

**Projektzusammenfassung vom
05.07.2021 – 16.07.2021**

**Entwicklung und Konstruktion
eines Kühlkreislaufes und einer
PWK Testvorrichtung für Finnen
des DLR-Moduls auf der
Hyperschallflugmission
HIFLIER1**

Yan Schmidt



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Inhaltsverzeichnis

1. Überblick

2. Kühlkreislauf des Moduls

2.1. Schott

2.2. Gasreservoir

2.3. Verbindung von Gasreservoir und Rohren

2.4. Halterungen

2.4.1. Technische Zeichnungen der Halterungen

2.5. Massendurchflussregler

2.6. Zusammensetzung des Moduls und Masseschwerpunkt

3. Test der Finnen im PWK

3.1. PWK (Plasmawindkanal)

3.2. Finnen

3.3. Finnschuh

3.4. Keiloberseite

3.4.1. Keilunterseite

3.5. Zusammensetzung der Testvorrichtung

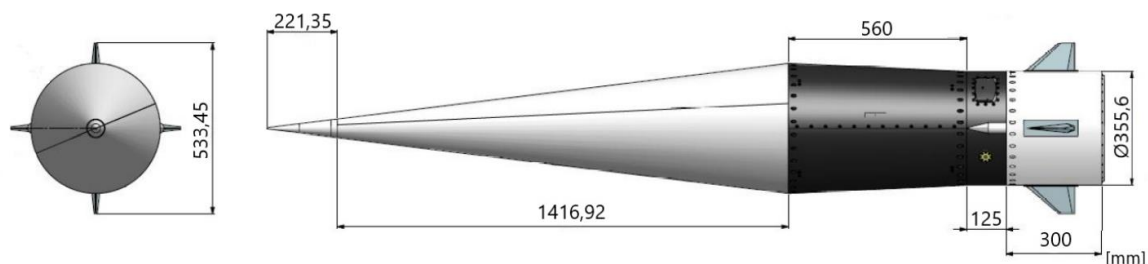
4. Zusammenfassung und Ausblick

Projektzusammenfassung - HIFLIER

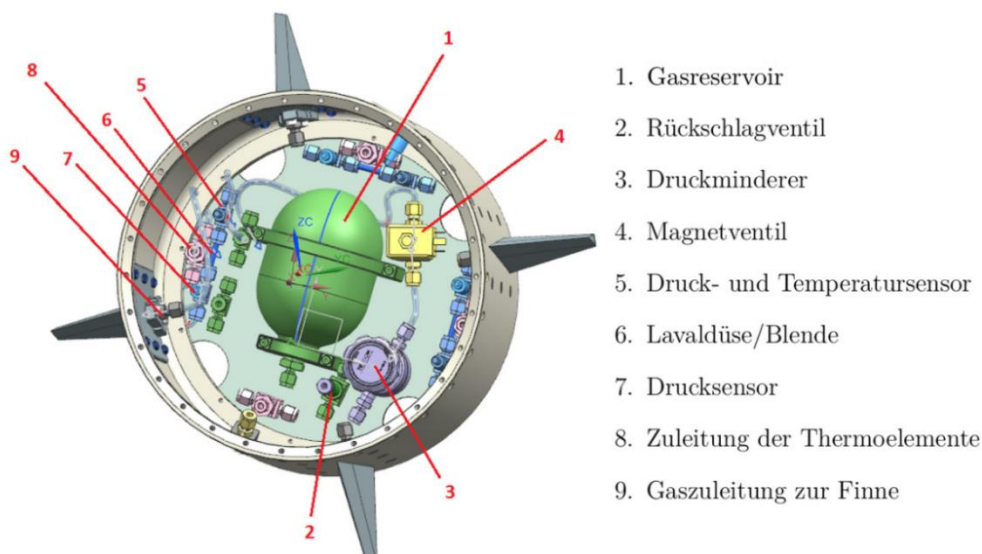
1. Überblick:

Das DLR arbeitet zurzeit an der amerikanischen HIFLIER-Mission der NASA mit, dem Nachfolger der HIFiRE-Missionen. Hierbei handelt es sich um ein Hyperschallflugexperiment, bei dem eine Höhenforschungsrakete, ausgestattet mit den verschiedensten Modulen, mit Überschallgeschwindigkeit in- und außerhalb der Atmosphäre (auf bis zu 250km Höhe) fliegt und dabei Messungen und Experimente ausführt. Sowohl bei der schon abgeschlossenen HIFiRE5b-Mission der NASA als auch bei der anstehenden HIFLIER-Mission wurde das DLR eingeladen ein eigenes Experimentiermodul in die Rakete zu integrieren, welches die Eigenschaften von Finnen an der Außenseite der Rakete unter den extremen Flugbedingungen untersucht. Besonders an der HIFLIER-Mission ist, dass 3 der 4 Finnen mit einem Gas gekühlt werden, während die 4. Finne als Referenz ungekühlt gelassen wird. Dabei wird der Einfluss der Kühlung genau beobachtet und es wird sich erhofft daraus etwas für zukünftige Flugsituationen zu lernen. Für die besagte Kühlung wird ein sehr komplexer Kühlkreislauf benötigt.

HIFLIER Flugkörper¹:



Gesamtüberblick des Moduls mit Fokus auf dem Kühlkreislauf²:



¹ Bericht Joelle Schäfer, S.2 (Dokumentseite 13)

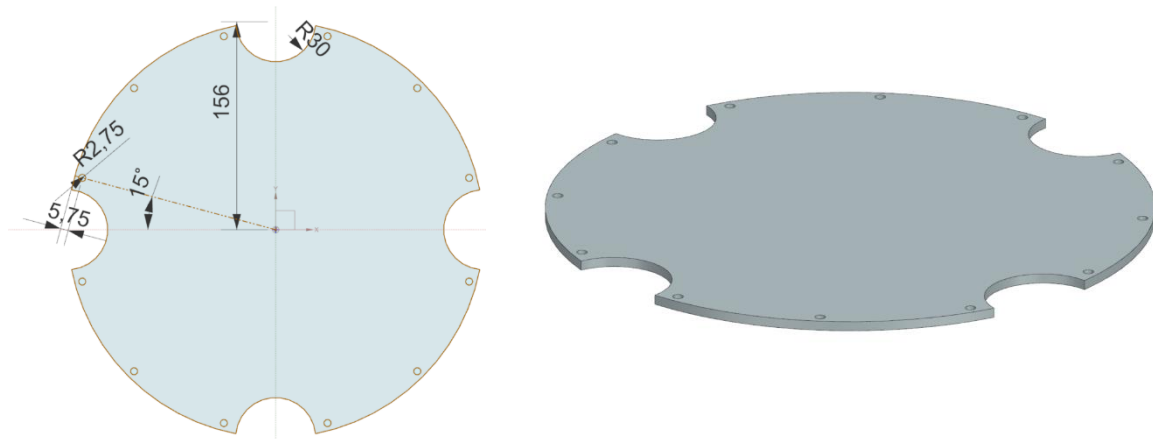
² Bericht Joelle Schäfer, S.24 (Dokumentseite 35)

2. Kühlkreislauf des Moduls:

2.1. Schott:

Für das Modul soll ein Schott (eine Bodenplatte) konstruiert werden. Dieses muss aus 5mm starkem Alublech bestehen und einen Außenradius von 156mm, 4 runde Einsparungen für Kabel und 12 Durchgangsbohrungen für Schrauben der Größe M5 (5,5mm Durchmesser) besitzen.

Skizze und CAD des Schotts³:



In einem späteren Schritt wird das Schott noch an 4 Stellen mit M4 Durchgangsbohrungen (4,5mm Durchmesser) angebohrt, um an den Halterungen (siehe Kapitel 2.4.) befestigt zu werden. Anschließend wird noch eine technische Zeichnung für die Fertigung⁴ erstellt.

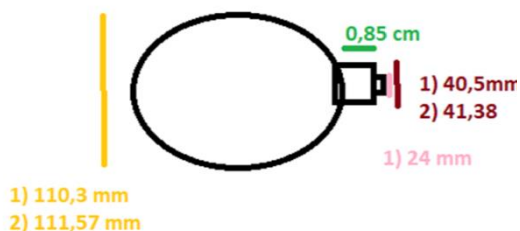
2.2. Gasreservoir:

Als Gasreservoir wird eine Armotech HP Flasche⁵ verwendet, welche 0,8 Liter und 300 bar fasst. Eine Mitarbeiterin hat bereits eine Planskizze mit Maßen angefertigt, doch die Flasche muss noch im CAD konstruiert werden.

Planskizze:

Foto:

CAD⁶:



³ Datei Nr.1

⁴ Datei Nr.2

⁵ <https://www.paintballsports.de/armotech-0-8-liter-300-bar-hp-flasche-nur-650-gramm/>

⁶ Datei Nr.3

Die Flasche wiegt leer 650 Gramm, doch vor dem Start der Rakete wird sie mit Stickstoff befüllt. Ihr ganzes Volumen von 0,8 Liter soll genutzt werden und der Druck soll auf 240bar gebracht werden. Für spätere Schritte (siehe Kapitel 2.6.) ist es notwendig die Masse der Füllung zu berechnen.

Hierfür werden die folgenden Formeln benötigt:

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T$$

" p " ist der Druck in Pascal [Pa]

" V " ist das Volumen in Kubikmeter [m^3]

" m " ist die Masse des Gases in Kilogramm [kg]

" R_s " ist die spezifische Gaskonstante in Joule pro Kelvin mal Kilogramm [$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$]

" T " ist die Temperatur in Kelvin [K]

Masse des Kühlgases:

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T \quad | : (R_s \cdot T)$$
$$\Leftrightarrow m = \frac{p \cdot V}{R_s \cdot T} \approx 0,221 \text{ kg} \approx \boxed{221 \text{ g}}$$

$$\text{mit } p = 240 \text{ bar} = 24\,000\,000 \text{ Pa ;}$$

$$V = 0,8 \text{ l} = 0,0008 \text{ m}^3$$

$$R_{s\text{N}_2} = 296,8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$T = 293 \text{ K}$$

Die Füllung wiegt also 221 Gramm, woraus sich eine Gesamtmasse des Gasreservoirs von 871 Gramm ergibt.

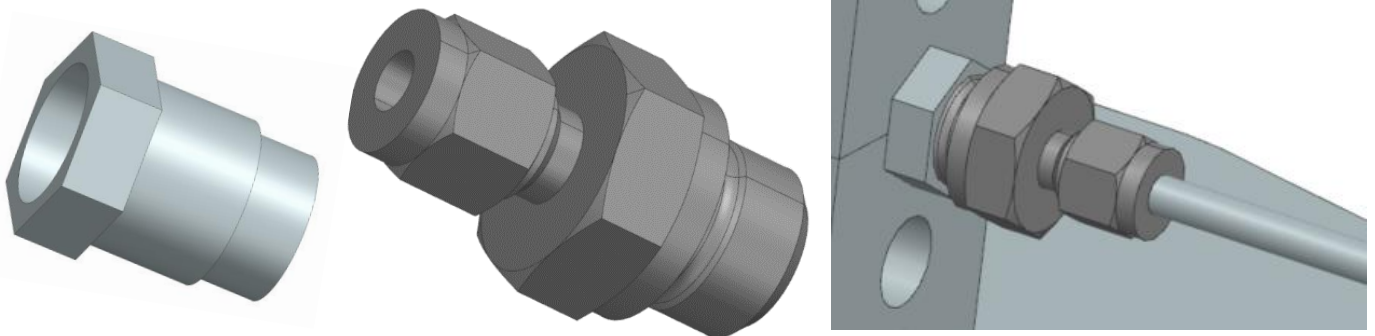
2.3. Verbindung von Gasreservoir und Rohren:

Die Gasflasche muss mit einem kappbaren Ventil an die Rohrleitung des Kühlsystems angeschlossen werden. Die Flasche ist mit einem 5/8“ UNF Innengewinde mit der Gangzahl 18 (18 Gänge pro Zoll) ausgestattet und die Rohre haben eine Dicke von 6mm. Da das 5/8“ – 18 UNF Innengewinde ein nicht sehr weit verbreitetes Gewinde ist, ist ein Zwischenschritt notwendig. Es wird also ein Reduzierstück mit einem 5/8“ – 18 UNF Außengewinde und einem G 3/8“ Innengewinde benötigt, an welches dann wiederum eine Einschraubverschraubung mit einem zylindrischen ISO 3/8“ Außengewinde und einer 6mm Rohrverschraubung angebaut wird. Beide Teile sind einem sehr hohen Druck von 300 bar ausgesetzt und können durch die hohe Geschwindigkeit der Rakete stärkeren Krafteinwirkungen ausgesetzt werden, weshalb sie sehr stabil gebaut sein müssen und als Material nur Stahl oder Messing und beispielsweise kein Aluminium infrage kommt. Die gewählte Einschraubverschraubung ist von Swagelok⁷ und hat bereits ein CAD-Modell, während das ausgesuchte Reduzierstück von Gase Dopp⁸ noch im CAD nachgebaut werden muss.

Reduzierung⁹:
(Für Abschliff siehe)
Kapitel 2.4.)

Einschraubverschraubung¹⁰:

Vollständige Verbindung:



Die verschiedenen Gewindetypen und Normen lassen sich sehr gut auf der ersten Seite der Tabellensammlung¹¹ von landefeld heraussuchen.

⁷ <https://products.swagelok.com/de/c/gerade-ausf%c3%bchrungen/p/SS-6M0-1-6RP?q=einschraubverschraubung:relevance:connection1Size:6+mm>

⁸ <https://shop.gase-dopp.de/Reduzierung-5-8-18-UNF-AG-x-G-3-8-IG-Messing>

⁹ Datei Nr.4

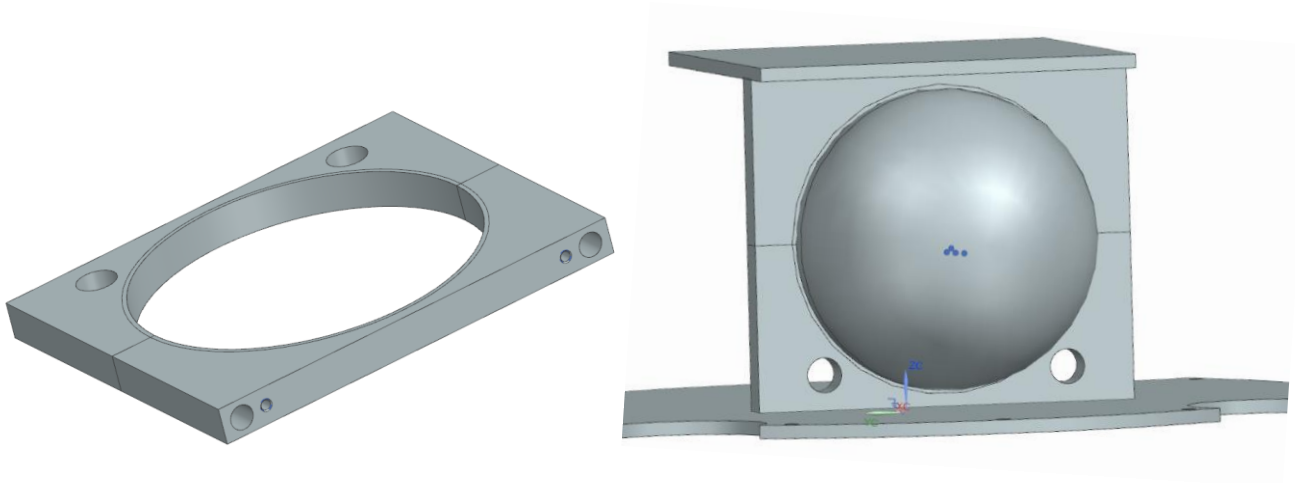
¹⁰ Datei Nr.5

¹¹ <https://www.landefeld.de/shop/media/webdownload/Tabellensammlung.pdf>

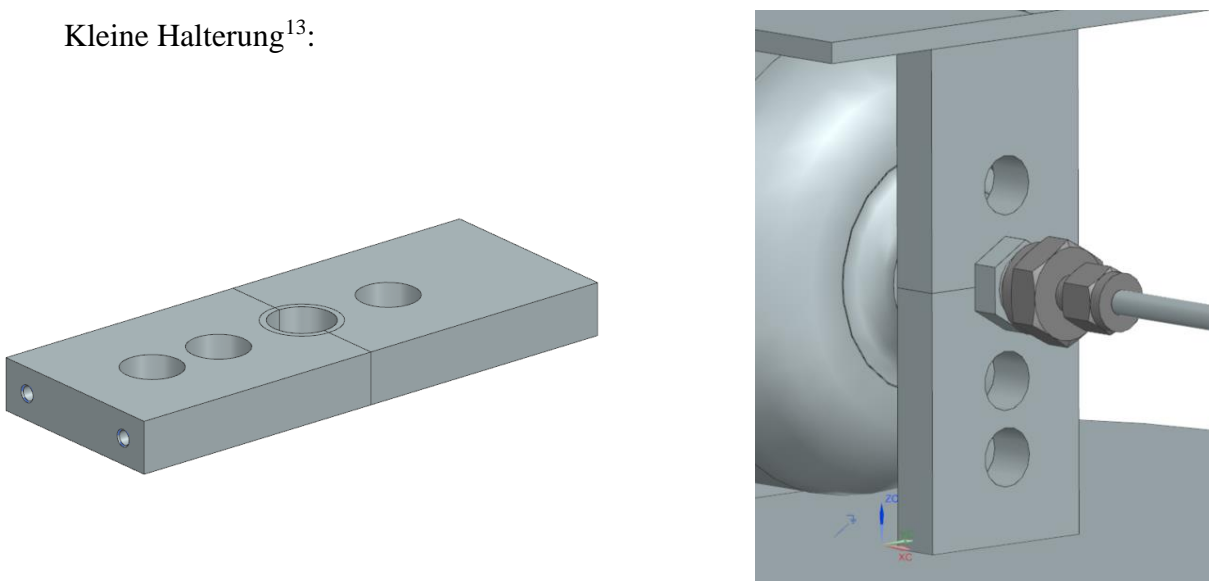
2.4. Halterungen:

Die Gasflasche muss an dem Schott befestigt werden und gleichzeitig soll über ihr eine Basis für eine weitere Plattform entstehen (siehe Kapitel 2.5.). Die Halterungen werden aus Aluminium gefertigt und mit Gummi ausgekleidet. Sie werden von unten durch das Schott, von oben durch die obere Plattform und am Übergang der beiden Hälften jeweils mit M4 Schrauben befestigt. Am zylindrischen Teil der Flasche wird eine große Halterung angebracht, während am Reduzierstück der Verbindung 12mm des Sechskants des Teils mit einem Durchmesser von 18,8mm zu einem Zylinder mit einem Durchmesser von 18mm geschliffen wird. Hier kann nun anschließend eine weitere kleinere Halterung nach demselben System angebracht werden, damit sich die Gasflasche auch bei größeren Krafteinwirkungen in keine Richtung bewegen kann. Da, die Halterungen etwas schwer sind und bei einer Rakete jedes Kilogramm sehr viel Geld kostet, kann durch große Bohrungen, noch ein Teil der Masse reduziert werden.

Große Halterung¹²:



Kleine Halterung¹³:



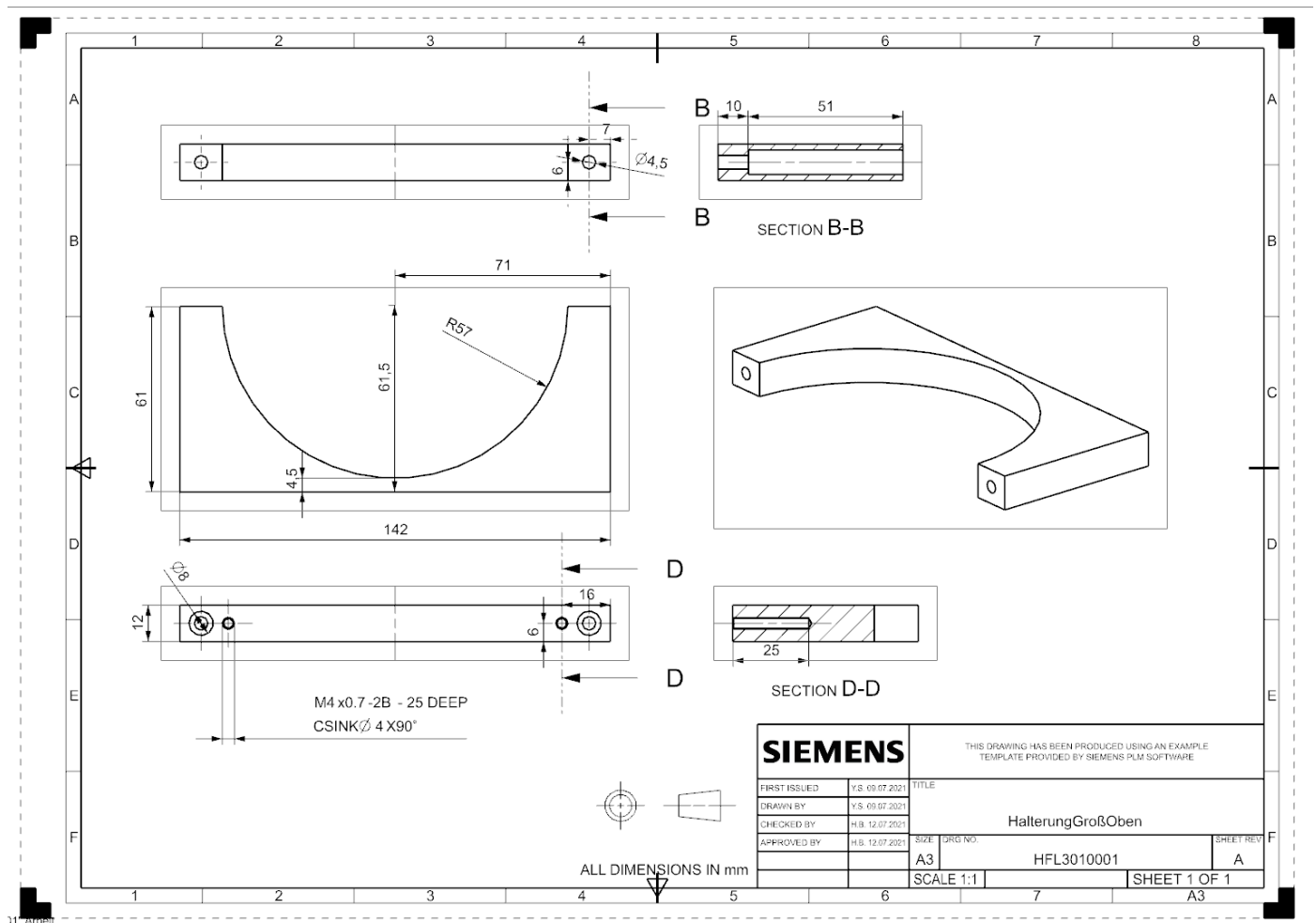
¹² Datei Nr.6

¹³ Datei Nr.7

2.4.1. Technische Zeichnungen der Halterungen:

Um die Pläne der Halterungen der Fertigungsabteilung des DLR zukommen zu lassen, müssen mithilfe von NX technische Zeichnungen¹⁴ angefertigt werden. Hiervon werden insgesamt 4 Stück benötigt, nämlich von jeder Halterung jeweils eine Zeichnung der oberen Hälfte und eine der unteren Hälfte.

Technische Zeichnung der oberen Hälfte der großen Halterung:



¹⁴ Dateien Nr.8-11

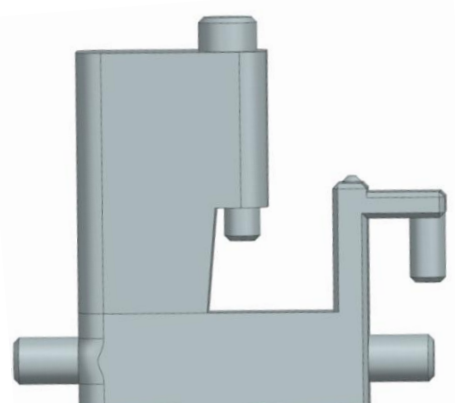
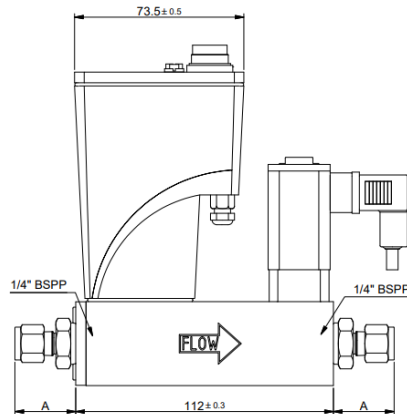
2.5. Massendurchflussregler:

Auf der Plattform über der Gasflasche muss ein Massendurchflussregler der Firma Bronkhorst¹⁵ befestigt und angeschlossen werden. Auf der Webseite steht eine technische Zeichnung¹⁶ zur Verfügung, mit welcher der Regler im CAD nachgebaut werden kann.

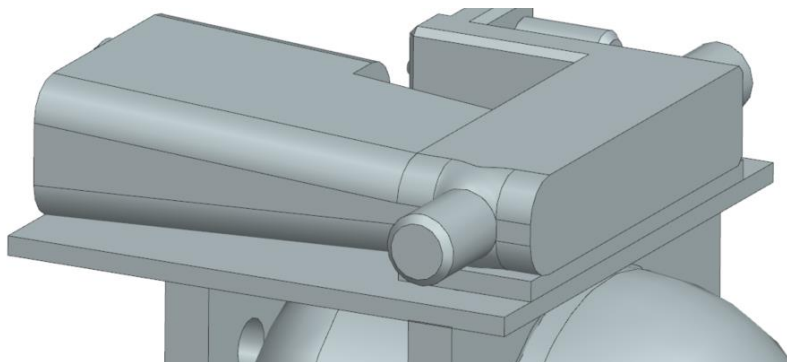
Foto:

Technische Zeichnung:

CAD¹⁷:



Der Regler wird auf einer 137x142x5mm Aluplatte¹⁸, über den Halterungen der Gasflasche, mithilfe von M4 Schrauben, angebracht und davon wird eine technische Zeichnung für die Fertigung erstellt¹⁹. Da, der Massendurchflussregler auf einer Seite etwas breiter als auf der anderen Seite ist, wird noch eine weitere Abstandhalterplatte²⁰ benötigt, um eine gerade Auflagefläche zu ermöglichen. Eine Verbindung und Befestigung der beiden Platten und des Reglers muss noch entworfen werden.



¹⁵ <https://www.bronkhorst.com/int/products/gas-flow/in-flow/f-201ai/>

¹⁶ <https://www.bronkhorst.com/getmedia/23c4d782-7ab1-4c70-afe7-4901f50c047a/715027-dimensional-drawing-f-201ai-f-211ai-nc.pdf>

¹⁷ Datei Nr.12

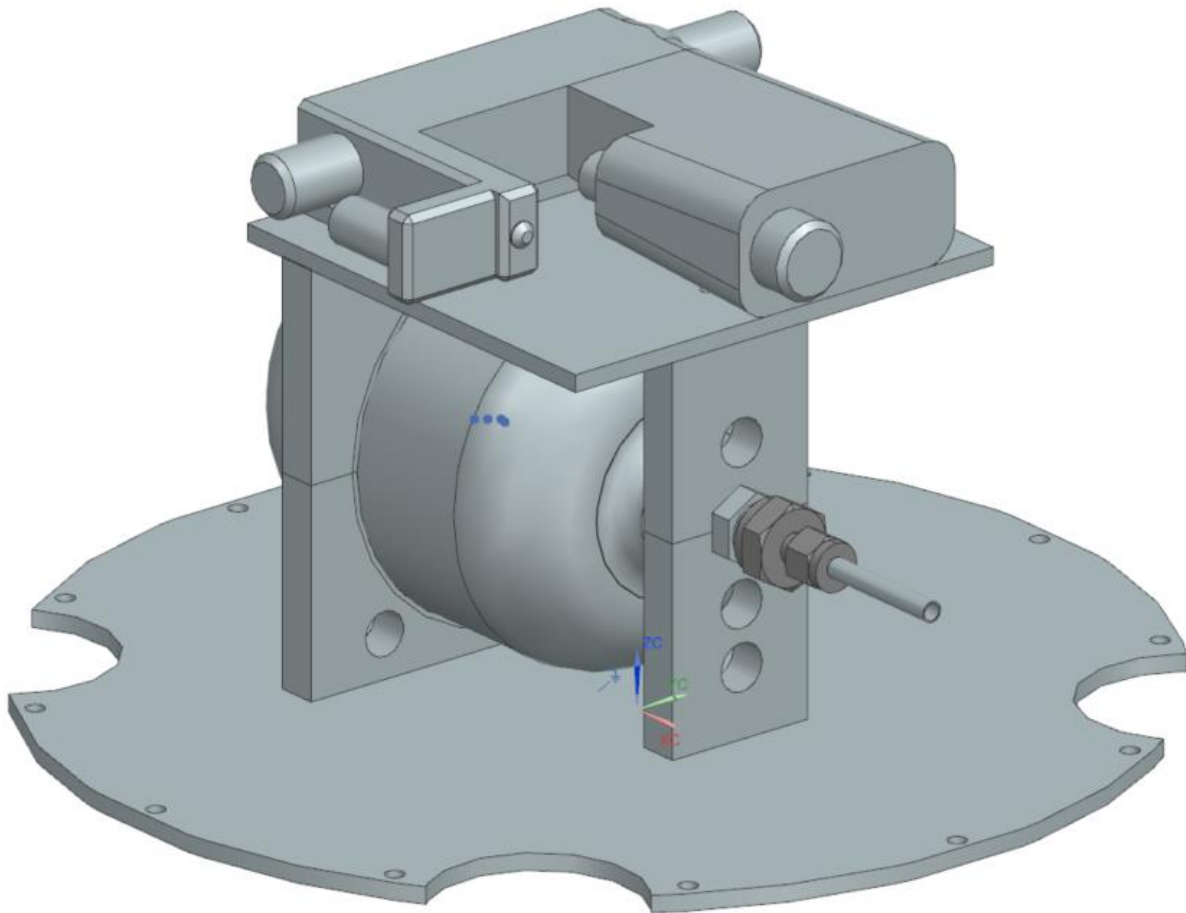
¹⁸ Datei Nr.13

¹⁹ Datei Nr.14

²⁰ Datei Nr.15

2.6. Zusammensetzung des Moduls und Masseschwerpunkt:

Nachdem die einzelnen Teile des Moduls entworfen und im CAD konstruiert wurden, kann das Modul²¹ zusammengesetzt werden.



Jedem Teil muss noch das jeweilige Material bzw. die zugehörige Dichte zugeordnet werden, um anschließend mithilfe der NX-Messfunktion die Masse und den Masseschwerpunkt (Center of Gravity) der Aufbauten, also allen Teilen außer des Schotts, zu berechnen. Zusammen haben die Teile eine Masse von 2,8691 kg und der Masseschwerpunkt liegt bei (-16,4677 | 5,2809 | 114,7308). Hier liegt allerdings eine potenzielle Ungenauigkeit vor, da uns nicht bekannt ist, wie das Gewicht innerhalb des Massereglers verteilt ist, beispielsweise ob die linke Seite mehr wiegt als die rechte Seite. Uns ist nur seine Gesamtmasse von 1,5kg bekannt, welche wir in eine gesamte Dichte umrechnen konnten. Zu beachten ist auch, dass sich dieser Schwerpunkt bei jeder noch folgenden Änderung wieder verschiebt. Das Schott kann jetzt so platziert werden, dass sein Mittelpunkt auf den X- und Y-Koordinaten des Masseschwerpunkts liegt und somit das Modul theoretisch perfekt ausbalanciert ist.

²¹ Datei Nr.16

3. Test der Finnen im PWK:

3.1. PWK (Plasmawindkanal):

Es gibt 2 grundlegende Arten von Windkanälen. Auf der einen Seite die klassischen Windkanäle, mit deren Hilfe die aerodynamischen und aeroakustischen Eigenschaften eines Objekts untersucht werden können und auf der anderen Seite die Plasmawindkanäle, mit welchen die thermodynamischen Eigenschaften eines Objekts geprüft werden. Bei den klassischen Windkanälen wird das zu prüfende Objekt mit Luft mit einer sehr hohen Geschwindigkeit und einem sehr hohen Druck angeströmt, bei den Plasmawindkanälen mit einer genauso hohen Geschwindigkeit, dafür aber mit geringerem Druck und sehr stark erhöhter Temperatur.

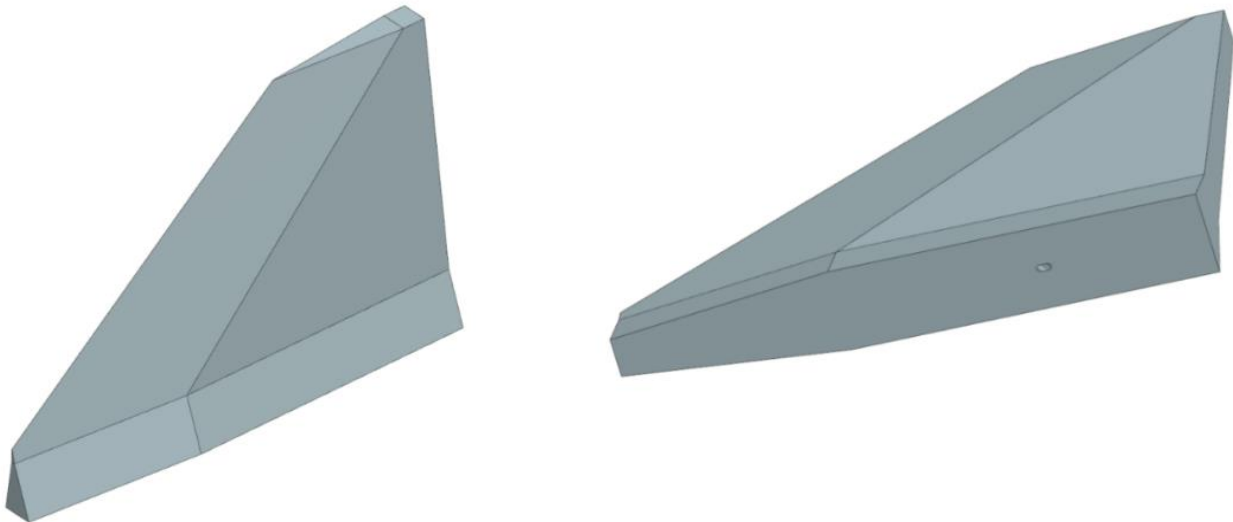
Das Institut für Raumfahrtssysteme des DLRs verfügt über einen eigenen Plasmawindkanal:



Wenn die HIFLIER Rakete mit Überschallgeschwindigkeit fliegt, ist sie sehr hohen Temperaturen ausgesetzt, welche durch die beim Wiedereintritt in die Atmosphäre entstehende Verdichtung der Teilchen vor der Rakete und durch die starke Luftreibung entstehen. Um dies zu simulieren, sollen die Finnen des DLR-Moduls im Vorfeld im PWK getestet werden. Hierfür wird eine komplexe Testvorrichtung benötigt.

3.2. Finnen:

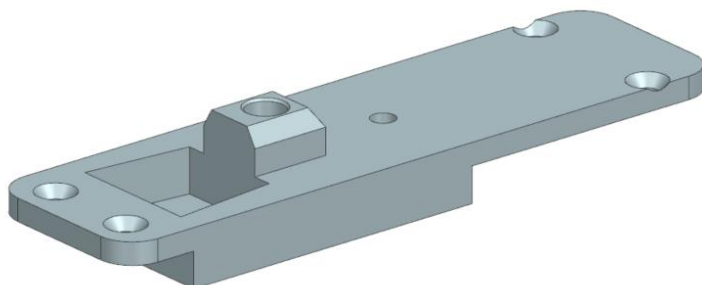
Es wurden bereits fertige Finnen für die HIFLIER-Mission entworfen und konstruiert²². Sie wurden nach dem Vorbild der scharfkantigen SHEFEX-Finnen designt und haben innen Hohlräume für den Stickstoff, welcher durch das unten zu sehende kleine Loch an der Unterseite der Finnen eingeführt wird.



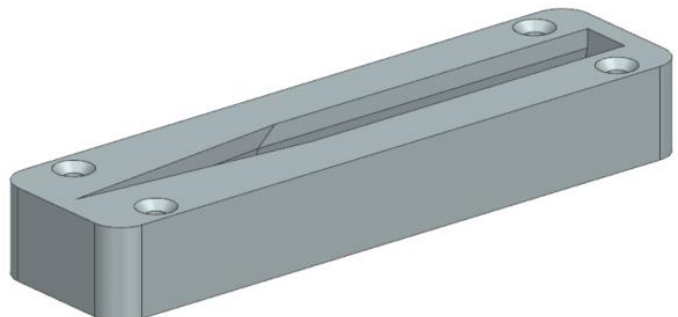
3.3. Finnschuh:

Die Finnen werden von unten durch einen Finnschuh gesteckt, welcher eine genaue Aussparung für die untere Keilform der Finnen besitzt und diese somit festhält. Es gibt noch ein CAD des Finnschuhs der HIFiRE-Mission, dieser muss allerdings stark angepasst werden, da die HIFLIER-Finne eine völlig andere Geometrie besitzt und somit auch anders befestigt werden muss.

Alter HIFiRE-Finnschuh:



Neuer HIFLIER-Finnschuh²³:



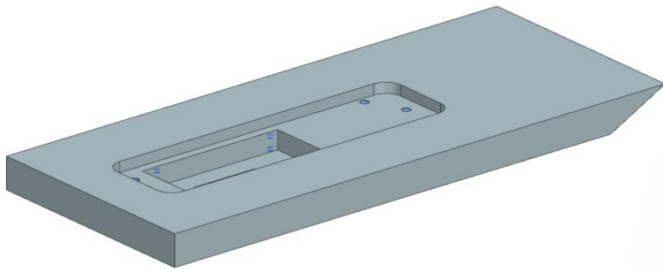
²² Datei Nr.17

²³ Datei Nr.18

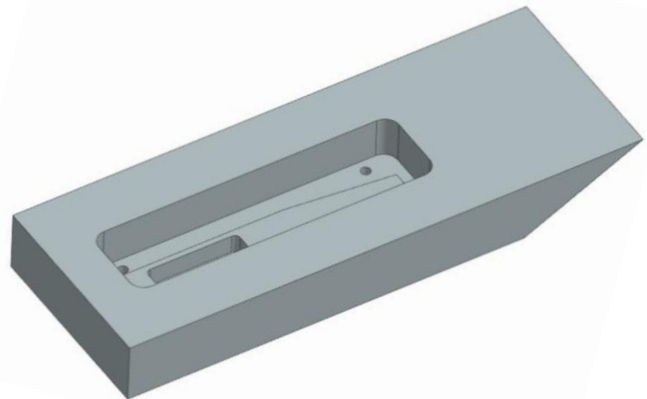
3.4. Keiloberseite:

Der Finnschuh wird mitsamt der Finne, mithilfe von M5 Schrauben in die obere Hälfte eines zweiteiligen Keils geschraubt. Hierdurch wird die Finne stark gegen den Keil gepresst und kann somit gut gedichtet werden. An der Unterseite der oberen Hälfte befindet sich ein Kühlkanal (ummantelt von einem O-Ring zur Dichtung), durch welchen Wasser läuft, um ein Schmelzen des Keils im PWK zu verhindern. An der Gaszufuhr zwischen den beiden Keilhälften muss nicht ganzflächig, sondern nur um das unten zu erkennende Ovalloch, durch welches die Gasleitung verläuft, gedichtet werden. Auch hiervon gibt es noch ein altes HIFiRE-CAD, welches wieder angepasst werden muss. Die Hauptänderung bei Finnschuh und Keil war die Erhöhung der Tiefe, da der keilförmige Teil der Finne komplett in Finnschuh und Keiloberseite hineinpassen muss und nicht nur wie davor daran befestigt wird.

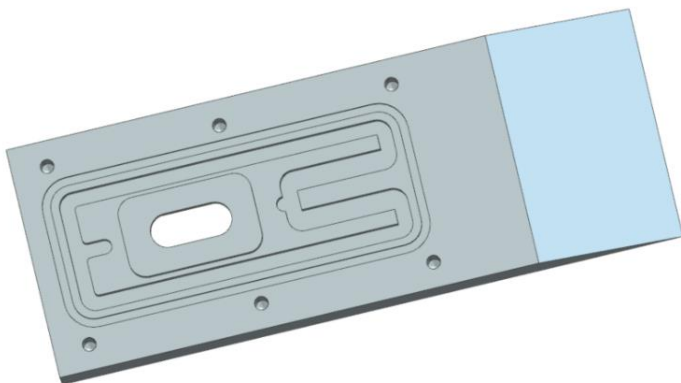
Alte HIFiRE-Keiloberseite:



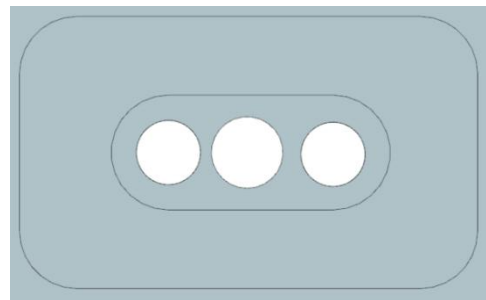
Neue HIFLIER-Keiloberseite²⁴:



Kühlkanal:



Ovalloch zwischen Ober- und Unterseite:

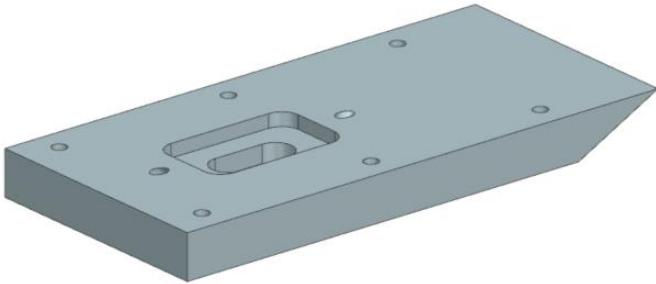


²⁴ Datei Nr.19

3.4.1. Keilunterseite:

Die Oberseite des Keils wird schließlich mit der unteren Hälfte verschraubt und wieder gedichtet. Die komplette Unterseite des Keils kann von der HiFIRE-Mission übernommen werden und muss nicht modifiziert werden.

Keilunterseite²⁵:

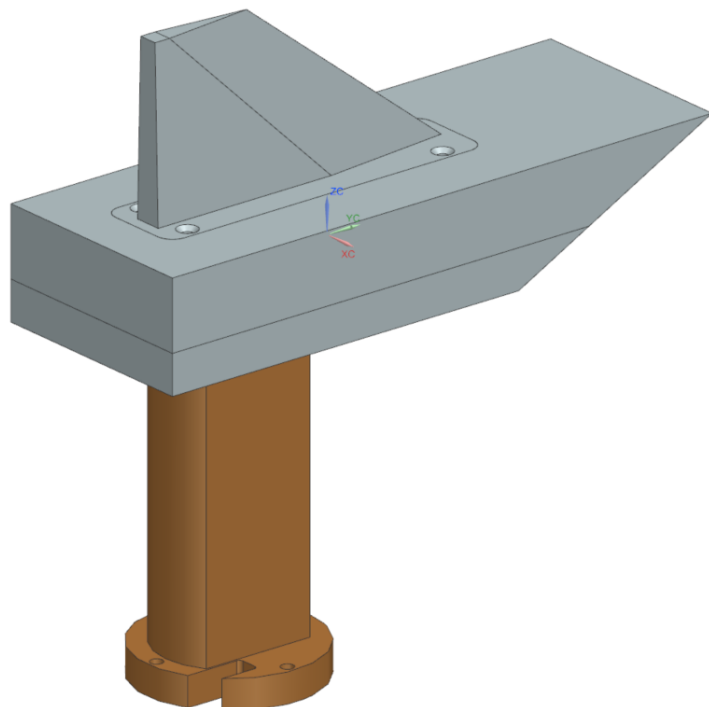
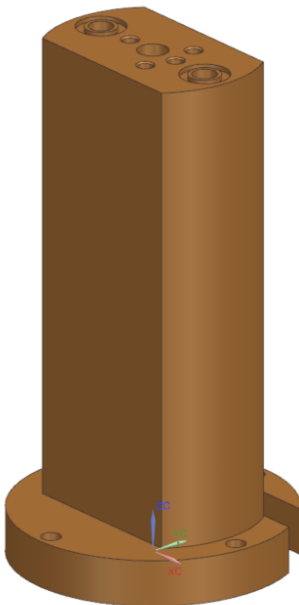


3.5. Zusammensetzung der Testvorrichtung:

Für die Befestigung der Testvorrichtung am PWK wird noch ein Sondenfusshalter benötigt, welcher allerdings schon fertig entworfen ist und nicht geändert werden muss. Die 5 Teile (Finne, Finnschuh, Keiloberseite, Keilunterseite und Sondenfusshalter) können jetzt im CAD zusammengesetzt werden und anschließend in die Fertigung gegeben werden, bzw. montiert werden. Die fertige Konstruktion ist auch final so mit Christian Dürnhofer vom Institut für Raumfahrtssysteme abgesprochen, da dort die Testung ablaufen wird.

Sondenfusshalter²⁶:

Testvorrichtung²⁷:



²⁵ Datei Nr.20

²⁶ Datei Nr.21

²⁷ Datei Nr.22

4. Zusammenfassung und Ausblick:

In den 2 Wochen wurde das Modell des Kühlkreislaufs des DLR HIFLIER Experimentiermoduls ausgearbeitet und vollständig im CAD konstruiert. Es wurde ein Gasreservoir, ein Reduzierstück und eine Einschraubverschraubung bestellt und die technischen Zeichnungen des Schotts, der Halterungen und der Zwischenplatte gehen in die Fertigung. Ausstehend für die Weiterarbeit am Kühlkreislauf sind noch folgende Punkte: Abschleifen des Reduzierstücks, Anbringung des Massendurchflussreglers, Planung eines Rohrsystems und die Montage des Moduls. Des Weiteren wurde an einer Testvorrichtung für die Finnen im PWK gearbeitet. Ein Teil der weiteren Arbeit in diesem Projekt wurde an das Institut für Raumfahrtssysteme abgegeben, inklusive die Fertigung des Keils, doch für das Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie steht noch die Fertigung der Finnen und des Finnschuhs an, bis der Test im PWK durchgeführt werden kann. Die finale Ausführung des Experiments bzw. der Start der wirklichen HIFLIER Rakete ist für April 2022 geplant.