



Fachbericht
ILK-B-1-18-446_v3
21.03.2019
Seitenzahl 47

Final Design Review – Cryostat for the Cryogenic Current Comparator (CCC) at CRYRING / FAIR

Auftraggeber:
GSI Darmstadt
Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Hauptbereichsleiter:
PD Dr. rer. nat. habil. J. Klier

Bearbeiter:

M.Eng. Gregor Trommler, Dr. rer. nat. Andreas Kade

Dipl.-Ing.(BA) Frank Schoepe, Dipl.-Ing. Gunar Schroeder



Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	4
2 Komponentenbeschreibung	5
2.1 Helium-Behälter	5
2.1.1 Berechnung	5
2.1.2 Aufhängung	7
2.1.3 Helium-Rohr	7
2.1.4 SQUID-Aufnahme	8
2.1.5 Überdruckabsicherung	9
2.1.6 Deckel	10
2.1.7 Abdichtung	10
2.1.8 Revisionsöffnungen	10
2.2 Thermisches Schild	12
2.2.1 Aufhängung	15
2.2.2 Rohrleitungskontaktierung	15
2.2.3 Schild zwischen Helium-Rohr und UHV-Rohr	17
2.2.4 Trennbarkeit	17
2.2.5 Revisionsöffnungen	17
2.2.6 Thermische Anker	18
2.3 Vakuum-Behälter	19
2.3.1 Berechnung	19
2.3.2 Verbindungen der Stahlstreben	20
2.3.3 UHV-Rohr	21
2.3.4 Durchführungen am Deckel	23
2.3.5 Durchführungen am Boden	24
2.3.6 Füße	24
2.3.7 Revisionsöffnungen	25
2.3.8 Typenschild	25
2.4 System-Komponenten	26
2.4.1 LHe-Level-Sensor	26
2.4.2 Position LHe-Heber	26
2.4.3 Temperatur-Sensoren	27
2.4.4 Auslesem modul	28
2.4.5 Multi Layer Insulation	28

3 Montage- und Demontageanleitung	30
3.1 Helium-Rohr	30
3.2 Helium-Behälter	30
3.3 Helium-Behälter am Vakuumdeckel	30
3.4 Thermisches Schild	30
3.5 Vakuum-Behälter	31
4 Berechnungen	32
4.1 Thermische Berechnungen – Wärmelast (Helium-Behälter)	32
4.2 Thermische Berechnungen – Wärmelast (Thermisches Schild)	36
4.3 Thermische Berechnungen – Gas Kühlung	36
4.4 Thermische Berechnungen – Thermische Anker	39
4.5 Berechnungen der Sicherheitseinrichtungen	40
4.6 Kältekontraktion – Kupfer-Rohr / Helium-Rohr	46
5 Zusammenfassung	47

1 Einleitung

Innerhalb des Projekts „Design, Entwicklung und Fertigung eines speziellen He-Badkryostaten für den kryogenen Stromkomparator (CCC)“ wurde die Design-Phase mit der Konstruktion des CCC-Kryostaten inklusive aller Komponenten und Bestandteile entsprechend der Spezifikation und Absprachen mit dem AG ausgeführt und dokumentiert. Damit kann der AG das Final Design Review (FDR) abschließend durchführen und dem ILK Dresden bestätigen. In diesem Bericht werden dazu die Hauptkomponenten mit ihren Schnittstellen in der Konstruktion beschrieben, die Montage und Demontage kurz erläutert und auf die Beschreibungen in den jeweiligen Baugruppenzeichnungen verwiesen und alle durchgeführten Berechnungen detailliert dargelegt.

2 Komponentenbeschreibung

2.1 Helium-Behälter

Der Helium-Behälter (siehe Abbildung 1) ist als Schweißkonstruktion mit lösbarem Deckel und Boden aus dem Edelstahl 1.4571 aufgebaut (siehe 1-130-01-4100-00_A). Er besitzt einen rechteckigen Querschnitt von $392 \times 392 \text{ mm}^2$ mit einer Innenhöhe von 667 mm. Zur Fertigung ist der Behälter bei der Firma ROVAK GmbH vorgesehen.

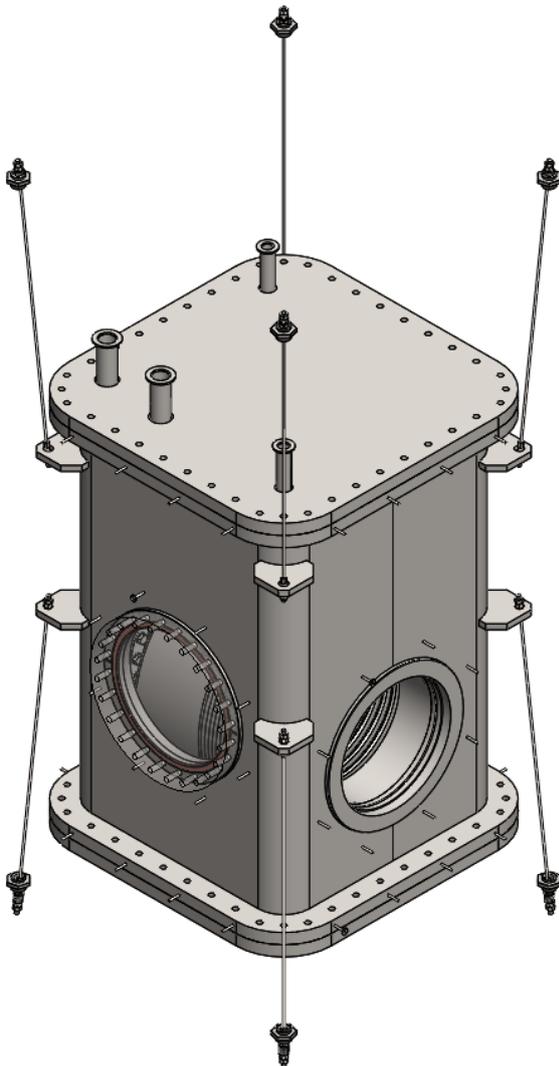


Abbildung 1: Helium-Behälter

2.1.1 Berechnung

Der abzusichernde Druck des Helium-Behälters gegenüber Atmosphäre liegt bei $0,4 \text{ bar}_g$. Damit fällt der Behälter nicht unter die Druckgeräterichtlinie. Als Basis für die Auslegung und FEM-Nachrechnung des Helium-Behälters wurde ein Differenzdruck über den Behälter von 2 bar_a (innen: 2 bar_a ; außen: Vakuum) angenommen. Die Ergebnisse zeigen Spannungswerte

(siehe Abbildung 2), die unterhalb der Streckgrenze von Edelstahl (≤ 190 MPa) liegen und maximale Verformungswerte (siehe Abbildung 3) im Bereich der CF-Dichtung des Strahlrohrs von 0,5 mm aufweisen. Mit dem Ergebnis wird der Behälter als zulässig für den Betriebsfall bewertet.

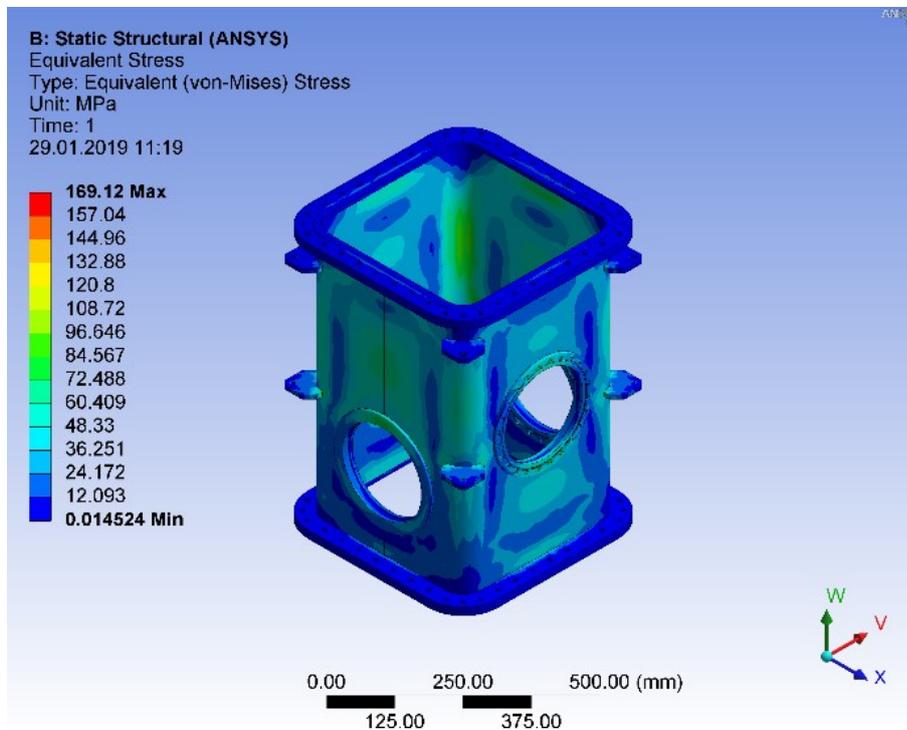


Abbildung 2: FEM-Berechnungsergebnis: Helium-Behälter (1-130-01-4100-00): Spannung

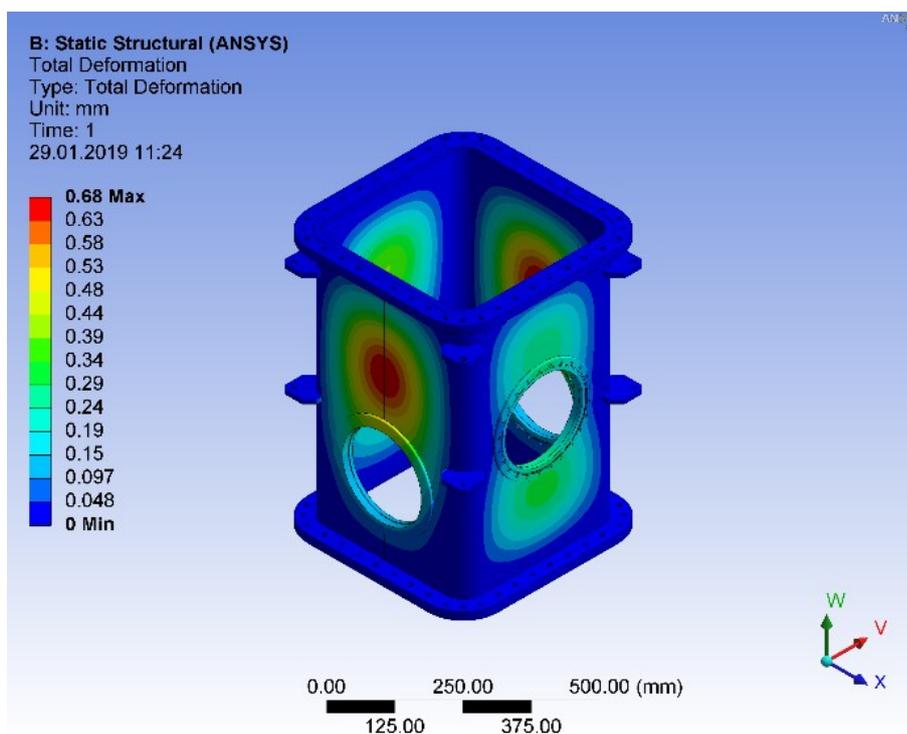


Abbildung 3: FEM-Berechnungsergebnis: Helium-Behälter (1-130-01-4100-00); Verformung

2.1.2 Aufhängung

Die Aufhängung des Helium-Behälters erfolgt über vier Titanstäbe, die am Deckel des Vakuumbehälters verstellbar befestigt sind und vier Titanstäbe, die nach unten mit dem Boden des Vakuumbehälters zur Versteifung, ebenfalls verstellbar und über 16 Tellerfedern gelagert, verbunden sind (siehe Abbildung 1). Die verwendete Titanlegierung TiAl6V4 (3.7165) hat eine Streckgrenze von 840 MPa. Mit einem Gesamtgewicht des Helium-Behälters von 270 kg (200 kg Behälter, 60 kg SQUID und 10 kg Helium) kann mit einem Stabdurchmesser von 3 mm und der Annahme von drei tragenden Zugstangen eine vierfache Sicherheit gegen statische Belastung (Fall 1) und eine zweifache Sicherheit gegen dynamische Belastung (Fall 2 bei 2g) abgesichert werden (Kraftannahme siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Der Berechnung zugrundgelegte Kräfte

Fall 1	Gesamtzugkraft je Stab	1290 N
Zugkraft je Stab	Aus Gewichtskraft	883 N
	Aus 0,05 mm je Feder Vorspannung	132 N
	Aus 0,1 mm je Feder Kältekontraktion	275 N
Fall 2	Gesamtzugkraft je Stab	2173 N
Zugkraft je Stab	Aus Gewichtskraft	1766 N

Durch gleiche Längen der Stäbe oben und unten kann ein gleichmäßiger Wärmeeintrag angenommen werden. Die Kältekontraktion des Behälters wird durch die Tellerfedern in den unteren vier Stabaufnahmen ausgeglichen. Die Annahmen zur Kältekontraktion und resultierende Maßnahmen zur Montage sind Abschnitt 4.6 zu entnehmen.

2.1.3 Helium-Rohr

Das Helium-Rohr zur Aufnahme des SQUID-Messsystems (siehe Abbildung 4) ist mit einem Innendurchmesser von 200 mm konstruiert. Die Baugruppe besteht aus drei Rohrsegmenten, einer Keramik zur Unterdrückung von Spiegelströmen, einem Wellbalg zur Montage der Baugruppe in den Helium-Behälter und zwei CF-Flanschen (einer komplett, einer geteilt). Die Keramik (FRIALIT F99,7) mit einem Übergang aus Ni42/1.3917 auf Edelstahlrohr ist zur Fertigung bei der Firma FRIATEC vorgesehen. Dafür liegt ein Angebot inkl. der Herstellung der Rohrbaugruppe unter Beistellung des Wellbalgs von der Firma FLEXOMAT vor. Der Wellbalg aus 1.4404 ist für einen axialen Hub von ± 21 mm bei einer axialen Federrate von 111 N/mm² ausgelegt. Die Helium-Rohr-Baugruppe (1-130-02-4200-00_A) ist in der Länge mit einem Übermaß von mindestens 0,5 mm und höchstens 1,0 mm toleriert, um eine Druckbelastung auf die Keramik in jedem Betriebsfall zu gewährleisten.

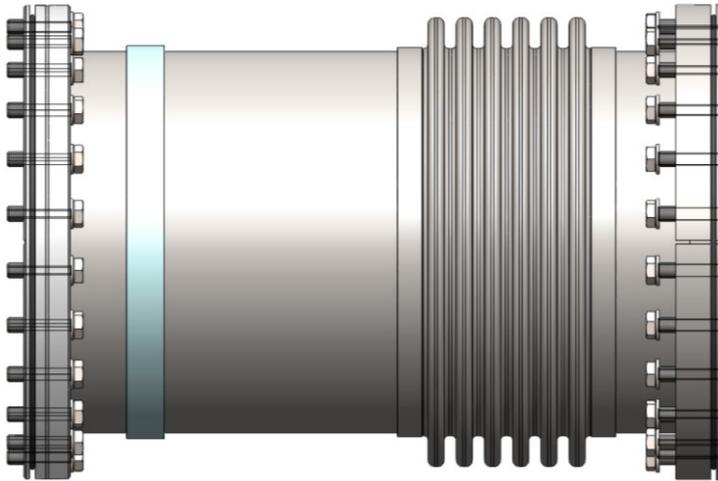


Abbildung 4: Helium-Rohr mit Keramik und Balg

2.1.4 SQUID-Aufnahme

Die Aufnahme vom SQUID-Messsystem auf dem Helium-Rohr ist durch eine Vorgabe des Auftraggebers (AG) entstanden (siehe Abbildung 5). Die GFK-Konstruktion ist als geteilte Ausführung auf dem Rohr montierbar.

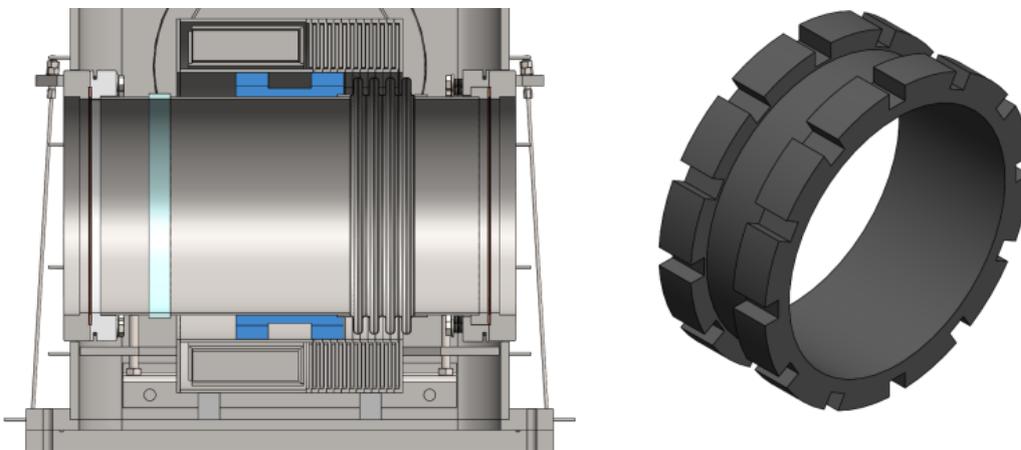


Abbildung 5: Aufnahme SQUID; links: auf dem Helium Rohr (blau markiert); rechts: separat

Die zusätzliche Lastaufnahme des SQUID-Messsystems innerhalb des Helium-Behälters ist über zwei 20 mm starke GFK-Stege vorgesehen. Diese sind an den Seiten des Behälters höhenverstellbar konstruiert, um die genaue Position des Messsystems einstellen zu können (siehe Abbildung 6).

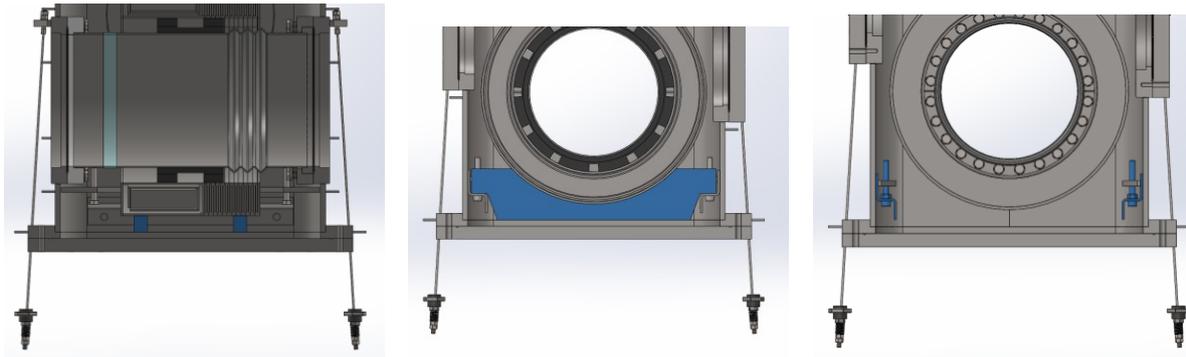


Abbildung 6: SQUID-Aufnahme aus unterschiedlichen Ansichten

2.1.5 Überdruckabsicherung

Der Heliumbehälter ist gegenüber Überdruck abzusichern (siehe Abschnitt 2.1.1). Dafür werden zwei Sicherheitsventile vom Typ 06316 der Firma HEROSE verwendet. Die Zuleitung vom Heliumbehälter zum Sicherheitsventil-Anschluss auf dem Vakuumdeckel ist eine DN 25 Leitung mit einer glatten Innenoberfläche und einer Länge von 1,85 m. Zur Reduzierung der thermischen Einträge ist diese Leitung gebogen ausgeführt (siehe Abbildung 7).

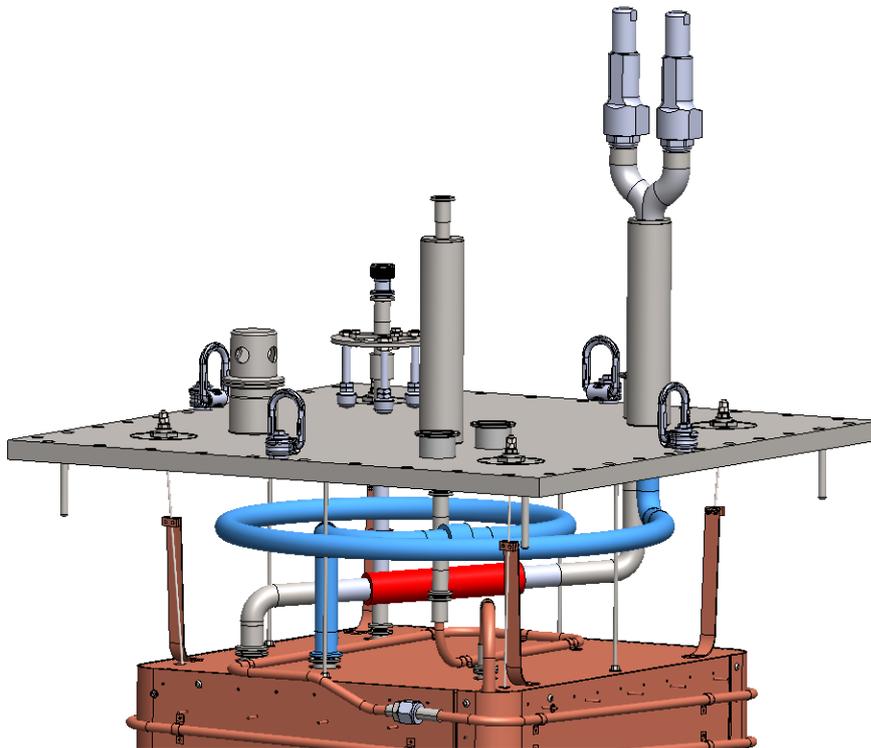


Abbildung 7: Zuleitung zu den Sicherheitsventilen – blau markiert

Die Ausführungen zur Dimensionierung der Sicherheitsventile und der Zuleitung sind in den Berechnungen aufgeführt (siehe Abschnitt 4.5).

Die maximale Höhe des Kryostaten wird bei aufgesetzten Sicherheitsventilen erreicht und beträgt **1710 mm**. Bitte unbedingt diese Abweichung zur Spezifikation beachten.

2.1.6 Deckel

Im Heliumdeckel sind vier Durchführungen realisiert (siehe Abbildung 8). Die Durchführungen sind als Kleinflansch mit einer Stutzenlänge von 70 mm ausgeführt. Damit liegt die Schnittstelle außerhalb vom thermischen Schild.

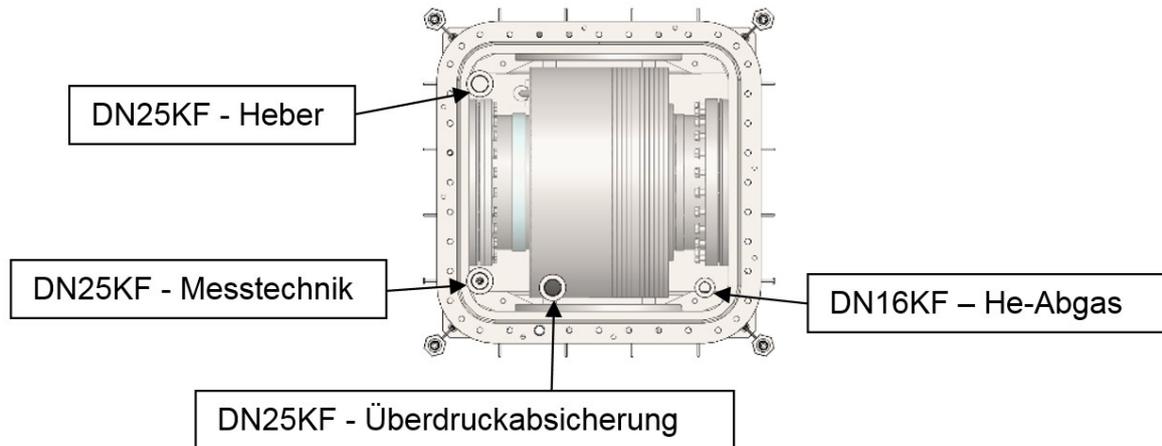


Abbildung 8: Durchführungen im Helium-Deckel

2.1.7 Abdichtung

Boden und Deckel des Helium-Behälters sind über jeweils 40 Schrauben lösbar gestaltet. Die Abdichtung erfolgt mit $\varnothing 3$ mm Indium-Dichtung. Die Nut (im Deckelflansch und im Boden) wird durch einen Fräser hergestellt und nachträglich geschliffen.

2.1.8 Revisionsöffnungen

Zwei Revisionsöffnungen seitlich zum Strahlrohr sind mit einer Größe von 200 mm als CF-Flansch ausgeführt. Die Öffnungen sind unterschiedlich in der Höhe hinsichtlich der Vorgaben angebracht. Die untere Öffnung ist 90 mm und die obere Öffnung 130 mm oberhalb der Strahlachse angebracht (siehe Abbildung 9).

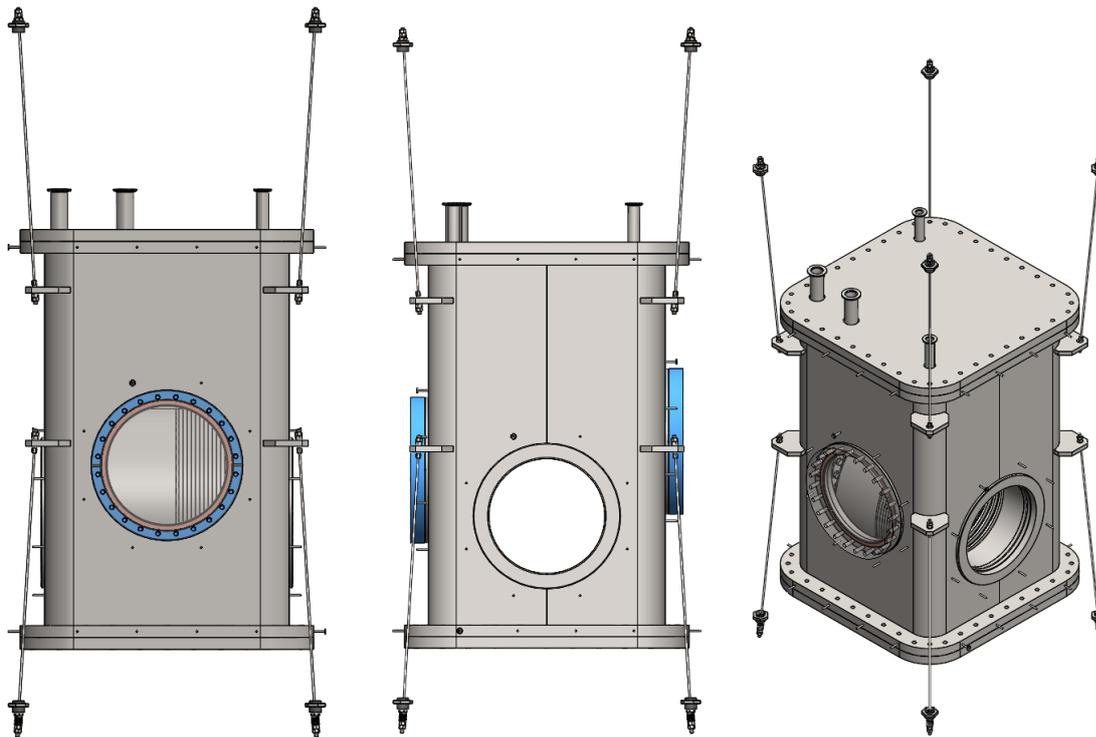


Abbildung 9: Revisionsöffnungen im Helium-Behälter (blau markiert) ; links: Ansicht quer zur Strahlrichtung; mitte: Ansicht in Strahlrichtung; rechts: isometrische Ansicht

2.2 Thermisches Schild

Das thermische Schild ist aus 1,5 mm starkem Kupferblech (OFHC) mit vier Seitenteilen und einem Boden und einem Deckel aufgebaut. Die folgenden Abbildungen (Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12) zeigen das thermische Schild in drei möglichen Varianten der Rohrwendeln auf dem Blech. In Variante A erfolgt die aktive Kühlung des Schildes mittels Helium-Abgas aus dem Helium-Behälter über parallelisierte Rohrwendeln, in Variante B1 über eine um die Blechkonstruktion geführte Rohrleitung mit einem Innendurchmesser von 15 mm und in Variante B2 über eine um die Blechkonstruktion geführte Rohrleitung mit einem Innendurchmesser von 10 mm. In der Beschreibung und Diskussion mit dem AG wurde sich für die Umsetzung von Variante B2 entschieden.

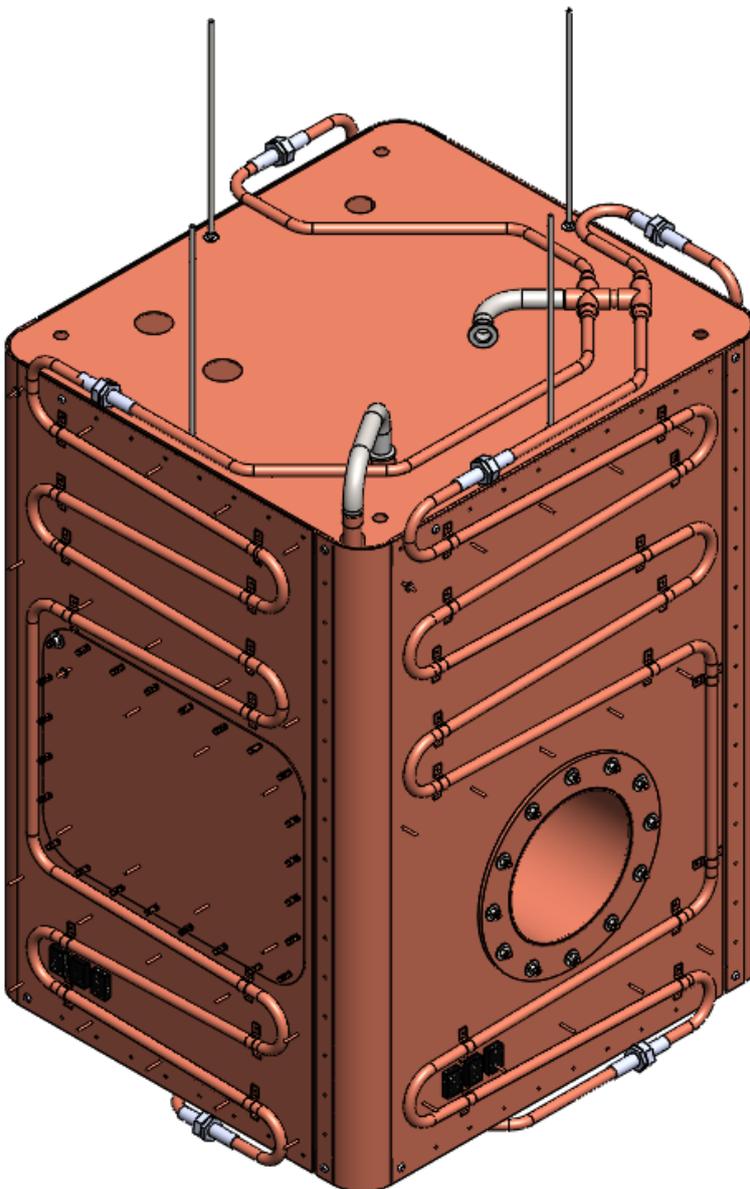


Abbildung 10: Thermisches Schild; Variante A - parallele Kreise

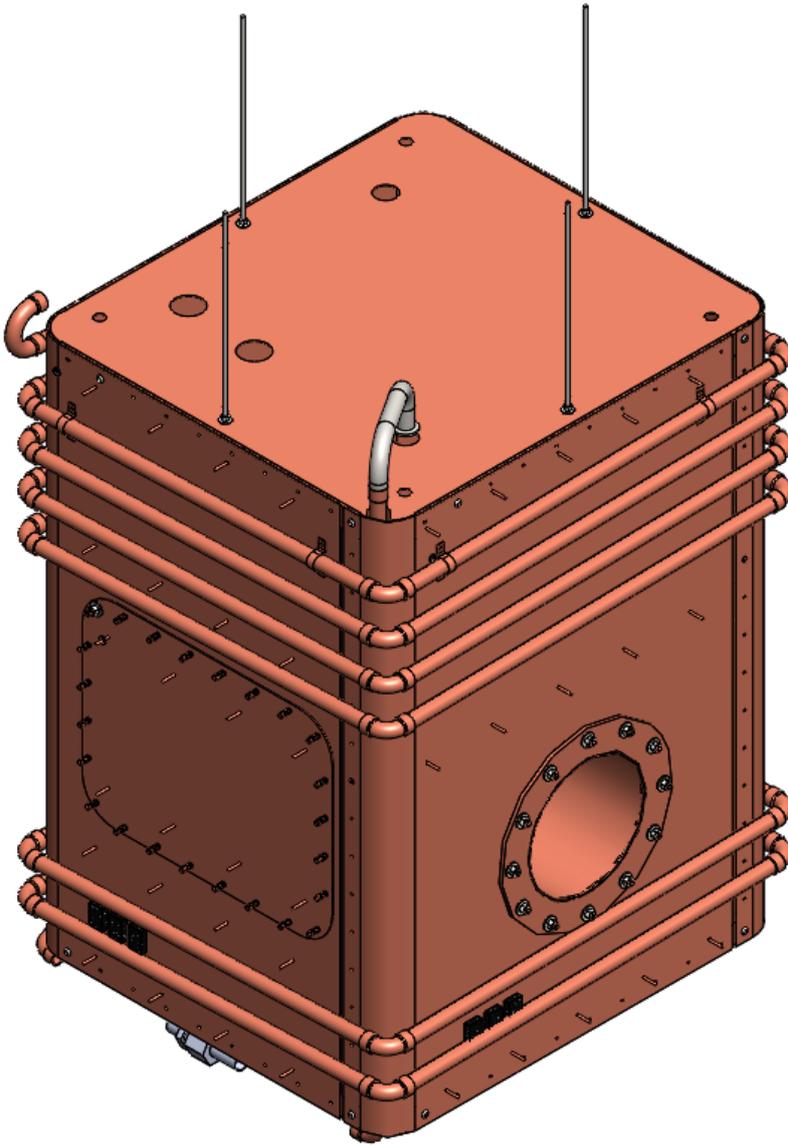


Abbildung 11: Thermisches Schild; Variante B1 – Einzelrohr (Innendurchmesser 15 mm)

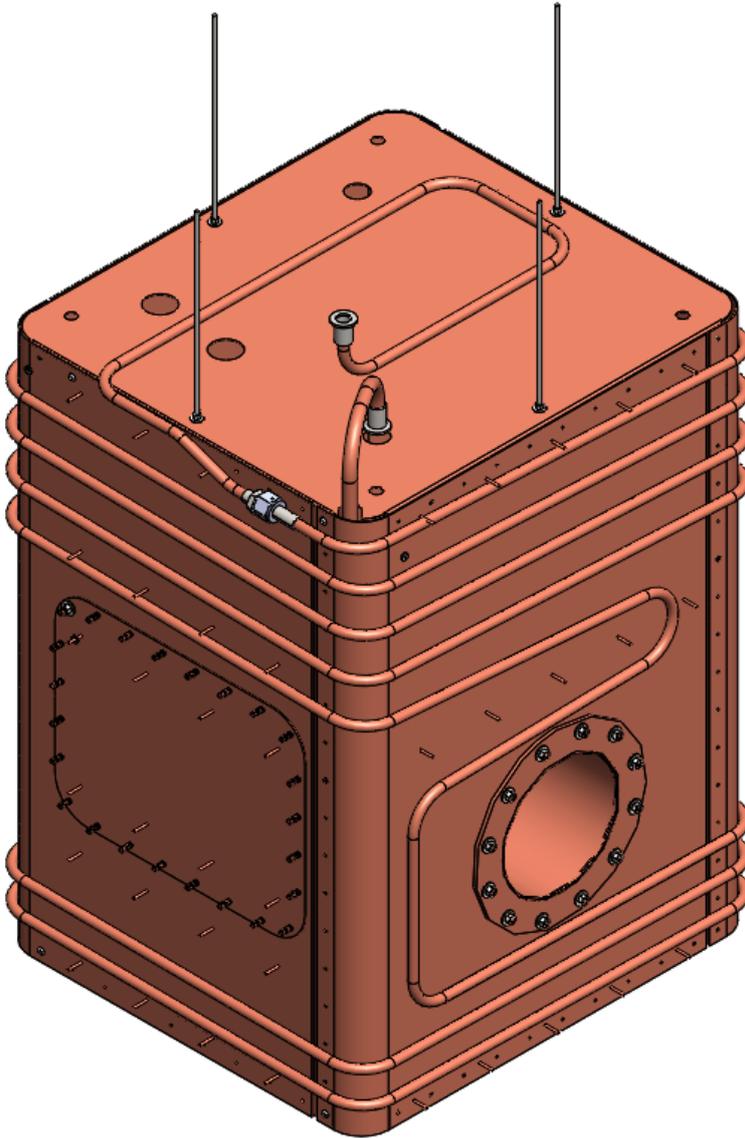


Abbildung 12: Thermisches Schild; Variante B2 – Einzelrohr (Innendurchmesser 10 mm)

2.2.1 Aufhängung

Die Aufhängung des Schildes erfolgt über vier senkrechte Edelstahl Gewindestangen (M5), die in Sackgewinde im Vakuumdeckel geschraubt und verklebt (keine separate Entlüftung notwendig) werden. Die Aufhängung am Schild ist über eine verstärkte Blechkonstruktion (siehe Abbildung 13) mit Verschraubungen gelöst. Das Gesamtgewicht von 60 kg wird damit sicher gehalten. Baugleiche Ausführung für Variante B.

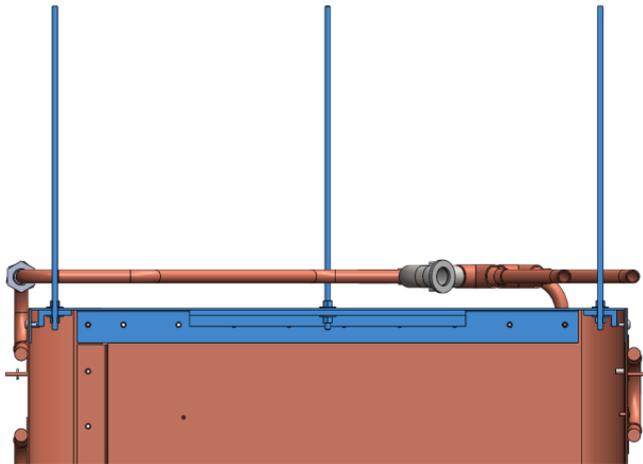


Abbildung 13: Aufhängung thermisches Schild

2.2.2 Rohrleitungskontaktierung

Die Rohrleitung wird an das Kupferblech mit Schellen fixiert und anschließend gelötet (siehe Abbildung 14).

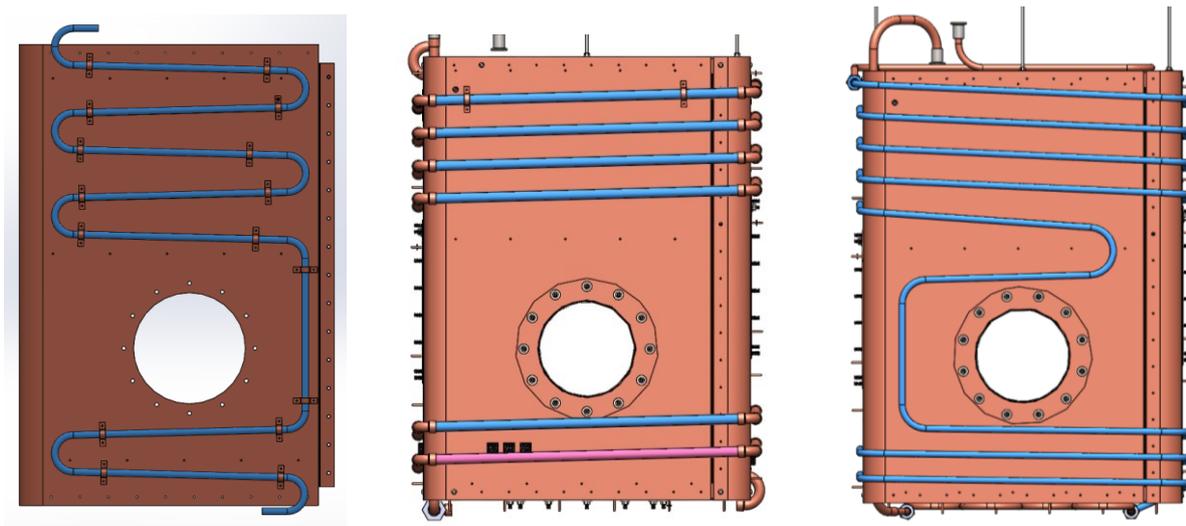


Abbildung 14: Kontaktierung der Kupferrohrleitung auf dem Blech; links: Variante A; mitte: Variante B1; rechts: Variante B2

Die Rohrschlange auf dem Deckelblech von Variante B2 ist in Abbildung 15 zusehen.

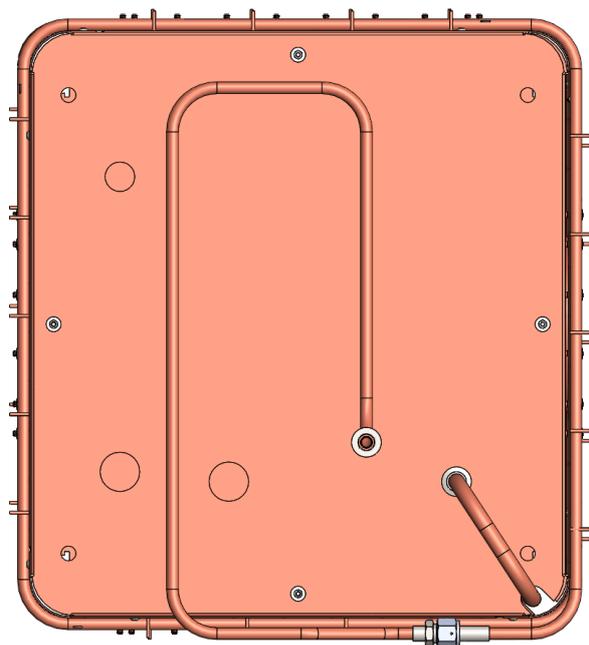


Abbildung 15: Ansicht Deckelblech

Die Rohrschlange auf dem Bodenblech von Variante B2 zeigt Abbildung 16.

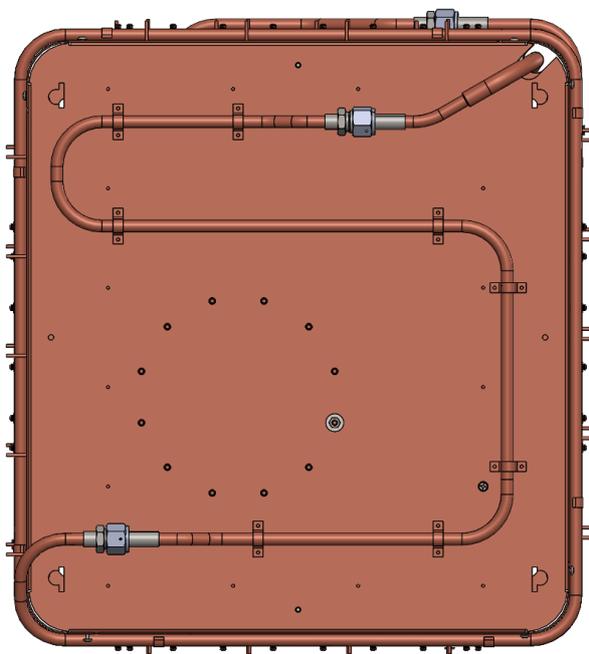


Abbildung 16: Ansicht Bodenblech

Die genaue Fertigungsanweisung zur Rohrleitungskontaktierung ist den jeweiligen Zeichnungen zu entnehmen.

2.2.3 Schild zwischen Helium-Rohr und UHV-Rohr

Zwischen Helium-Rohr und UHV-Rohr ist ein passives Kupferschild mit einem Innendurchmesser von 175 mm vorgesehen (siehe Abbildung 17). Das Kupferschildrohr ist zweigeteilt mit einer GFK-Muffe verbunden, um auch hier mögliche Ströme zu unterbinden. Auf der Blechseite sind die Rohrsegmente über jeweils zwei Klemmflansche mit dem Hauptschild verbunden.

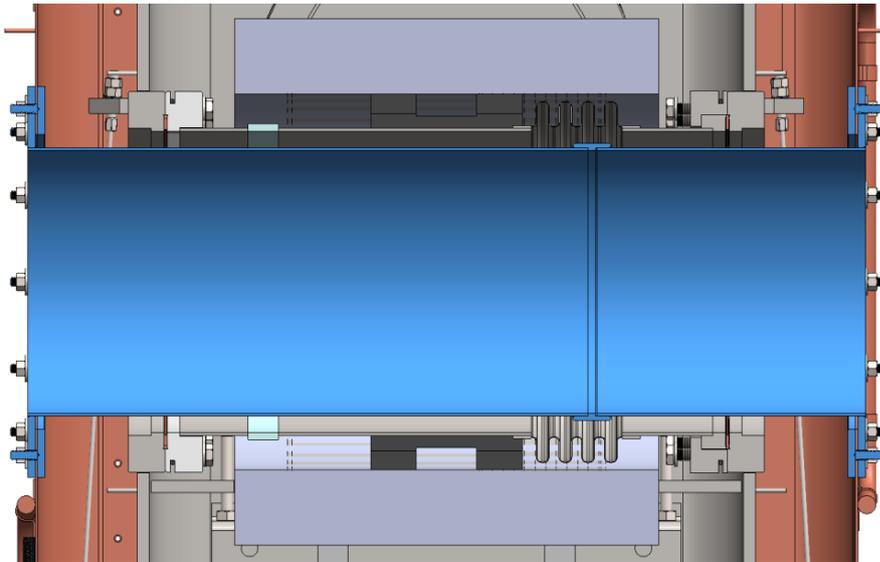


Abbildung 17: Kupfer-Schildrohr zwischen Helium-Rohr und UHV-Rohr

2.2.4 Trennbarkeit

Das Thermische Schild ist im oberen Bereich zwischen Deckblech und Seitenteilen und im unteren Bereich zwischen Bodenblech und Seitenteilen mit Schraubnieten lösbar gestaltet. Die Rohrleitung kann über Rohrverschraubungen getrennt werden.

2.2.5 Revisionsöffnungen

Seitlich zum Strahlgang bestehen am thermischen Schild zwei Revisionsluken mit einem rechteckigen Querschnitt von 260 x 340 mm². Zum besseren Wärmeübergang wird jeweils mittig auf den Luken eine Schraubverbindung vorgesehen, um eine Kupferlitze mit dem aktiv gekühlten Schild zu verbinden.

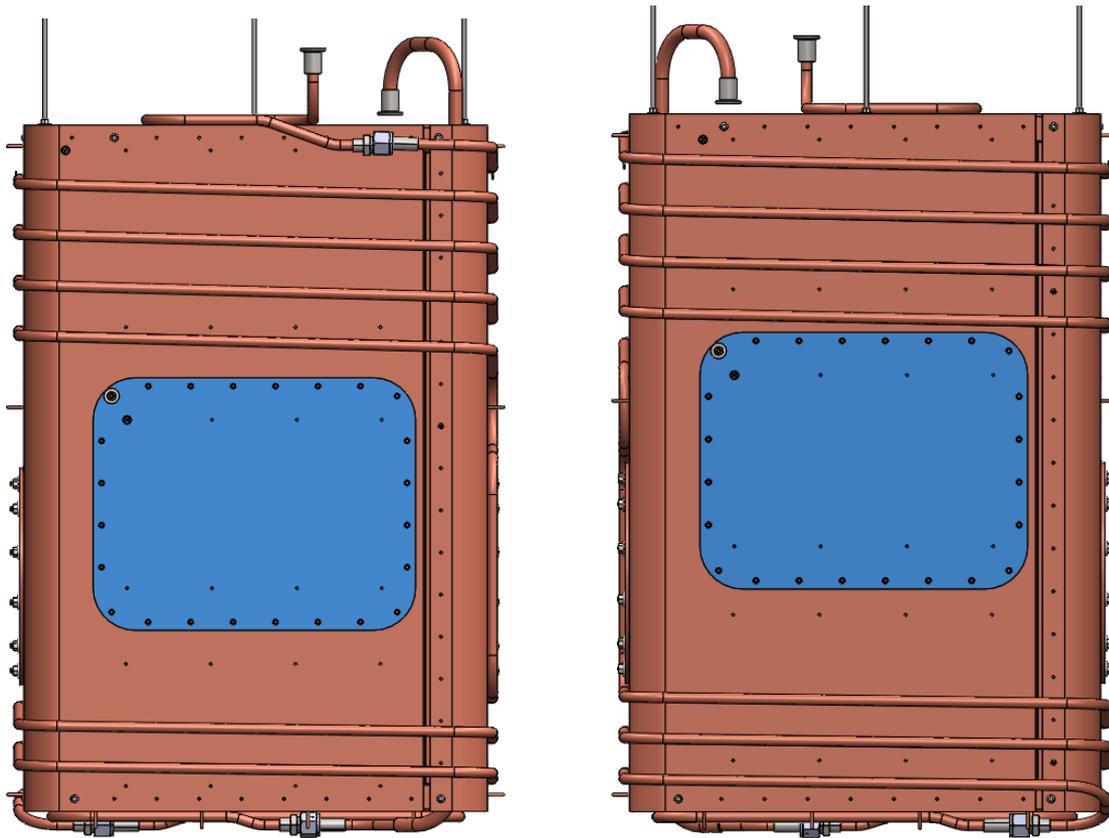


Abbildung 18: Revisionsöffnungen am thermischen Schild (Variante B2) linke und rechte Seite zum Strahlengang

2.2.6 Thermische Anker

Um Wärmeeinträge über Leitungen zu minimieren, die mit dem Helium Behälter verbunden sind, werden thermische Anker am thermischen Schild vorgesehen. Die Ankerpunkte an den Leitungen und auf den Haltestreben sind im Kapitel 4 Berechnungen beschrieben.

2.3 Vakuum-Behälter

Der Vakuum-Behälter (siehe Abbildung 19) ist als Stahlgerüst (allgemein: 1.4301; zwei Stahlstreben oberhalb der Strahlachse: 1.4429 – siehe 1-130-02-1110_A) mit acht aufgesetzten und einzeln abnehmbaren Aluminium-Fenstern (C250) konstruiert. Die Abmessungen laut Spezifikation B850 x T850 x H1200 werden erreicht und in der Höhe aufgrund der aufgesetzten Dome und Sicherheitsventile um 500 mm überschritten.

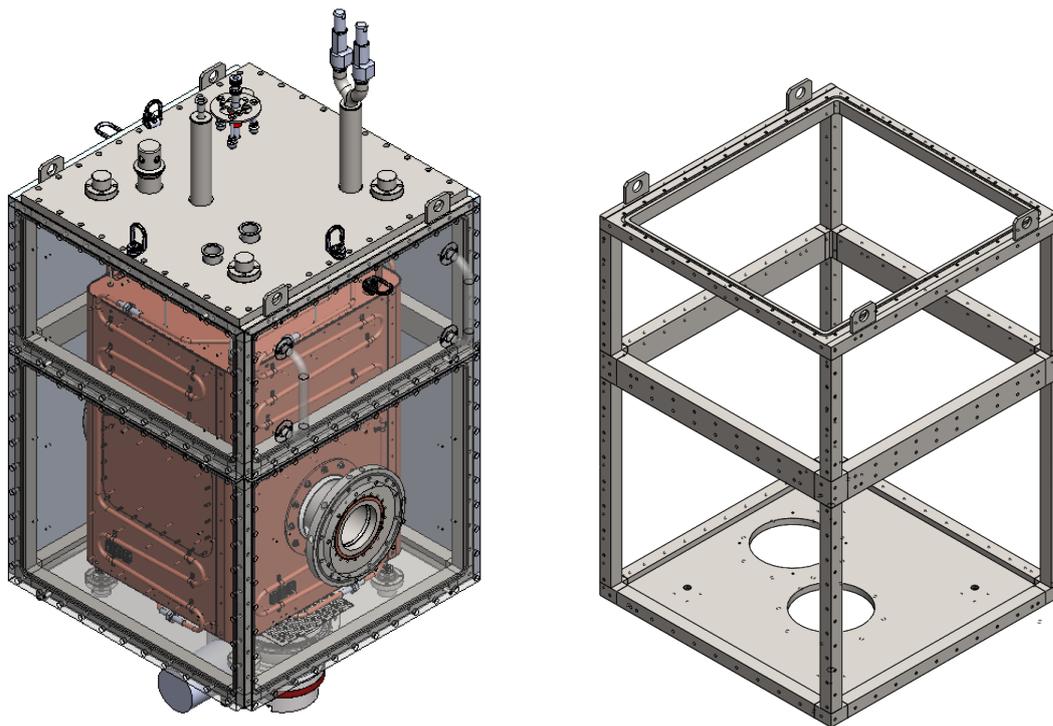


Abbildung 19: Vakuum-Behälter, links: in der Gesamtbaugruppe, rechts: einzeln

2.3.1 Berechnung

Die Berechnung erfolgt aufgrund der Außendruckbelastung von 1 bar infolge des Vakuums im Behälter. Die FEM-Ergebnisse zeigen in Strahlrichtung (siehe Abbildung 20) maximale Werte von 0,25 mm und quer zur Strahlrichtung (siehe Abbildung 21) von 0,59 mm. Damit wird der Behälter als praktisch zulässig eingestuft.

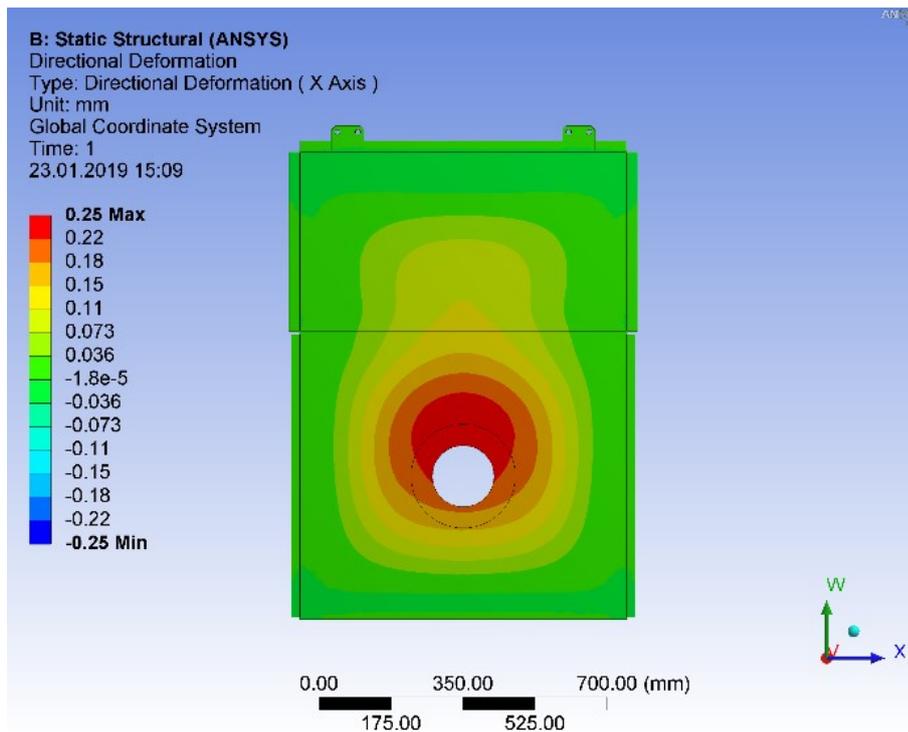


Abbildung 20: Verformung des Vakuumbehälters in Strahlrichtung

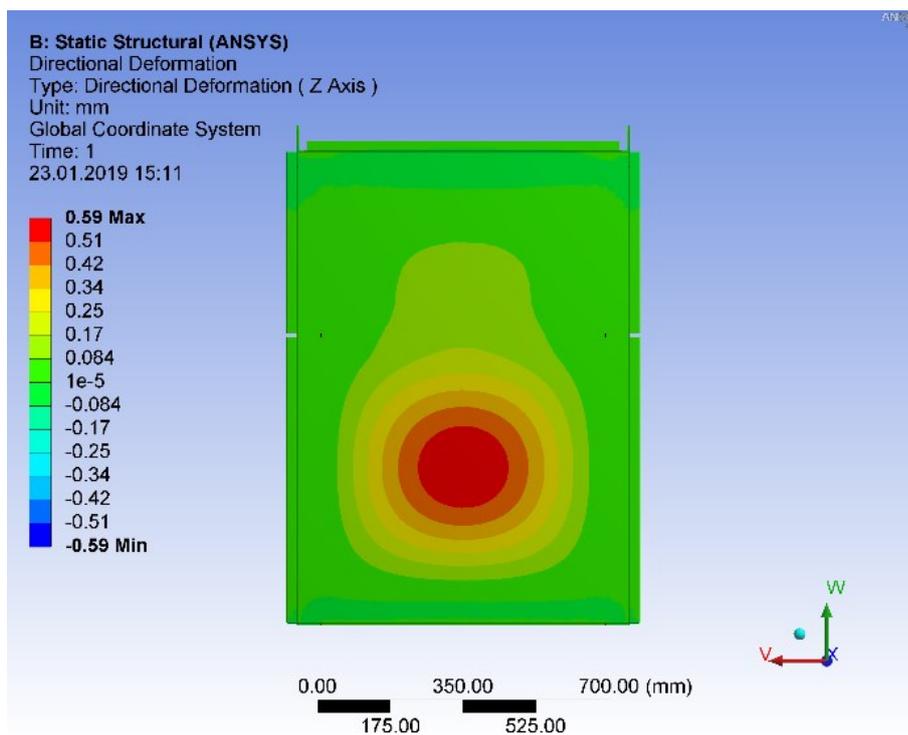


Abbildung 21: Verformung des Vakuumbehälters quer zur Strahlrichtung (rechts)

2.3.2 Verbindungen der Stahlstreben

Die Stahlstreben (38 x 38 und 38 x 80) werden über eine Zapfenform (siehe Abbildung 22) ineinander gesteckt und anschließend verschweißt.

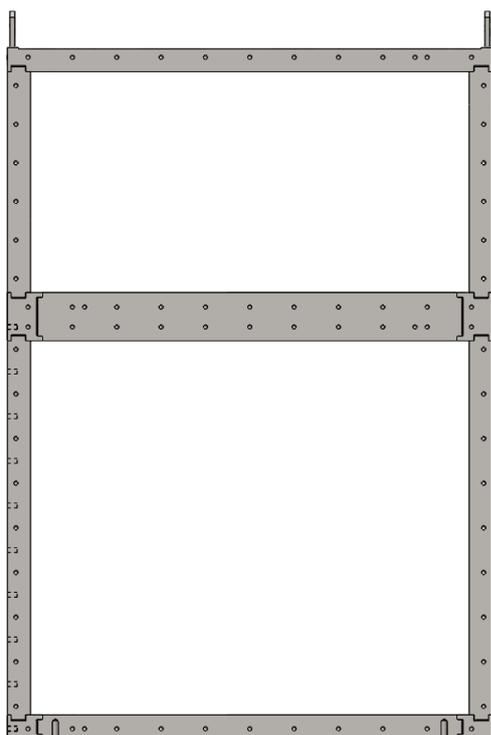


Abbildung 22: Formschlüssige Verbindungen zwischen den Profilen

2.3.3 UHV-Rohr

Das UHV-Rohr ist mit einem Durchmesser von DN130 (Rohrinnendurchmesser: 123,2 mm) konstruiert. Die Abweichung zur Spezifikation (DN150) ist aufgrund des vom AG verwendeten Detektors mit einem Innendurchmesser von 250 mm und den resultierenden Randbedingungen von Helium-Rohr und Thermischem Schild entstanden. Die Übergabe zum CRYRING-Strahlrohr auf den Durchmesser DN150 erfolgt über einen Spezialflansch, der zusätzlich gekühlt werden kann (siehe Abbildung 23). Die Anschlüsse für die Kühlung sind mit M8x1 Innengewinde vorgesehen.

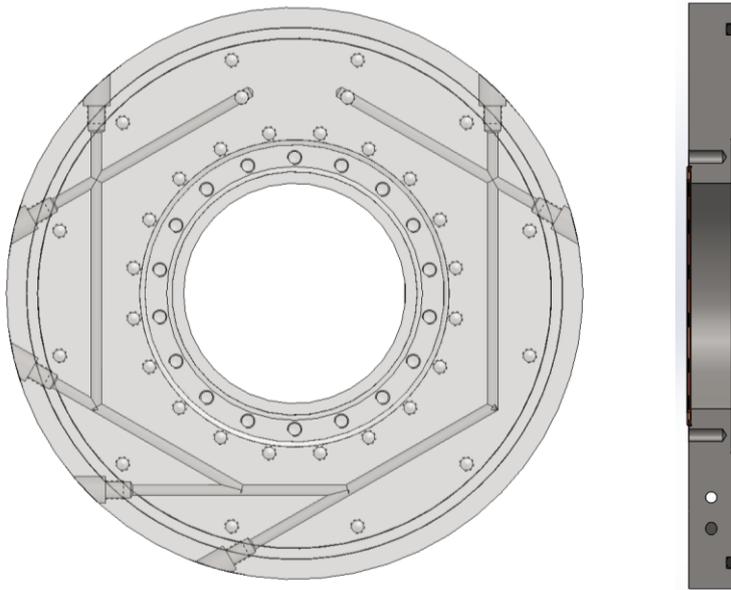


Abbildung 23: Spezialflansch, links: Ansicht mit Kühlung, rechts: Schnittansicht

Weiterhin besteht die UHV-Rohrbaugruppe aus einer Keramik zur Unterdrückung von Spiegelströmen, einem Wellbalg zur Kompensation der Bewegung der angrenzenden Teile, der Rohrleitung dazwischen und zwei CF-Flanschen (einer starr und einer drehbar geteilt). Die Keramik (FRIALIT F99,7) mit einem Übergang aus Ni42/1.3917 auf Edelstahlrohr ist zur Fertigung bei der Firma FRIATEC vorgesehen. Dafür liegt ein Angebot inkl. der Herstellung der Rohrbaugruppe unter Beistellung des Wellbalgs von der Firma FLEXOMAT vor. Der Wellbalg aus 1.4404 ist für einen axialen Hub von ± 11 mm bei einer axialen Federrate von 144 N/mm² ausgelegt. Diese Baugruppe (1-130-02-3100-00_A) ist in der Länge mit einem Übermaß von mindestens 0,5 mm und höchstens 1,0 mm toleriert, um eine Druckbelastung auf die Keramik in jedem Betriebsfall zu gewährleisten.

Die Baugruppe ist zur Montage einseitig mit dem starren CF-Flansch, mit dem Spezialflansch und dem Aluminium-Fenster inkl. 20 Lagen MLI vorzumontieren. Dieser Baugruppenteil wird dann durch die bestehende Baugruppe von Helium-Behälter und thermischen Schild durchgesteckt und auf der anderen Seite mit dem Reduzierflansch und dem Aluminium-Fenster verbunden (siehe Abbildung 24).

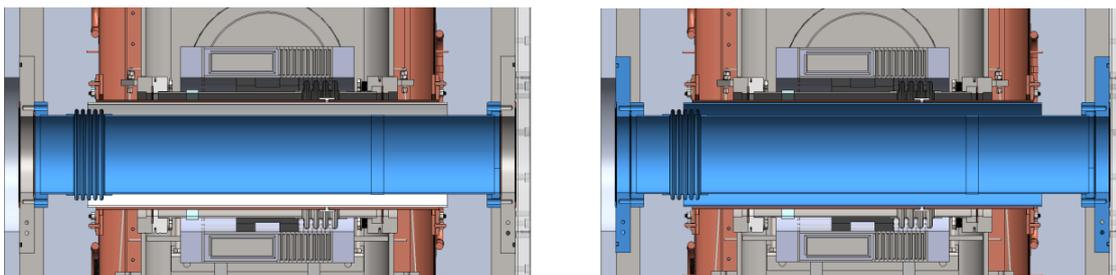


Abbildung 24: Übergabe UHV-Rohr, links: an Reduzierflansch, rechts: an Al-Fenster

2.3.4 Durchführungen am Deckel

Folgende Durchführungen sind im Deckel umgesetzt:

- 1x Überdruckabsicherung des Vakuumbehälters DN50 KF (1)
- 1x Überdruckabsicherung des Helium-Behälters DN25 (2)
- 1x Helium-Eintritt DN16 KF (3)
- 1x Helium-Austritt DN16 KF (4)
- 1x Messtechnik Helium-Behälter DN25 KF (5)
- 2x Messtechnik Vakuumbehälter DN40 KF (6)
- 4x Verstärkung Helium-Behälter (7)

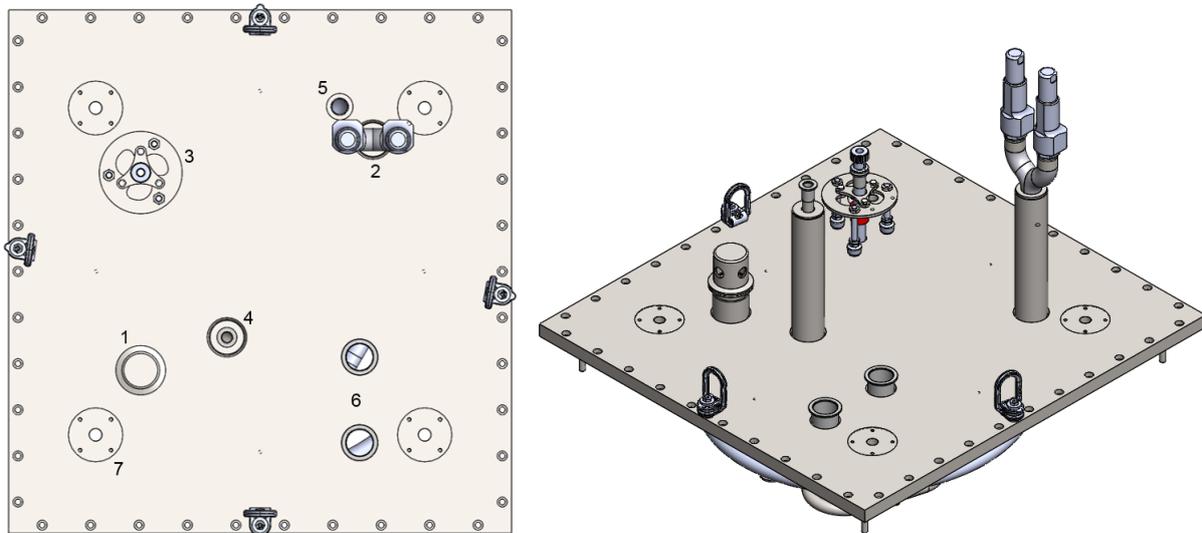


Abbildung 25: Durchführungen am Vakuumdeckel; links: Ansicht oben; rechts: Ansicht isometrisch

Die Überdruckabsicherung des Vakuumbehälters erfolgt mit einem Stopfen der Firma JAKOB Vakuumtechnik, der über einen Kleinflansch montiert wird. Die Auslegung dafür ist in Abschnitt 4.5 beschrieben. Die Überdruckabsicherung des Helium-Behälters wird über eine DN25 Leitung durch den Deckel in einem 200 mm langen DN40 Dom geführt. Zwei Sicherheitsventile der Firma HEROSE sind über einen Verteiler an diese Leitung geschraubt. Der Flüssighelium-Eintritt ist für einen Heber d12 über einen DN16 KF Anschluss schwingungsisoliert konstruiert. Die acht Titan-Haltestreben des Heliumbehälters (vier oben – vier unten) werden an den warmen Enden in der Deckel- als auch in der Bodenplatte verschraubt und können von außen im nicht evakuierten Zustand verstellt werden (siehe Abbildung 26).

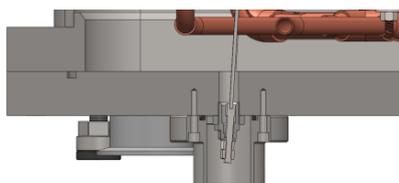


Abbildung 26: Befestigung der Titan-Haltestreben am Vakuum-Behälter

Die Kabel der ILK-Messelektronik 5x Temperatursensor und 1x Füllstand werden im Helium-Behälter am vorgesehenen Austritt (d25) auf einer Platine zusammengeführt, thermisch kontaktiert und mit einem Kabel über den vorgesehenen flexiblen Schlauch (d25) zum Vakuumdeckel geführt. Zusätzlich wird das Kabel der SQUID-Messelektronik (kann thermisch auch mit auf die Platine geklemmt werden) über den gleichen flexiblen Schlauch (d25) zum Vakuumdeckel geführt. Dort wird über ein T-Stück die ILK-Messleitung auf der einen Seite (über einen Stecker im Blinddeckel - Panel Mounted Receptacles D Body Style 105 von Fischer Connectors 27 Pins) und die SQUID-Messleitung auf der anderen Seite herausgeführt.

2.3.5 Durchführungen am Boden

Für den Anschluss der Vakuumpumpe ist an der Bodenplatte ein DN200 ISO-K Flansch vorgesehen. Für die zusätzliche Nutzung eines Kühlers besteht für den Kaltkopf „GM Coldhead 250MD“ eine weitere Anschlussmöglichkeit (DN200 ISO-K) in der Bodenplatte.

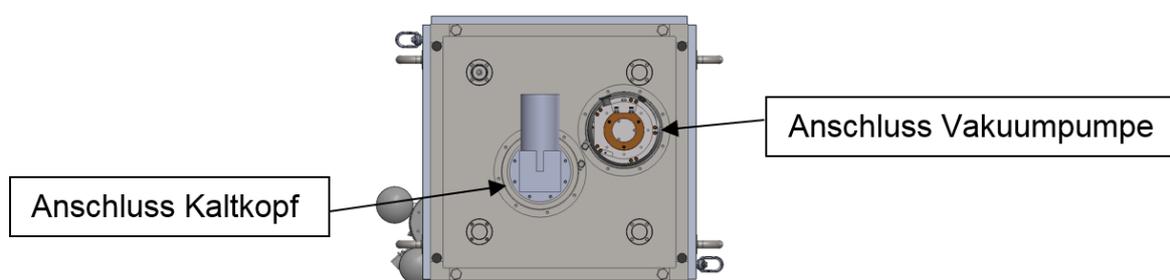


Abbildung 27: Bodenansicht Vakuumbehälter

2.3.6 Füße

Der Kryostat wird auf vier Gummifüßen aus Naturkautschuk, die für die Masse von 1 t ausgelegt sind, aufgestellt. Die Höhenverstellbarkeit wird über eine M20 Gewindestange zwischen Fuß und Kryostat-Boden ermöglicht. Der AG hat die Festlegung „Maschinenfuss SFE mit Dämpfung“¹ getroffen.

¹ https://www.schwaderer.com/products/maschinenfuss_sfe50_mit_daempfung; abgerufen am 05.03.2019

2.3.7 Revisionsöffnungen

Für Revisionszwecke können alle acht seitlichen Aluminiumfenster abgenommen werden. Entsprechende Hebe- und Haltevorrichtungen sind vorgesehen (siehe Abbildung 28).

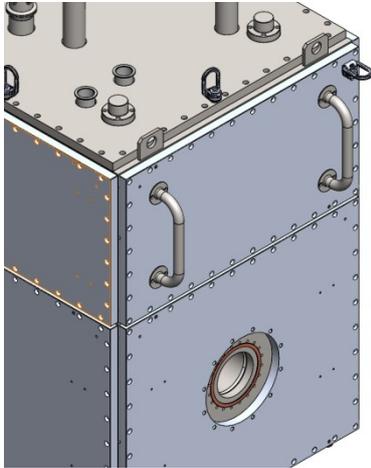


Abbildung 28: Hebe- und Haltevorrichtungen am Vakuumbehälter

2.3.8 Typenschild

Angaben zum Typenschild werden vom AG noch vorgegeben bzw. bestätigt. Für die Position des Typenschildes sind zwei Vorschläge in der Abbildung 29 zu sehen. Einer oder beide Vorschläge können umgesetzt werden.



Abbildung 29: Position Typenschild / zwei Möglichkeiten

2.4 System-Komponenten

2.4.1 LHe-Level-Sensor

Zum Einsatz kommt ein Standard-AMI-Flüssigheliumsensor², G-10 (GFK), mit einem Außendurchmesser von 1/4" (6,4 mm), einer aktiven Länge von 26" (ca. 660 mm). Die Leitungslänge von 1 m ist ausreichend für eine S-förmige Führung in der anschließenden, flexiblen Rohrleitung bis zum Deckel. Eine passende Halterung im LHe-Behälter ist konstruktiv vorgesehen (siehe Abbildung 30).

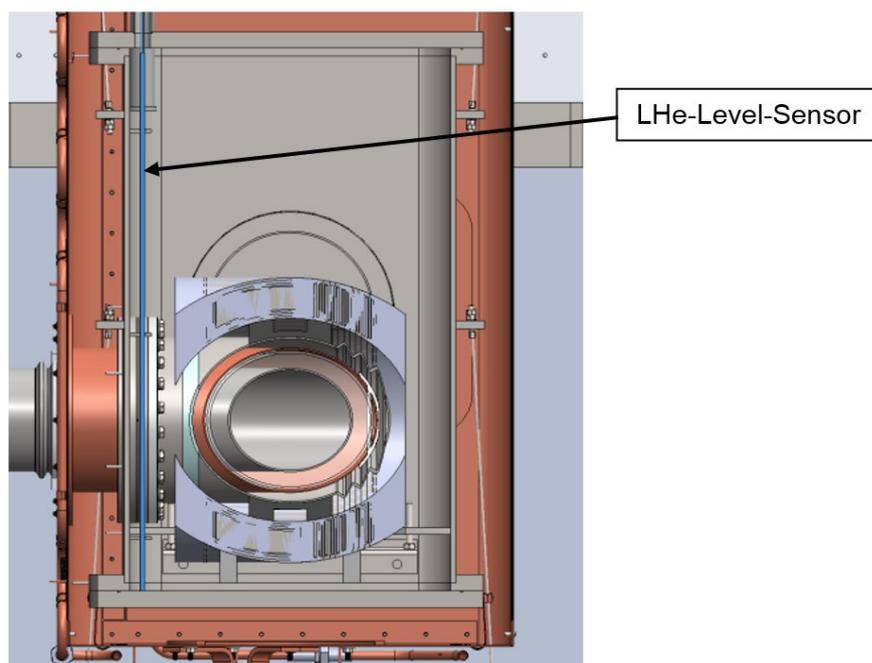


Abbildung 30: LHe-Level-Position im He-Behälter (blau markiert)

2.4.2 Position LHe-Heber

Der Heber vom vorgesehenen Rückverflüssiger mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Länge von 600 mm ragt in der bestehenden Konstruktion 60 mm in den Helium-Behälter hinein (siehe Abbildung 31).

² <http://www.americanmagnetics.com/hesensors.php>

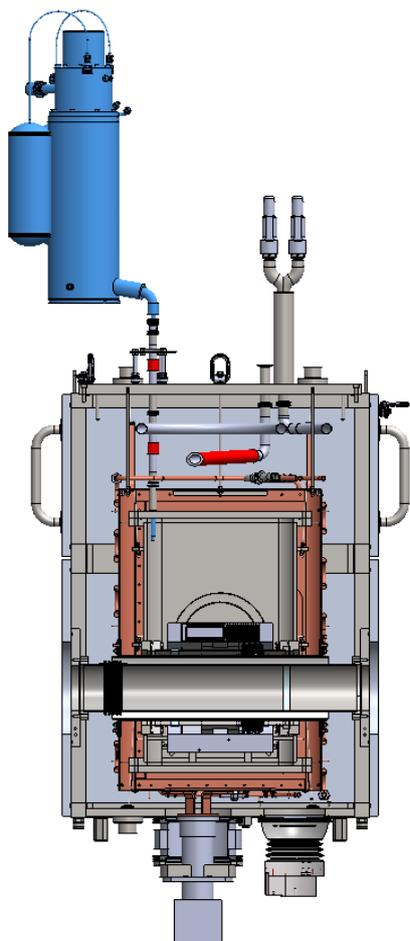


Abbildung 31: LHe-Heber vom Rückverflüssiger (blau markiert)

2.4.3 Temperatur-Sensoren

Im Helium-Behälter (T1 bis T5) als auch im Vakuum-Behälter (T6 bis T10) werden Kohle-Widerstände (carbon sensors (TVO)³; SCBccs04 Carbon Ceramic Sensor D 4.2K-375K) zur Temperaturmessung (siehe Abbildung 32) verbaut.

³ <https://www.cryoandmoreshop.de/products/thermometry/carbon-ceramic-sensors/>

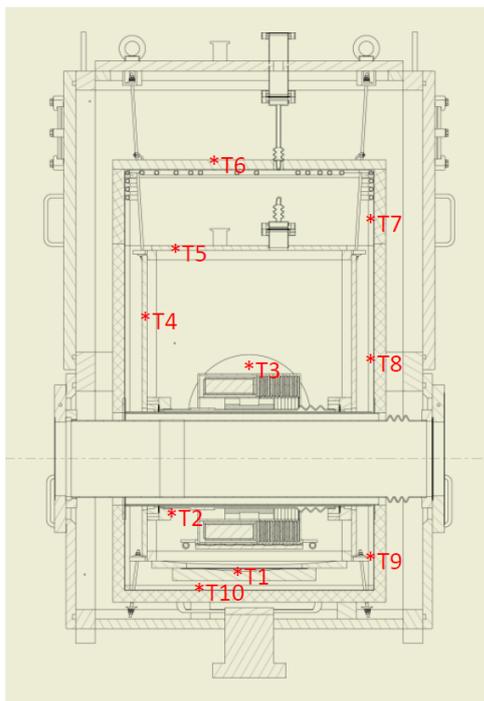


Abbildung 32: Temperatur-Sensoren laut Spezifikation

Die Temperatursensoren werden in eine Kupferbohrung \varnothing 2.5 mm eingeklebt. Die Sensorkabel werden als „Kupfer-Bronze doppelt verdreht“ ausgeführt und an geeigneten Stellen abgefangen.

2.4.4 Auslesemodul

Das Auslesemodul für die ILK-Sensoren ist in einer Box mit einer Größe von ca. L200xB100xH50 mm ohne Bildschirm, spritzwasserdicht aufgebaut. Als Schnittstelle ist RS485 mit Modbus RTU vorgesehen. Modbus RTU ist ein RS485 Industriestandard und wird von allen Rechnern und PLC (SPS) unterstützt. Es ist ein RS485 basierendes Bussystem mit bis zu 250 Teilnehmern und der Möglichkeit eine Kabellänge $>$ 100 m umzusetzen. Es ist ein serieller Bus und kann damit auf jede serielle Schnittstelle adaptiert werden (auch USB). Es können auch Umsetzer für Ethernet erworben werden. Das Temperatúrauslesemodul kann auf bis zu 80 Sensoren erweitert werden. Die Stromversorgung beträgt 24 V DC. Eine Auslesemöglichkeit (Software) kann bei Bedarf am ILK angefragt werden.

2.4.5 Multi Layer Insulation

Zur Strahlungsisolation kommt Multi Layer Insulation (MLI) von der Firma RUAG zum Einsatz. Im Bereich des Strahlrohrs wird die Variante „Coolcat 2 NI“ (nichtinduktiv) und im übrigen Bereich die Variante „Coolcat 2 NW“ verwendet. In der Konstruktion sind am äußeren Helium-Behälter 30 Lagen MLI und am äußeren thermischen Schild 20 Lagen MLI vorgesehen. Die Berechnungen dazu sind in Abschnitt 4.1 und 4.2 beschrieben. Die Spezifikationen der MLI

sind zu beachten. Im Bereich des Strahlrohrs ist die MLI sowohl am Helium-Rohr, als auch am thermischen Schild an einer Stelle zu trennen und mit Kapton-Klebeband zu verbinden.

3 Montage- und Demontageanleitung

3.1 Helium-Rohr

Die Baugruppe ist in folgender Reihenfolge zu montieren:

1. Komprimierung über eine Montagevorrichtung,
Vorsicht – die Keramik darf keine größeren Kräfte erfahren!
2. Führen der Baugruppe von unten oder von oben in den Behälter,
3. Ablegen und Ausrichten der Baugruppe auf der GFK-Aufnahme,
4. Platzieren der Kupfer-Dichtungen,
5. Lösen der Montagevorrichtung und
6. Festziehen der Schrauben.

In Abhängigkeit der Länge des Messsystems muss für die Schraubenmontage das SQUID auf dem Helium-Rohr verschoben werden.

3.2 Helium-Behälter

Nachdem das Helium-Rohr mit der SQUID-Messtechnik im Helium-Behälter installiert ist, kann der Füllstandsensoren und die Temperatursensoren positioniert und die Kabel über den DN25 KF Stutzen herausgeführt werden. Danach wird der Behälter mit Boden und Deckel über jeweils eine Indium-Schnur dicht verschlossen und verschraubt. Anschließend wird der Behälterdeckel mit 30 Lagen MLI ummantelt.

3.3 Helium-Behälter am Vakuumdeckel

Zur weiteren Montage werden die vier oberen Titanstäbe mit dem Heliumbehälter verbunden und das obere Kupfer-Blech vom thermischen Schild über die Titanstäbe gefädelt. Dann kann der Helium-Behälter über die Titanstäbe an dem Deckel des Vakuumbehälters aufgehängt werden.

3.4 Thermisches Schild

Zur weiteren Montage des thermischen Schildes ist die Montageanleitung auf der Zeichnung „1-130-02-5000-00“ zu beachten. Anschließend ist die Ausrichtung von Helium-Behälter und thermischen Schild zum Vakuumdeckel durchzuführen (siehe dazu Zeichnung „1-130-02-7000-00“). Die Montage ist ohne Kran möglich.

3.5 Vakuumbehälter

Anschließend kann die Montagebaugruppe „1-130-02-7000-00 in die Rahmenbaugruppe „1-130-02-1100-00“ inkl. O-Ring-Schnur gehangen werden. Weitere Montageschritte sind auf der Gesamtbaugruppenzeichnung „1-130-02-0000-00“ vermerkt.

Bei der Montage vom UHV-Rohr ist äußerste Vorsicht geboten. Die Keramikverbindung darf keine größeren Kräfte erfahren.

4 Berechnungen

4.1 Thermische Berechnungen – Wärmelast (Helium-Behälter)

Die gesamte Designüberlegung basiert auf der Minimierung des Flüssigheliumverbrauchs. Der Ansatz basiert auf 14 Litern Flüssighelium (LHe) pro Tag. Die Leistungsreserven des Verflüssigers (ATL-160) liegen nach den mit dem AG besprochenen Daten bei bis zu 22 Liter pro Tag.

Tabelle 2 zeigt die relevanten Wärmeeinträge in den Helium-Behälter unter Berücksichtigung der thermischen Anker bei 76 K an den entsprechenden Elementen. In Abhängigkeit der selbstregelnden Temperatur des thermischen Schildes können auch höhere Wärmelastwerte auftreten.

Tabelle 2: Relevante Wärmeeinträge in den Helium-Behälter

Element	Heat load [W]
Holders He-vessel 8 x TiAl6V4, M3, total length 0,39 m	0.04
Pipes	0.06
LHe filling tube	0.1
Other peripherals (instrumentation, SQUID, sensors) - assumption	0.13
Thermal radiation helium vessel	0.01
Total heat load into the He vessel	0.34
Evaporation rate LHe	~14 liter/day

Thermische Berechnungen im Detail (Helium-Behälter):

 HOLDERS:

8x - TiAl6V4

Diameter:	3 mm
Total length:	0.39 m
Active length to the helium vessel (l):	0.3 m
Area (A):	7.07E-06 m ²
$\int_4^{76} \lambda dT$ (heat conduction integral):	213 W/m

$$\dot{Q} = 8 \cdot \frac{A}{l} \cdot \int_4^{76} \lambda dT = 0,04 \text{ W}$$

heat load: 40 mW

 PIPES:

a) gas cooling exhaust (between end of thermal shield and IVC lid)

Material:	stainless steel
Dimension:	KF 16
Diameter:	16 mm
Thickness:	0.2 mm
Total length:	0.45 m
Active length:	0.36 m
$\int_4^{76} \lambda dT$ (heat conduction integral):	317 W/m
Heat load:	<u>9 mW</u>

b) LHe filling

Material:	stainless steel
Dimension:	KF 25
Diameter (flex line):	20 mm
Thickness:	0.18 mm
Total length (pulled):	0.25 m (stainless steel range)
$\int_4^{76} \lambda dT$ (heat conduction integral):	317 W/m
Heat load:	<u>15 mW</u>

The thermal decoupling to the lid of the vacuum vessel is designed with a GRP pipe (80 mm length, thickness 1.5 mm).

c) Sensors pipe (levelmeter, SQUID, temperature)

Material:	stainless steel
Dimension:	KF 25
Diameter:	25 mm
Thickness:	0.2 mm
Total length:	0.7 m
Active length:	0.36 m
$\int_4^{76} \lambda dT$ (heat conduction integral):	317 W/m
Heat load:	<u>14 mW</u>

d) Safety line

Material:	stainless steel
Dimension:	DN25
Diameter:	25 mm
Thickness:	1 mm
Total length:	1.7 m
Active length:	1 m
$\int_4^{76} \lambda dT$ (heat conduction integral):	317 W/m
Heat load:	<u>26 mW</u>

e) Helium transfer inlet tube

Heat load assumption:	<u>100 mW</u>
-----------------------	---------------

f) other peripherals

(heater, SQUID, instrumentation)

Heat load assumption:	<u>130 mW</u>
-----------------------	---------------

g) Thermal radiation

Area:	2 m ²
-------	------------------

The thermal radiation can be calculated according to the following equation:

$$\dot{Q} = \frac{A \cdot e \cdot \sigma \cdot (T_W^4 - T_C^4)}{2(n + 1)}$$

For simplification, it is assumed, that the surfaces have the same emissivity e and the adjacent surfaces (A) have the same values.

σ (Stefan-Boltzmann-Constant):	5.67E-08 W/m ² K ⁴
T_W (warm surface):	76 K
T_C (cold surface):	4.5 K
n :	number of layers of superinsulation (MLI), 30

Limitation for the $(\frac{1}{2(n+1)} \cdot e)$ term, as a practical value, based on our experience, for

aluminized MLI: 0.003

Total radiation heat load: 10 mW

Zusammenfassend wird eine Gesamtwärmebelastung von ca. 0.35 W auf dem LHe-Behälter erwartet.

Enthalpy of vaporization:	18 J/g
Evaporation rate:	0.02 g/s
Helium consumption:	~14 liter/day

4.2 Thermische Berechnungen – Wärmelast (Thermisches Schild)

Die folgenden Wärmeeinträge müssen für das thermische Schild berücksichtigt werden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Wärmelast, Thermisches Schild

Element	Heat load [W]
Thermal radiation (3 m ² , 20 layers MLI Coolcat 2 NW, 76 K)	2.25
Thermal radiation (0.32 m ² , 20 layers MLI Coolcat 2 NI, 76 K)	1.01
4x Holders (15 W/(mK); l=0,25 m; d=4 mm; dT=230 K)	0.7
Thermal anchors	1.3
Total heat load	6.0

4.3 Thermische Berechnungen – Gas Kühlung

Das verdampfende Helium wird zur thermischen Schildkühlung verwendet.

Heat capacity helium:	5.2 J/g K
Mass flow helium:	0.02 g/s
Inlet temperature:	20 K
Outlet temperature:	120 K
ΔT :	100 K
\dot{Q}_{\max} (possible):	10.1 W
Shield Temperature (average value):	76 K
Heat transfer coefficient:	5.3 W/m ² K ⁴
Inner diameter (cooling pipe):	10 mm
Outer diameter (cooling pipe):	12 mm
Length (cooling pipe):	~20 m
ΔT (gas/cooling pipe):	2.1 K
Heat transfer (gas → pipe):	7 W

Die Konfiguration DN10 ist sinnvoll dimensioniert, damit der Abgasstrom die anfallende Wärmelast des thermischen Schildes aufnehmen kann. Der Vergleich zu Konfiguration DN15 kann nur über die geringere Strömungsgeschwindigkeit im Rohr und ein damit abgeleiteter, kleinerer

⁴ <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1501/1501.07153.pdf> (Stand 14.02.2019)

Wärmeübergang zwischen Gas und Rohrleitung geführt werden. Die Entscheidung für eine Abgaskühlung in Ausführung DN10 resultiert daher zum einen aus einer höheren Strömungsgeschwindigkeit im Rohr (DN15 mit 0.2 m/s; DN10 mit 0.4 m/s), was einen besseren Wärmetransport gewährleistet, und zum anderen aus einer signifikant besseren Fertigung der Konfiguration DN10. Der Druckverlust der Leitung der Gaskühlung (innerhalb des Kryostaten) ist in Tabelle 4 dargestellt (ohne Bogenelemente) und beträgt ca. 0.5 mbar. Im Vergleich dazu ist in der Leitung (14 m) in Ausführung DN15 ein Druckverlust von 0.1 mbar zu erwarten.

Tabelle 4: Druckverlustberechnung⁵ der Rohrleitung für Abgaskühlung (DN 10)

Berechnungsausgabe	
Fördermedium:	Helium Abgas / gasförmig
Massenstrom:	0,073 kg/h
Dichte:	0,64 kg/m ³
Dynamische Viskosität:	8 · 10 ⁻⁶ Pa s
Rohrleitungselement:	Kreisrohr
Elementabmessungen:	Rohrdurchmesser D: 10 mm Rohrlänge L: 20,2 m
Strömungsgeschwindigkeit:	0,4 m/s
Reynolds-Zahl:	323
Strömungsgeschw.2:	-
Reynolds-Zahl 2:	-
Strömungsform:	laminar
Rohrrauigkeit:	0,03 mm
Rohrreibungszahl:	0,2
Zeta-Wert:	400,58
Zeta-Wert abzw.Rohr:	-
Druckv. abzw.Rohr:	-
Druckverlust:	0,73 mbar 0 bar

Die Bögen der Leitung der Gaskühlung werden mit 0.4 mbar abgeschätzt. Weitere Abschätzungen zum Druckverlust innerhalb der Peripherie zum ATL160 sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Abschätzungen zum weiteren Druckverlust in der Peripherie zum ATL160 in Abstimmung mit GSI

Abschnitt	Druckabfall [mbar]	Temperatur [K]
Höhendifferenz (2 m)	0.10	100
Rohrleitung Kryostat -> Verflüssiger (1 m, 6.5 mm)	0.35	200
Verengungen (65 mm, 4.5 mm)	0.08	200
Ventil (10 mm, 2 mm)	0.25	200
Summe	0.78	

Sollte an der Peripherie zum ATL160 kein Ventil verbaut sein (siehe Tabelle), dann reduziert sich der Druckverlust um 0.25 mbar.

⁵ <http://www.druckverlust.de/>

Insgesamt wird ein Druckverlust von 2 mbar für die gesamte Abgasstrecke angenommen.
Die Helium-Eintrittsleitung (LHe-Heber) muss für die Funktion der Helium-Rückverflüssigung über den ATL160 einen entsprechend höheren Druckverlust aufweisen.

4.4 Thermische Berechnungen – Thermische Anker

a) Pipes

Total calculated heat flow: 2 W

Thermal connection

Material: Copper
 Cross-section: 50 mm²
 Length: 200 mm
 ΔT : 6 K
 Heat conductivity @ 76 K : 520 W/m K (theoretical value)
 → after soldering ~350 W/m K
 Heat flow: 0.5 W (ok)

→ Four connecting elements from the thermal shield to the pipes are necessary!

b) TiAl6V4 support rods for the helium vessel

Total heat flow: 0.9 W (for 8 pieces)

Thermal connection

Material: Copper
 Heat flow per unit: max. 0.15 W
 Cross section: 30 mm²
 Length: 300 mm
 ΔT : 6 K
 Heat conductivity @ 76 K : 520 W/m K (theoretical value)
 → after soldering ~350 W/m K
 Heat flow per unit: 0.21 W (ok)

4.5 Berechnungen der Sicherheitseinrichtungen

Sicherheitsventil - Berechnungen nach:

Kryobehälter – Sicherheitseinrichtungen zum Schutz vor Überdruck - Teil 3:

Bestimmung des erforderlichen Abflusses – Kapazität und Dimensionierung.

Diese Regel basiert auf den CGA-Dokumenten S-1.2 und S-1.3 und den Regeln CEN/TC 69.

Berechnung ohne Brandeinwirkung!

Berechnung des Sicherheitsventils für den LHe Behälter - mittlere Oberfläche: 2 m²

Berechnungen nach EN 13648 – 3.2.2:

Vakuumisolierte Behälter, Wärmedurchgang (Watt)

$$W_2 = (T_a - T) \times U_2 \sum A$$

With:

U_2 coefficient of heat transfer

$$U_2 = \frac{\lambda_2}{e_2}$$

λ_2 heat conductivity of the insulating material at atmospheric pressure, W m⁻¹K⁻¹

e_2 minimum thickness of the insulating material, m

$\sum A$ arithmetic average of the area of the insulating material of the vessel, m²

Heat conductivity of the MLI (multilayer insulation) at atmospheric pressure:

0.02 W/m K (see Frey, Haefer page 238, 1981)

For comparison: heat conductivity of air at atmospheric pressure: 0.0262 W/m K

Thickness of 30 layers MLI (type RUAG Coolcat):

9 mm practical thickness after installation (e. g. Coolcat from RUAG space company)

The pressure (1.4 bar) in the vessel is lower than the critical pressure (2.27 bar).

Vacuum loss, heat load:

$$W_2 = \frac{\lambda_{MLI}}{e_{MLI}} \cdot (90 \text{ K} - 4.5 \text{ K}) \cdot 2 \text{ m}^2 = 380 \text{ W}$$

He-leakage heat load:

Coupling of helium atmosphere to the MLI (average heat conductivity of helium

$\lambda = 0.113 \text{ W/m K}$ ⁶ between 80 K and 300 K):

$$W_2 = \frac{\lambda_{\text{He}}}{0,025 \text{ m}} \cdot (80 \text{ K} - 4.5 \text{ K}) \cdot 2 \text{ m}^2 = 683 \text{ W}$$

$$W_2 = \frac{\lambda_{\text{He}}}{0,105 \text{ m}} \cdot (300 \text{ K} - 4.5 \text{ K}) \cdot 2 \text{ m}^2 = 636 \text{ W}$$

⁶ <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

Berechnungen nach EN 13648 – 3.2.3:

Wärmedurchgang pro Zeit (Watt) durch Behälterhalterungen und Rohrleitungen zwischen den beiden Behältern im Schadensfall: ~30 W (assumption)

Berechnungen nach EN 13648 – 3.2.4:

Not to apply, no pressure generation evaporator.

Zusammenfassung:

Die Gesamtwärmebelastung für die Berechnung des Massenstroms beträgt nach obiger Abschätzung maximal 1 kW.

Nach der Arbeit von Lehmann und Zahn können bei Leckagen am He-Behälter bzw. durch Kondensationseffekte aber durchaus Wärmeeinträge im Bereich von kW/m² auftreten⁷.

Unter der Annahme von 1 kW/m² und einer Fläche von 2 m² entspricht dies 2 kW.

Um diesen Aspekt in der Auslegung zu berücksichtigen wird als Mittelwert zur Berechnung des Massenstroms für die Sicherheitseinrichtung 1500 W angenommen.

Bei Vernachlässigung von Brandeinwirkung sind keine größeren Wärmeeinträge zu erwarten.

Berechnungen des Massenstroms nach EN 13648 – 4.1:

Der Blow-Out-Druck p (1.3 bar) ist kleiner als der kritische Druck:

$$\dot{m} = 3.6 \times \frac{W}{L}$$

With:

L is the specific evaporation energy at blow out conditions in kJ kg⁻¹
 specific evaporation energy at 1.4 bar: 18.28 kJ/kg

$$\dot{m} = 3.6 \times \frac{1500 \text{ W}}{18.28 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 295 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

⁷ <http://inspirehep.net/record/1418755/files/LHE-Cryostats.PDF> (Stand 21.02.2019)

Regeln für den Einbau von Sicherheitseinrichtungen EN 13648 –5:

According to the AD 2000 the pressure loss in the pipe must not exceed 3 % of the differential pressures of the safety device (1.4 bar) and atmospheric pressure (1.0 bar). The loss of pressure inside the pipelines was calculated to be 12 mbar, see Tabelle 6.

Tabelle 6: Druckverlustberechnung innerhalb der Peripherie⁸

Druckverlust Online-Rechner	
Berechnungsausgabe	
Fördermedium:	Helium / gasförmig
Massenstrom:	295 kg/h
Dichte:	23,78 kg/m³
Dynamische Viskosität:	1,37 10 ⁻⁶ Pa s
Rohrleitungselement:	Kreisrohr
Elementabmessungen:	Rohrdurchmesser D: 25 mm Rohrlänge L: 1,7 m
Strömungsgeschwindigkeit:	7,02 m/s
Reynolds-Zahl:	3046275
Strömungsgeschw. 2:	-
Reynolds-Zahl 2:	-
Strömungsform:	turbulent
Rohrrauigkeit:	0,03 mm
Rohrreibungszahl:	0,02
Zeta-Wert:	1,4
Zeta-Wert abzw.Rohr:	-
Druckv. abzw.Rohr:	-
Druckverlust:	12,37 mbar 0,01 bar

Berechnung des erforderlichen Querschnitts von Sicherheitsventilen nach AD 2000

→subcritical pressure relation

$$\frac{p_a}{p_0} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$A_0 = \frac{q_m}{\psi \cdot \alpha_w \sqrt{2 \frac{p_0}{v}}}$$

$$\psi \approx \sqrt{\frac{k}{k-1}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_a}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_a}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}}$$

k :	isentropic exponent	1.75
p_a :	back pressure	0.10 MPa
p_0 :	vessel pressure	0.14 MPa
q_m :	mass flow	0.08 kg/s
v :	specific volume	0.042 m³/kg
ψ :	function of discharge	0.46
α_w :	coefficient of discharge	0.5 (type 06316)
A_0 :	necessary cross section	139.16 mm²

⁸ <http://www.druckverlust.de/>

Zusammenfassung:

Zwei HEROSE Sicherheitsventile vom Typ 06316.1004.N020 (78.5 mm²: freier Querschnitt je Ventil) sind vorzusehen. Sie müssen auf einen Ansprechdruck von 0.4 bar_g für Heliumgas bei 300 K eingestellt werden.

Überdruckventile für den Vakuumbehälter

Vessel volume:

867 litres

According to CGA S-1.3 and EN 13458-2 the jacket of the containers (vacuum) shall be protected by a suitable PRD (pressure release devices) to release internal pressure. The total discharge area of vacuum jacket relief devices on a container shall be at least $0.3414 \text{ mm}^2/\text{kg}$ of water capacity of the container (minimum DN10).

The vacuum vessel should be equipped with one pressure relief valves DN50 KF from comp. Jakob Vakuumtechnik (see Abbildung 33, response pressure $< 0.5 \text{ bar}$) but without self-actuating close behaviour.

During the operation of the CCC cryostat gases can aggregate on cold surfaces. During warm-up of the CCC cryostat, substantial amount of these gases will release into the vacuum volume. In order to keep the vacuum pressure, a suitable vacuum pump must be left running until complete warm-up.

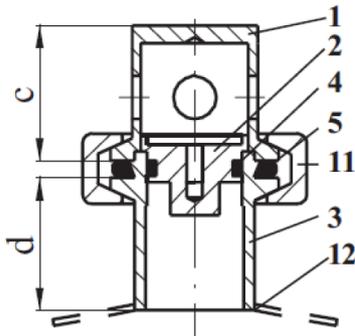


Abbildung 33: Vakuum-Druckbegrenzungsventil der Firma JAKOB Vakuumtechnik ⁹

⁹ http://www.jakobvakuumtechnik.de/downloads/katalog_5.pdf, Seite 2, 01.02.2019

4.6 Kältekontraktion – Kupfer-Rohr / Helium-Rohr

Die Kältekontraktion bei der Abkühlung von Helium-Behälter und thermischen Schild hat im Ergebnis die Verschiebung (siehe Tabelle 7) vom Kupfer-Rohr des thermischen Schildes zum Helium-Rohr des Helium-Behälters. Damit können die Baugruppen bei der Montage versetzt zueinander montiert werden und sind im Betriebszustand zentriert zum UHV-Rohr.

Tabelle 7: Berechnung Kältekontraktion Thermisches Schild / Helium-Behälter

Bauteil	Material	Länge	delta T	ADKoeff	delta L
(-)	(-)	(m)	(K)	(10 ⁻⁶ 1/K)	(mm)
Haltestab Schild	Edelstahl	0.25	112.5	12	0.34
He Behälter	Edelstahl	0.664	291	12	2.32
Abstand Ti Stabaufnahme He Behälter	Edelstahl	0.085	291	12	0.30
Abstand Ti Stabaufnahme Strahlrohr	Edelstahl	0.371	291	12	1.30
Pos. CU Rohr rel. Oberkante Schild	Kupfer	0.535	225	16.5	1.99
Boden zu Kopf CU Schild	Kupfer	0.815	225	16.5	3.03
Haltestäbe	Titan	0.34	112.5	8.6	0.33
Haltestäbe	Titan	0.12	33	8.6	0.03
Vergleich	Aluminium	0.5	225	23.1	2.60
Positionsberechnung, rel. Verschiebung (mm)					
Pos. CU Rohr - nach oben		2.32	um diesen Betrag ist das Cu-Rohr tiefer zu montieren		
Pos. Strahlrohr - nach oben		1.66	um diesen Betrag ist das He-Rohr tiefer zu montieren		

Für die Berechnung der Kältekontraktion der Haltestäbe des thermischen Schildes und des Helium-Behälters wurde ein linearer Verlauf im Stab angenommen und damit die für die Rechnung relevante Temperaturdifferenz halbiert.

5 Zusammenfassung

In diesem Bericht wurden die Hauptkomponenten Helium-Behälter, Thermisches Schild und Vakuumbehälter mit ihren Schnittstellen untereinander und zu angrenzenden Systemen in der Konstruktion beschrieben. Die Montage des Messsystems in den Helium-Behälter, die Montage des thermischen Schilds und die Montage des Vakuumbehälters wurden kurz erläutert und auf die Beschreibungen in den jeweiligen Baugruppenzeichnungen verwiesen. Des Weiteren wurden alle durchgeführten thermischen und strukturellen Berechnungen detailliert dargestellt und wie sie in die Konstruktion eingeflossen sind.

Auf der Basis im Zusammenhang mit dem 3D-Modell und den 2D-Zeichnungen ist der AG in der Lage das Design abschließend zu prüfen (FDR) und damit die weiteren Schritte in der Projektbearbeitung freizugeben.