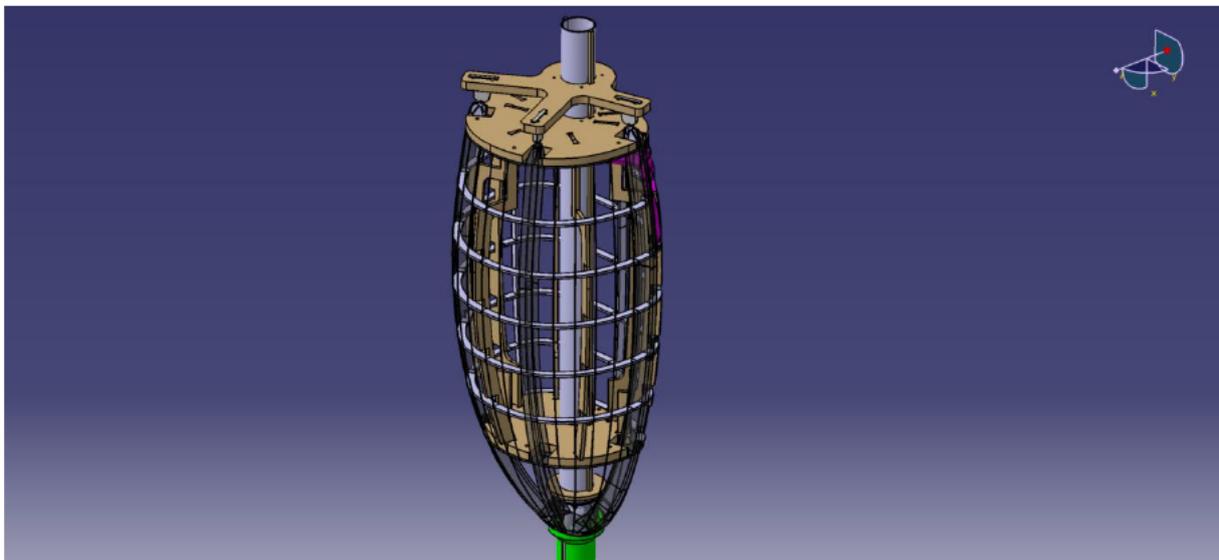
Für die Positionierung der Hauptverbinder wird eine Nachbildung des Gegenstücks, welches sich am Rumpf befindet, in die Positionierungsplatte geklebt. Diese Platte wird wie die Hauptspannträger mit einem Winkel verschraubt [vgl. Abb. 28].



**Abbildung 28:** Isometrische Darstellung der Positionierungsplatte mit Nachbildung der Hauptverbinder des Rumpfes.

Diese Positionierungsplatte kann während oder nach der Fertigung entfernt werden und dann als Vorlage für die Fertigung des Geräteträgers dienen. Das erfolgt durch einen Nachbau des Hauptverbinders der NLV anhand der Positionierungsplatte. Dieser Nachbau der NLV kann als Positionierung der Hauptverbinder des Geräteträgers genutzt werden. Dadurch wird eine hohe Genauigkeit bei der Positionierung zwischen den Hauptverbindern der NLV und des Geräteträgers erreicht, ohne dass die NLV und der Geräteträger in einer Vorrichtung gebaut werden müssen.

Abbildung 29 zeigt die Fertigungsvorrichtung mit zusammengebauter Nutzlastverkleidung und zusammengebauter Sekundärklappe.



**Abbildung 29:** Nutzlastverkleidung und Sekundärklappe in der Fertigungsvorrichtung

### 4.3 Diskussion der Fertigungsvorrichtung

Es ist festzuhalten, dass es gelungen ist, eine funktionierende Fertigungsvorrichtung zu entwerfen. Diese existiert Stand September 2024 nur konzeptionell. Vieles muss in der Praxis erprobt werden und der Fertigungsaufbau oder Fertigungsablauf kann sich ggf. in der Zukunft verändern.

Multiplex wird als Werkstoff primär aus folgenden Gründen ausgewählt:

1. kostengünstig und gut zu bearbeiten.
2. projektübergreifender vorhandener Werkstoff mit entsprechender Handhabungserfahrung
3. erfüllt die Mindestanforderung in Bezug auf Materialeigenschaften.

Nachteilig ist an diesem Werkstoff festzustellen, dass ein möglicher Verzug durch Feuchtigkeit während einer Lagerung des fertigen Bauteils auftreten kann. Das Gewicht der Mutliplex-Platten als Hauptspanträger ist deutlich schwerer als eine Konstruktion aus Stützen und Armen. Das Gesamtgewicht von ca. 25 kg ist von zwei Personen tragbar.

Für die sichere Befestigung der Hauptspante werden Schrauben mit langem Schaft und großen Unterlegscheiben verwendet werden. Für die Bohrung für die Bolzenschraube ist eine Übergangspassung zu wählen. Dadurch entsteht wenig Spiel zwischen Hauptspanträger und Hauptspant. Es ist darauf zu achten, die Hauptspante nicht zu beschädigen. Die großen Unterlegscheiben verteilen die Kraft der Verschraubung auf eine möglichst große Fläche und verhindern so mögliche Schäden an dem CFK-Sandwich des Hauptspantes.

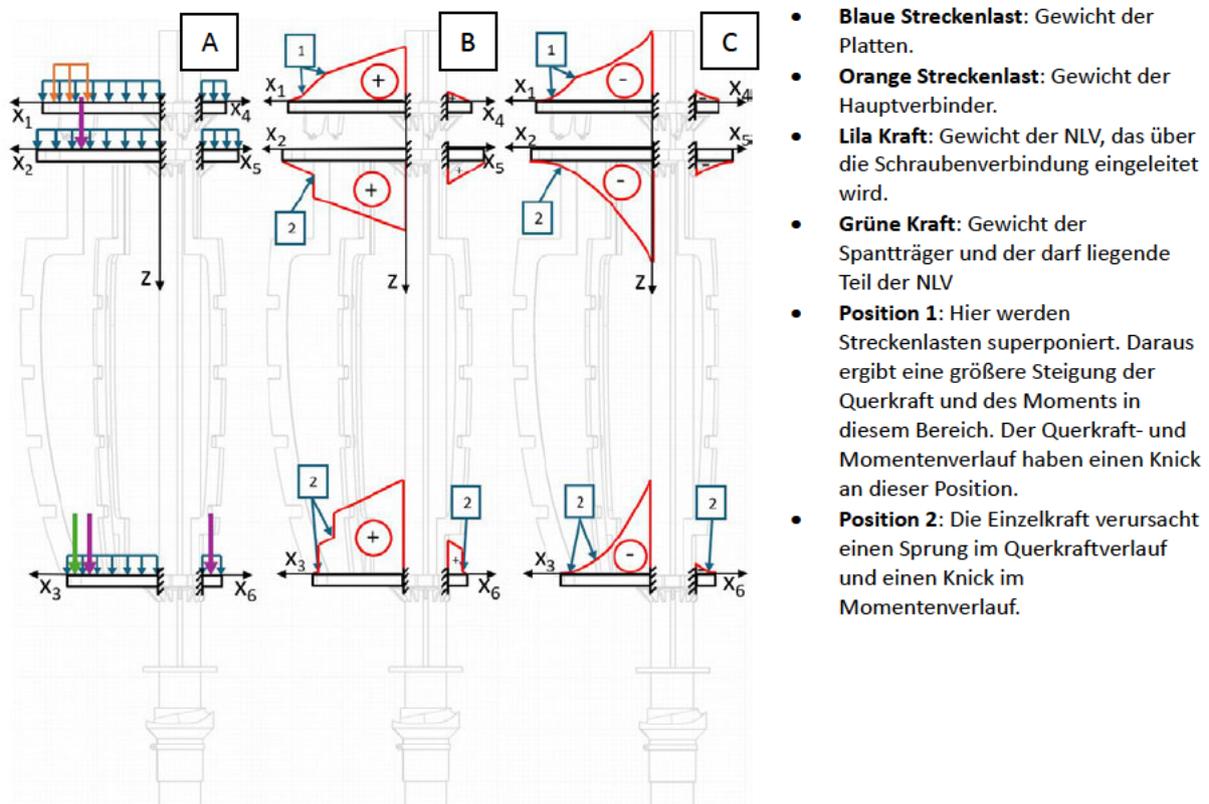
Für das Projekt HAP-alpha steht ein Prusa Mk4 3D-Drucker zur Verfügung. Mit PA-CF kann nur mit einer verminderten Geschwindigkeit gedruckt werden, ansonsten beschädigen die Carbonfasern die Düse. Das Filament muss ggf. im Vorhinein getrocknet werden, dies kann je nach verwendetem Trocknungsverfahren 1 Std. bis 48 Std. dauern. Daher kann ein guter Druck für z.B. die Winkel viel Zeit in Anspruch nehmen. Bei den Druckteilen ist daher immer die Fertigungszeit miteinzuplanen.

Die NLV besteht aus teils filigranen Einzelteilen und ihre Steifigkeit wird erst im zusammengebauten Zustand erreicht. Hier ist das Anbringen der Zwingen für die Klebung mit sehr geringen Anpressdruck notwendig. Hinzu kommt, dass der Raum zwischen den Spanten und Stringern begrenzt ist. Die Art und Größe der Zwingen können realistisch erst in der Praxis ermittelt werden.

#### 4.4 Nachweis der Fertigungsvorrichtung

Es ist zu zeigen, dass kritische Bauteile der Fertigungsvorrichtung nicht versagen und die gesamte Fertigungsvorrichtung die nötigen Steifigkeiten aufweist.

Für die Ermittlung der kritischen Bauteile wird der Querkraftverlauf und der Momentenverlauf abgeschätzt. Zur Vereinfachung wird der Querschnitt der Fertigungsvorrichtung betrachtet. Die Hauptspanträger und Positionierungsplatte der Hauptverbinder werden im Querschnitt als 2D Balken mit fester Einspannung betrachte. Jeder dieser Balken hat sein eigenes Koordinatensystem, wobei die x-Achse von der Einspannung entlang der Balken läuft und die z-Achse bei allen Balken gleich nach unten zeigt [vgl. Abb. 30].



**Abbildung 30:** Vereinfachte Darstellung des Querschnitts der Fertigungsvorrichtung; Bild A: Last Fall; Bild B: Querkraftverlauf; Bild C: Momentenverlauf.

Aus der Abbildung 30 lässt sich entnehmen, dass die größte Querkraft und größte Biegemoment an der Verbindung zwischen Standrohr und den Platten auftritt.

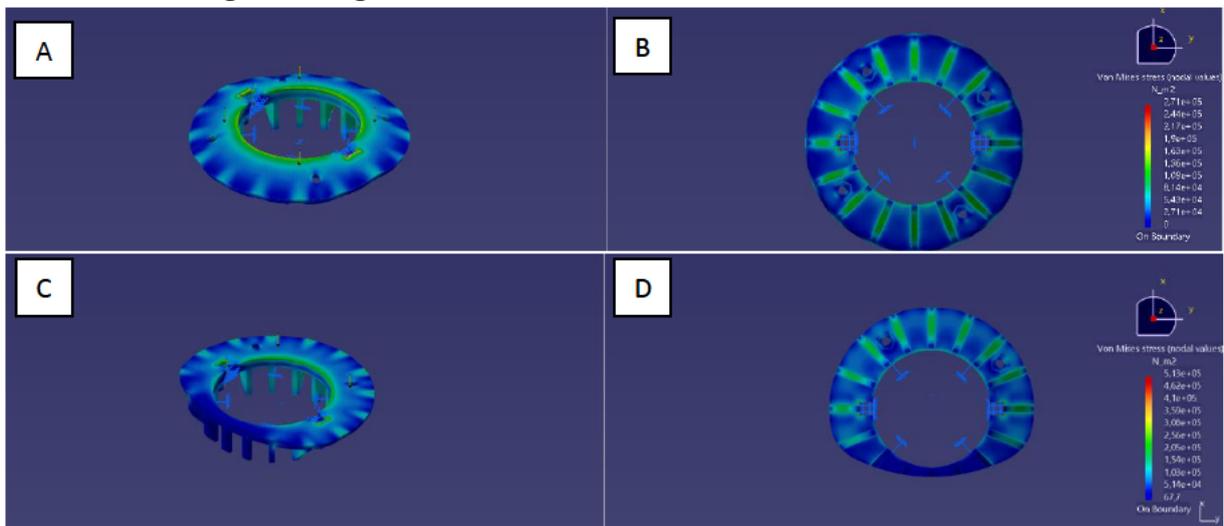
Als erstes muss die Festigkeit der Fertigungsvorrichtung aufgrund ihres Aufbaus und Eigengewichtes nachgewiesen werden. Das Standrohr aus Stahl mit einer Wandstärke von 3,2 mm [vgl. Anhang E, Tab. 6] sowie der Multiplexplatten mit einer Dicke von 21 mm und 9 mm [vgl. Anhang E, Tab. 5] kann als fest angenommen werden. Für die Winkel wird PA-CF [vgl. Anhang E, Tab. 4] verwendet, was sich durch eine hohe Zugfestigkeit auszeichnet. Der Winkel befindet sich im Bereich des maximalen Querkraft und Biegemoments und muss untersucht werden.

Die FE-Analyse wird in CATIA durchgeführt. Als erstes werden die Winkel auf Festigkeit überprüft.

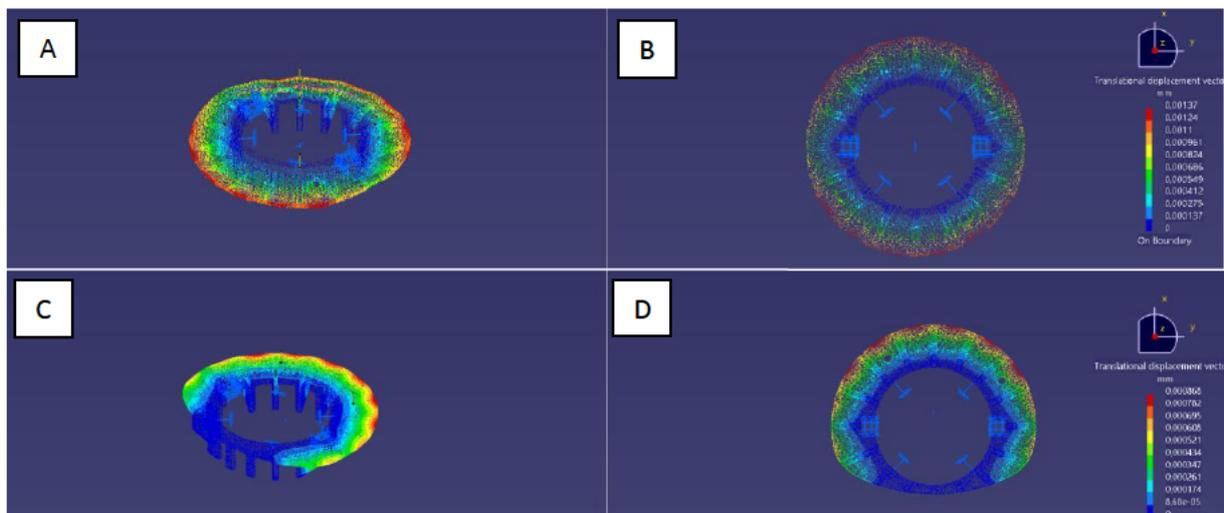
**Vernetzung:** Das Mesh hat eine gezielte Auflösung von 0,2 mm, dabei werden Tetraederelemente genutzt und die Vernetzung geschieht automatisch. Für die Simulation wird ein rein linearer Solver verwendet.

**Lastannahme:** Der Winkel ist durch die Klebung fest mit dem Standrohr verbunden und es wirkt eine Last von 10 kg auf senkrecht auf den Winkel. Das Gewicht stellt einen möglichen Extremfall da. Es ergibt sich aus dem Gewicht des Hauptspanträgers von 2,5 kg, der für die Klebung angebrachten Zwingen von 1,5 kg, einem Teil des Gewichtes der NLV von 1 kg und einem Sicherheitsfaktor von 2.

**Modellbildung:** Alle Freiheitsgrade der Knoten auf der Innenseite des Winkels werden gesperrt. Es wird eine Last von 100 N auf die Oberseite des Winkels aufgebracht und über das Programm über alle Knoten der Oberseite gleichmäßig verteilt.



**Abbildung 31:** Spannungen im Winkel durch 100 N; Bild A: Isometrische Darstellung der hinteren Winkel; Bild B: Draufsicht von unten auf die hintere Winkel; Bild C: Isometrische Darstellung des vorderen Winkels; Bild D: Draufsicht von unten den vorderen Winkel.



**Abbildung 32:** Verschiebungen im Winkel durch 100 N; Bild A: Isometrische Darstellung der hinteren Winkel; Bild B: Draufsicht von unten auf die hintere Winkel; Bild C: Isometrische Darstellung des vorderen Winkels; Bild D: Draufsicht von unten den vorderen Winkel.

In diesem Lastfall beträgt die maximale Spannung 271 kPa für die hinteren Winkel und 513 kPa für den vorderen Winkel [vgl. Abb. 31]. Sie tritt in den Ecken des Ausschnittes für die Führungsschienen auf. Im Durchschnitt bewegt sich die Spannung zwischen 30 kPa und 250 kPa. Die Zugfestigkeit des verwendeten PA-CF hat seine minimale Zugfestigkeit bei 70 MPa, wenn die wirkende Kraft  $90^\circ$  zur Druckrichtung liegt. Das Bauteil bei der angegebenen Belastung einen Sicherheitsfaktor von sehr viel mehr als 100 gegenüber der Zugfestigkeit auf.

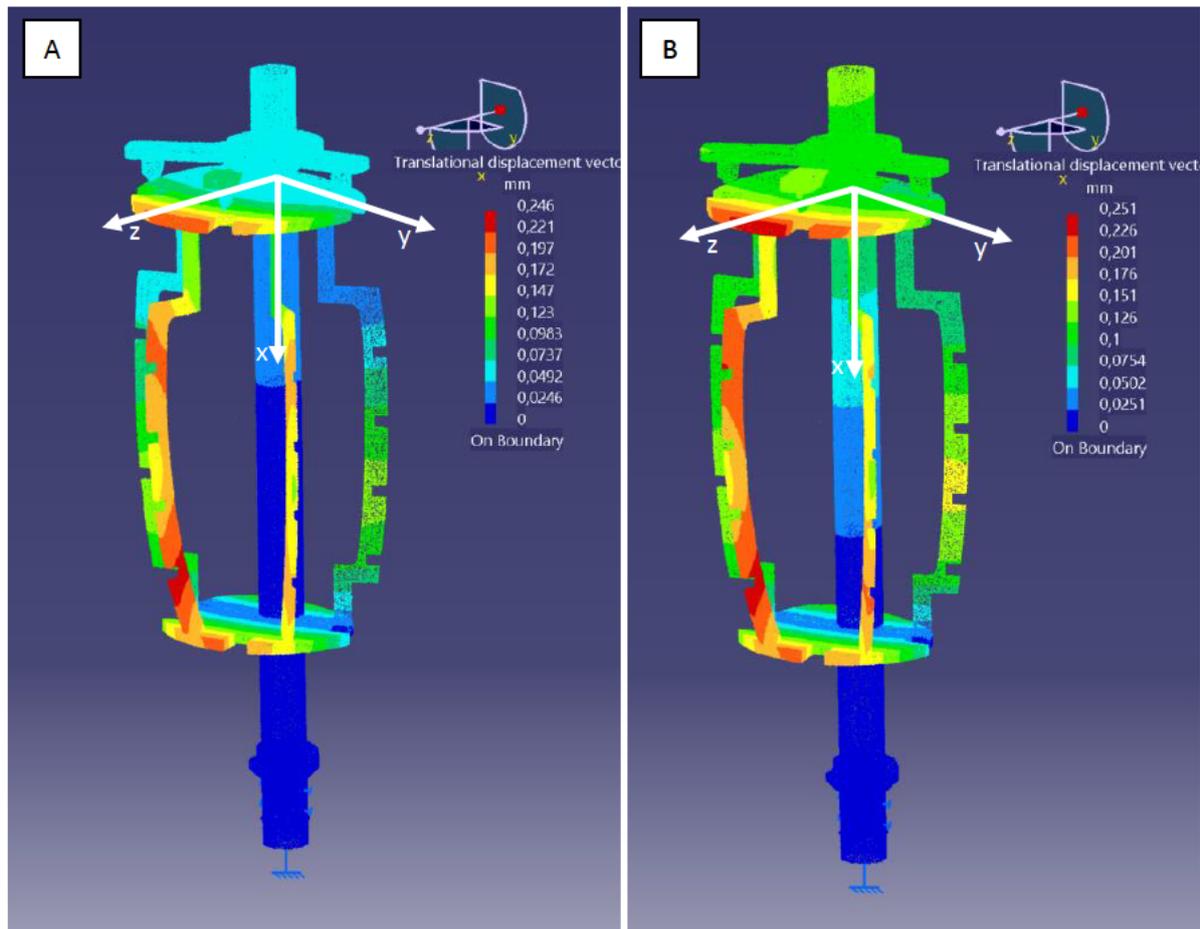
Die maximale Verformung der Winkel ist sehr viel kleiner als 0,1 mm und befindet sich an den Rändern des Winkels [vgl. Abb. 32]

Es wird die Fertigungsvorrichtung auf Steifigkeit untersucht.

**Vernetzung:** Für das Mesh werden Tetraederelemente genutzt und die Vernetzung geschieht automatisch. Für die Simulation wird ein rein linearer Solver verwendet. Die gezielte Auflösung liegt für die Winkel und die Nachbildung der Hauptverbinder bei 0,2 mm, für die Hauptspanträger und die Positionierungsplatte bei 0,5 mm und für das Standrohr bei 1 mm.

**Lastannahme:** In einem Fall A wird die Fertigungsvorrichtung durch ihr Eigengewicht belastet. Weiter wird über die Bohrungen für die Schraubverbindung zwischen Hauptspant und Hauptspanträgern ein Teil (1 kg) des Gewichtes der NLV in die Fertigungsvorrichtung eingeleitet. Das restliche Gewicht (0,5 kg) der NLV wird auf Ausschnitte in den Spanträgern verteilt. Es wird angenommen, dass ein Gewicht für die Zwingen von insgesamt 4,5 kg hinzukommt. Auf dem Spitzenhalter liegt ein kleiner Teil des Gewichtes der NLV (0,3 kg). In einem weiteren Fall B wird zusätzlich davon ausgegangen, dass die NLV durch Arbeiten während der Fertigung eine seitliche Kraft (in y-Richtung, vgl. Abb. 33) von 40 N erfährt.

**Modellbildung:** Um das Eigengewicht der Fertigungsvorrichtung zu simulieren wird diese mit  $9,81 \text{ m/s}^2$  in x-Richtung (siehe Abb. 33) beschleunigt. Für die Gewichtskraft der NLV werden je 5 N über die Bohrungen der Hauptspanträger eingeleitet. Weitere 5 N der Gewichtskraft der NLV werden auf den Unterseiten der Ausschnitte der Spanträger gleichmäßig auf Knoten verteilt. 45 N Gewichtskraft für die Zwingen werden, genau wie das Gewicht der NLV, gleichmäßig auf die Bohrungen der Hauptspanträger und die Unterseite der Spanträger verteilt. Die Gewichtskraft von 3 N wird gleichmäßig auf die Knoten der Oberseite des Spitzenhalters verteilt. Im Fall B wird die Kraft nur über die Bohrungen der Hauptspanträger eingeleitet. Die Einzelteile werden mit einander verbunden, indem die Kontaktebenen gleichgesetzt werden.



**Abbildung 33:** Darstellung der Verschiebung der Fertigungsvorrichtung unter Last von Fall A und Fall B.

In beiden Lastfällen liegt die maximale Verformung bei ca. 0,25 mm und die durchschnittliche Verformung bei ca. 0,07 mm im Fall A und 0,12 mm im Fall B [vgl. Abb. 33]. Der Spanträger N3 ist im Vergleich zu den anderen Spanträgern stärker verformt. Im Fall B ist die durchschnittliche Verformung im hinteren Hauptspanträger fast um den Faktor 2 größer als in Fall A.

Für eine Fertigungsgenauigkeit von  $< 5$  mm sind die Steifigkeiten der Fertigungsvorrichtung ausreichend. Die Verformung der Positionierungsplatte der Hauptverbinder bewegt sich im Bereich von 0,07 mm bis 0,13 mm und könnte sich als kritisch erweisen.

## 4.1 Diskussion des Nachweises der Fertigungsvorrichtung

Durch den komplexen Aufbau der Fertigungsvorrichtung ist eine händische Auswertung der Steifigkeit nicht machbar. Die Annahmen, die zum Querkraft- und Momentenverlauf führen, sind grob vereinfacht. Trotzdem können schnell durch die Abbildung 30 kritische Stellen entdeckt werden, ungeachtet der exakten Werten der wirkenden Kräfte und Momente. Die Berechnungen erfolgten alle mittels FE-Analyse und stellen ebenfalls einen Vergleichsfall da. In der Praxis sind die Lastfälle deutlich komplexer, was zu höheren Verformungswerten führen kann.

Für FE-Analyse mittels CATIA wird richtet sich an Konstrukteure und nicht an FEM-Analysten, da der Preprozessor, Solver und Postprozessor in dem Programm vereinigt sind und somit weniger Funktionen bieten als alleinstehende Tools. Für schnelle FE-Analysen mit hohen Sicherheitsfaktoren ist die Arbeit mit CATIA mehr als ausreichend. Weiter ist die lineare Lösung bei CATIA deutlich steifer als eine parabolische Lösung [24]. Die Verformungen werden in der Praxis höher ausfallen. Für eine parabolische Lösung ist mehr Rechenkapazität und somit auch Zeit notwendig und konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Durch die hohe Vernetzungsdichte konnte trotzdem eine adäquate Lösung bereitgestellt werden.

Die Verformung der Positionierungsplatte der Hauptverbinder bewegt sich in dem Bereich von 0,07 mm bis 0,13 mm und wird sich in der Realität vermutlich mehr verformen. Das könnte sich als kritisch erweisen. Durch den Aufbau der Fertigungsvorrichtung befindet sich während des Fertigungsprozesses theoretisch keine Last an der Positionierung der Hauptverbinder. In der Praxis kann es jedoch vor und während des Klebprozesses zu Verzug kommen. Die Positionierungsplatte der Hauptverbinder darf bei kleinen Lasten keine elastische Verformung aufzeigen und muss ggf. weiter verstärkt werden.

Durch die Größe des Meshes in der FE-Analyse von 0,2 mm bis 1 mm, je nach Bauteil, kann es bei kleinen Rundungen und Ecken zu Fehlern kommen. Das Mesh kann die eigentliche Struktur in diesen Situationen nicht korrekt abbilden. Auch wenn grundsätzlich Spannungsspitzen bei Bohrungen oder ähnlich Ausschnitten zu erwarten sind, kann FE-Analyse bei dieser Auflösung dies nur schwer beurteilen.

Der Winkel wurde in der FE-Analyse nur unter einer Flächenlast geprüft. Durch den Aufbau der Auflage und Verschraubung des Hauptspantes am Winkel ist die Krafteinleitung in der Realität deutlich komplexer. Durch den sehr hohen Sicherheitsfaktor ist das Versagen aufgrund von Überschreitung der Festigkeit sehr unwahrscheinlich.

Der vordere Hauptspanträger wird im Gegensatz zu den anderen Trägern nur mit zwei statt vier Schrauben befestigt. Durch die exzentrische Lage des Standrohres kann sich unter Last die Rückseite unter Umständen anheben. In der Praxis wird Multiplex nicht auf ein Hundertstel genau gefräst, sodass Spiel zwischen dem Standrohr und dem Hauptspanträger entsteht. Eine Lösung wäre es, die vorderen Hauptspanträger mit seinem Winkel zu verkleben.

## 5. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden zwei Konzepte für die Fertigung der Nutzlastverkleidung des Fluggerätes im Projekt HAP-alpha entwickelt. Einmal das Konzept „Innen → Außen“ und einmal „Außen → Innen“. Beide Konzepte werden anhand von gegebenen Anforderungen in einer tabellarischen Gegenüberstellung überprüft und bewertet. Die Summe der Bewertung in den einzelnen Anforderungen fließt ohne Gewichtung in das Endergebnis ein und das Konzept „Innen → Außen“ erhält die höhere Gesamtpunktzahl. Das Konzept überzeugt vor allem durch die gute Umsetzbarkeit in der Fertigung, ohne dabei die festgelegten Abweichungen im fertigen Produkt zu überschreiten. Für die weitere Ausarbeitung dieses Konzepts wird eine Fertigungsvorrichtung mit der notwendigen Steifigkeit konstruiert, die die Montage sinnvoll unterstützt und eine Positionierung der Einzelteile zueinander während des Aushärtungsprozesses der Klebung ermöglicht. Somit ist umfassender Prozess entwickelt, welcher aus einem Fertigungsprozess und einer Fertigungseinrichtung zur Nutzlastverkleidung samt Sekundärklappe besteht, der in Zukunft bei der Montage genutzt wird.

## 6. Ausblick

Wie bereits im Kapitel 4.3 erwähnt gilt es einige Dinge in der Praxis zu testen, angefangen bei den Zwingen. Diese müssen möglichst leicht sein, wenig Raum benötigen und nur die nötige Spannkraft besitzen, um die Bauteile nicht zu beschädigen und trotzdem zu fixieren. Beim Kleben kann es vorkommen, dass der Kleber ebenfalls mit den Zwingen in Kontakt kommt und diese danach schwer zu reinigen sind, daher sollten die Zwingen schnell und günstig ersetzbar sein. Hier muss vor dem Einsatz analysiert werden, welche Zwingen zweckdienlich sind. Die Art der Zwinge kann wiederum Einfluss auf die Positionierung dieser haben.

Für die verzugsfreie Lagerung der Fertigungsvorrichtung müssen zusätzliche Strategien entwickelt werden. Das ist vor allem für die Positionierungsplatte der Hauptverbinder wichtig, da diese auch nach Fertigung der Nutzlastverkleidung weiterverwendet wird. Es ist zu empfehlen, die Multiplexplatte mit Ölen oder Lacken vor Verzug zu schützen.

Die angenommene Fräsgenauigkeit von 0,1 mm und die 3D-Druckgenauigkeit von 0,2 mm muss in der Praxis weiter analysiert werden. Eine Testreihe zur Genauigkeit der 3D-Druckteile hat bereits begonnen.

Die Auswahl des Klebers ist noch zu treffen. Dabei bedarf es einer Abwägung zwischen Viskosität, Härtezeit, Dichte, Elastizität im ausgehärteten Zustand und der Fähigkeit gute Kehnähte zu legen. Für die Nutzlastverkleidung kann überprüft werden, ob auf Klebstoff zurückgegriffen werden kann, der bereits für andere Strukturteile des Fluggeräts verwendet wird. Der Kleber für die Bauteile der Fertigungsvorrichtung kann von dem Kleber für die Struktur abweichen.

Die Konstruktion, der der Positionierungsplatte der Hauptverbinder, muss weitergeführt werden. Es bestehen mehrere Möglichkeiten die Steifigkeit zu erhöhen. Bei Betrachtung der Steifigkeiten fällt auf, dass die Steifigkeit entweder vom Flächeninhalt des Querschnitts oder vom Flächenträgheitsmoment abhängt [vgl. Anhang A, Tab. 3]. Wenn es gelingt diese Werte zu erhöhen, erhöht sich ebenfalls die Steifigkeit und die Verformung wird kleiner.

Die Belastung der Fertigungsvorrichtung wird durch ihr Eigengewicht, dem Gewicht der für die Fertigung benötigten Utensilien und dem Gewicht der NLV bestimmt. Die Fertigung findet fast ausschließlich in senkrechter Position statt. Es also ausreichen die Steifigkeit gegen Kräfte in Gravitationsrichtung zu erhöhen. In das Flächenträgheitsmoment der Platte bezüglich einer Biegung um die y-Achse geht die Dicke in dritter Potenz ein [vgl. Tab. 1]. Damit erhöht die Dicke der Platte nicht nur den Flächeninhalt des Querschnittes, sondern in dritter Potenz auch das Flächenträgheitsmoment und ist von entscheidender Bedeutung. Es kann mit Versteifungselementen, einer dickeren Platte oder einer weiteren Platte, nachgeholfen werden. Die Versteifungselemente könnten z.B. Vierkantstäbe sein, die auf den Platten befestigt werden und die stark belasteten Stellen unterstützen. Dadurch wird das Flächenträgheitsmoment lokal erhöht und somit auch die Steifigkeit gesteigert. Dickere Platten erhöhen die Steifigkeit deutlich, sind aber aufwendiger zu fräsen und auch schwerer. Es könnte auch eine exakte Kopie der Platten gefräst werden und diese anschließen miteinander verklebt werden. Das hat

denselben Effekt wie eine dickere Platte bei geringerem Fräsaufwand. An diesem Punkt sollte weiter Arbeit investiert werden.

Die Ausarbeitung des Fertigungsprozesses samt Fertigungsvorrichtung ist entwickelt und überprüft worden. Die Zeichnungen der Frästeile für die Fertigungsvorrichtung liegen aktuell der Fertigung vor (auf der beigelegten CD in Form von dxf-Dateien). Die Bauteile, die 3D-gedruckt werden sollen, sind bereit für den 3D-Druckvorbereitet (auf der beigelegten CD in Form von 3mf-Dateien) und werden in naher Zukunft in Druck gehen. Die Voraussetzung für den Beginn der Fertigung der Nutzlastverkleidung wurde geschaffen.

Sobald die Struktur der Nutzlastverkleidung fertiggestellt wurde kann die Bespannung in der Praxis angegangen werden. Wir sind einer Realisierung des Erstfluges Mitte 2025 der High Altitude Platform im DLR Projekt HAP-alpha einen Schritt nähergekommen.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank für die kontinuierliche Unterstützung der Abteilung Sichere System und Systems Engineering im Institut für Flugsystemtechnik des DLRs ausdrücken.

Besonders bedanke ich mich bei meinem Betreuer Daniel Rothe (DLR). Stets ging er auf meine Fragen und Ideen mit Ernsthaftigkeit ein und ebnete mir somit den Weg für diese Bachelorarbeit. Durch den regen Austausch mit ihm und Felix Köneke (DLR) war es mir erst möglich meine Ideen sinnvoll zu verwirklichen.

Meiner Familie und Kommilitonen danke ich für die Geduld, den Beistand und nervliche Rückendeckung.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Hruza, Ludwig, *Aus der Luft gegriffen*, Frankfurter Allgemeine Zeitung 23.12.2020  
<https://www.faz.net/aktuell/wissen/erde-klima/ueberwachung-aus-dem-weltall-satelliten-beobachten-die-welt-17071714.html> (Besucht am 27.09.2024)
- [2] Molczan, Ted, *Keyhole Resolution*, Visual Satellite Observer's  
<https://satobs.org/columbia/KH11resolution.html>
- [3] Satellitenaufklärungssystem SAR-Lube, Bundeswehr, <https://www.bundeswehr.de/de/ausruestung-technik-bundeswehr/cybersysteme-bundeswehr/sar-lupe>  
(Besucht am 27.09.2024)
- [4] European Space Agency, *Satelliten-Umlaufbahnen*,  
[https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_DE/SEM69FF280G\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_DE/SEM69FF280G_0.html) (Besucht am 27.09.2024)
- [5] Nikodem, Florian, *Entwicklung der DLR-Höhenplattform und ihrer Anwendung*  
DWT Konferenz Unbemannte System VIII, 26.10.2021 – 27.10.2021
- [6] Airbus: *Zephyr, The world's most advanced solar-powered High Altitude Platform Station*  
<https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/uas-solutions/zephyr>  
(Besucht am 27.09.2024)
- [7] Wilkens, Andreas, *Airbus: Aufklärungsdrohne Zephyr flog 64 Tage am Stück*, heise online, 23.08.2022  
<https://www.heise.de/news/Airbus-Aufklaerungsdrohne-Zephyr-flog-64-Tage-am-Stueck-7240826.html> (Besucht am 27.09.2024)
- [8] Nikodem, Florian, *Overview of the DLR High Altitude Platform and Scientific Potential of the Technology Demonstrator HAP-alpha*, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 19.09.2023 – 21.09.2023
- [9] Falkenheim, Tim, *Entwicklung einer Nutzlaststruktur im Rahmen des Projektes HAP alpha*, Masterarbeit, 12.01.2024
- [10] Jirousek, Matthias und Peichl, Markus und Anger, Simon und Engel Marius und Scheiber, Rolf und Baumgartner, Stefan, *HAPSAR Innovatives MW-Fernerkundungswerkzeug zur Langzeit-Erdbeobachtung vieler Phänomene*,  
Forum Unbemannte Systeme VIII, 25.10.2021-27-10-2021
- [11] DIN 8589-3  
<https://dx.doi.org/10.31030/9500667>
- [12] MBS CNC-Technologie & Engineering GmbH, *Was Ist CNC-Fräsen?*  
<https://mbs-cnc.de/unternehmen/ratgeber/was-ist-cnc-fraesen/> (Besucht am 27.09.2024)
- [13] Dassault Systems, *3D Druck*  
<https://www.3ds.com/de/make/guide/process/3d-printing> (Besucht am 27.09.2024)
- [14] 3D-Activation Lexikon, *Fused Deposition Modelling (FDM)*  
<https://www.3d-activation.de/druckverfahren/fused-deposition-modeling/> (Besucht am 27.09.2024)
- [15] 3D-Activation Lexikon, *FDM - Druckverfahren*  
<https://www.3d-activation.de/information/lexikon/fdm-3d-druck-verfahren/> (Besucht am 27.09.2024)
- [16] Fachwissen Technik, *Kleben*  
<https://www.fachwissen-technik.de/verfahren/kleben.html> (Besucht am 27.09.2024)

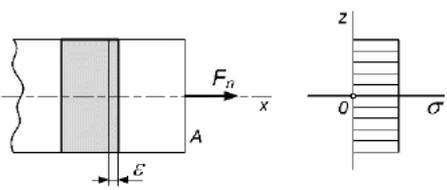
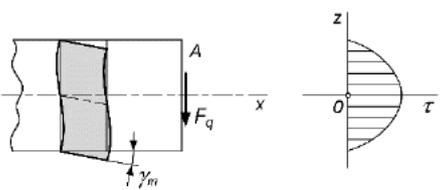
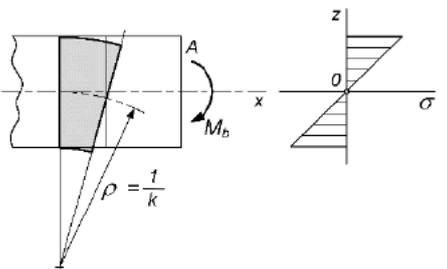
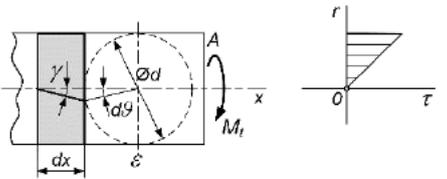
- [17] Bischof, Claus and Possart, Wulff, . *Adhäsion: Theoretische und experimentelle Grundlagen*, Berlin, Boston: De Gruyter, 1983.  
<https://doi.org/10.1515/9783112728031>
- [18] Habenicht, Gerd, *Kleben Grundlagen, Technologie, Anwendung*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2005  
ISBN 3-540-26273-3
- [19] Zwettler, Monika *Was ist eigentlich FEM?*, Konstruktionspraxis, 17.01.2023  
<https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/was-ist-eigentlich-fem-a-5b27ea98c31843bbdeb48e78482fe2f9/> (Besucht am 27.09.2024)
- [20] Gross, Dietmar und Hauger, Werner und Schröder, Jörg und Wall, Wolfgang A., *Technische Mechanik 2 Elastostatik*, Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2017  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-53679-7>
- [21] Linke, Markus und Nast, Eckart, *Festigkeitslehre für den Leichtbau Ein Lehrbuch zur Technischen Mechanik*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2015  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-53865-0>
- [22] Gedächtnisprotokoll des Gespräch mit dem technischen Leiter des DLR Projekts HAP-alpha M.Sc. Daniel Rothe, September 2024
- [23] Dubs, F., *Aerodynamik der reinen Unterschallströmung*, Springer Basel AG , 2013  
<https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5295-1>
- [24] Zamani, Nader G., *CATIA V5 FEA Tutorials*  
<https://static.sdcpublications.com/pdfsamples/1-58503-227-1-2.pdf> (Besucht am 27.09.2024)
- [25] Tabelle entnommen aus dem Handbuch des Herstellers Fiberthree: PA-CF Pro
- [26] Tabelle entnommen aus dem Handbuch des Herstellers Holz-Zentrum Luhmann: Birke Multiplex Platten

## Bildquellen

- [B1] Nikodem, Florian, *Overview of the DLR High Altitude Platform and Scientific Potential of the Technology Demonstrator HAP-alpha*. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 19.09.2023 – 21-09.2023
- [B2] Steel, Justus, Visualisierung für Messeauftritte des DLR
- [B3] Prusa Research by Josef Prusa Anleitung: *Zusammenbau des Gehäuses*  
[https://help.prusa3d.com/de/guide/3-zusammenbau-des-gehauses\\_335739](https://help.prusa3d.com/de/guide/3-zusammenbau-des-gehauses_335739)
- [B4] CNC Kitchen *Tipps & Tricks für Gewindeeinsätze im 3D Druck*  
<https://www.cnckitchen.com/blog/tipps-amp-tricks-fr-gewindeeinstze-im-3d-druck> (Besucht am 27.09.2024)
- [B5] Markus Schauer GmbH, *Fachkatalog 2015/2016*, Seite 152  
[https://schauer-lindner.de/download/schauer\\_fachkatalog2015-16.pdf](https://schauer-lindner.de/download/schauer_fachkatalog2015-16.pdf) (Besucht am 27.09.2024)
- [B6] Wikipedia *Steifigkeit*  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Steifigkeit> (Besucht am 27.09.2024)

## Anhang A

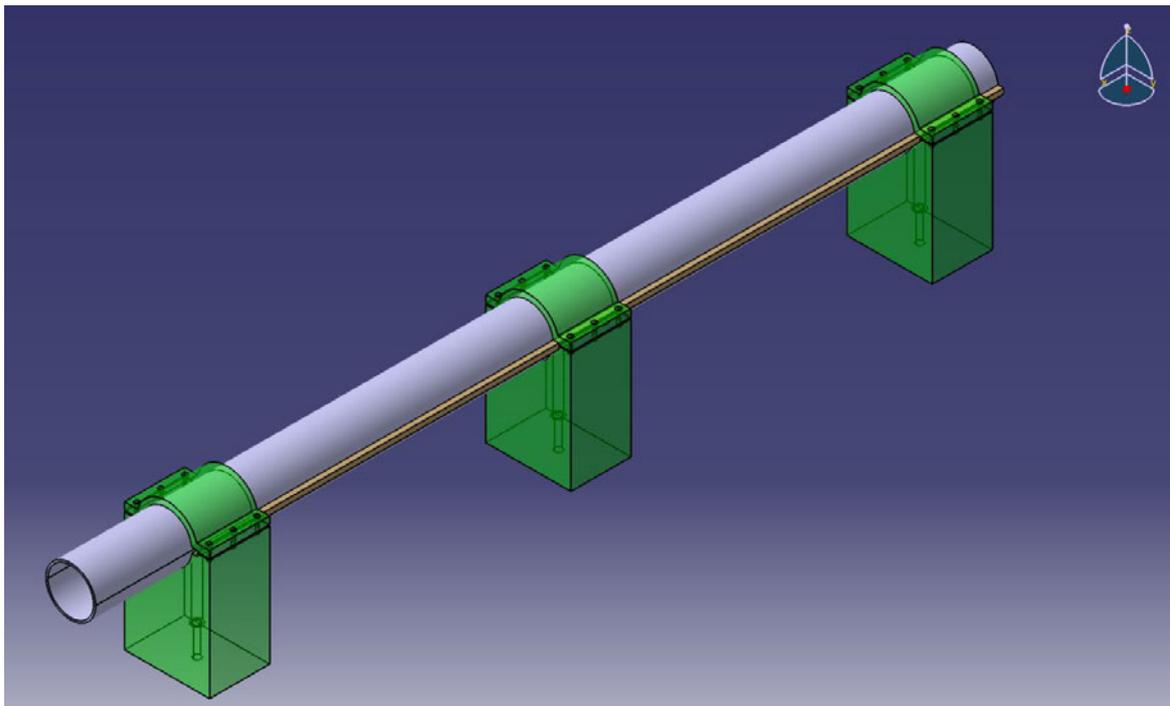
Tabelle 3: Übersicht der Steifigkeiten bei homogenen Querschnitten [20]

Steifigkeit	Visualisierung	Formel	Nr.
Dehnsteifigkeit	 <p>[B6]</p>	$S_{z,d} = EA$	(4)
Schubsteifigkeit	 <p>[B6]</p>	$S_s = GA$	(5)
Biegesteifigkeit	 <p>[B6]</p>	$S_b = EI$	(6)
Torsionssteifigkeit	 <p>[B6]</p>	$S_t = GI_T$	(7)

## Anhang B

### Zusammenbau der Fertigungsverfahren:

1. Standrohr waagrecht über die Halter [vgl. Abb. 34] auf einem Schweißstisch fixieren. Führungsschienen über die waagrecht Halter zum Standrohr ausrichten. Die Enden der Führungsschienen über einen Winkel des Schweißstisches gleich mit dem Beginn des Standrohres setzen und mit dem Standrohr verkleben.



**Abbildung 34:** Standrohr mit Führungsschienen in waagrecht Position.

2. Winkel für die Hauptspanträger vorne auf dem Standrohr positionieren und kleben. Die Positionierung erfolgt über die Winkel des Schweißstisches.
3. Vorderen Hauptspanträger am Winkel mit zwei M6 Schrauben und Muttern am Winkel befestigen.
4. Winkel für die Hauptspanträger hinten auf dem Standrohr positionieren und kleben. Die Positionierung erfolgt durch am Schweißstisch befestigte Winkel.
5. Hinteren Hauptspanträger am Winkel mit vier M6 Schrauben und Muttern am Winkel befestigen.

6. Winkel für die Positionierungsplatte der Hauptverbinder auf dem Standrohr positionieren und kleben [vgl. Abb. 35]. Die Positionierung erfolgt durch am Schweißtisch befestigte Winkel.

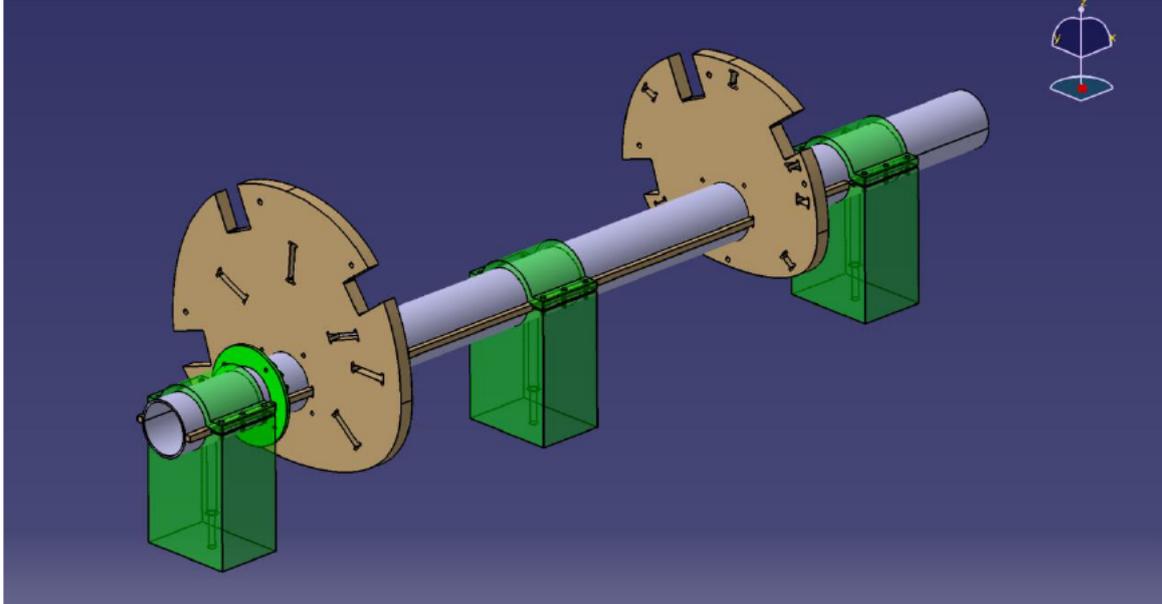


Abbildung 35: Standrohr in waagerechter Position mit Winkeln und Hauptspanträgern.

7. Stopperscheibe am unteren Ende der Führungsschienen positionieren und kleben. Das Standrohr kann zu diesem Zweck waagrecht verschoben werden, sodass die Stopperscheibe von der anderen Seite gegen einen der waagerechten Standrohrhalter stößt und während des Klebevorganges fixiert wird [vgl. Abb. 36].

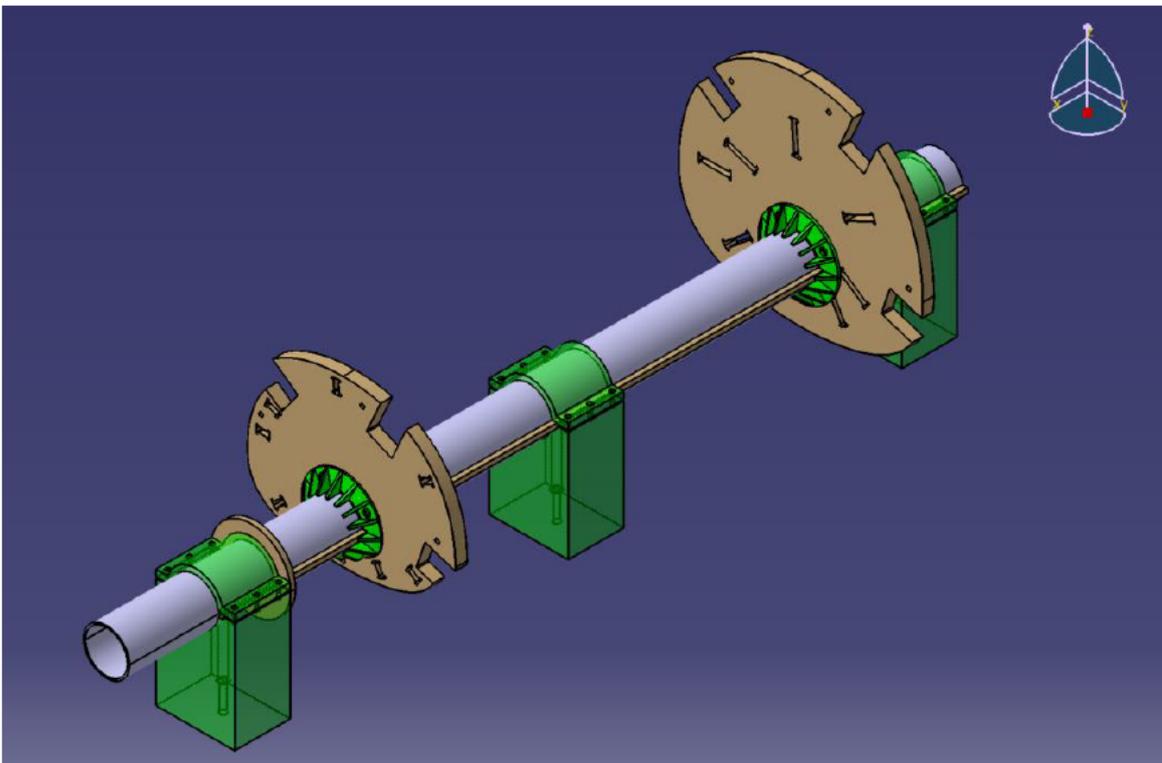
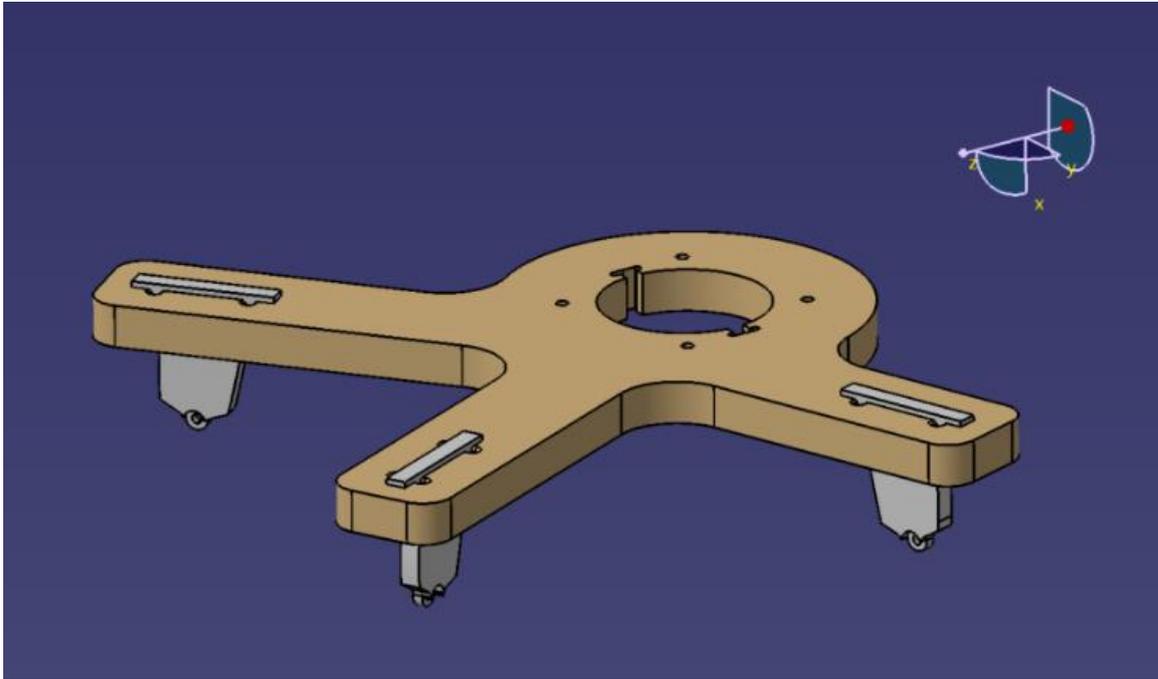


Abbildung 36: Fertigungsverfahren mit Stopperscheibe für den Spitzenverbinder

8. Standrohr aus der waagerechten Position in eine senkrechte Position bringen und Standrohrhalter befestigen.
9. Nachbildung der Hauptverbinder des Rumpfes in der Positionierungsplatte kleben [vgl. Abb. 37].

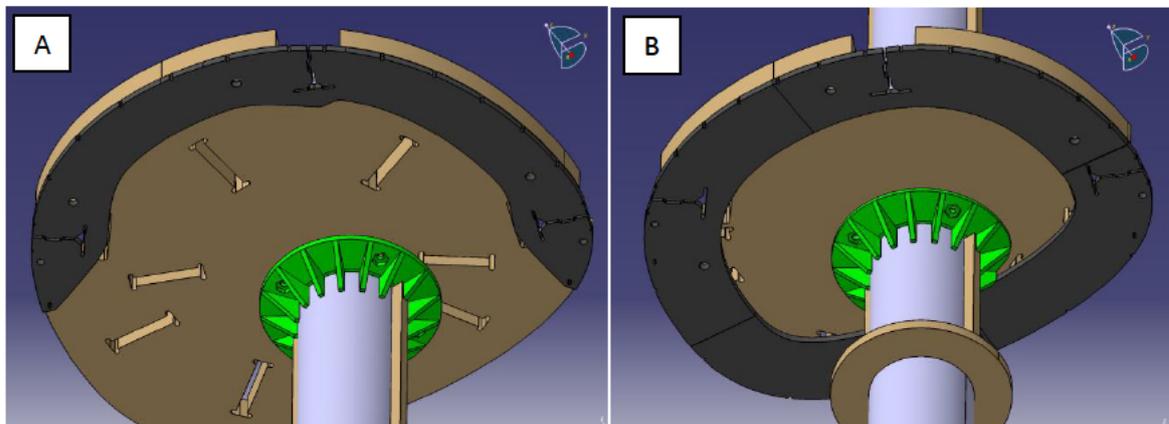


**Abbildung 37:** Positionierungsplatte mit Gegenstück der Hauptverbinder.

## Anhang C

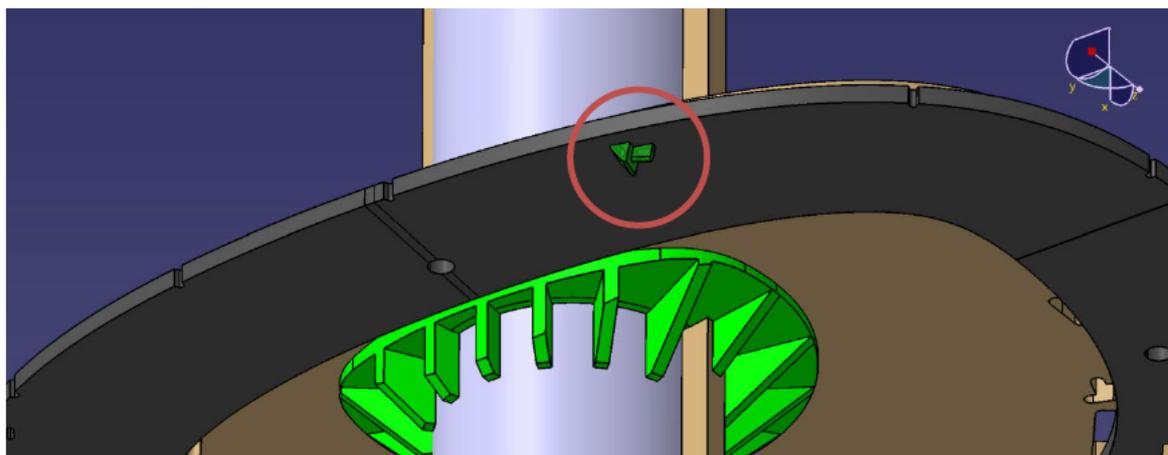
### Zusammenbau des Hauptteils der Nutzlastverkleidung:

1. Das „untere T-Stück“ der Hauptstringer separat fertigen.
2. Hauptverbinder, auf dem „unteren T-Stück“ der Hauptstringer positionieren und verkleben.
3. Fertigungsverfahren senkrecht im Standrohrhalter befestigen.
4. Vorderen und hinteren Hauptspanten über Bolzenschrauben am vorderen und hinteren Hauptspanträger fixieren [vgl. Abb. 38].



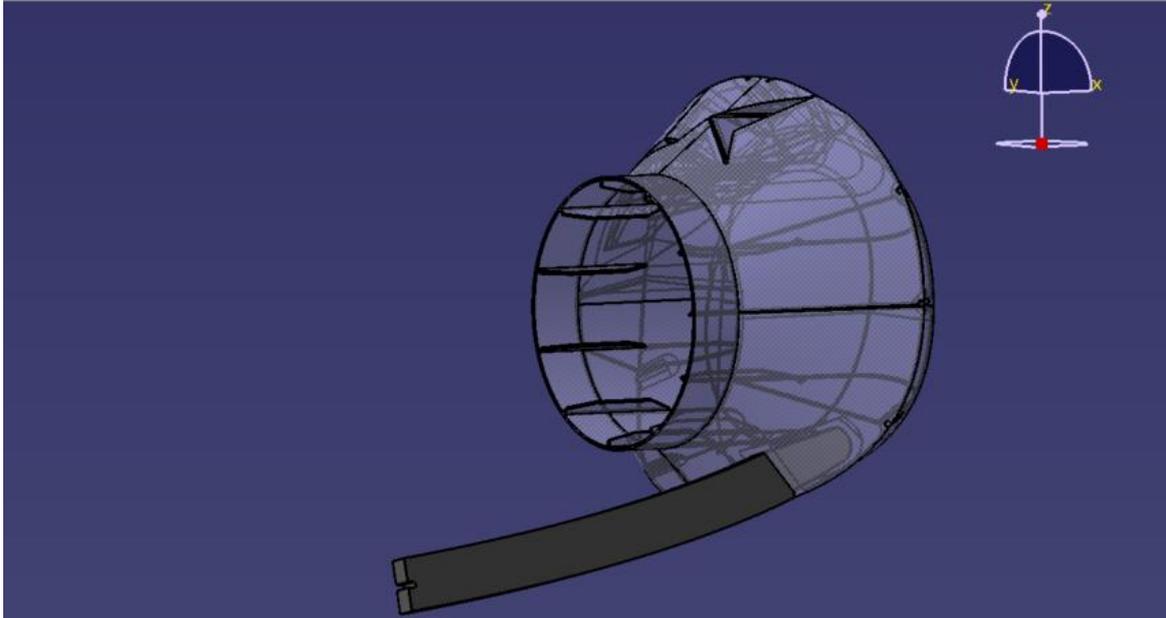
**Abbildung 38:** Bild A: Hinterer Hauptspant am entsprechenden Hauptspanträger; Bild B: Vorderer Hauptspant am entsprechenden Hauptspanträger.

5. Winkel für den vorderen Nebenstringer, der den Spitzenverbinder stützt, am vorderen Hauptspant positionieren [vgl. Abb. 39].



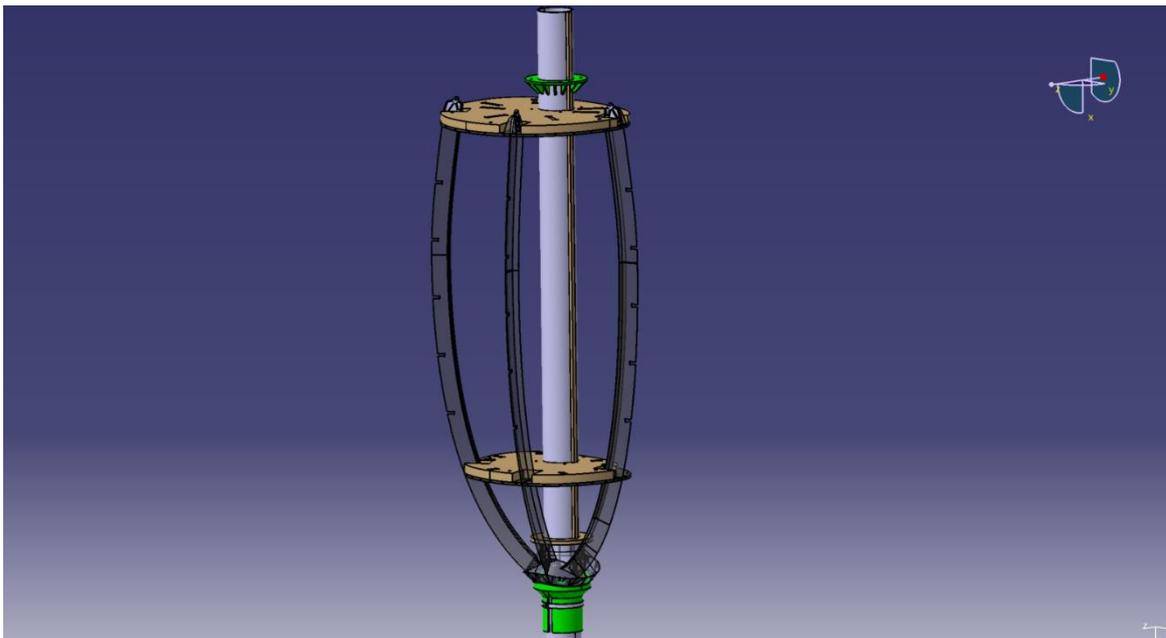
**Abbildung 39:** Rot eingekreist: Winkel für den Positionierungsspannt des Spitzenverbinders.

6. Vorderer Nebenstringer im Spitzenverbinder einkleben. Den Spitzenverbinder über das Standrohr ziehen, bis der vordere Nebenstringer auf seinen Winkel trifft. [vgl. Abb. 40].



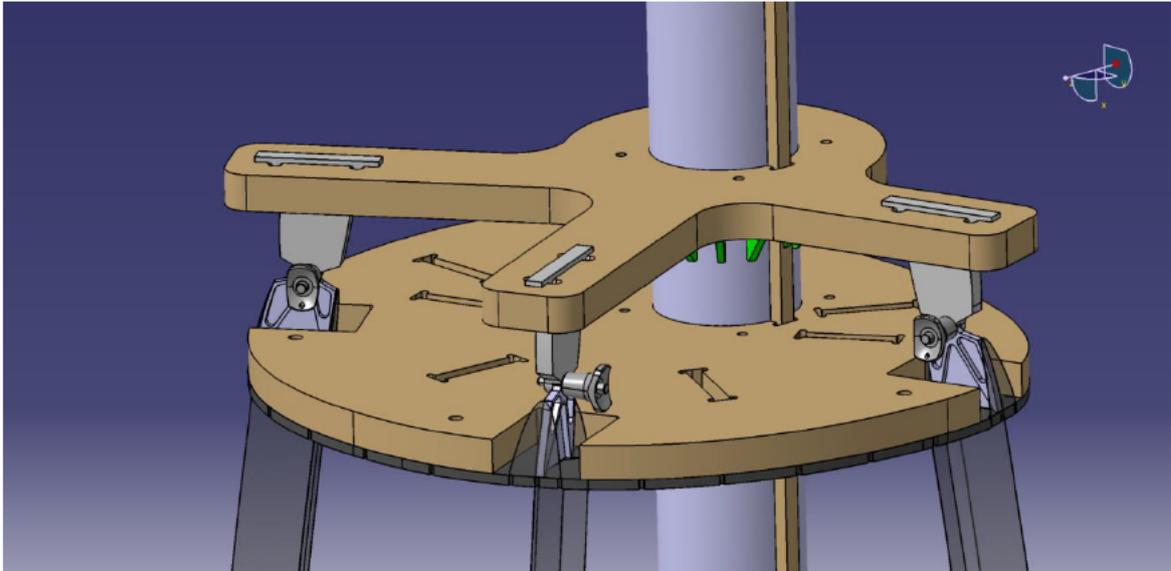
**Abbildung 40:** Spitzenverbinder mit Positionierungsspannt.

7. Die „untere T-Stücke“ der Hauptstringer von oben einfädeln. Zuerst durch die Ausschnitte im hinteren Hauptspant, danach durch die Ausschnitte im vorderen Hauptspant und abschließen in den Spitzenverbinder.
8. Spitzenhalter auf das Standrohr ziehen, bis er den Spitzenverbinder trifft und mit einer Schelle festspannen. Für diesen Schritt muss das Standrohr in einer waagerechten Position sein, damit das Standrohr von unten zugänglich ist [vgl. Abb. 41].



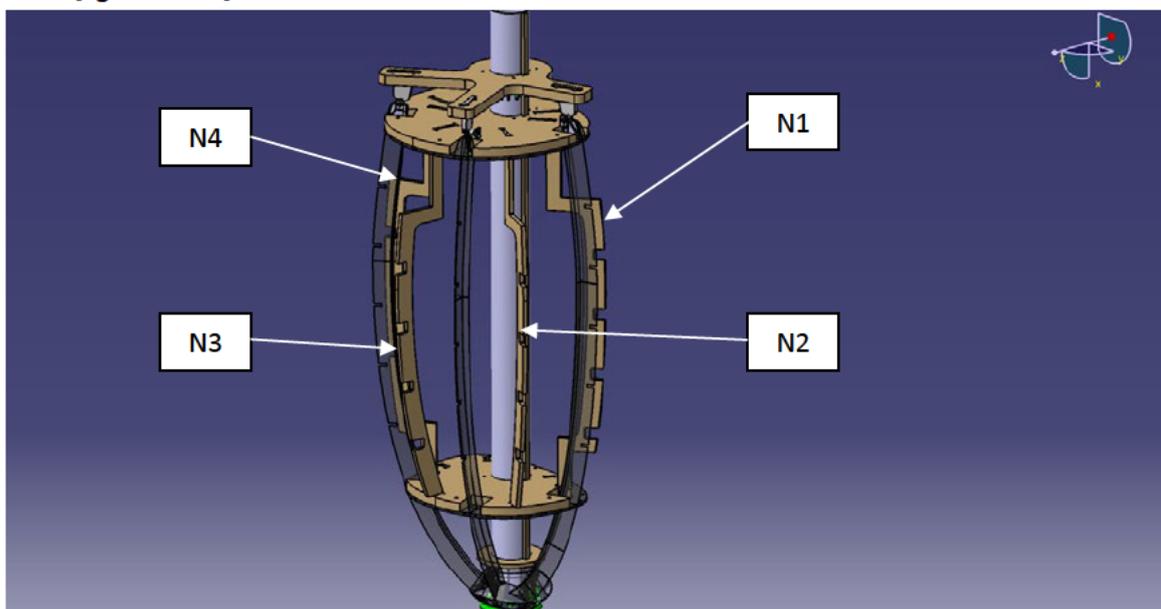
**Abbildung 41:** Die „unteren T-Stücke“ der Hauptstringer in den Hauptspanten und Spitzenverbinder.

9. Positionierungsplatte der Hauptverbinder am Winkel mit vier M6 Schrauben und Muttern am Winkel befestigen [vgl. Abb. 42].



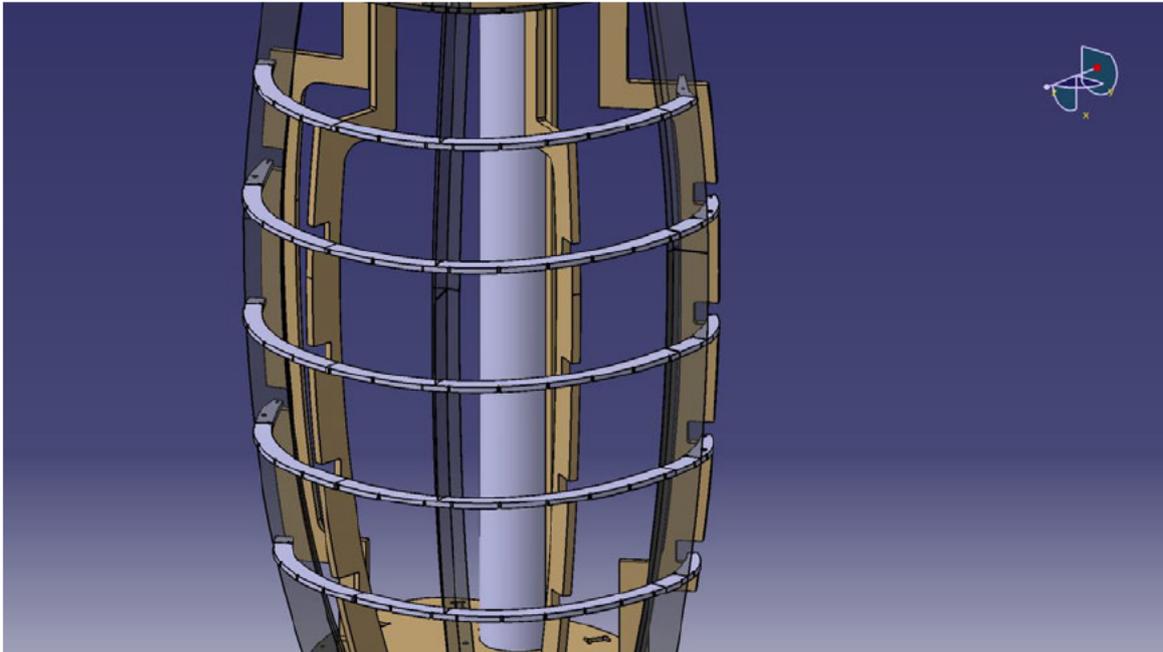
**Abbildung 42:** Positionierungsplatte über Kugelsperrbolzen mit den Hauptverbindern der NLV verbunden.

10. Mit den Kugelsperrbolzen die Hauptverbinder und dem Nachbau der Hauptverbinder des Rumpfes verbinden.
11. Das „untere T-Stücke“ der Hauptstringer mit den Hauptspanten und dem Spitzenverbinder verkleben.
10. Spanthalter für den Hauptteil der NLV, gemäß der Beschriftung einfädeln und mittels Keile sichern [vgl. Abb. 43].



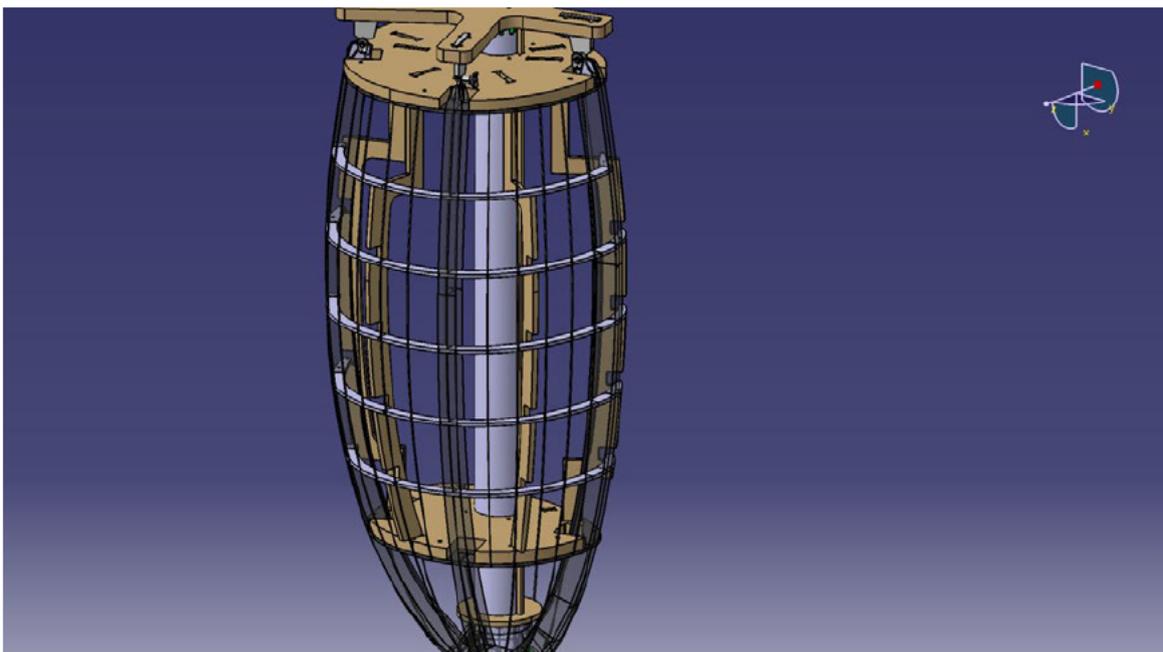
**Abbildung 43:** Spanthalter für den Hauptteil der NLV mit Bezeichnung in der Fertigungsvorrichtung.

12. Nebenspante in die Spanthalter legen und anhand ihrer Ausschnitte und den Ausschnitten in den Stegen der Hauptstringer positionieren.
13. Nebenspante mit den Stegen der Hauptstringer kleben [vgl. Abb. 44].



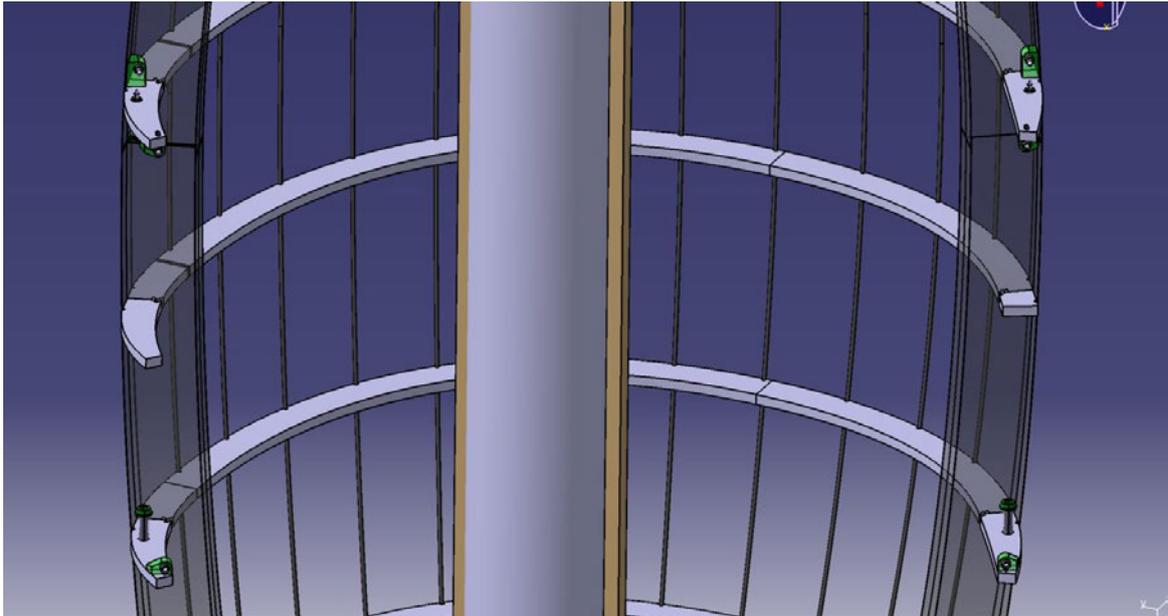
**Abbildung 44:** Nebenspante durch Ausschnitte in den Stegen der Hauptstringer und Spanthalter positioniert.

14. Obere Gurte der Hauptstringer an den Ausschnitten der Nebenspannten positionieren und kleben.
15. Nebenstringer an den Ausschnitten der Nebenspannten positionieren und kleben [vgl. Abb. 45].



**Abbildung 45:** Abschluss der Fertigung des Hauptteils der Nutzlastverkleidung.

16. Keile der Spanthalter lösen und Spanthalter durch den hinteren Hauptspanträger herausnehmen, um Platz für den Verbinder zur Sekundärklappe zu schaffen.
17. Bolzen des Verbindungsmechanismus in die 3D-gedruckten Halterungen kleben.
18. Als letzten Arbeitsschritt die Verbinder zur Sekundärklappe gemäß den Ausschnitten in den Spannten positionieren und kleben. [vgl. Abb. 46].



**Abbildung 46:** Verbinder an Haupt- und Nebenspannten passend ihren Ausschnitten hinzugefügt.

19. Für das Entfernen der NLV von der Fertigungsvorrichtung müssen die Spanträger entfernt worden sein. Die Fertigungsvorrichtung wird in eine waagrechte Position gebracht. Die waagerechten Halter müssen so gelegt werden, dass sie nicht die Spitzenhalter beim herunter ziehen vom Standrohr blockieren. Der Spitzenhalter und die Schrauben zwischen Hauptspant und Hauptspanträger werden entfernt. Im Anschluss kann die NLV über das Rohr geschoben werden, bis der Spitzenverbinder vom Standrohr getrennt wurde. Die NLV kann nun frei herausgenommen werden.

## Anhang D

### Zusammenbau der Sekundärklappe:

1. Spanthalter für die Sekundärklappe gemäß ihrer Beschriftung einstecken und mittels Keile sichern [vgl. Abb. 47].

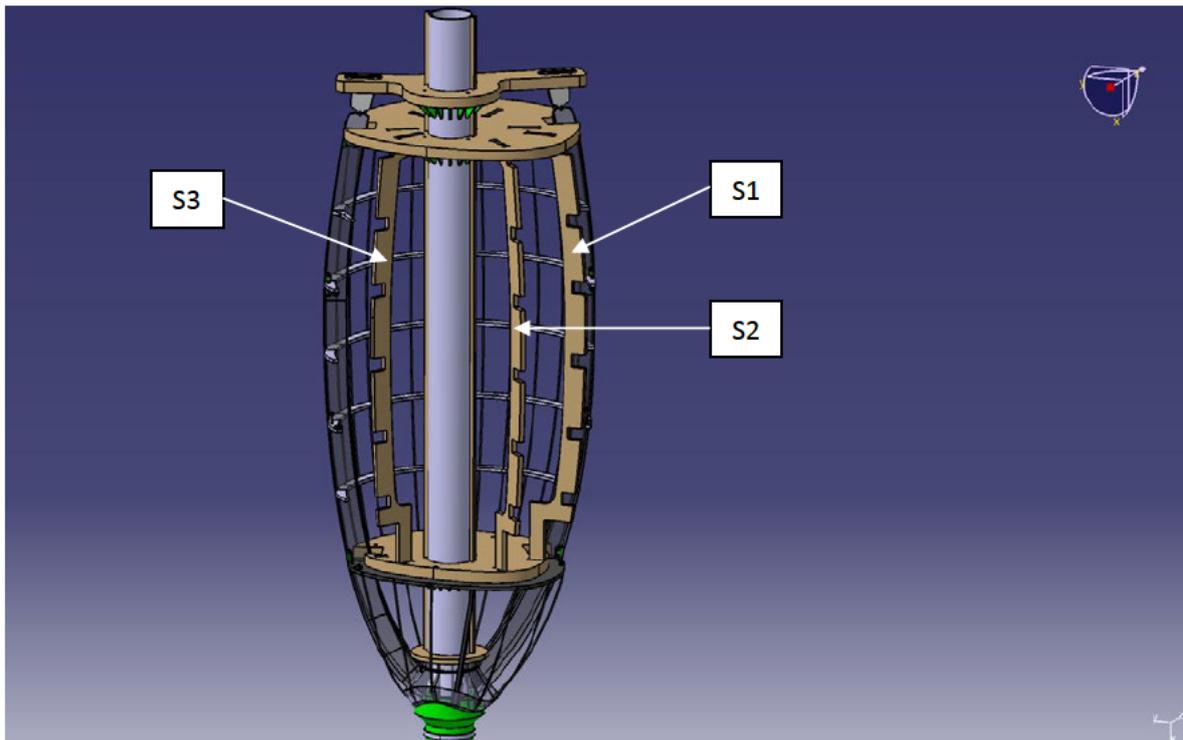


Abbildung 47: Spanthalter der Sekundärklappe mit Bezeichnung in der Fertigungsvorrichtung.

2. An den Spanten der Sekundärklappe die Verbinder für den Hauptteil der NLV gemäß den Ausschnitten positionieren und kleben [vgl. Abb. 48].

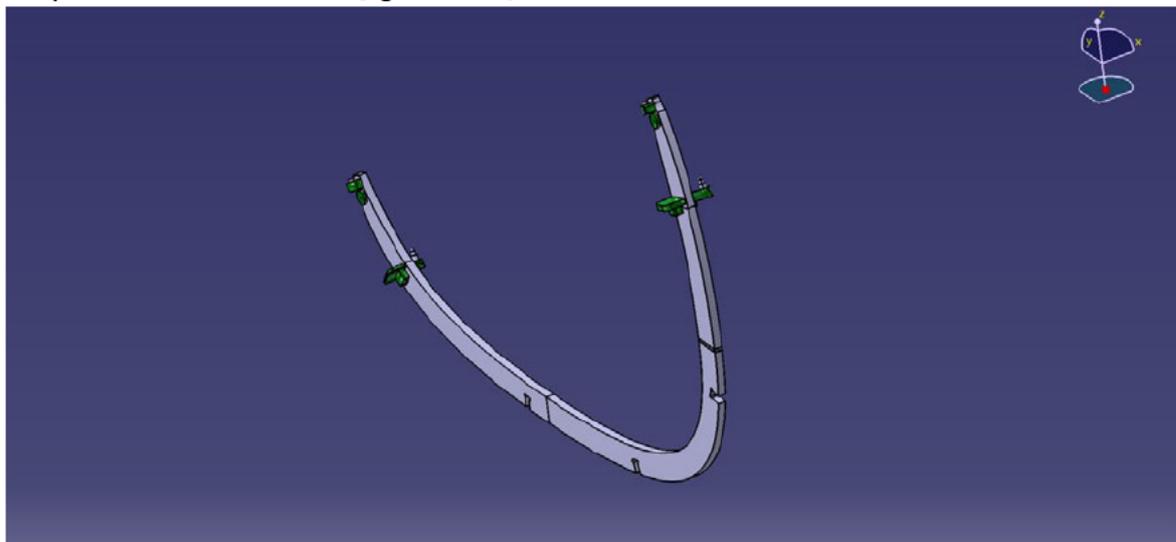
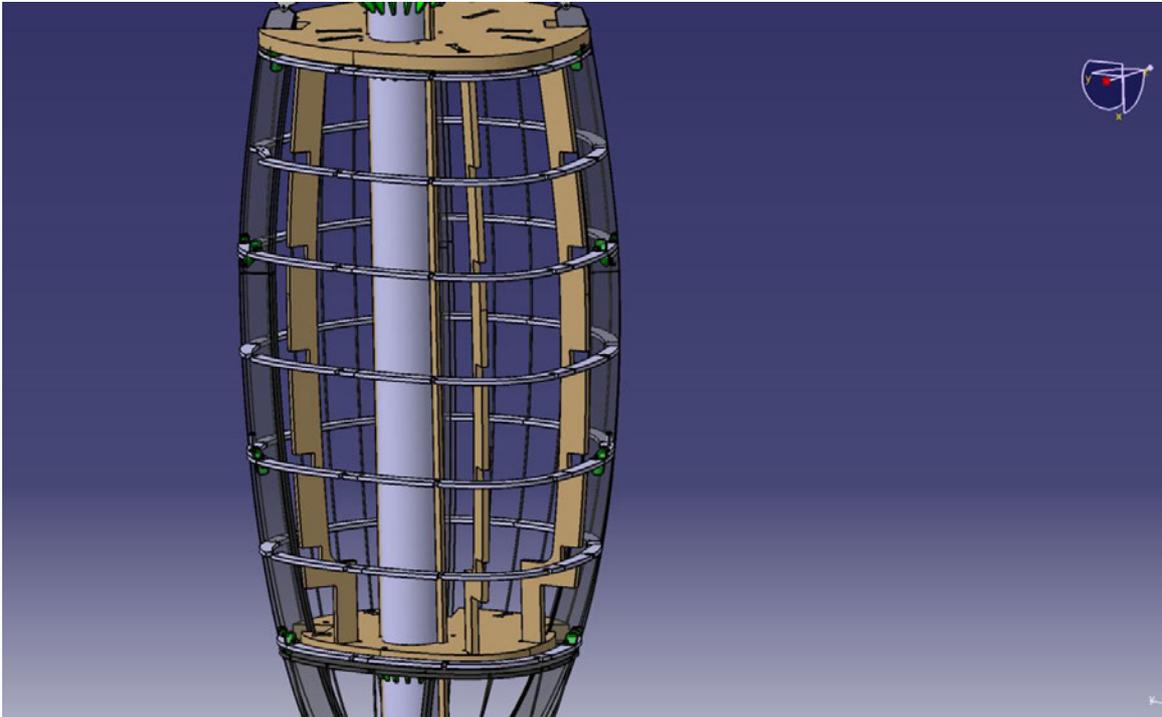


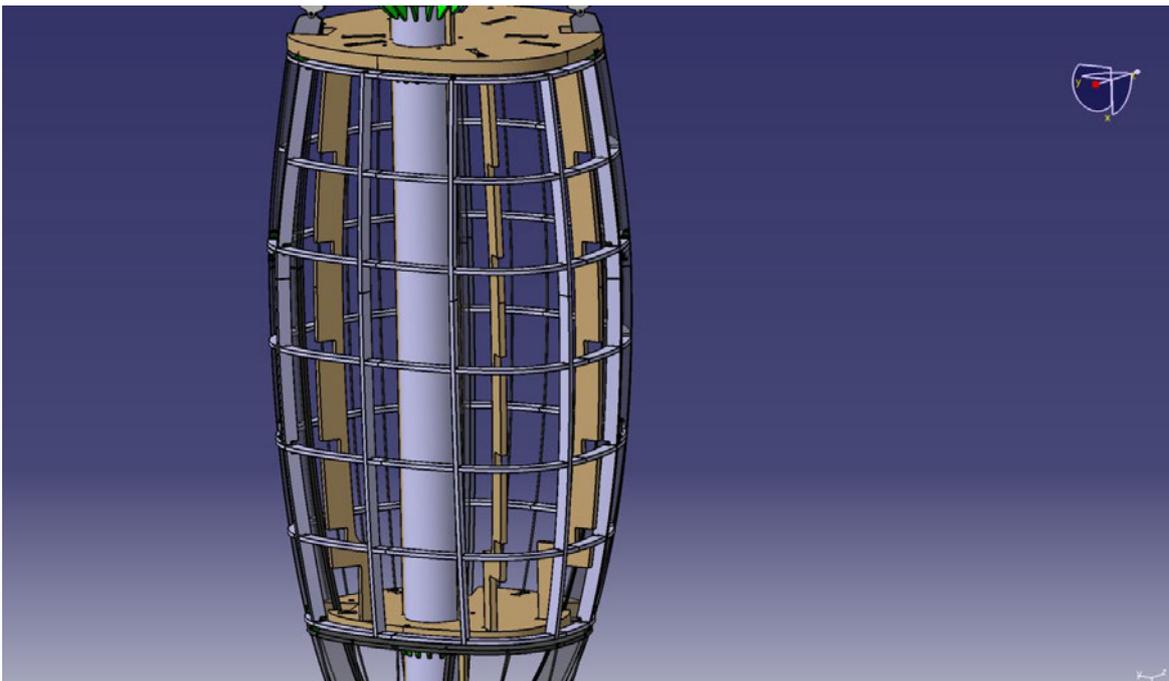
Abbildung 48: Beispiel eines Spantes mit angebrachtem Verbindungsmechanismus und Winkeln für die Randstringer.

- Über die Bolzen des Verbindungsmechanismus und die Spanthalter werden die Spante der Sekundärklappe positioniert. Den vorderen Spant mit den dafür vorgesehenen Abstandhaltern positionieren [vgl. Abb.49].



**Abbildung 49:** Positionierung der Spante anhand der Spanthalter und Verbinder zum Hauptteil der NLV.

- Im letzten Arbeitsschritt werden die Stringer und Randstringer der Sekundärklappe von außen anhand ihrer Ausschnitte und den Ausschnitten der Spanten positioniert und geklebt [vgl. Abb. 50].



**Abbildung 50:** Stringer an den Ausschnitten der Spant positioniert.

## Anhang E

**Tabelle 4:** Werkstoffkennwerte: F3 PA-CF Pro [25]

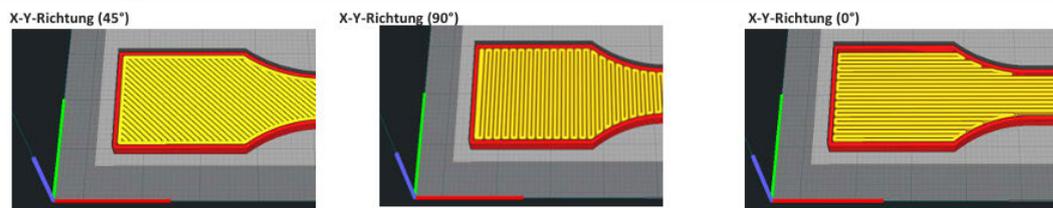
Mechanische Eigenschaften	Testmethode	Einheit	Werte	Güteklasse nach VDI3405 Blatt 7
Dichte	DIN EN ISO 1183	g/ cm <sup>3</sup>	1,25	
Zug E_Modul Druckprobe x-y (0°) ***	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A *	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	10500	10
Zug E_Modul Druckprobe x-y (90°) ***	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A *	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	4700	7
Zugfestigkeit Druckprobe x-y (0°) ***	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A *	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	110	10
Zugfestigkeit Druckprobe x-y (+ 45°/-45°) ***	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A *	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	85	8
Zugfestigkeit Druckprobe x-y (90°) ***	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A *	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	70	7
Bruchspannung Druckprobe x-y (0°)	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A*	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	112,73	
Bruchdehnung Druckprobe x-y (0°)	DIN EN ISO 527-2 Typ 1A*	%	0,98	0
Biegemodul E <sub>r</sub> Druckprobe x-y (+ 45°/-45°)	DIN EN ISO 14125 (Method B)**	GPa (kN/mm <sup>2</sup> )	4,78	
Schlagzähigkeit Druckprobe	DIN EN ISO 179eU	kJ/m <sup>2</sup>	47	
Kerbschlagzähigkeit	DIN EN ISO 179eB	kJ/m <sup>2</sup>	5,46	

\* Probenkörper gedruckt: E3D V6; 1,75mm Filament; Nozzle 0,4mm; Temp Nozzle 275°C Pro/ 285°C Lite ; Temp Druckbett 90°C; Layer 0,2mm; v=50 mm/s; Orientierung Layer in °/ konditioniert 24h bei 50% rel. LF

\*\* Gedruckt: E3D Volcano; Nozzle 0,6mm; Temp Nozzle 255°C ungefüllt/ 260°C Faser; Temp Druckbett 75°C; Layer 0,3mm; v=45 mm/s; Orientierung Layer in °/ konditioniert 24h bei 50% rel. LF

\*\*\* Zielwerte für beste Druckqualität. Diese können je nach System Nozzle - Drucker - Gcode bei gleichen Settings stark variieren.

### Zugprobenorientierung



Thermische Eigenschaften	Testmethode	Einheit	Werte	Bemerkung
Glasübergangstemperatur	DIN ISO 11357	°C	68	
Wärmeformbeständigkeit (HDT A@1,8 MPa)	DIN ISO 75	°C	120 °C	
Elektrische Eigenschaften	Testmethode	Einheit	Werte	Bemerkung
spezifischer Durchgangswiderstand	IEC 60167	Ohm*m	>10 <sup>10</sup>	
spezifischer Oberflächenwiderstand	IEC 60093	Ohm	>10 <sup>10</sup>	
sonstige Eigenschaften	Methode	Einheit	Werte	Bemerkung
Wasserabsorption (nach 24h)	DIN ISO 62	%	0,3	
Verarbeitungsempfehlung	Methode	Einheit	Werte	Bemerkung
Düsentemperatur	Fiberthree GmbH	°C	260 - 285	
Heizbett	Fiberthree GmbH	°C	Max. 80	
Düsendurchmesser	Fiberthree GmbH	mm	> 0,25	
Kühlung	Fiberthree GmbH	%	nicht empfohlen	
Schichthöhe	Fiberthree GmbH	mm	ab 0,10	
Empfohlenen Wandstärke zur Reduzierung von Einfluß durch Feuchte-Aufnahme:	Fiberthree GmbH	mm	4	
Geschwindigkeit	Fiberthree GmbH	mm/s	50	
Füllung	Fiberthree GmbH	%	0 - 100	
Retraction (direct drive/ Bowden System)	Fiberthree GmbH	mm (@ 50mm/sec)	Direct drive min. 2mm / Bowden System min. 6mm	

**Tabelle 5:** Werkstoffkennwerte: Multiplexplatten aus Birke [26]

		Characteristics														
Performance characteristics	EN	Unit	Value or class													
Nominal thickness		mm	4	6,5	9	12	15	18	21	24	27	30	35	40	45	50
Density	EN 323	Kg/m <sup>3</sup>	lower 5% quantile 670 upper 5% quantile 760													
Bending strength <sup>1</sup> face grain parallel to span perpendicular to face grain	EN 310	F class														
		acc.	50	50	40	40	40	40	35	35	35	35	35	35	35	35
		EN 636	15	25	35	35	35	35	30	30	30	30	30	30	30	30
Bending stiffness <sup>1</sup> face grain parallel to span perpendicular to face grain	EN 310	E class														
		acc.	100	90	90	80	80	80	80	80	80	80	70	70	70	70
		EN 636	10	30	40	50	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Characteristic bending strength <sup>2</sup> face grain parallel to span perpendicular to face grain	EN 789	N/mm <sup>2</sup>														
			75,3	58,2	52,1	49,0	47,2	45,9	45,1	44,4	43,9	43,5	42,9	42,5	42,3	42,0
			12,1	33,2	36,7	38,0	38,6	38,9	39,2	39,3	39,4	39,5	39,6	39,7	39,7	39,8
Characteristic bending stiffness <sup>2</sup> face grain parallel to span perpendicular to face grain	EN 789	N/mm <sup>2</sup>														
			16941	13101	11720	11026	10611	10335	10140	9994	9881	9791	9657	9562	9507	9461
			1059	4899	6280	6974	7389	7665	7860	8006	8119	8209	8343	8438	8493	8539

**Tabelle 6:** Werkstoffkennwerte: Stahl Rundrohr nach Norm: EN 10219 / EN 10220

<b>Material:</b>	Stahl
<b>Form:</b>	Rundrohr
<b>Werkstoff:</b>	S235JRH
<b>Werkstoffnummer:</b>	1.0039
<b>Herstellungsverfahren:</b>	geschweißt
<b>Außendurchmesser:</b>	82,5 x 3,2 mm
<b>Länge:</b>	2000 mm
<b>Gewicht:</b>	12,52 kg
<b>Längentoleranz:</b>	+/- 3 mm