Fachhochschule Köln
Institut für Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

Konstruktion von drei gewichtsoptimierten Kryostaten für die neue Dreifrequenz-Empfängerbox im Radioteleskop Effelsberg

Diplomarbeit

von Björn Hammen
aus Köln
Matr.Nr.: 11037133

Referent: Prof. Dr.-Ing. H.Hallmann
Korreferent: Dr. W. Schuh
Betreuer: Dr. R. Keller und Dipl.-Ing. U. Teuber

erstellt im Sommersemester 2006
eingereicht Ende August 2006

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne andere als die angegebenen Hilfsmittel erstellt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Textstellen und Abbildungen sind als solche kenntlich gemacht.

Bonn, den 18.08.2006

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen **VIII**

Vorwort **X**

1. Einleitung **1**

2. Projekt- und Komponentenbeschreibung **2**
2.1. Radioteleskop Effelsberg . . . 2
2.2. Empfangssysteme am Radioteleskop Effelsberg . . . 3
2.2.1. Primärfokus . . . 3
2.2.2. Sekundärfokus . . . 4
2.3. Die Empfängerbox . . . 5
2.4. Der Kryostat . . . 6
2.5. Das Strahlungsschild . . . 8

3. Grundlagen der Kryo- und Vakuumtechnik **9**
3.1. Kryotechnik . . . 9
3.1.1. Allgemein . . . 9
3.1.2. Die Refrigerator-Kryopumpe . . . 10
3.2. Wärmeübertragung . . . 12
3.2.1. Wärmeleitung über das Material . . . 12
3.2.2. Wärmestrahlung zwischen festen Oberflächen . . . 13
3.3. Vakuumtechnik . . . 16

4. Grundlagen der Konstruktion **19**
4.1. Die Software SolidWorks . . . 19
4.1.1. Allgemein . . . 19
4.1.2. Handhabung . . . 19
4.2. Die Software CosmosWorks . . . 21
4.2.1. Allgemein . . . 21
4.2.2. Grundstruktur der Analyse . . . 21
4.2.3. Verwendete Studientypen . . . 22

4.2.4. Schritte der angewandten Analysen . . . 23
4.3. Festigkeitsnachweis nach AD-Merkblätter und FE-Methode . . . 26
4.3.1. Geltungsbereich für AD-Merkblätter . . . 26
4.3.2. Berechnung gegen elastisches Einbeulen . . . 27
4.3.3. Berechnung gegen plastisches Verformen . . . 27
4.3.4. Festigkeitsberechnung am Beispiel des 300 K Rohres nach AD-Merkblätter . . . 28
4.3.5. Darstellung der FEM Berechnung und Vergleich . . . 30

5. Arbeitschritte im Konstruktionsprozess 32
5.1. Vorgehensweise . . . 32
5.2. Istzustand . . . 33
5.2.1. Beschreibung der Funktionen des Kryostaten . . . 34
5.2.2. Diskussion der zuvor eingesetzten Kryostaten . . . 34
5.3. Beschreibung des Sollzustandes . . . 36

6. Lösungskonzepte des dreifach Kryostaten 39
6.1. Werkstoffe . . . 39
6.1.1. Forderungen an die Werkstoffe . . . 39
6.1.2. Diskussion der Werkstoffe des Druckbehälter . . . 40
6.1.3. Diskussion der Werkstoffe des 70K Schildes . . . 42
6.2. Form und Gestalt . . . 51
6.3. Verbindungsmöglichkeiten zum Verschließen des Dewars . . . 58
6.4. Entwurf verschiedener Optionen mit Solid Works . . . 59
6.4.1. Konzipierungsmöglichkeiten des 21cm Kryostats . . . 59
6.4.2. Konzipierungsmöglichkeiten des 7mm Kryostats . . . 65
6.4.3. Konzipierungsmöglichkeiten des 3mm Kryostats . . . 68
6.5. Vergleich und Auswahl der verschiedenen Optionen . . . 71
6.5.1. Diskussion und Auswahl des 21cm Kryostaten . . . 71
6.5.2. Diskussion und Auswahl des 7mm Kryostaten . . . 73
6.5.3. Diskussion und Auswahl des 3mm Kryostaten . . . 74
6.5.4. Darstellung der vorentworfenen Kryostaten in der Empfängerbox 75

7. Konstruktion der ausgewählten Kryostaten und deren Anordnung in der Empfängerbox 76
7.1. Lösung zum Druckbehälter des 21cm Kryostats . . . 76

7.1.1. Beschreibung des äußeren Aufbaus des Kryostaten 76
7.1.2. Festigkeitsnachweis des 21cm Kryostaten mit Cosmos Works . . . 77
7.1.3. Festigkeitsanalyse von Oberkasten und Oberdeckel 78
7.1.4. Festigkeitsanalyse der Ringschraube 81
7.1.5. Festigkeitanalyse des 300 K Rohrs 86
7.1.6. Fesigkeitsanalyse des kompletten 21cm Kryostaten 88
7.2. Lösung zum 70K Schild des 21cm Kryostaten 91
7.2.1. Beschreibung des inneren Aufbaus des Kryostaten 91
7.2.2. Thermische Analyse der 70 Kelvin Bauteile des 21cm Kryostaten 94
7.2.3. Temperaturverlauf von AlMg 4,5 Mn 95
7.2.4. Temperaturverlauf von Al 99,5 97
7.2.5. Temperaturverlauf von Al99,5 mit einem 70K Rohr von 3mm Wandstärke 99
7.2.6. Diskussion der thermischen Analysen 99
7.3. Zusammenfassung der Ergebnisse des 21cm Kryostaten 100
7.4. Lösung des 7mm Kryostaten 101
7.5. Anordung der Kryostaten in der Empfängerbox 104

8. Messergebnisse **107**
8.1. Messaufbau 107
8.2. Grundlagen zur Leckratenbestimmung 108
8.3. Messung der Leckrate 108
8.4. Messung der Verschiebung 109

9. Zusammenfassung und Ausblick **111**

Literatur **112**

A. Anhang **114**
A.1. Auszüge aus den AD-Merkblättern 114
A.2. Datenblätter zu den Werkstoffeigenschaften von Al 99,0 122
A.3. Konstruktionszeichnungen 126

Abbildungsverzeichnis

1. Radioteleskop Effelsberg [16] . . . 2
2. Signaleingang am Teleskop [16] . . . 4
3. Primärfokus des Radioteleskop Effelsberg fotografiert aus einem der vier Stützbeine (Aufstieg zur Fokuskabine) . . . 5
4. Ansicht Empfängerbox mit Kryostaten . . . 7
5. Dampfdruckkurve für Kühlmittel [1] . . . 10
6. Refrigerator- Kryopumpe . . . 11
7. Zur Berechnung der Einstrahlzahl φ [4] . . . 15
8. Skizzenmodus . . . 19
9. Feature- und Modellansicht . . . 20
10. CosmosWorks Modus . . . 22
11. Vergleich der Spannung am 300K Rohr . . . 31
12. Werteanalyse Arbeitsplan [10] . . . 32
13. Kryostat . . . 33
14. Funktionendiagramm . . . 35
15. Wärmeleitfähigkeit AlMg 4,5 Mn (Linie 4) [6] . . . 44
16. Wärmeleitfähigkeit bei tiefen Temperaturen [8] . . . 44
17. Wärmeleitfähigkeit von OFE-Kupfer [17] . . . 46
18. E-Modul von OFE-Kupfer [17] . . . 46
19. Unidirektionale Schicht [21] . . . 48
20. Richtungsabhängigkeit von Faserverbundwerkstoffen [7] . . . 48
21. Emissionskoeffizienten bei verschiedenen Temperaturen [2] . . . 49
22. Hohlzylinder . . . 51
23. Hohlquader . . . 52
24. Kugel . . . 52
25. Hohlquader mit Außenradius . . . 53
26. 400er Würfel . . . 54
27. Tellerboden . . . 55
28. Flacher Deckel . . . 55
29. Flacher Deckel mit geforderter Wandstärke . . . 56
30. Flacher Deckel mit Einfräsungen . . . 57
31. Ansicht des Hohlleiters mit Verstärkern . . . 60
32. Darstellung Option 1-21cm Dewar . . . 61

33. Festigkeit Option 1 . . . 61
34. Ansicht Option 2-21cm Dewar . . . 62
35. Festigkeit Option 2 . . . 63
36. Ansicht Option 3-21cm Dewar . . . 64
37. Festigkeit Option 3 . . . 65
38. Ansicht Option 1-7mm Dewar . . . 66
39. Festigkeit Option 1-7mm Dewar . . . 66
40. Ansicht Option 2-7mm Dewar . . . 67
41. Festigkeit Option 2-7mm Dewar . . . 68
42. Ansicht Option 1-3mm Dewar . . . 69
43. Festigkeit Option 1-3mm Dewar . . . 69
44. Ansicht Option 2-3mm . . . 70
45. Festigkeit Option 2-3mm Dewar . . . 71
46. Vorentwurf der Empfängerbox mit den Kryostaten . . . 75
47. Ansicht des entgültigen 21cm Kryostaten . . . 78
48. Spannung von Oberkasten und Oberdeckel . . . 79
49. Verschiebung von Oberkasten und Oberdeckel . . . 79
50. Verschiebung von Seitendeckel (Darstellung mit ISO-Clipping) . . . 80
51. Sicherheit von Oberkasten und Oberdeckel . . . 80
52. Spannung von Oberdeckel und Ringschraube mit Außendruck . . . 82
53. Verschiebung von Oberdeckel und Ringschraube mit Außendruck . . . 82
54. Sicherheit von Oberdeckel und Ringschraube mit Außendruck . . . 83
55. Spannung von Oberdeckel und Ringschraube ohne Außendruck . . . 84
56. Spannung von Oberdeckel und Ringschraube ohne Außendruck mit ISO Clipping . . . 84
57. Verschiebung von Oberdeckel und Ringschraube ohne Außendruck . . . 85
58. Sicherheit von Oberdeckel und Ringschraube ohne Außendruck . . . 85
59. Spannung am 300K Rohr . . . 86
60. Verschiebung am 300K Rohr . . . 87
61. Sicherheit des 300K Rohrs . . . 87
62. Spannung Kryostat Ansicht 1 . . . 88
63. Spannung Kryostat Ansicht 2 . . . 89
64. Verschiebung Kryostat Ansicht 1 . . . 89
65. Verschiebung Kryostat Ansicht 2 . . . 90
66. Sicherheit Kryostat Ansicht 1 . . . 90

67. Sicherheit Kryostat Ansicht 2 91
68. Ansicht der 70K Bauteile des 21cm Kryostaten 92
69. Detailansicht Hohlleiterrohraufhängung 93
70. Detailansicht 70K Gehäuseabstützung 94
71. Thermische Analyse AlMg 4,5 Mn (Ansicht Unten) 95
72. Thermische Analyse AlMg 4,5 Mn (Ansicht Hinten) 96
73. Thermische Analyse AlMg 4,5 Mn (Ansicht Vorne) 97
74. Thermische Analyse Al 99,5 Unten 98
76. Themische Analyse Al 99,5 (Ansicht Vorne) 98
75. Thermische Analyse Al 99,5 (Ansicht Hinten) 99
77. Thermische Analyse bei erhöhter Wandstärke des 70K Rohres 100
78. Spannung des 7mm Kryostaten 102
79. Verschiebung des 7mm Kryostaten 103
80. Sicherheit des 7mm Kryostaten 103
81. Empfängerbox Vorder- und Hinteransicht 104
82. Empfängerbox Draufsicht 105
83. Empfängerbox Ansicht 4 und 5 105
84. Empfängerbox Ansicht 6, Kroyostat gekippt 106
85. Empfängerbox Ansicht 7, Kryostat gekippt 106
86. Messaufbau 107

Tabellenverzeichnis

1. Werkstoffvergleich für den Druckbehälter [20], [17], [15] 43
2. Vergleich von verschiedenen Aluminiumsorten [20], [14], [15] 45
3. Vergleich der Werkstoffe des 70K Schildes [20], [17], [14] 50
4. Vergleichswerte der verschiedenen Dewarformen 53
5. Vergleich des Tellerbodens mit dem flachen Deckel 56
6. Vergleich des flachen Deckels mit dem ausgefrästen Deckel 57
7. Vergleiche der 21cm Kryostaten 72
8. Vergleich der 7mm Kryostaten 73
9. Vergleich der 3mm Dewar 74
10. Überblick der Maße des 21cm Kryostaten 101
11. Überblick der Gewichte der Bauteile des 21cm Kryostaten 101
12. Verschiedene Einheiten für die Leckrate 108
13. Messergebnisse Leckratenmessung 109
14. Vergleich der Verschiebungsergebnisse 109

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Benennung
A	m^2, mm^2	Fläche
C_{12}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$	Strahlungsaustauschzahl
c_1	-	Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung
c_2	-	Abnutzungszuschlag
D	mm	Durchmesser
D_a	mm	Außendurchmesser Zylinderschale
D_i	mm	Innendurchmesser Zylinderschale
E	MPa, $N \cdot mm^{-2}$	Elastizitätsmodul
$\dot{E}$	$W \cdot m^{-2}$	Bestrahlungsstärke
F	N	Kraft
h	mm	Höhe
I	mm^4	Flächenträgheitmoment
K	MPa, $N \cdot mm^{-2}$	Festigkeitskennwert
L	mm	Länge
l	dm^3, Liter	Volumen
M	kg	Masse
n	-	Anzahl der Einbeulwellen, die beim Versagen auftreten können
p	bar, Pa, $N \cdot m^{-2}$	Druck
p_{abs}	bar, Pa, $N \cdot m^{-2}$	Absolutdruck
p_i	bar, Pa, $N \cdot m^{-2}$	Partialdruck
Δp	bar, Pa, $N \cdot m^{-2}$	Druckdifferenz
ql	$mbar \cdot l \cdot s^{-1}$	Leckrate
$\dot{Q}$	W	Strahlungsleistung, Wärmestrom
r	mm	Radius
r_i	mm	Innenradius
r_a	mm	Außenradius
S	-	Sicherheit
S_K	-	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen
s	mm	Verschiebung
s_e	mm	Wandstärke

T	Kelvin	Temperatur
T_a	Kelvin	Temperatur außen
T_i	Kelvin	Temperatur innen
u	%	Unrundheit von Zylinderschalen
w	mm	Durchbiegung
Z	-	Hilfswert zur Berechnung gegen elastisches Einbeulen
α	-	Winkelabweichung
β	-	Winkel senkrecht zur Strahlungsfläche
ϵ	-	Emissionskoeffizient, Dehnung
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	$kg \cdot dm^3$	Dichte
σ	MPa, $N \cdot mm^{-2}$	Spannung
σ_{RE}	MPa, $N \cdot mm^{-2}$	Streckgrenze
σ_{ist}	MPa, $N \cdot mm^{-2}$	vorhandene Spannung
φ_{12}	-	Einstrahlzahl

Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde zum Abschluss des Studiengangs Maschinenbau, Fachrichtung Konstruktionstechnik, mit der Vertiefungsrichtung Produktentwicklung, an der Fakultät für Anlagen-, Energie- und Maschinensysteme der Fachhochschule Köln geschrieben. Die Ausarbeitung erfolgte von Juni bis August 2006 in der Gruppe Hochfrequenztechnik am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn.

Ich bedanke mich an dieser Stelle bei allen Personen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. Ute Teuber und Herrn Dr. Reinhard Keller in organisatorischen und technischen Angelegenheiten.

Des Weiteren bedanke ich mich bei den Herren Dipl.-Ing. H.J. Wunsch, Dipl.-Ing. K. Müller, Dipl.-Ing. M. Nahlbach, P. Winkelmann, H. Kronenberg und G. Bestgen, die mir bei technischen und organisatorischen Fragen stets zur Seite standen.

Seitens der Fachhochschule Köln bedanke ich mich bei Prof. Dr.- Ing. H. Hallmann für die ständige Beratung und Betreuung während der Ausarbeitung.

Zum Schluss gilt mein ganz besonderer Dank meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht und mich während der gesamten Zeit unterstützt haben.

Bonn, den 16.08.2006

1. Einleitung

Das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn hat seine Hauptarbeitsgebiete im Bereich der Radio- und Infrarotastronomie. Die technologischen Entwicklungen beziehen sich damit auch auf die Erforschung neuer leistungsfähiger Empfänger. In der Arbeitsgruppe Hochfrequenztechnik hatte ich die Aufgabe, Neu- und Anpassungskonstruktionen für verschiedene Empfängerbehälter vorzunehmen, welche im zweitgrößten vollbeweglichen Radioteleskop der Welt in Effelsberg/ Eifel eingesetzt werden.

Radioastronomische Signale werden mittels empfindlicher Empfänger erkannt und ausgewertet. Damit dies möglich ist, müssen alle Empfänger in Kryostaten, auch Dewar genannt, untergebracht werden. Ein Kryostat ist ein Kühlbehälter, der mit Hilfe eines Refrigerators sehr niedrige Temperaturen erreichen kann. Dadurch können die Störsignale der elektronischen Bauteile im Kryostaten derart klein gehalten werden, dass ein Erkennen astronomischer Eingangssignale möglich wird.

Für den Einsatz im Teleskop müssen die verschiedenen Kühlbehälter in eine dafür vorgesehene Empfängerbox installiert werden. Die Box befindet sich im Primärfokus des Teleskops und ist aufgrund der festgelegten Maße der dortigen Aufnahmehülse in Durchmesser und Höhe vordefiniert. Bei einer bestimmten Stellung des Teleskopspiegels kann mit Hilfe eines Krans die Empfängerbox gewechselt werden. Allerdings ist dieser Vorgang sehr zeitaufwendig und hat stets einen Teleskopstillstand zur Folge. Um diesem Problem zu entgegnen kam man im Institut zu dem Entschluss die Anzahl der Empfänger in der Trägerbox zu erhöhen.

Meine Diplomarbeit beinhaltet die Ausstattung der Empfängerbox mit drei Empfangskryostaten verschiedener Frequenzen. Dadurch sollten längere Observationszeiten und weniger Umbaupausen erreicht werden. Aufgrund der festgelegten Nutzfläche in der Empfängerbox war eine an die Anforderungen angepasste Konstruktion der Kryostaten und eine optimale Platzierung dieser vorzusehen. Dabei galt es darauf zu achten, die Kryostaten möglichst leicht auszulegen. Möglichkeiten für Wartungsarbeiten sowie problemlose Montage und Demontage der Dewar waren zusätzlich erwünscht. Mit Hilfe eines 3-D CAD und eines FEM (Finite-Elemente-Methode) Programms wurden Festigkeitsnachweise und die daraus resultierenden Gewichtsoptimierungen einzelner Bauteile und Baugruppen durchgeführt.

2. Projekt- und Komponentenbeschreibung

Die folgenden Unterkapitel sollen dem Leser ein besseres Verständnis für die Aufgabenstellung geben. Das Teleskop und seine für die Diplomarbeit wichtigen Komponenten werden erläutert.

2.1. Radioteleskop Effelsberg

Das 100m-Radioteleskop ist das Hauptbeobachtungsinstrument des Max-Planck-Institutes für Radioastronomie. Es wurde in den Jahren 1968 bis 1972 von den Firmen Krupp/ MAN gebaut und in Effelsberg bei Bad Münstereifel errichtet. Inbetriebnahme war der 1.August 1972. Das Teleskop ist das zweitgrößte vollbewegliche Radioteleskop der Welt mit einem Reflektordurchmesser von 100m. Die Antennenfläche setzt sich aus 2352 Paneelen zusammen und weist eine Gesamtoberfläche von 7850m^2 auf. Das Gesamtgewicht der Stahlkonstruktion beträgt 3200t. In knapp zwölf Minuten kann das Teleskop um 360° auf einer Schiene gedreht werden. Die Justiergenauigkeit beträgt dabei etwa 0,3mm. Vier Kippmotoren ermöglichen das Kippen des Parabolspiegels mit einer Geschwindigkeit von 16°/min. Die Brennweite liegt bei 30m.

Abbildung 1: Radioteleskop Effelsberg [16]

Das Teleskop kann zum Empfang von Radiowellen im Bereich von 90cm bis hinunter zu 3,5mm Wellenlänge eingesetzt werden. Dabei stellt es das leistungsfähigste Teleskop überhaupt für den kurzwelligen Bereich von 6mm bis 2,8cm dar. Die Beobachtung bei kurzen Wellenlängen ist dadurch möglich, dass trotz elastischer Verformungen der Stahlkonstruktion von einigen Zentimetern nur eine maximale Abweichung des Reflektors von der idealen Parabolform von 0,5mm entsteht. Durch ein elektronisches Nachsteuern kann die bei der Kippung des Teleskops auftretende Verlagerung des Brennpunktes kompensiert werden. Bei der Auswahl des Aufstellungsortes achtete man darauf, dass das Teleskop in einem Tal sowie in einem wenigbewohnten Gebiet aufgestellt wurde. Somit verringerte man den Einfluss von Fremdsignalen, welche den Empfang astronomischer Signale erheblich stören können. Das Radioteleskop ist rund um die Uhr im Einsatz und wird nur durch Wartungsarbeiten oder durch den Wechsel der Empfängerbox im Messbetrieb unterbrochen.

Zum Einsatzgebiet zählen unter anderem die Beobachtung von Pulsaren, kalten Gas-Staubwolken, Sternentstehungsgebieten, von Schwarzen Löchern ausgehenden Materiejets und von Kernen ferner Galaxien.

2.2. Empfangssysteme am Radioteleskop Effelsberg

Die Empfangssysteme sind an zwei Stellen des Teleskops zu finden, am Primär- und Sekundärfokus. Der Parabolspiegel hat die Funktion, die aus dem Weltall einfallende Strahlung im Primärfokus zu bündeln. Mit einem Umlenkspiegel in der Nähe des Brennpunktes wird die Radiostrahlung zum Sekundärfokus reflektiert. An beiden Punkten können wechselweise Messungen durchgeführt werden.

2.2.1. Primärfokus

Der Primärfokus befindet sich an der Spitze von vier verstrebten Stützbeinen, 30 Meter über der Oberfläche des Parabolspiegels. Die Fokuskabine ist die Zentrale des Primärfokus und ist begehbar. Zu ihr gelangt man durch einen Treppenaufstieg, der sich in einem der vier Stützbeinen befindet. In der Kabine sind Empfängerschränke installiert, die es möglich machen zusätzlich zum Steuerraum auch Messungen vor Ort zu betrachten. Dies geschieht meistens dann, wenn neue Empfänger zum ersten mal eingesetzt werden.

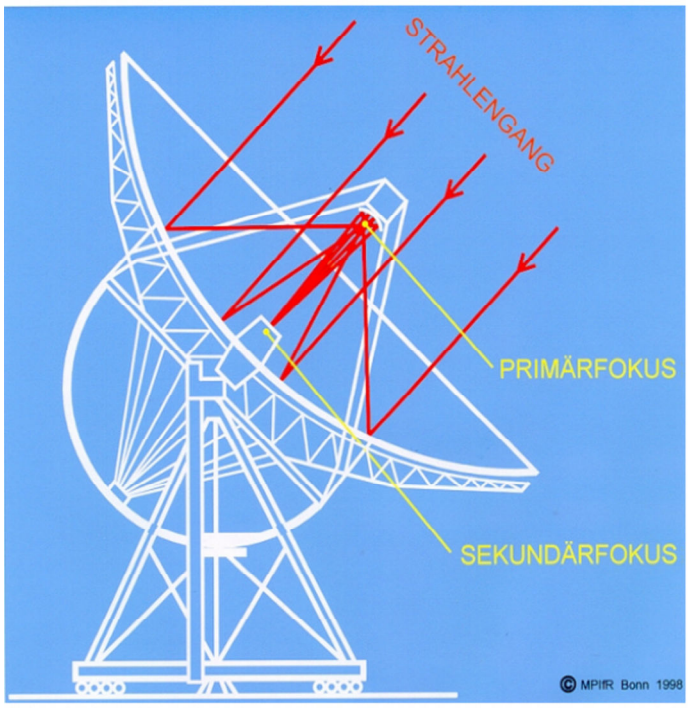


Abbildung 2: Signaleingang am Teleskop [16]

In der Bodenmitte der Kabine befindet sich eine kreisrunde Öffnung, in welche die Empfängerbox eingeschoben wird bis die Antenne des Empfängers im Brennpunkt steht. Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurde in fast allen Fällen immer nur ein Empfänger pro Empfängerbox eingesetzt. Deshalb befinden sich zusätzlich zwei Wechselempfängerboxen mit Empfängern anderer Frequenzen in der Kabine. Es ist kein Problem die Boxen zu tauschen, allerdings muss dafür der Messbetrieb unterbrochen werden. In naher Zukunft soll sich das aber durch eine von mir angepasste Konstruktion mehrerer Dewar für die Dreifrequenz- Empfängerbox ändern und so Messausfälle reduzieren. Die Empfängerbox soll dann über rotatorische und translatorische Bewegung in der Primärfokuskabine in den jeweils gewünschten Brennpunkt gebracht werden.

2.2.2. Sekundärfokus

Hinter dem Brennpunkt des Primärfokus befindet sich an der Unterseite der Fokuskabine der elliptische Sekundärspiegel (Gregory Spiegel) mit einem Durchmesser vom 6,5m. Für Beobachtungen im Sekundärfokus werden die eintreffenden Radiowellen zuerst vom Hauptspiegel und dann nochmals vom Sekundärspiegel umgelenkt. Der Sekundärfokus hat seinen Sitz im Zentrum des 100m Spiegels. Der zweite Fokus kommt zum Einsatz,

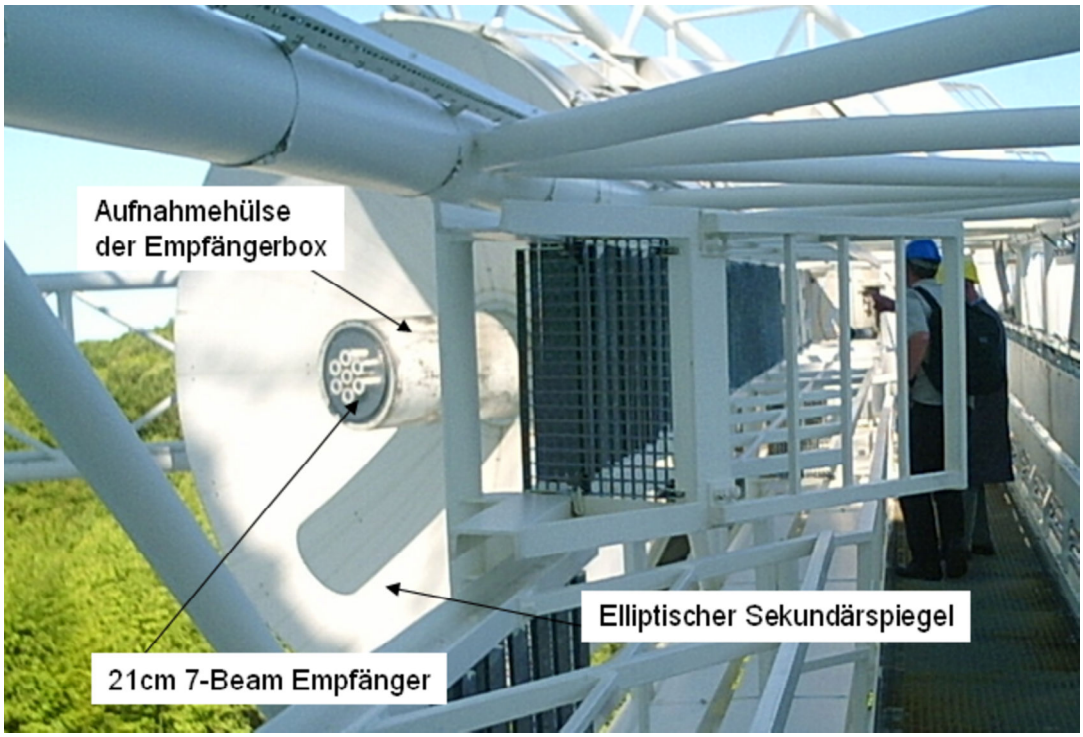


Abbildung 3: Primärfokus des Radioteleskop Effelsberg fotografiert aus einem der vier Stützbeine (Aufstieg zur Fokuskabine)

da geometrische Fehler selbst in größerer Entfernung von der optischen Achse vergleichsweise gering sind. Des Weiteren ist es möglich, im Gegensatz zum Primärfokus, mehrere Empfänger gleichzeitig einzusetzen. Ein gleichzeitiges Betreiben beider Fokusse ist aber nicht möglich. Durch eine Umbaumaßnahme für Beobachtungen im Sekundärfokus, werden verbleibende Abweichungen des Hauptspiegels von einem perfekten Paraboloid in Zukunft über eine aktive Oberfläche des 6,5m Sekundärspiegels durch Aktuatoren[1] ausgeglichen werden.

2.3. Die Empfängerbox

Die Empfängerbox ist das Trägergehäuse der Empfängerbehälter beziehungsweise der Kryostaten. Im Boden der Fokuskabine des Primärfokus kann mit Hilfe eines Krans die Box in den passgenauen Hohlzylinder eingeführt und befestigt werden. Bei einer Teleskopstellung von 90° - Primärfokus und Sekundärfokus stehen dabei senkrecht aufeinander-

[1] Aktuatoren sind Stellglieder, die Signale in mechanische Arbeit umsetzen, z.B. Öffnen und Schließen eines Ventils

ist ein Wechsel der Empfängerbox möglich. Dies ist stets dann gefordert, wenn Messungen mit einer anderen Frequenz verlangt werden. Der Boxdurchmesser mit 1146mm und die Boxhöhe mit 1730mm ist vordefiniert und bietet deshalb nur beschränkt Platz. Aufgrund der Fixierung, also der nichtvariablen Position des Hohlzylinders in der Kabine, wurde bei der Konstruktion der Befestigung zwischen der Empfängerbox und dem Kryostaten immer darauf geachtet, dass der Kryostat mittig in der Trägerbox sitzt. Durch die bereits in 2.2.1 genannten Maßnahmen wird es aber in Kürze möglich sein die Empfängerbox in der Ebene waagrecht zur Kabinenunterseite zu bewegen. So sollen mehrere Empfänger in der Box außer Mitte platziert werden, was ein Teil des Aufgabenfeldes der vorliegenden Diplomarbeit war. Aus dem Steuerraum wird es dann möglich sein, die Empfängerbox anzusteuern und nach belieben elektrisch zu positionieren. Abbildung 4 auf der nächsten Seite zeigt das Modell einer Empfängerbox mit den darin befindlichen Kryostaten.

2.4. Der Kryostat

Radioastronomische Empfangsbehälter werden allgemein als Kryostaten bezeichnet. Dieser ist ein Kühlbehälter, in dem ein geringer Absolutdruck -bis $10^{-6} bar$- und partiell sehr tiefe Temperaturen herrschen. Um diese niedrigen Temperaturen zu erreichen, muss der Kryostat mit Hilfe einer Vakuumpumpe evakuiert werden. Durch ein anschließendes Abkühlen mittels eines Refrigerators werden an einigen Stellen Temperaturen unter 10 Kelvin erreicht. Der innere Aufbau besteht aus zwei Kühlstufen. An der ersten Kühlstufe ist das Strahlungsschild, auch 70K Schild genannt, befestigt, das den Innenraum vor Wärmestrahlung schützt. An der zweiten Stufe sitzen im mechanischen Kontakt zum Kühlkopf die Empfangsverstärker für die radioastronomischen Eingangssignale. In der Radioastronomie benötigt man sehr empfindliche Empfänger, mit denen es gelingt, aus dem Spektrum der sehr schwach empfangenen Signale die gewünschten Nutzsignale herauszufiltern. Diese Nutzsignale sind nur unwesentlich größer oder teilweise sogar kleiner als die Pegel der mitempfangenen Rauschsignale. Diese setzen sich aus dem Eigenrauschen des Empfängers, dem Hintergrundrauschen anderer astronomischer Quellen und dem Rauschen von Störquellen zusammen. Damit das Eigenrauschen des Empfängers verringert werden kann, werden die ersten Stufen in Kryostaten bei sehr niedrigen Temperaturen eingesetzt. Unter Rauschen versteht man das regellose und zufällige Abweichen physikalischer Größen von ihrem Mittelwert. So tritt zum Beispiel bei Schaltkreisen, aufgrund der Umgebungstemperatur $T > 0$ K, eine ungeordnete Bewegung der Ladungs-

träger infolge der thermischen Energie in Erscheinung. Die Ladungsträger werden durch das Vibrieren der Atomgitter abgelenkt. Steigt die Temperatur, so steigt auch die Vibration des Atomgitters. Die frei beweglichen Ladungsträger werden in Folge dessen stärker abgelenkt, womit das thermische Eigenrauschen des Bauteils steigt. Diese willkürlichen Bewegungen führen zwischen den Enden des leitenden Materials zu einer stochastischen Spannung, die als thermische Rauschspannung bezeichnet wird. Die meisten Empfängerbehälter basieren auf der Idee eines Dewars. Dieser ist im Grunde ein verspiegelter und evakuierter Behälter. Er dient der thermischen Isolierung der beinhalteten Bauteile. Benannt ist dieser nach dem schottischen Physiker James Dewar, der das Vakuumgefäß erfunden hat. Der Hauptunterschied des von mir konstruierten Empfangsdewar zur Dewarschen Erfindung ist, dass bei diesem Projekt Bauelemente anstatt Flüssigkeiten durch vakuumisieren thermisch isoliert werden. Des Weiteren beinhaltet der eigentliche Dewar keine Kühlpumpe die für die Abkühlung und den Erhalt der niedrigen Temperaturen sorgt. Deshalb ist Kryostat die bessere Bezeichnung für den Empfangsbehälter. "Kryo-" steht für Kälte und "stat" für statisch.

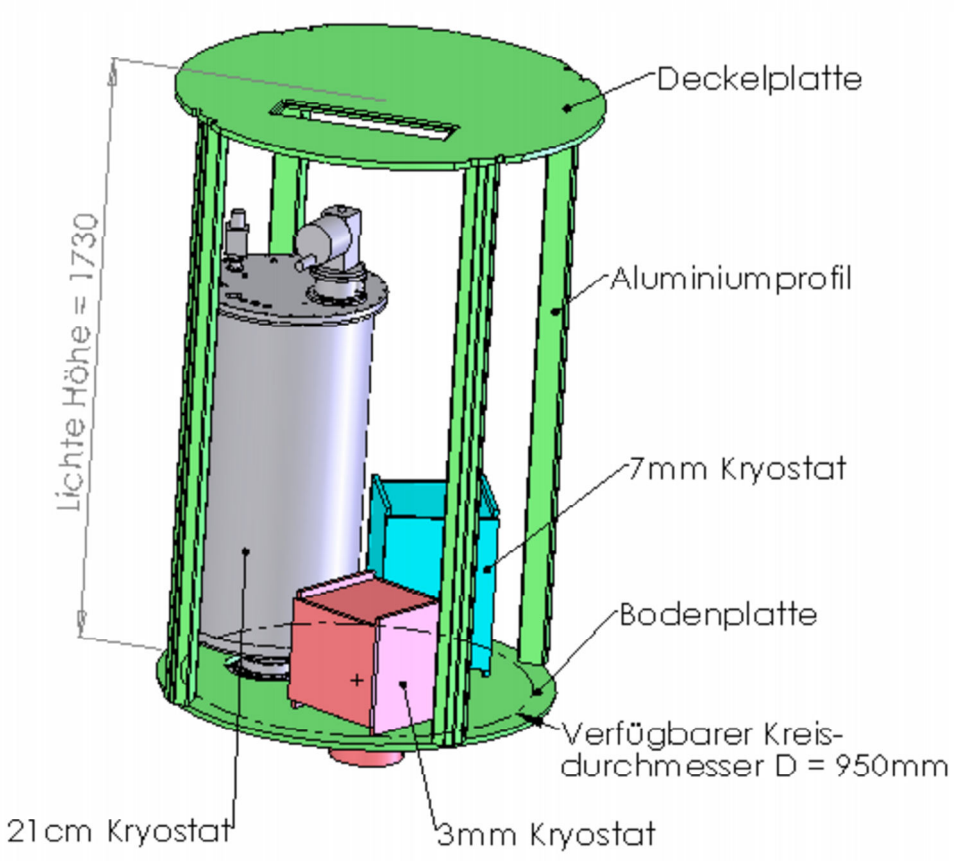


Abbildung 4: Ansicht Empfängerbox mit Kryostaten

Für die Diplomarbeit waren Kryostaten für Empfangsfrequenzen mit einer Wellenlänge von 3mm, 7mm und 21cm zu konstruieren. Abbildung 4 soll dem Leser die Anordnung und die Größenverhältnisse der Kryostaten in der Empfängerbox klar machen. Dabei stellt die grünfarbige Baugruppe die Empfängerbox dar.

2.5. Das Strahlungsschild

Strahlungsschilder oder auch Baffle genannt, werden auf der ersten Kühlstufe -70 Kelvin Stufe- eingesetzt und umschließen alle elektronischen Bauteile. Sie sind zur thermischen Isolation der Empfänger vor der äußeren Behälterwand gedacht. An der äußeren Behälterwand herrscht eine Temperatur von etwa 300 Kelvin, die auf die zu kühlenden Bauelemente strahlt. Ohne den Schutz der Strahlungsschilder würde ein Abkühlen und Aufrechterhalten der für tiefe Temperaturen vorgesehenen elektronischen Bauteile unmöglich sein. Deshalb müssen die Strahlungsschilder bestimmte Eigenschaften aufweisen. Der Emissionsgrad sollte gegen Null gehen und die Strahlungsfläche eine gut polierte oder beschichtete Oberfläche besitzen. Verschmutzungen, Legierungen und die Belegung der Oberfläche mit kondensierten Gasen vergrößern den Emissionkoeffizienten. Nicht nur durch Strahlung, sondern auch durch mechanischen Kontakt kann Wärmeleitung erfolgen. Deshalb muss auch darauf geachtet werden, den Wärmefluss bei Verbindungen klein zu halten.

Das Auslegen des 70K Schildes (Strahlungsschild) und dessen Konstruktion gehörte ebenfalls zu dem Aufgabenfeld meiner Diplomarbeit.

3. Grundlagen der Kryo- und Vakuumtechnik

3.1. Kryotechnik

3.1.1. Allgemein

Der Begriff Kryo ist dem Griechischen entnommen und bedeutet Kälte. Man spricht von Kryotechnik bei einem Temperaturbereich von unter 120 Kelvin.

$$0\ \text{K} - \text{-}273{,}15°\text{C} \text{ und damit } 0°\text{C} - 273{,}15°\text{C}$$

Die Grundlagen der Kryotechnik entstanden, als Wissenschaftler im Rahmen thermodynamischer Untersuchungen die Eigenschaften verschiedener Gase erforschten insbesondere ihren Übergang vom flüssigen Zustand in den Gasförmigen. Heute sind die Verhaltensweisen und Eigenschaften verflüssigter Gase bekannt. Das Interesse besteht nun darin, die Eigenschaften gezielt einzusetzen und zu nutzen. Unter dem Begriff Kryotechnik versteht man daher das Erreichen tiefer Temperaturen mit dem Ziel der Aufrechterhaltung. Als wichtigste gasförmigen Kältemittel gelten Helium, Stickstoff und Wasserstoff. Die Siedetemperatur dieser gasförmigen Stoffe liegt bei:

$$^3He = 3{,}2\ \text{K}$$

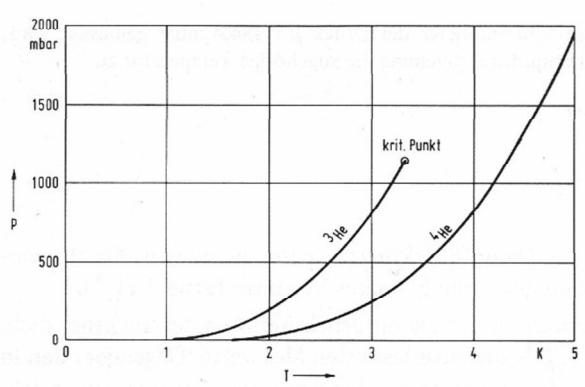
$$^4He = 4{,}2\ \text{K}$$

$$H_2 = 20{,}3\ \text{K}$$

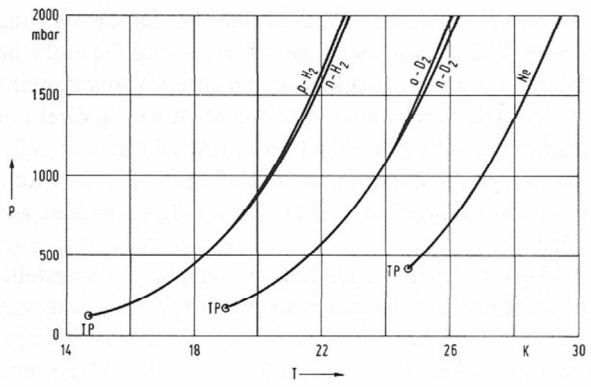
$$N_2 = 77{,}3\ \text{K}$$

Ordnet man die verwendeten Kältemittel nach ihrer Bedeutung ein, so steht Helium ohne Zweifel an der Spitze gefolgt von Stickstoff. Will man einen Kältekreislauf kontinuierlich betreiben, so wird man feststellen, dass das nur mit einem Arbeitsmedium möglich ist, welches im gesamten gewünschten Temperaturbereich flüssig ist. Betrachtet man die Dampfdruckkurven in Abbildung 5, so ist zu erkennen, dass nur Helium bis zu den tiefsten Temperaturen in Frage kommt.

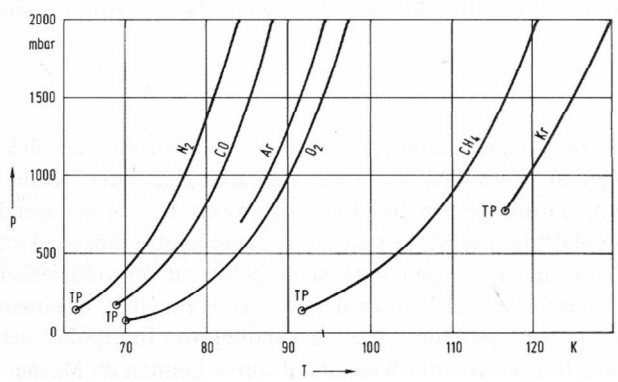
Kryotechnik und Vakuumtechnik sind eng miteinander verknüpft. Beide dienen der Aufrechterhaltung extremer Zustände: Die Vakuumtechnik der Erzeugung niedriger Drücke, und die Kryotechnik der Abkühlung von Materie bis nahe an den absoluten Nullpunkt. Bei der Vakuumisolation wird die Wärmeübertragung durch die Gasmoleküle von den warmen auf die kalten Wände reduziert. Anderseits werden auf tiefe Temperaturen gekühlte Flächen in Kühlfallen und Kryopumpen zur Vakuumerzeugung benutzt.



(a) Helium



(b) Wasserstoff, Sauerstoff, Neon



(c) Stickstoff

Abbildung 5: Dampfdruckkurve für Kühlmittel [1]

3.1.2. Die Refrigerator-Kryopumpe

Eine Refrigerator-Kryopumpe arbeitet mit einem geschlossenen Heliumkreislauf, wobei das von einem Kompressor verdichtete Gas im Kaltkopf des Refrigerators entspannt und

im Kreislauf wieder dem Kompressor zugeführt wird. Die Refrigeratoren sind zweistufig ausgeführt und erreichen bei der ersten Kühlstufe 70 Kelvin und bei der zweiten unter 15 Kelvin. Bei einer Temperatur der Kühlflächen von 5 K bis 15 K werden die meisten Gase durch Kondensation gepumpt. Damit auch Helium bis in den UHV-Bereich gepumpt werden kann, ist die Kühlfläche teilweise mit einem Absorptionsmittel[2] versehen, an dem dieses Gas durch Kryosorption gebunden wird. Eine geeignete geometrische Anordnung verhindert weitgehend die Vorbelegung der Sorptionsflächen durch das leicht kondensierbare Gas. Über mechanischen Kontakt zur zweiten Stufe des Refrigerators kann das angeschlossene Bauelement gekühlt werden. Dieses wird von einem Strahlungsschild umgeben, das mit der ersten Stufe des Refrigerators im direkten Kontakt steht. Das komplette System wird nach außen von einem Vakuummantel umschlossen. Diese Einheit nennt man Kryostat. Im Max-Planck Institut werden Refrigeratoren bevorzugt, die nach dem Gifford-McMahon Prinzip arbeiten. Dabei sind Kühlkopf und Kompressor voneinander getrennt und über zwei flexible Hochdruckleitungen verbunden. Die Abbildung 6 zeigt einen üblich verwendeten Refrigerator.

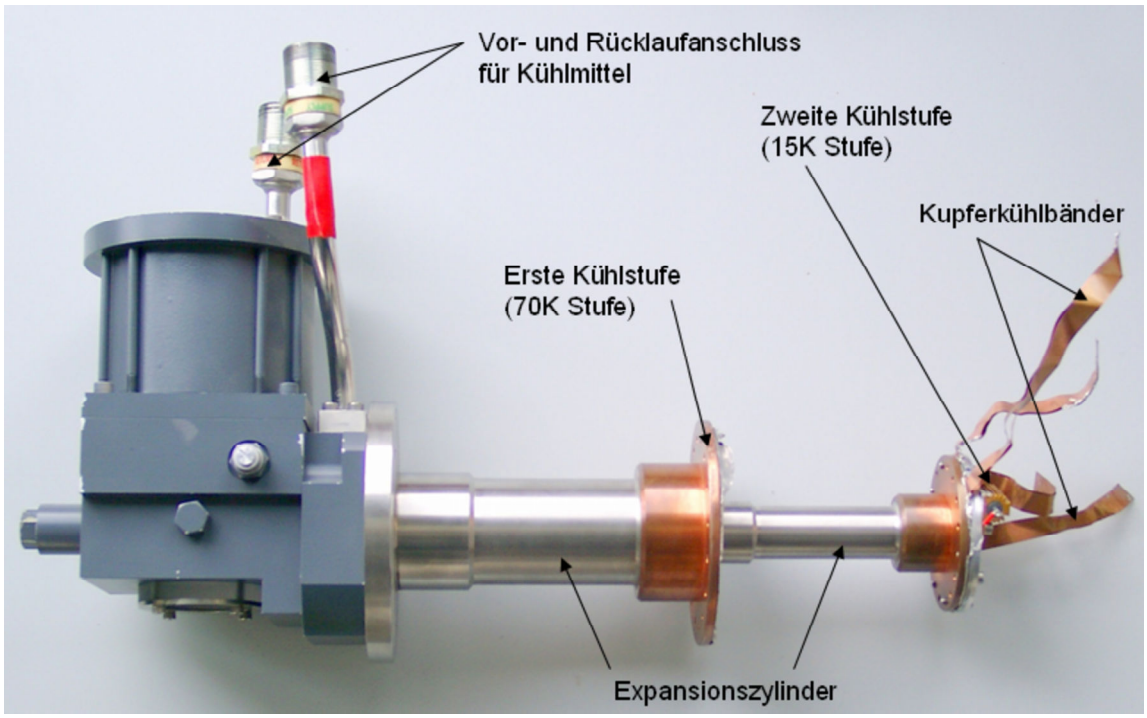


Abbildung 6: Refrigerator- Kryopumpe

[2]Absorption ist die Aufnahme eines Gases durch feste Körper od. Flüssigkeiten

3.2. Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung ist eine wichtige Thematik im Bereich des Kryostatenbaus. So werden besonders die Gebiete der Wärmeleitung und Wärmestrahlung näher beschrieben. Die Wärmeübertragung infolge Konvektion kann außer Betracht gelassen werden, weil ab einem Absolutdruck im Dewar kleiner 10^{-3}bar, die Strömung von Gasmolekülen keine Rolle mehr spielt.

3.2.1. Wärmeleitung über das Material

Der Wärmestrom fließt in einem Werkstoff stets vom höheren zum niedrigeren Temperaturniveau. Die durch einen Leiter konstanten Querschnitts A und der Länge L bei der Temperaturdifferenz T_1-T_2 übertragene Leistung beträgt

$$\dot{Q} = \frac{A}{L} \int_{T_2}^{T_1} \lambda dT \tag{1}$$

λ= Wärmeleitfähigkeit

In analoger Weise lassen sich die Temperaturfelder in den gekrümmten Wänden eines Hohlzylinders bestimmen. In dem Fall fließt der Wärmestrom in radialer Richtung senkrecht zur Wand und erlaubt die Darstellung der folgenden Gleichung:

$$\dot{Q} = \lambda \frac{2\pi L}{ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \cdot (T_a - T_i) \tag{2}$$

Die Wärmeströme $\dot{Q}$ durchsetzen auch gekrümmte Wände unabhängig von der Ortskoordinate r, während die Wärmestromdichten mit zunehmenden Radius r aufgrund der Flächenvergrößerung abnehmen.

Die Festkörperleitung muss am 70K Gehäuse und an deren angeschlossenen Bauteile groß sein, damit sich die Wärme des Kühlkopfes vom Refrigerator auf das gesamte 70K Schild verteilt. Gewährleistet wird dies durch eine entsprechende Konstruktion, einen

entsprechenden Werkstoff und einen guten Flächenkontakt zwischen den betroffenen Bauteilen. Weitere Abhilfen können Kühlbänder schaffen, um auch entfernte Punkte des Schildes zusätzlich zu kühlen.

Dagegen muss beachtet werden, dass die Wärmeleitung vom 300K Schild zum 70K Schild klein gehalten werden muss. Durch das Vermeiden von mechanischen Verbindungen kann der Wärmetransport verhindert werden. Allerdings muss das 70K Gehäuse natürlich irgendwo am 300K Gehäuse abgestützt werden. Dabei muss man darauf achten, dass das Material welches für die Befestigung benutzt wird, eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Zusätzlich gilt:

- dünne Wandstärken bevorzugen
- Verwendung langer Zuleitungen
- thermische Kontaktierung der Zuleitungen auf eine Zwischentemperatur unter Ausnutzung des Strahlungsschildes

3.2.2. Wärmestrahlung zwischen festen Oberflächen

Der Wärmetransport durch Strahlung ist nicht an Materie gebunden, damit ist klar, dass der Transport auch im Vakuum passiert. Alle möglichen Körper mit einer Temperatur von über 0 Kelvin geben Wärmeenergie durch Strahlung ab. Die Energie wird in Form elektromagnetischer Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit transportiert. Sie wird in fester, flüssiger und gasförmiger Materie durch Umwandlung innerer Energie, beispielsweise bei Elektronenübergängen oder Gitterschwingungen abgegeben. Es wird nur der Teil, der als Licht oder Wärme empfunden wird, als Strahlung bezeichnet.

Eine nicht abgeschirmte Kühlfläche A empfängt von der umgebenen Behälterwand die Strahlungsleistung $\dot{Q}_S$.

$$\dot{Q}_S = \varepsilon \cdot \sigma_S \cdot A \cdot T^4 \tag{3}$$

Dabei ist ε der Emissionskoeffizient bzw. die Abstrahlung der strahlenden Oberfläche, definiert als Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen der Oberfläche und dem

Emissionsvermögen eines schwarzen Körpers bei gleicher Temperatur. Materialien wird ein Abstrahlwert von 0 bis 1,0 zugewiesen. Ein schwarzer Körper hat den Abstrahlwert 1 und ein perfekter Wärmereflektor den Wert 0.

σ_S kennzeichnet die Stefan-Boltzmann-Konstante; sie beträgt $5{,}67{\cdot}10^{-8}\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$.

Körper emittieren und absorbieren Strahlungen. Die innere Energie eines Körpers ändert sich aber nur, wenn ein Temperaturunterschied zwischen zwei Flächen besteht. Dann wird, aufgrund des Strahlungsaustauschs, unterschiedliche Strahlungsanteile absorbiert, also aufgenommen. Der Wärmestrom definiert sich dann so [4]:

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} \cdot A_1 \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right) \tag{4}$$

Der Wärmestrom fließt vom warmen zum kalten Körper. Ein positiver Wert für $\dot{Q}_{12}$ bedeutet also, dass Körper 1 Wärme an den Körper 2 abgibt. C_{12} ist die Strahlungsaustauschzahl, welche sich wie folgt definiert:

$$C_{12} = \sigma_S \varepsilon_1 \, \varepsilon_2 \frac{\varphi_{12}}{1 - (1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2) \cdot \frac{A_1}{A_2}\varphi_{12}^2} \tag{5}$$

φ berechnet sich aus Gleichung 6. Zur Verdeutlichung dessen, siehe Abbildung 7.

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi A_1} \int \int \frac{cos\beta_1 \, cos\beta_2}{s^2} \, dA_2 dA_1 \tag{6}$$

Wird Wärme durch Strahlung zwischen einem Körper mit der Oberfläche A_1 und der Temperatur T_1 und einem ihn umhüllenden Körper mit der Oberfläche A_2 und der Temperatur $T_2 > T_1$ übertragen, so ergibt sich die Bestrahlungsstärke folgendermaßen:

$$\dot{E} = \frac{\sigma_S}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \cdot \left(T_2^4 - T_1^4\right) \tag{7}$$

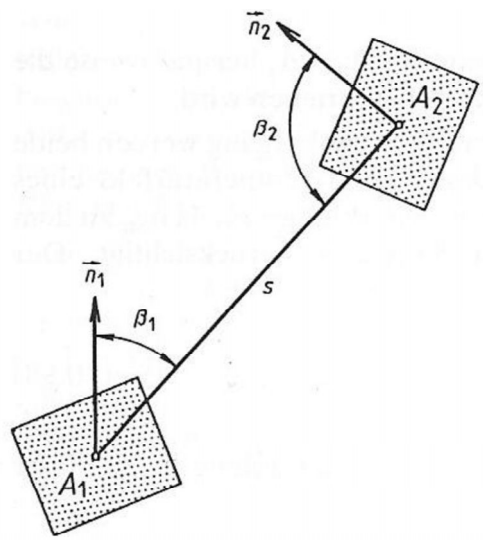


Abbildung 7: Zur Berechnung der Einstrahlzahl φ [4]

Als Beispiel: Für ε=1 (schwarzer Strahler) beträgt die Bestrahlungsstärke von 20°C auf 4,2 Kelvin ca. 470 $\frac{W}{m^2}$, von 70 Kelvin auf 4,2 Kelvin in etwa 2 $\frac{W}{m^2}$.

Bei festgelegten Flächen und Temperaturen lässt sich die Wärmestrahlung nur durch Reduzierung des Emissionskoeffizienten verkleinern. Er ist umso kleiner, je besser die Oberfläche die Strahlung reflektiert und je weniger sie absorbiert. Eine Faustregel besagt: Je größer die elektrische Leitfähigkeit eines Materials, desto kleiner fällt der Emissonskoeffizient aus.

Positioniert man zwischen der 300K Wand und dem 70K Schild ein weiteres Strahlungsschild$_M$ mit dem Emissionskoeffizienten der Außenwand, so strahlt dieses Schild nach beiden Seiten gleichmäßig die Leistung $\dot{Q}_M$ ab. Weil die Strahlung von der kalten Wand praktisch vernachlässigt werden kann, erhält das 70K Schild nur die Strahlung von der Behälteraußenwand.

Dann gilt

$$\dot{Q}_M = 1/2\ \dot{Q}$$

Stellt man ein weiteres Strahlungsschild$_N$ dazwischen, dann ist

$$2\,\dot{Q}_M - \dot{Q}_N \text{ sowie}$$

$$2\,\dot{Q}_N = \dot{Q}_M + \dot{Q}$$

daraus folgt dann schließlich

$$\dot{Q}_M = \frac{1}{3}\dot{Q}$$

Aus der hergeleiteten Formel ergibt sich für n Strahlungsschilder die Strahlungsleistung

$$\dot{Q}_M = \frac{1}{n+1} \cdot \dot{Q} \tag{8}$$

An dieser Formel erkennt man, dass beim Einsetzen eines zusätzlichen Strahlungsschildes die Strahlungsleistung bereits schon um die Hälfte reduziert wird.

3.3. Vakuumtechnik

Die Vakuumtechnik dient der Schaffung eines geringen Drucks. Erreicht werden kann er, indem man einen abgeschlossenen Hohlraum, den Rezipienten, mit einer Vakuumpumpe evakuiert. Dabei ist die obere Grenze eines Gases oder Dampfes, welche man als Vakuum bezeichnet, nicht genau definiert. Sie ist abhängig von den äußeren Umständen, also dem Atmosphärendruck, welcher beeinflusst wird durch

- die geografische Lage
- die Höhe
- das Wetter

In der Kryotechnik wird durch die dort übliche Vakuumisolation die Wärmeübertragung auf die kalten Bauteile vermindert. Das Vakuum ist also ein wichtiges Hilfsmittel zum Erreichen und Erhalten tiefer Temperaturzustände. Andererseits werden auf tiefe Temperaturen abgekühlte Flächen in Kühlfallen und Kryopumpen zur Vakuumerzeugung durch Kondensation und Absorption von Gasen benutzt.

In der Vakuumtechnik hat man es vorwiegend mit Gasen, Dämpfen oder Gas-Dampf-Gemischen zu tun, welche unter einem verminderten Druck stehen. Gase lassen sich im Gegensatz zu Dämpfen, im Arbeitsbereich nicht in einen anderen Aggregatszustand überführen.

Wirkt eine Kraft senkrecht auf eine Fläche, so ergibt sich der Druck

$$p = \frac{F}{A} \tag{9}$$

Bei gekrümmten Flächen oder bei ungleichmäßig wirkenden Kräften kann man den Differenzenquotienten zur Berechnung des Drucks heranziehen, welcher lautet

$$p = \frac{dF}{dA} \tag{10}$$

Die Einheit des Drucks ist 1Pa bzw. $1\frac{N}{m^2}$. Aufgrund der Historie sind auch noch andere Einheit gebräuchlich. Besonders Torr sticht in der Vakuumtechnik heraus, weil in erster Linie amerikanische Hersteller das Einheitssystem noch verwenden. Folgend sind die wichtigsten Einheiten, die in der Vakuumtechnik verwendet werden aufgeführt und in Bezug zur Einheit Pascal gesetzt.

- 1 Bar $= 10^5$Pa
- 1 Torr $\approx$ 133,33 Pa
- 1 atm $\approx$ 101325 Pa
- 1 psi $\approx$ 6895 Pa

Befindet sich ein Gas im thermodynamischen Gleichgewicht, dann herrscht überall im Gas der gleiche Druck und die gleiche Temperatur. Es befindet sich dann in Ruhe. Wird dieses thermodynamische Gleichgewicht gestört, dann hängt der Druck vom Ort und Richtung ab. Die Kraft, die dann senkrecht auf der Fläche steht ist

$$F = A \cdot p \tag{11}$$

Sind in einem Behälter mehrere, nicht miteinander reagierende Gase vorhanden, dann stören sie sich gegenseitig nicht.

Nach dem Daltonschen Gesetz setzt sich bei einem Gemisch idealer Gase der Absolutdruck p_{abs} aus den Partialdrücken p_i der einzelnen Komponenten i zusammen.

$$p_{abs} \sum_{i=1}^{n} p_i \tag{12}$$

Von einem Partialdruck wird gesprochen, wenn man nur den Druck eines einzigen Gases ohne Einfluss eines Zweiten betrachtet.

Die Luft besteht aus mehreren Gasen und Dämpfen. Dabei greift das Daltonsche Gesetz für reale Gase und Dämpfe umso genauer, je ähnlicher die kritischen Daten dieser Gase sind. Der Dampfdruck über einer Flüssigkeit ist unabhängig davon ob sich ein anderes Gas oder ein Vakuum über der Flüssigkeit befindet. In der kinetische Gastheorie geht man von der Vorstellung aus, dass kleine Partikel auf geraden Bahnen einen Raum durchfliegen. Dabei können sie auf andere Teilchen sowie auf die Behälterwand treffen. Die Zusammenstöße gehorchen dem Gesetz des elastischen Stoßes und verursachen den Druck.

In der Vakuumtechnik unterteilt man die verschiedenen Druckbereiche in vier Arbeitsbereiche [3].

Bezeichnung	Druckbereich in Pa	Moleküle pro cm^3
Grobvakuum	10^5- 10^2	10^{19}- 10^{16}
Feinvakuum	10^2- 10^{-1}	10^{16}- 10^{13}
Hochvakuum	10^{-1}- 10^{-5}	10^{13}- 10^9
Ultrahochvakuum	10^{-5}- 10^{-12}	10^9- 10^4

4. Grundlagen der Konstruktion

4.1. Die Software SolidWorks

4.1.1. Allgemein

SolidWorks ist ein 3-D CAD Programm für Konstruktionsanwendungen im Maschinenbau, die auf der grafischen Oberfläche von Microsoft Windows eingesetzt wird. Konstrukteure können ihre Ideen in Skizzen umsetzen und mit Features und Bemaßungen experimentieren sowie Modelle und detaillierte Zeichnungen erstellen.

4.1.2. Handhabung

SolidWorks verwendet die 3-D Konstruktionsmethode. Während ein Teil von der Anfangsskizze bis hin zum fertigen Modell konstruiert wird, entsteht ein 3-D Element. Auf der Grundlage dieses 3-D Elements können weitere 2-D Zeichnungen erstellt werden, oder verschiedene Komponenten miteinander verknüpft werden, um so 3-D Baugruppen zu erstellen.

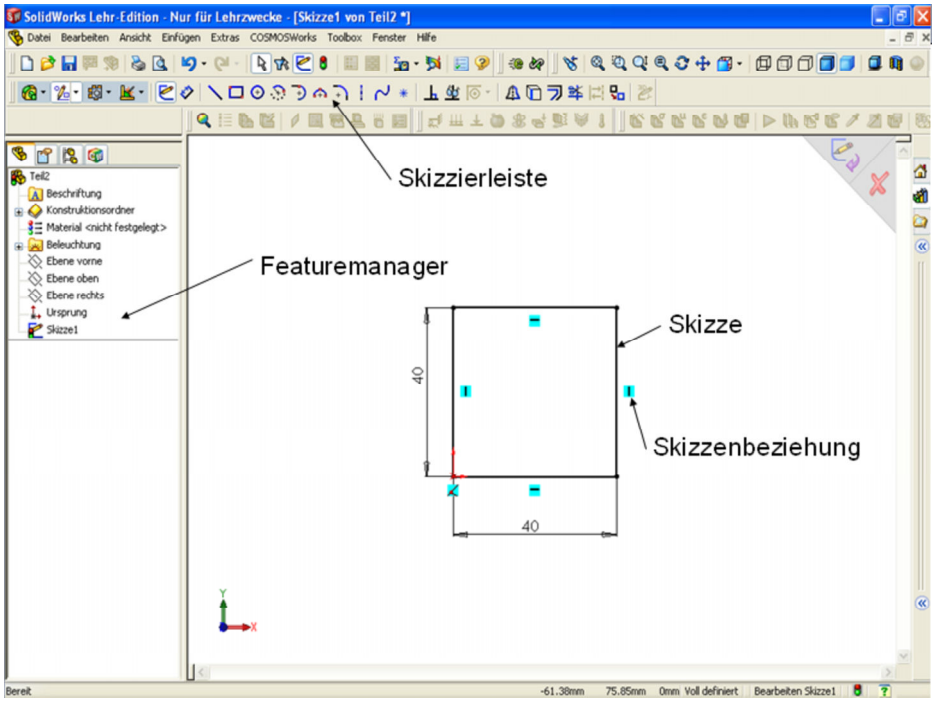
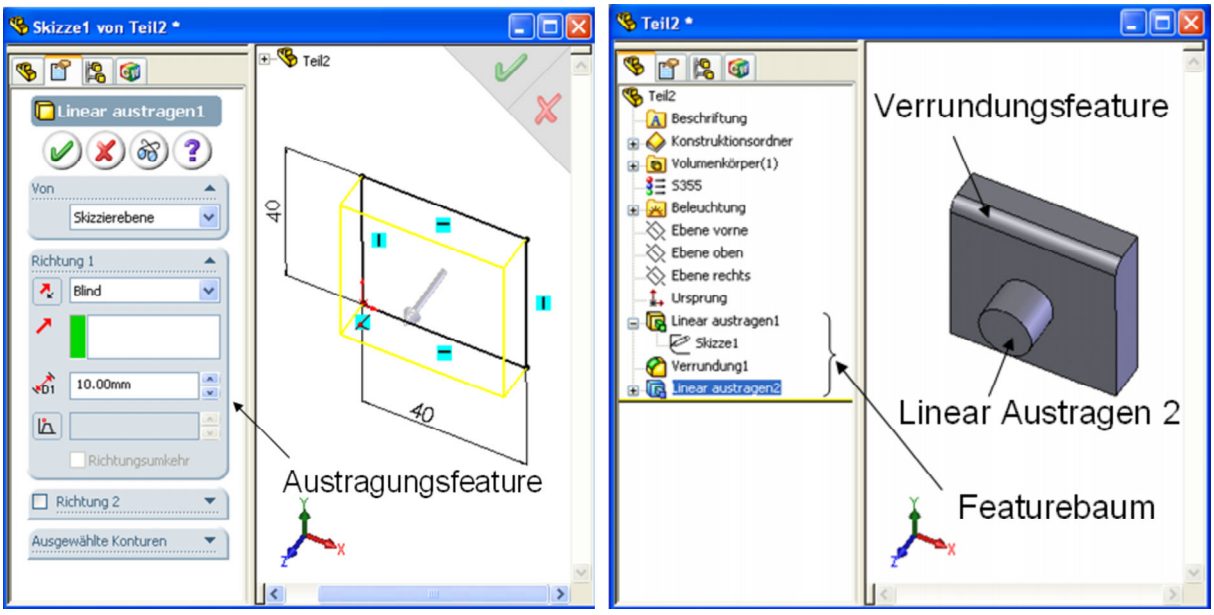


Abbildung 8: Skizzenmodus

Damit ein Volumenkörper erstellt werden kann muss zuerst eine 2D-Skizze angefertigt werden (siehe Abbildung 8). Eine Skizze basiert auf Linien und Kreise welche mit Maßen und geometrischen Beziehungen versehen werden um dem zukünftigen Modell eine bestimmte Form zu geben. Nach der Fertigstellung dieser können unter Verwendung von Features -z.B. einer linearen Austragung- ein 3-D Modell erstellt werden (siehe Abbildung 9a).

Sind weitere Bearbeitungen am Volumenmodell erwünscht, so muss erneut eine Skizze auf eine ebene Fläche gelegt werden. Diese Fläche kann eine Ausgewählte des Modells oder eine Referenzebene sein. Die Skizze wird in Bezug zu dem vorhandenen Körper bemaßt und durch anschließende Auswahl eines Features einem 3-D Profil zugeordnet. Des Weiteren ist es über verschiedenen Featurefunktionen möglich, ein Bauteil an einer Kante z.B. zu Fasen oder zu Verrunden. Ein Beispiel zeigt Abbildung 9b.



(a) Linear austragen (b) Volumenmodell

Abbildung 9: Feature- und Modellansicht

Alle ausgewählten Schritte sind im Featuremanager dokumentiert und als Featurebaum dargestellt. Sie sind chronologisch aufgelistet und in ihren vom Benutzer eingestellten Eigenschaften stets änderbar. Solid Works ist ein auf Parametern basierendes Modellierungsprogramm und bietet deshalb den Vorteil, dass alle Skizzen und Features nachträglich bearbeitet werden können. So ist es zum Beispiel problemlos möglich, vorhandene Löcher in Bauteilen in Tiefe oder Durchmesser zu ändern.

Um Baugruppen zu erstellen kann man zusammenpassende Bauteile geometrisch miteinander Verknüpfen. Die Daten der einzelnen Modelle bleiben jedoch in der Ausgangsdatei und rufen eine Aktualisierung der Baugruppe hervor sobald etwaige Änderungen vorgenommen werden.

Vorraussetzung für die Fertigung einer Komponente ist eine Fertigungszeichnung. Diese werden auf Grundlage von Teil- oder Baugruppenmodellen erstellt. Sie können in verschieden Ansichten angezeigt werden. Auch hier bewirkt eine Änderung des Bauteils oder Baugruppe eine Änderung in der Zeichnung.

4.2. Die Software CosmosWorks

4.2.1. Allgemein

CosmosWorks ist ein vollständig in SolidWorks integriertes System zur Konstruktionsanalyse. Gleichungslöser ermöglichen die Durchführung von Spannungs-, Frequenz-, Knick-, thermodynamischen und Optimierungsanalysen. Komplizierte Bauteilgeometrien können auf schnelle Weise untersucht und Schwachstellen ausgemacht werden. Durch anschließende Änderungen im analysierten Modell kann eine optimierte Konstruktion erzielt werden. Im Folgenden werden auf die im Rahmen dieser Diplomarbeit verwendeten statischen und thermischen Analyse eingegangen.

4.2.2. Grundstruktur der Analyse

CosmosWorks verwendet die Finite-Elemente-Methode (FEM), welche aufgrund der Allgemeingültigkeit und Eignung für Computerimplementierungen als Standart-Analysemethode anerkannt ist. Das Programm nutzt numerische Verfahren für die Analyse von technischen Konstruktionen. Es unterteilt Modelle in viele kleine Teile mit einfachen Formen, die als Elemente bezeichnet werden. Vereinfacht gesagt wird ein großes komplexes Problem durch viele kleine Probleme ersetzt, die parallel gelöst werden können.

Wie in Abbildung 10 zu sehen haben die Elemente (Dreiecke) gemeinsame Punkte, die als Knoten bezeichnet werden. Das Verfahren zur Unterteilung des Modells nennt man Vernetzung. Jeder Knotenpunkt ist vollständig durch ein Reihe von Parametern definiert, welche von der Analyseart und dem verwendeten Element abhängig sind. So beschreibt beispielsweise die Verschiebung eines Punktes dessen Reaktion bei einer statischen Analyse. Vorraussetzung ist, dass alle Randbedingungen wie Lager, Druck oder

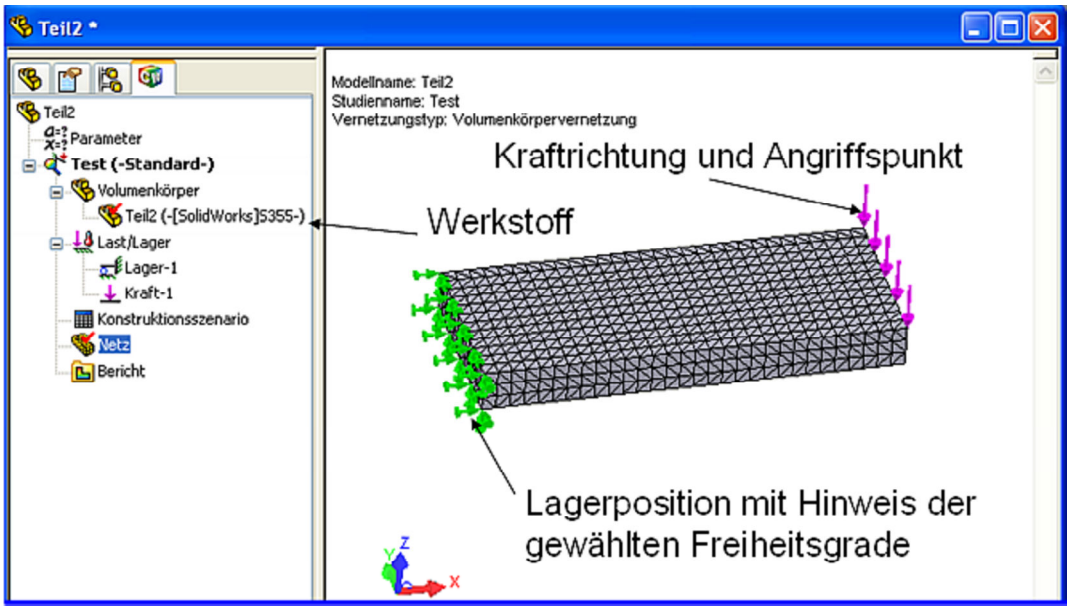


Abbildung 10: CosmosWorks Modus

Kraft im CosmosWorks Manager eingegeben wurden. Das Programm formuliert Gleichungen, welche das Verhalten der Elemente bestimmen. Dabei werden Verknüpfungen zu den Nachbarelementen berücksichtigt. Die Gleichungen bedienen sich ebenso an den bekannten Materialeigenschaften sowie an den Randbedingungen Lager und Lasten [13].

4.2.3. Verwendete Studientypen

Statische Analyse

Statischen Studien berechnen Spannungen, Verschiebungen, Dehnungen sowie den Sicherheitsfaktor unter den eingegebenen Randbedingungen. So kann erkannt werden, wann ein Bauteil zu schwach ausgelegt wurde und ein Material versagen wird. Große Sicherheitsfaktoren haben verhältnismäßig geringe Spannungen voraus, das bedeutet, dass in einem entsprechenden Bereich Materialeinsparungen vorgenommen werden können.

Die statische Analyse kann man auf die Annahme der Linearität anwenden. Sobald Lasten um einen gewissen Faktor geändert werden, ändern sich Verschiebungen oder Spannungen um den gleichen Faktor. Diese Annahmen gelten aber nur wenn bei den folgenden Vorraussetzungen [13]:

- Alle Lasten müssen hinsichtlich Stärke, Richtung und Verteilung konstant sein und

dürfen sich bei einer Verformung des Modells nicht ändern

- Die induzierten Verschiebungen sind gering genug um die durch die Lasten bedingte Änderung der Steifigkeit zu ignorieren
- Die Materialen verhalten sich nach dem Hookeschen Gesetz, bei dem Spannungen und Dehnungen proportional sind, d.h. eine Verdopplung der Spannung würde auch eine Verdopplung der Dehnung bedeuten, siehe Gleichung 13.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{13}$$

Thermische Analyse

Mit der Thermischen Analyse können Temperaturen, Temperaturgradienten und der Wärmestrom auf der Grundlage der Wärmeerzeugung, der Wärmeleitung, der Konvektion und der Wärmestrahlung berechnet werden. Diese Studien unterstützen den Konstrukteur bei Fragen der Überhitzung von Bauteilen und geben ihm eine einfache Anschauung zur Temperaturverteilung in einem Modell.

Optimierungs Analyse

Mit dieser Analyseart lässt sich automatisch eine optimale Konstruktion für Bauteile und Baugruppen finden. Eine Optimierungsstudie wird durch eine Zielfunktion, Konstruktionsvariablen und Zwangsbedingungen definiert. Zum Beispiel ist es möglich, eine Materialdicke soweit zu senken, bis der Grenzwert der Spannung erreicht wird.

4.2.4. Schritte der angewandten Analysen

CosmosWorks wird in SolidWorks als Zusatzanwendung aufgerufen. Es ist stets möglich von der Bauteil- oder Baugruppenansicht zu dieser Zusatzanwendung zu wechseln.

Die statische Analyse

Folgende Schritte sind notwendig um eine statische Studie auszufühen:

1. Zuerst wird eine Studie erstellt und dazu die Analyseart “Statisch” ausgewählt. Als Vernetzungstyp sollte die Option “Volumenkörpervernetzung” ausgewählt werden. Die Option der Schalenvernetzung ist ungenauer und nicht für komplexe Modelle und Baugruppen geeignet.

2. Danach wird dem Modell ein Material zugeordnet, wobei man auf die Materialdatenbank von SolidWorks zurückgreifen kann oder manuell dem Bauteil Werkstoffeigenschaften zuweist. Streckgrenze und Zugfestigkeit sowie E-Modul sind hier die mindest geforderten Eingabewerte.

3. Durch das Festlegen von Lagersitzen, Kraft- und Druckangriffspunkte werden die Randbedingungen des Bauteils gesetzt. Lager sowie die Belastungen können auch auf Kanten oder Flächen angebracht werden.

4. Das Modell kann nun vernetzt werden. CosmosWorks schlägt eine Netzgröße vor, welche aber auch selbst ausgewählt werden kann. Dabei muss beachtet werden: Je feiner das Netz desto länger die Vernetzungsdauer. In Bereichen wo genaue Ergebnisse gefordert sind, können durch das Auswählen von Eckpunkten, Kanten, Flächen und ganzen Komponenten feinere Netze erstellt werden.

5. Anschließend kann die Studie gestartet werden und CosmosWorks berechnet die Ergebnisse auf Grundlage der zuvor eingegebenen Werte.

6. Nach dem erfolgreichen Ausführen einer Studie erstellt CosmosWorks einen Ergebnisordner im CosmosWorks Manager. Es ist nun möglich die Ergebnisse für Spannung, Verformung, Verschiebung, Dehnung und Konstruktionssicherheit grafisch darzustellen.

7. Es können auch andere Darstellungen des Ergebnisses eingeblendet werden. Dazu gehört das in dieser Diplomarbeit verwendete ISO-Clipping. Mit diesem Werkzeug lassen sich Oberflächen für einen bestimmten Wert des Resultats anzeigen. Durch eine Schnittdarstellung des Bauteils oder der Baugruppe wird dies ermöglicht (siehe Abbildung 22). Die Darstellung ist auch für eine thermische Studie möglich.

Die thermische Analyse

Die thermische Analyse gleicht in den meisten Schritten der statischen Analyse und der prinzipielle Aufbau bleibt erhalten.

1. Als Analyseart wird “Thermisch” und als Analyseoption “Volumenkörpervernetzung” ausgewählt. Zu beachten ist, dass die Wärmeübertragungsanalyse im Punkt Eigenschaften im Featuremanager auf “Statisch” eingestellt sein muss, weil von einem thermisches Gleichgewicht ausgegangen wird.

2. Allen Bauteilen werden Werkstoffe zugewiesen. Es ist unbedingt darauf zu achten, dass in den physikalischen Eigenschaften die Wärmeleitfähigkeit eingegeben ist.

3. Im CosmosWorks Featuremanager wird im Kontextmenü "Lager und Lasten" die Temperatur für Flächen, Kanten, Eckpunkte und Bauteile bestimmt. Als nächstes werden im Kontextmenüpunkt "Wärmestrahlung" den Flächen oder Körpern Wärmestrahlungsparameter zugeordnet sowie ein Wärmestrahlungstyp.

4. Das Bauteil oder die Baugruppe werden nun wie bei der statischen Analyse vernetzt.

5. Danach wird die Studie ausgeführt und die Berechnungen können erfolgen.

6. Das Ergebnis kann anschließend grafisch dargestellt werden.

Optimierungsanalyse

Diese Analyse ist von der Ausgangsstudie abhängig. Deshalb wird der Vernetzungstyp beim Erstellen einer neuen Studie nicht angegeben.

1. Im Kontextmenü des Studiennamens der Optimierungsstudie, kann unter dem Punkt Eigenschaften die maximale Anzahl der Konstruktionszyklen festgelegt werden.

2. Die Zielvorgabe wird definiert. Dabei kann z.B. eine Volumen- oder Gewichtsminimierung angegeben werden.

3. Anschließend werden die Konstruktionsvariablen festgelegt. Das können alle veränderbaren Modellmaße sein. Für alle Konstruktionsvariablen muss ein oberer und unterer Grenzwert angegeben werden.

4. Es müssen Zwangsbedingungen definiert werden. Dazu können bei statischen Studien die Grenzwerte für z.B. die Vergleichsspannungen, Dehnungen und Verschiebungen angegeben werden. Bei der thermischen Studie können bestimmte Temperaturen und Wärmeflüsse als Bedingung festgelegt werden, die die optimierte Konstruktion erfüllen muss.

5. Die Studie wird ausgeführt und alle ausgewählten Modellmaße werden automatisch optimiert.

4.3. Festigkeitsnachweis nach AD-Merkblätter und FE-Methode

Die Festigkeitsberechnung von Druckbehältern liefert verschiedene Möglichkeiten. Zum Vergleich wird im folgenden Kapitel ein Bauteil des konstruierten Dewars mit Hilfe des FEM- Programms CosmosWorks und manuell mit AD- Merkblättern berechnet.

4.3.1. Geltungsbereich für AD-Merkblätter

Für glatte Zylinderschalen als Druckbehältermäntel und unter äußerem Überdruck, bei denen das Verhältnis $\frac{D_a}{D_i} \leq 1,2$ ist, gelten die Berechnungsregeln der AD- Merkblätter. Es ist des Weiteren darauf zu achten, dass der Druck auf den vollen Umfang wirken muss. Die Berechnung ist gegen elastisches Einbeulen und gegen plastisches Verformen durchzuführen, wobei der kleinste Wert von p_1 und p_2 für die Bestimmung des zulässigen Überdrucks verwendet werden muss. Von vornherein ist allerdings klar, dass das Ergebnis bezüglich elastischen Einbeulens nicht mit Ergebnissen von CosmosWorks verglichen werden kann, da das Programm nicht über eine solche Studienart verfügt. Nur ein Vergleich mit der Berechnung gegen plastisches Verformen ist daher möglich.

Formelzeichen

K Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur

S Sicherheitsbeiwert

D_a Außendurchmesser der Zylinderschale

D_i Innendurchmesser Zylinderschale

s_e Wandstärke

L Länge des Rohres

c_1 Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung

c_2 Abnutzungszuschlag

p Berechnungsdruck

ν Querkontraktionszahl

E Elastizitätsmodul

S_K Sicherheitsfaktor gegen elastisches Einbeulen

4.3.2. Berechnung gegen elastisches Einbeulen

Die Berechnung folgt aus der Zahlenwertgleichung nach Abschnitt 7.2 des Kapitels B6 aus [5].

$$p_1 = \frac{E}{S_K} \cdot \left[\frac{20}{\left(n^2-1\right) \cdot \left[1+\left(\frac{n}{Z}\right)^2\right]^2} \cdot \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} + \frac{80}{12\left(1-\nu^2\right)} \cdot \left[n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - \nu}{1+\left(\frac{n}{Z}\right)^2} \right] \cdot \left[\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \right]^3 \right] \tag{14}$$

Dabei ergibt sich der Hilfswert Z aus Gleichung 15:

$$Z = 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot D_a}{l} \tag{15}$$

und die Anzahl der eventuell auftretenden Einbeulwellen n kann näherungsweise aus Gleichung 16 ermittelt werden.

$$n = 1,63 \cdot \sqrt[4]{\frac{D_a^3}{l^2 \cdot (s_e - c_1 - c_2)}} \tag{16}$$

Des Weiteren müssen die zusätzlich aufgeführten Bedingungen beachtet werden:

- n sollte ganzahlig sein
- n $\geq$2
- n $>$ Z

4.3.3. Berechnung gegen plastisches Verformen

Nach AD- Merkblättern der Kapitel B0 bzw. B6 der Ausgabe Januar 1995 unter Abschnitt 7.3 gilt Formel 17 zur Berechnung gegen Verformung unter der Beachtung von

$\frac{D_a}{l} \leq 5.$

$$p_2 = \frac{20 \cdot K}{S} \cdot \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1,5u \cdot \left(1 - 0,2\frac{D_a}{L}\right) \cdot D_a}{100 \cdot (s_e - c_1 - c_2)}} \tag{17}$$

.

Dabei berechnet sich u nach Kapitel B6 aus Abschnitt 7.3.4 der AD- Merkblätter aus

$$u = 2 \cdot \frac{D_{i\,max} - D_{i\,min}}{D_{i\,max} + D_{i\,min}} \cdot 100 \tag{18}$$

4.3.4. Festigkeitsberechnung am Beispiel des 300 K Rohres nach AD-Merkblätter

Das 300K Rohr hat einen Außendurchmesser von 306mm mit einer Länge von 691,8mm (siehe Anhang A.3). Die Wandstärke beträgt 3mm. Als Material wurde AlMg3 ausgewählt, das eine Streckgrenze von $80\frac{N}{mm^2}$ und einen E-Modul von $70\ 000\frac{N}{mm^2}$ besitzt. Zur Berechnung mit der FEM- Spannungsanalyse wurde ein Viertel des 300K Rohrs ohne Flansche analysiert, damit eine möglichst einfache Analysesituation entsteht. Bei den AD- Merkblättern wurde ein Vollrohr ohne Flansche zur Berechnung verwendet.

Berechnung gegen elastisches Einbeulen

Der Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen beträgt S_K= 3, weil u ≤1,5 %. Die Querkontraktionszahl für Aluminium beträgt 0,33. Bei Nichteisenmetallen ist C_1 und $C_2 = 0$ (siehe Anhang A.1). Zur Berechnung der Unrundheit u wurde eine Durchmessertoleranz von $\pm\,0,5mm$ vorgesehen.

$$Z = 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot 306mm}{691,8mm} \approx 0,695$$

$$n = 1,63 \cdot \sqrt[4]{\frac{(306mm)^3}{(691,8mm)^2 \cdot (3mm - 0 - 0)}} \approx 3,45$$

gewählt werden n − 4 Einbeulwellen.

$$u = 2 \cdot \frac{300,5mm - 299,5mm}{300,5mm + 299,5mm} \cdot 100 \approx 0,333$$

$$p_1 = \frac{70000 \frac{N}{mm^2}}{3} \cdot \left[\frac{20}{\left(4^2 - 1\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{4}{0,695}\right)^2\right]^2} \cdot \frac{3mm - 0 - 0}{306mm} + \frac{80}{12\left(1 - 0,33^2\right)} \right.$$

$$\left. \cdot \left[4^2 - 1 + \frac{2 \cdot 4^2 - 1 - 0,33}{1 + \left(\frac{4}{0,695}\right)^2} \right] \cdot \left[\frac{3mm - 0 - 0}{306mm}\right]^3 \right]$$

$p_1 \approx \underline{\underline{2,84\,bar}}$

Hieraus ist zu erkennen, dass die Zylinderschale bzw. das 300K Rohr höchstens mit einem Außendruck von 2,84 bar belastet werden darf. Ist der Druck größer, so kann es zu einem elastischen Einbeulen kommen. Die Zylinderschale wird allerdings nur vakuumisiert und daher mit einem Außendruck von maximal 1 bar belastet. Daraus folgt, dass man einen zusätzlichen Sicherheitsfaktor von 2,8 erhält.

Berechnung gegen plastisches Verformen

Der Sicherheitsbeiwert gegen plastisches Verformen beträgt für Aluminium und dessen Legierungen S – 1,6.

$$p_2 = \frac{20 \cdot 80 \frac{N}{mm^2}}{1,6} \cdot \frac{(3-0-0)mm}{306mm} \cdot \frac{1}{1+\frac{1,5 \cdot 0,333 \left(1 - 0,2 \frac{306mm}{691,8mm}\right) \cdot 306mm}{100 \cdot (3-0-0)\,mm}}$$

$$p_2 = (1000 \cdot 0,0098 \cdot 0,683)bar \approx \underline{\underline{6,7\,bar}}$$

p_2 ist größer als p_1 und wird daher nicht betrachtet. Es bleibt daher bei der obigen Aussage. Der Überdruck darf maximal 2,8 bar betragen.

4.3.5. Darstellung der FEM Berechnung und Vergleich

Um einen genauen Vergleich mit der FEM- Analyse zu bekommen, wird in der Gleichung 19 die Unrundheit und der Sicherheitsbeiwert außer Betracht gelassen.

Somit gelangt man zu der Gleichung

$$p_2 = 20 \cdot K \cdot \frac{s_e}{D_a} \tag{19}$$

.

Stellt man diese Gleichung nach K um, so erhält man die Spannung.

$$K = p_2 \cdot \frac{D_a}{20 \cdot s_e} = 1bar \cdot \frac{306mm}{20 \cdot 3mm} = 5,1 \frac{N}{mm^2}$$

Das Berechnungsverfahren der AD- Merkblätter liefert einen Wert, der nur wenig von der FEM- Analyseergebnis abweicht (siehe Abbildung 11). Das Programm kommt bei feiner Vernetzung zu einer maximalen Spannung von etwa

$$\sigma = \underline{\underline{5,26 \frac{N}{mm^2}}}$$

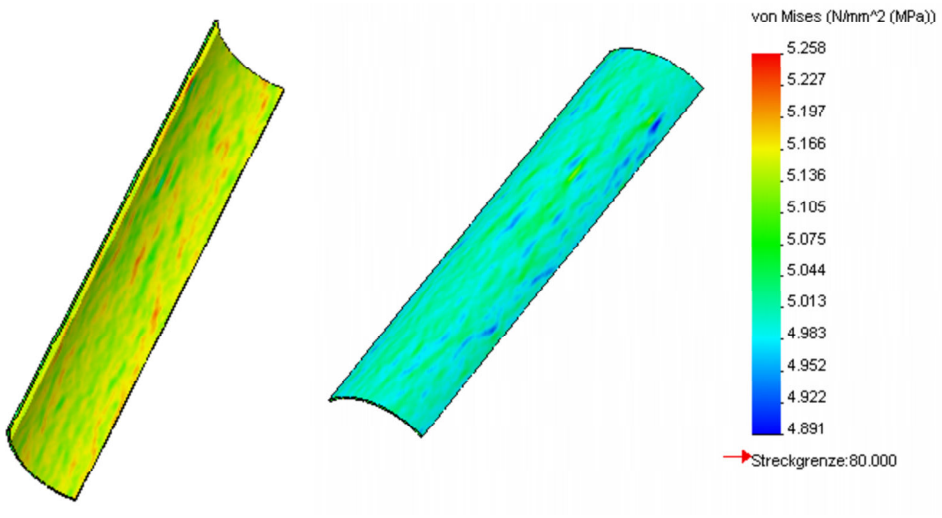


Abbildung 11: Vergleich der Spannung am 300K Rohr

Fazit

Die Berechnung der Spannung ist mit dem FEM- Programm meist schneller durchzuführen und liefert bei feiner Vernetzung immer ein genaueres Rechenergebnis. Des Weiteren bietet es den Vorteil, dass auch komplexe Bauteile und Baugruppen berechnet werden können. Die AD- Merkblätter dagegen zeigen einen Rechenweg für einfache Teile, wie z.B. Zylinderschalen, ebene Böden und Platten und Tellerböden und haben den Vorteil, dass Faktoren wie z.B Unrundheit und Sicherheit direkt in die Rechnung miteinfließen.

5. Arbeitschritte im Konstruktionsprozess

5.1. Vorgehensweise

Das Vorgehen zum Lösen der zu bearbeitenden Thematik unterteilt sich im Wesentlichen in zwei Schritte. Es werden zuerst verschiedene Konstruktionskonzepte aufgezeigt und anschließend das geeignetste Konzept mit Hilfe von Berechnungen nach der FE- Methode zu einer fertigen Konstruktion ausgearbeitet. Der Lösungsweg richtet sich nach dem Werteanalyse- Arbeitsplan nach DIN 69910 und VDI 2800 (siehe Abbildung 12).

Ein Konstruktionsprozess zeichnet sich in besonderer Weise dadurch aus, dass der Konstrukteur eine Reihe von nichtalgorithmisierbaren Aufgaben bzw. schlechtstrukturierten Probleme zu lösen hat. Das bedeutet, dass im Anfangsstadium vorerst keine konkreten Zielvorstellungen vorhanden sind und auch unklar ist, wie man zu dem Ziel gelangen kann. Die dann anstehende Vorgehensweise zeigt Abbildung 12.

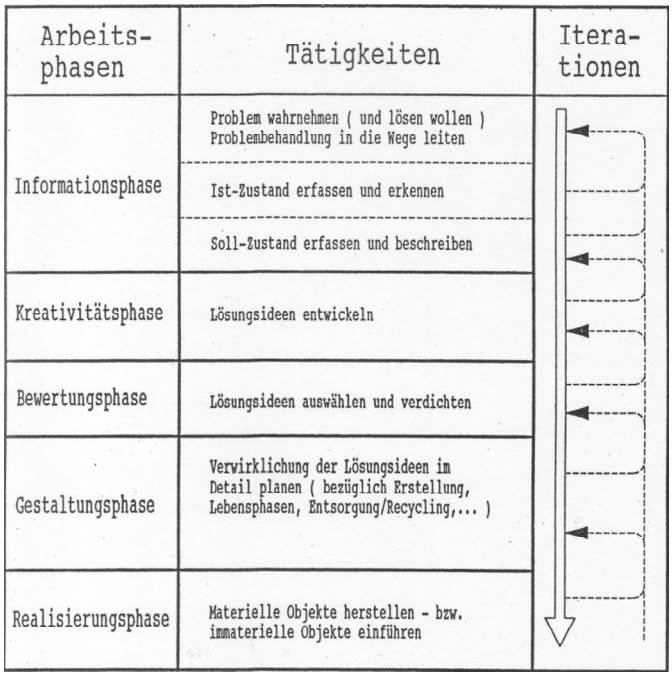


Abbildung 12: Werteanalyse Arbeitsplan [10]

Das Ziel einer solchen Methodik und letztlich des gesamten Konstruktionsprozesses besteht darin, Gedankengänge und Entscheidungen nachvollziehbar zu machen, Fehler zu vermeiden und somit eine gute Verwirklichung der Konstruktion zu ermöglichen.

5.2. Istzustand

In der Informationsphase ist es wichtig sich über die Gegebenheiten ein klares Bild zu verschaffen. Den Istzustand konnte ich durch Observieren der Empfängerbox und des zuletzt darin befindlichen Empfangskryostaten, sowie anhand Kryostaten früherer Einsätze erkennen. Zeichnungen und Fotos standen mir ebenfalls zur Verfügung.

In der Abbildung 13 wird zur Veranschaulichung ein gewöhnlicher Single-Beam Kryostat[3] dargestellt, der im Teleskop Effelsberg im Einsatz war. Beschriftet sind die wichtigsten Komponenten des Kryostaten.

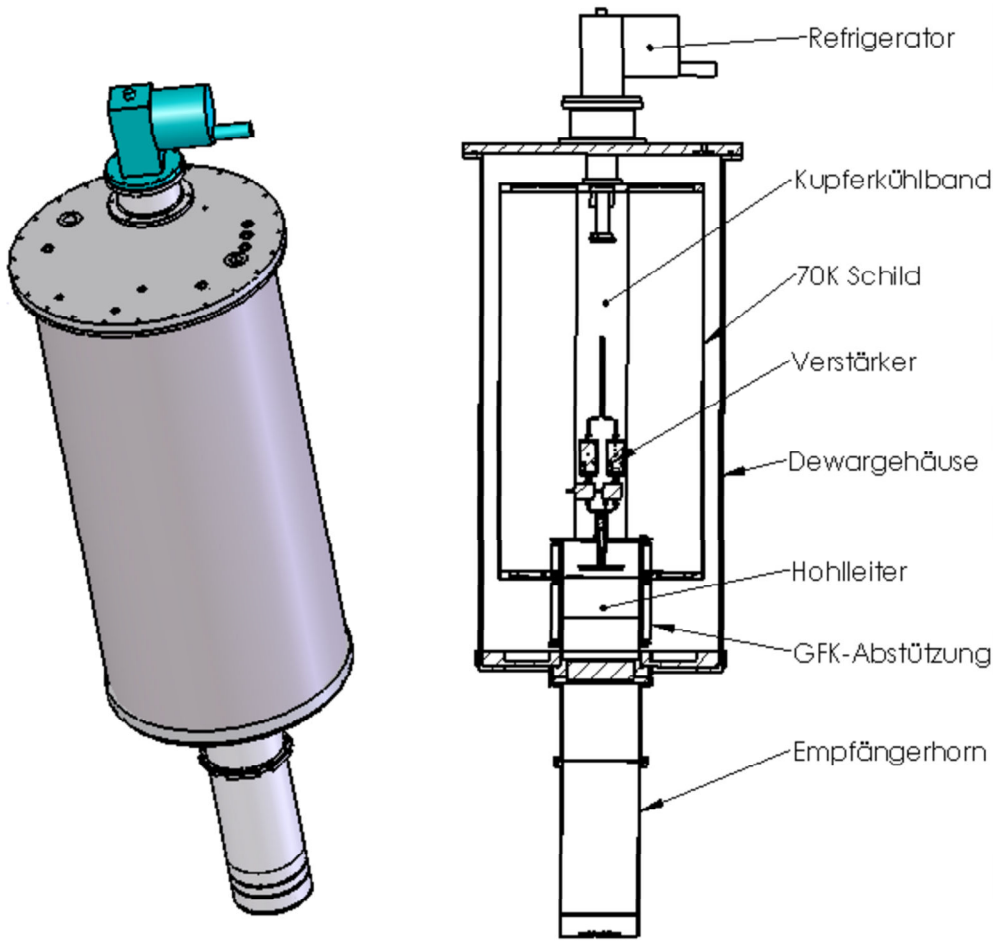


Abbildung 13: Kryostat

[3]Empfangskryostat mit einem einzigen Empfangshorn

5.2.1. Beschreibung der Funktionen des Kryostaten

Die Verstärker sind von einem Mantel, dem Dewargehäuse, umgeben (siehe Abschnitt 2.4 auf Seite 6). Dieser hat die Hauptfunktion den Innenraum auf Hochvakuumniveau zu halten. Auf dem Dewargehäuse sitzt die Refrigerator-Kryopumpe (siehe Abschnitt 3.1.2 auf Seite 10), die den Verstärker vom Stutzenende (zweite Kühlstufe) über ein Kupferkühlband auf niedrige Temperaturen($T \leq 15K$) abkühlt. Auf der ersten Kühlstufe des Refrigerators sitzt das Strahlungsschild bzw. 70K Schild (siehe Abschnitt 2.5), das aufgrund der mechanischen Verbindung Wärme über das komplette Schild transportiert. Des Weiteren hat das 70K Schild die Aufgabe bestmöglichst die Wärmestrahlung vom Dewargehäuse zu reflektieren. Mit Hilfe von GFK-Stäben wird das Schild vom Dewarbehälter abgestützt und aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Stabmaterials thermisch isoliert. Der Hohlleiter ist der Wellenleiter für elektromagnetische Wellen, in dem sich hohe Frequenzen im Gegensatz zu Kabeln sehr verlustarm übertragen lassen. Am Hohlleiter angeflanscht sitzen die Eingangsverstärker. Das Empfängerhorn ist die Antenne des Empfangskryostaten.

Zur besseren Übersicht habe ich die wichtigen Einzelfunktionen in einer Funktionsliste dargestellt (siehe Abbildung 14 auf der nächsten Seite)

5.2.2. Diskussion der zuvor eingesetzten Kryostaten

Wie bereits in der Einleitung und im Kapitel 2.2.1 auf Seite 3 erwähnt, war es bis zum jetzigen Zeitpunkt üblich, nur einen Empfangskryostaten pro Empfängerbox vorzusehen. Aufgrund dessen war es oft nötig einen Tauschvorgang der Box im Teleskop vorzunehmen. Es gab nur einen Sonderfall, bei dem vor einigen Jahren zwei Empfänger in einer Box eingesetzt wurden.

Im Max-Planck-Institut in Bonn findet man viele Dewar vor, die überdimensioniert sind. Oftmals wurde nicht darauf geachtet, Größe und Gewicht zu sparen, weil man nicht die technischen Möglichkeiten und das Fachwissen besaß um Festigkeitsberechnungen durchzuführen. Dies führte auch dazu, dass man stabile aber auch schwere Materialien wie z.B. Edelstahl verwendete, um die sichere Gewissheit zu haben, dass der Dewar dem Außendruck von 1 bar standhält.

Bei Dewars mit Empfängern großer Wellenlänge wurden in den letzten Jahren auf rohrförmige Behälter vertraut, weil diese einen höheren Druckwiderstand aufweisen als beispielsweise Vierkantprismen. Durch das Abnehmen des Kessels können Wartungsarbei-

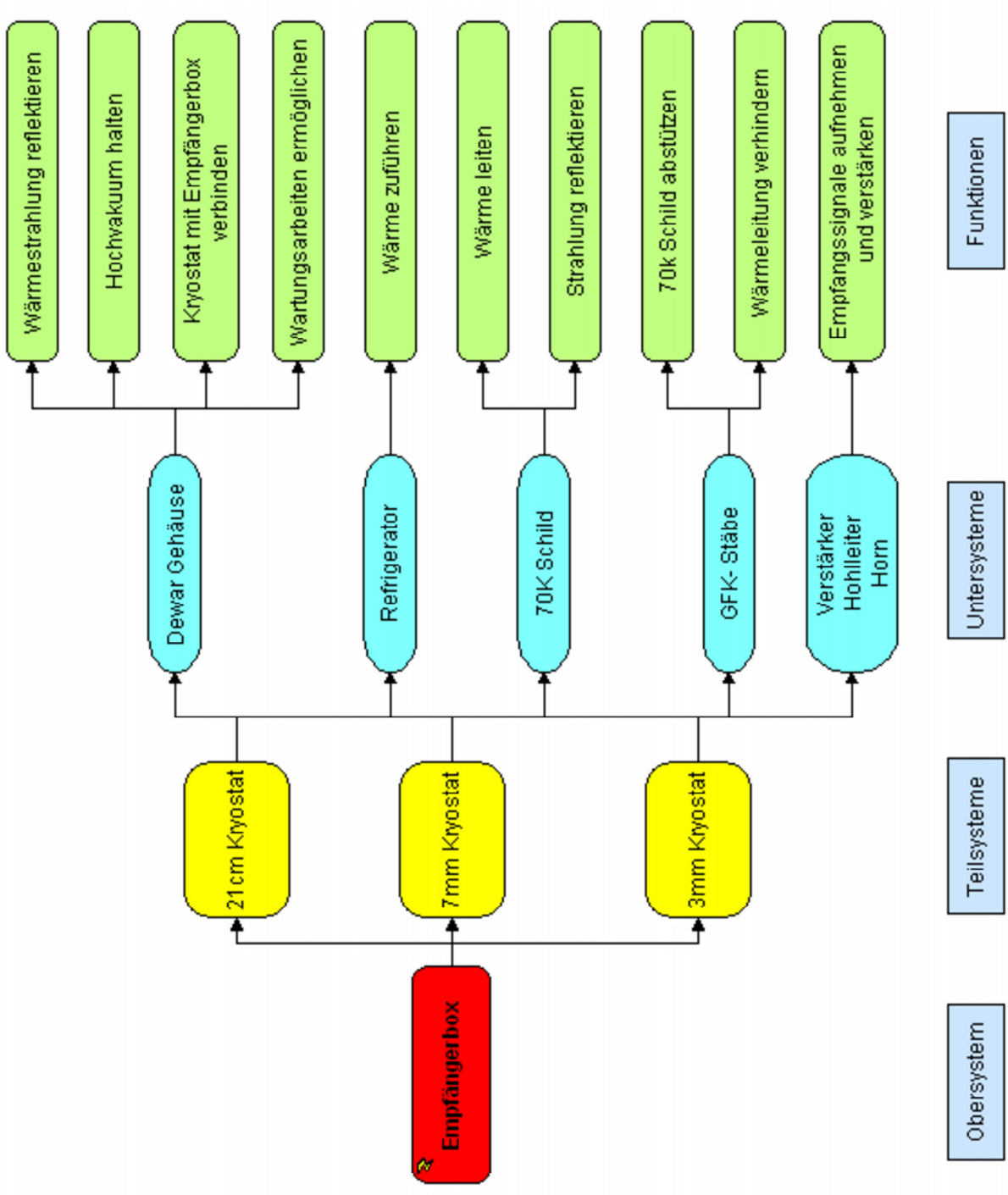


Abbildung 14: Funktionendiagramm

ten durchgeführt werden. Allerdings muss man dafür den Dewar aus der Empfängerbox nehmen, weil der Platz in vertikaler Richtung nicht ausreicht.

Für Dewars mit Empfängern kleiner Wellenlänge wurden quaderförmige Behälter bevorzugt. Diese bestanden aus Aluminium mit dicken Wandstärken. Um das Gewicht ein wenig zu senken, wurden teilweise Ausfräsungen zur Gewichtserleichterung vorgesehen. Quaderförmige Dewars bieten aufgrund der flachen Flächen gute Anschlussmöglichkeiten für Refrigerator, Vakuumpumpenanschluss ect. sowie gute Wartungsmöglichkeiten.

In der Vergangenheit war es oftmals nicht nötig, sich um Dimension und Gewichtseinsparungen Gedanken zu machen. Die Situation ändert sich nun durch den Einsatz von drei Dewars in einer Empfängerbox. Somit steigt natürlich das Gesamtgewicht der Empfängerbox, was zu einer noch größeren Belastung der verstrebten Stützbeine führt, die die Primärfokuskabine tragen.

Zum Schutz vor Wärmestrahlung wurden Kupfer- und Aluminiumschilder benutzt. Aber auch Materialien die mit Gold überzogen wurden, kamen zum Einsatz. Alle drei Möglichkeiten haben sich in der Vergangenheit bewährt und weisen einen hohen Emissionsgrad und eine gute Wärmeleitfähigkeit auf.

5.3. Beschreibung des Sollzustandes

Mit Hilfe einer Anforderungsliste wurden die Forderungen und Wünsche des Auftraggebers herausgearbeitet. Während der Informationsphase ist dies für das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung eine wichtige Voraussetzung, damit Ergänzungen und Änderungen auf ein Minimum beschränkt bleiben. Dabei gilt grundsätzlich:

- Forderungen müssen unter allen Umständen erfüllt werden
- Wünsche sind nach Möglichkeit zu berücksichtigen

Des Öfteren kann es vorkommen, dass sich Forderungen widersprechen, d.h. nicht alle Forderungen sind zwingend erfüllbar. Dann muss ein Kompromiss zwischen den Forderungen gefunden werden.

Die folgend dargestellt Tabelle ist die Anforderungsliste, für das Thema meiner Diplomarbeit. Alle angegebenen Anforderungen weisen im Grunde auf den Sollzustand der Kryostaten und auf ihre Situation in der Empfängerbox hin.

F/ W	Anforderungen
	Geometrie:
F	Maximaler radialer Versatz der Dewars vom Zentrum des Empfängerboden-platte – 260mm
F	Der 21cm Kryostat sowie der 3mm und 7mm Kryostat müssen innerhalb eines Durchmesser von D – 950mm auf der Bodenplatte platziert werden
F	Die Kryostaten müssen so platziert werden, dass Wartungsarbeiten an ihnen möglich sind
F	Die Höhe der Kryostaten sollte vom Boden der Empfängerbox das Maß 1250mm nicht überschreiten
F	Unterkante Horn der Dewar bis Unterkante Emfängerfußplatte soll 115mm betragen
W	Strahlungsfläche der 70K Schilder möglichst klein halten
F	Den Druckbehälter so gestalten, dass Spannungen gering ausfallen und daraus Gewichtseinsparungen resultieren
	Kräfte, Statik:
F	Die Gewichtskraft der drei Kryostaten muss unter 270 kg liegen
F	Die Dewar müssen einem Außendruck von 1 bar standhalten
W	Möglichst geringe Verschiebungen
F	Keine plastischen Verformungen
W	Einigermaßen gleichmäßige Verteilung der Last auf der Empfängerbodenplatte
	Material:
F	Vakuumgeeignetes Material als Dichtkörper verwenden
F	Keine Korrosion, elektrochemische Spannungsreihe beachten
F	Strahlungsschilder aus emissionsarmen Material fertigen
F	Leichte Werkstoffe benutzen
W	Geringer Ausdehnungskoeffizient der Bauteile
	Verbindungs- und Dichtungsart:
F	Stoff- und Formschlussverbindungen vorsehen
W	Wenig Dichtflächen vorsehen
W	Verkleben von Bauteilen statt Dichtring

	Oberfläche:
F	Oberflächen mit geringen Emissionskoeffizienten für die 70K Bauteile vorsehen, eventuell Beschichten
F	Feinbearbeitung der Oberflächen für bessere Reflektion
W	Gutes optisches Aussehen der äußeren Bauteile der Kryostaten
	Energie:
F	Geringe Strahlungsabsorption der 70K Bauteile
F	Geringe Materialwärmeleitung von der äußeren Behälterwand an die 70K Bauteile
F	Gute Wärmeleitung der 70K Bauteile
W	Wenig Dichtflächen vorsehen, zur Minderung des Leckverlustes
	Ergonomie:
F	Einfache Wartungsarbeiten an Dewar für Kühlmaschine und Verstärker gewährleisten
W	Wartungsarbeiten an Hohlleiter ermöglichen
	Sicherheit und Kontrolle:
F	Vorschriften nach AD-Merkblätter beachten
F	Sicherheit des Bedienpersonals gewährleisten
W	Formschlüssige Verbindungen auf Druck und nicht auf Zug belasten, z.B. Schrauben
	Fertigung:
W	Bauteile so gestalten, dass sie in der institutseigenen Werkstatt zu Fertigen sind
W	Grobe Toleranzen, einfache Bauteile
	Transport:
F	Befestigungsmöglichkeiten für den Kran am Dewar vorsehen
	Kosten:
F	Vorveranschlagtes Buget nicht überschreiten
	Termin:
F	Fertigstellung 30.09.2006

6. Lösungskonzepte des dreifach Kryostaten

Zu Beginn der Diplomarbeit legten Herr Dr. Keller und Frau Dipl. Ing. Teuber fest, dass ich einen Empfangskryostaten für den 21cm Wellenlängenbereich konstruieren sollte. Der Frequenzbereich der beiden anderen Empfänger stand bis zum Verfassen dieser Zeilen noch nicht fest. Deshalb einigte man sich in der Arbeitsgruppe darauf, einen Dewar für den 7mm und 3mm Wellenlängenbereich zu konstruieren.

6.1. Werkstoffe

6.1.1. Forderungen an die Werkstoffe

Grundvorrausetzung für die Auswahl eines Werkstoffs zur Herstellung eines Kryostaten ist, dass das Material vakuumgeeignet sein muss. Der Anspruch an Werkstoffe, an deren Bearbeitung und Vorbehandlung, werden umso größer, je niedriger der Absolutdruck im Vakuumbehälter ist.

Die Werkstoffe müssen sowohl Forderungen vakuumtechnischer Natur als auch vakuumtechnischer Verfahren erfüllen [1].

Forderungen vakuumtechnischer Natur:

- geringe Gasdurchlässigkeit
- leichte Entgasbarkeit (geringer Fremdgasgehalt)
- saubere Oberflächen (keine oder nur leicht adsorbierte[4] Schichten)
- geringer Eigendampfdruck (Dampfdruckkurve beachten)

Forderungen aufgrund vakuumtechnischer Verfahren:

- chemische Resistenz gegenüber Gasen und Dämpfen
- Wärmedehnungsverhalten
- Temperaturwechselbeständigkeit

[4] Adsorption ist die Bindung von Atomen und Molekülen an der Oberfläche eines festen Körpers

- mechanische Festigkeit

Des Weiteren ist zu beachten, dass manche Werkstoffe im Dewar tieftemperaturbeständig sein müssen. Sie sollten bei tiefen Temperaturen noch gute Festigkeitswerte und nur einen geringen Abfall der Bruchdehnung und der Kerbschlagzähigkeit aufweisen. Im Wesentlichen hängen die Festigkeitseigenschaften vom Typ des Kristallgitters, von der Reinheit, von der chemischen Zusammensetzung, von Fehlern im Werkstoff und vom Herstellungsprozess ab. Eine bleibende Verformung setzt ein, wenn sich aufgrund einer Belastung, eine Gleitbewegung zwischen benachbarten Gitterebenen ausbildet. Störstellen behindern das Gleiten. Durch das Legieren mit anderen Werkstoffen wird die Anzahl der Störstellen erhöht und eine Zunahme der Streckgrenze erreicht.

Mit sinkender Temperatur nehmen Streckgrenze und Zugfestigkeit zu. Berechnet und konstruiert man also Bauteile für den Dewar bei Zimmertemperatur, so ist sicher, dass bei 70 Kelvin oder niedriger die Bauteile den geforderten Belastungen standhalten. Allerdings gilt es zu beachten, dass bei Metallen mit kubisch flächenzentriertem Gitter, z.B. austenitische Stähle, Al, Cu und Ni die Verformungsfähigkeit bei etwa 100K schlagartig abnimmt. Diese lässt sich aber durch Legieren wieder erhöhen.

Ebenso ist für die Auswahl des Werkstoffs eine gute Korrosionsbeständigkeit, eine gute Schweißbarkeit, eine geringe Dichte, gute Fertigungseigenschaften und bestimmte Wärmeübertragungseigenschaften zu beachten.

6.1.2. Diskussion der Werkstoffe des Druckbehälter

Für den Bau eines Druckbehälters kommen die Werkstoffe Normalstahl, Edelstahl, Kupfer und Aluminium in Frage. Die Gasdurchlässigkeit für diese Werkstoffe ist bei Zimmertemperatur äußerst gering und sinkt mit zunehmender Wandstärke. Deshalb kann die Gasdurchlässigkeit außer Betracht gelassen werden.

Edelstahl und Aluminium

Eines der meist verwendeten Metalle in der Vakuumtechnik ist Edelstahl X 5 CrNi 18 10 nach DIN EN 10088. Dieser ist ein austenitischer rostfreier Chrom-Nickel Stahl, der auch als V_2A bezeichnet wird. Der Stahl wird gewöhnlich bis zu einem Absolutdruck von $10^{-10}bar$ eingesetzt. Das ist möglich, weil er nicht oxidiert und bis zu einer sehr hohen Temperatur ausgeheizt werden kann. Somit wird eine Permeation[5] vermindert.

[5]Permeation ist das Durchdringen oder Durchwandern eines Stoffes durch einen Festkörper

Ein weiterer Grund für die Wahl von Edelstahl ist, dass er sehr einfach elektrolytisch polierbar ist. Somit kann eine feine Oberfläche gefertigt werden mit dem Zweck eine rostfreie und von Umgebungseinflüssen geschützte Oberfläche zur Verfügung zu haben. Des Weiteren minimiert das Polieren den effektiven Oberflächenbereich und den Wert für die Aufnahme von Gasteilchen aufgrund von Adsorption. Edelstahl lässt sich gut schweißen und bietet dabei einen Anwendungsbereich bis ins Ultrahochvakuum.

Ein Nachteil von V_2A ist das hohe Gewicht im Verhältnis zu Aluminium. Mit $7,9\frac{kg}{dm^3}$ ist die Dichte etwa dreimal größer als bei Aluminium, das eine Dichte von $2,7\frac{kg}{dm^3}$ besitzt. Der Elastizitätsmodul von Aluminium und dessen Legierungen liegt zwischen $6,5 \cdot 10^4 MPa$ und $7,2 \cdot 10^4 MPa$ und der von Edelstahl bei etwa $20 \cdot 10^4 MPa$. Um das gleiche Dehnungsverhalten für Aluminium wie bei zu Edelstahl zu erreichen, muss die Wandstärke nur um etwa 35-40% erhöht werden. Deshalb wird eine Gewichtsersparnis von mindestens der Hälfte von Edelstahl erreicht. Zum besseren Verständnis kann man dazu die Durchbiegung eines Biegebalkens betrachten, diese beträgt nach Gleichung 20 allgemein:

$$w = \frac{F \cdot l^3}{3EI} \tag{20}$$

Die Kraft F und die Hebelarmlänge l können für den Vergleich als Konstanten angenommen werden. Das Flächenträgheitsmoment (Gl.21) setzt sich aus der Breite b und der Höhe h zusammen. h geht dabei in der dritten Potenz ein und wird für Aluminium auf 1,4 gesetzt, weil von einem 40% dickeren Blech ausgegangen wird.

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \tag{21}$$

$$I_{Al} = \frac{b}{12} \cdot 2,744$$

Daraus ergibt sich die folgende Vergleichsgleichung:

$$\frac{E_{Edelstahl}}{E_{Aluminium}} \approx \frac{I_{Aluminium\,h=1,4}}{I_{Edelstahl\,h=1}}$$

Aluminium hat allerdings den Nachteil, dass es schlecht zu schweißen ist. Um gute Schweißnähte zu fertigen, muss die Wandstärke eine gewisse Dicke haben, damit auch

die Dichtheit der Nähte garantiert werden kann. Sind Schweißnähte erforderlich und es bietet sich keine andere Möglichkeit der Fertigung an, dann ist die Wahl von Edelstahl für manche Modellformen doch sinnvoller, sofern an Gewicht und Platz im Vergleich zu Aluminium gespart werden kann.

Die Oberfläche von Aluminium ist weicher und damit anfälliger für Kratzer. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein O-Ring auf einer Dichtfläche nicht richtig abdichtet ist also höher. Damit die Oberfläche nicht oxidiert und einfach zu säubern ist, kann der Dewar auch mit Nickel elektrolytisch beschichtet werden.

Kupfer und Normalstahl

Kupfer bietet sich für die Konstruktion eines Außenbehälters weniger an. Die Gründe liegen auf der fertigungstechnischen Seite. Es ist kompliziert technisch reines Kupfer zu verarbeiten. Kupferlegierungen z.B. mit Zink sind als Druckbehälter im Hochvakuum nicht zugelassen und entfallen daher ebenso. Des Weiteren würde Kupfer keine Gewichtsersparnis in Bezug auf ältere Kryostaten erzielen, welche meist aus Edelstahl gefertigt wurden.

Der Einsatz von Stahl ist ebenso ungeeignet. Er bietet zum Edelstahl nur den Vorteil, dass er etwa um das vierfache billiger ist. Ein großer Nachteil ist jedoch, dass er stark korrosionsanfällig ist.

Auswahl des Werkstoffs für den Druckbehälter

Ein wichtiger Punkt der Diplomarbeit war die Minimierung des Gewichts der Kryostaten. Aus diesem Grund, aber auch aufgrund der sehr guten Korrosionsbeständigkeit und der guten Zerspanbarkeit wird Aluminium bzw. Al-Legierungen als Material für den Druckbehälterbau gewählt. Tabelle 1 verschafft einen Überblick über verschiedene Aluminiumwerkstoffe mit deren physikalischen Eigenschaften sowie einen Vergleich mit Edelstahl, Normalstahl und Kupfer.

6.1.3. Diskussion der Werkstoffe des 70K Schildes

Bei der Konstruktion des Kryostaten sind für das 70K Schild zwei Punkte besonders zu beachten:

- Bauteile, welche die gleiche Temperatur haben sollen, müssen gut wärmeleitend verbunden sein

Werkstoff	Dichte in $\frac{kg}{dm^3}$	0,2% Dehngrenze in MPa	E-Modul in MPa	Korrisions-bestandig-keit	Spanbarkeit
Edelstahl	7,9	185	2,0	optimal	mäßig
Normalstahl	7,85	235-355	2,1	schlecht	sehr gut
E-Kupfer	8,9	40	1,2	gut	mäßig
Al 99,5	2,7	25	0,65	sehr gut	mäßig
Al Mg 3	2,66	80	0,7	sehr gut	gut
Al Mg 4,5 Mn	2,66	125	0,7	sehr gut	gut
Al Mg Si 1	2,7	300	0,7	gut	gut

Tabelle 1: Werkstoffvergleich für den Druckbehälter [20], [17], [15]

- zur Abstützung des 70K Schildes zur 300K Außenwand sind schlecht leitende Abstützungen erforderlich

Um dies zu gewährleisten werden Werkstoffe mit guten und mit schlechten Wärmeleitfähigkeiten benötigt.

Werkstoffe mit einer guten Wärmeleitfähigkeit

Dazu zählen hauptsächlich Kupfer, Gold, Silber und Aluminium und dessen Legierungen. Das 70K Schild muss bestimmte Festigkeitsansprüche erfüllen, weil sein Eigengewicht im Dewar abgestützt werden muss. Dazu ist immer eine gewisse Wandstärke erforderlich, die bei dieser Diplomarbeit im Bereich zwischen 0,5mm und 10mm liegt. Damit ist klar, dass das benötigte Volumen einen hohen Kostenaufwand bei einer Wahl von Silber und Gold bedeuten würde. Deshalb werden diese Werkstoffe nur als Beschichtungsmaterial betrachtet und bekommen im Teilabschnitt Wärmestrahlung eine größere Bedeutung zugeordnet.

Aluminium

Werte für die Wärmeleitfähigkeit bei tiefen Temperaturen sind nur sehr spärlich zu bekommen. Allgemein kann man aber behauptet, dass sie bei Legierungen mit sinkender Temperatur abnimmt und bei Reinaluminium (Al 99; Al 99,5; Al99,8) zunimmt. AlMg 4,5 Mn hat bei 70K etwa $\lambda = 50\frac{W}{m \cdot K}$ (siehe Linie 4 von Abbildung 15). Das ist weniger als die Hälfte der Wärmeleitfähigkeit im Vergleich bei Raumtemperatur (siehe Tabelle 2).

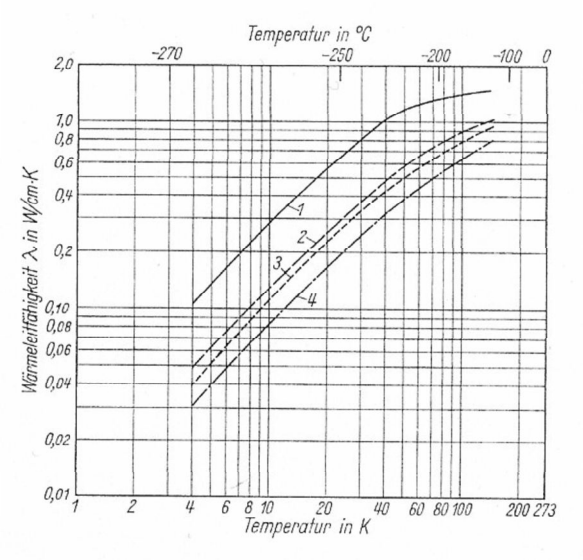


Abbildung 15: Wärmeleitfähigkeit AlMg 4,5 Mn (Linie 4) [6]

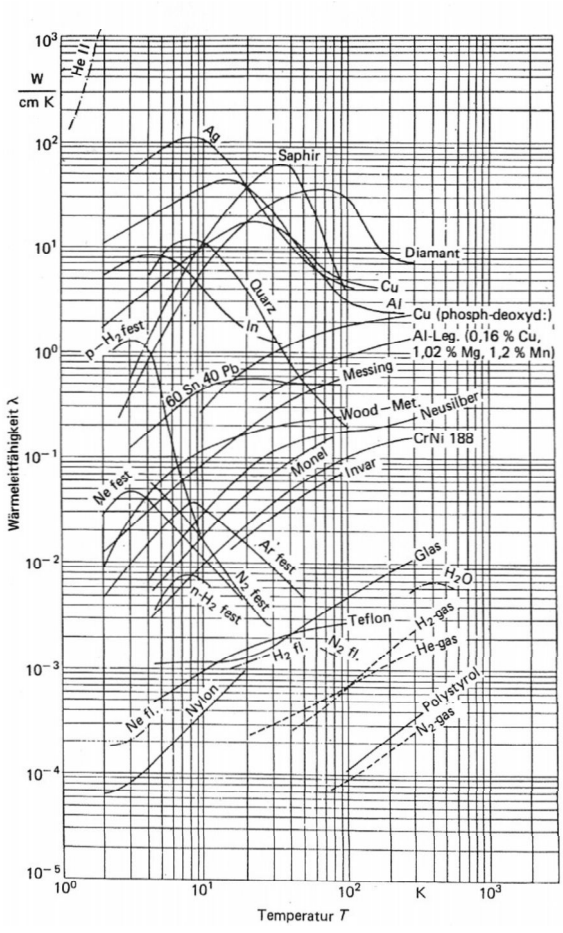


Abbildung 16: Wärmeleitfähigkeit bei tiefen Temperaturen [8]

Al 99,0 besitzt bei 293 Kelvin eine Wärmeleitfähigkeit von etwa 210 $\frac{W}{m \cdot K}$. Bei 70 Kelvin erhöht sich der Wert auf $\lambda \approx 310 \frac{W}{m \cdot K}$. Aus der Abbildung 16 auf der vorherigen Seite ist zu erkennen, dass Reinaluminium bei 70 Kelvin eine Wärmeleitfähigkeit von etwa 500 $\frac{W}{m \cdot K}$ erreicht. Der Wert für Al99,5 war in der Literatur nicht zu finden. Deshalb wurde ein geschätzter Wert von $\lambda = 400 \frac{W}{m \cdot K}$ angenommen, der zwischen Al 99,0 (siehe Anhang auf Seite 122) und hochreinen Aluminium liegt.

Werkstoff	W.-Nr	0,2% Dehngrenze in MPa	Zugfestigkeit in MPa bei 293 K	Wärmeleitfähigkeit in $\frac{W}{m \cdot K}$ bei 293 K
Al Cu Mg 1	3.1355	245	385	130
Al Mg 4,5 Mn	3.3547	125	275	110
Al Mg Si 1	3.3215	160	215	186
Al Mg 3	3.3535	80	190	150
Al 99,5	3.0255	20-60	75	220

Tabelle 2: Vergleich von verschiedenen Aluminiumsorten [20], [14], [15]

Die Streckgrenze und besonders die Zugfestigkeit nehmen bei Al-Mg-Legierungen mit sinkender Temperatur zu [8].

Kupfer

Hochreines Kupfer hat bei Zimmertemperatur eine Wärmeleitfähigkeit von etwa $400 \frac{W}{m \cdot K}$. Mit sinkender Temperatur nimmt sie stark zu und weist bei 70K eine Wärmeleitfähigkeit von $500 \frac{W}{m \cdot K}$ bis $600 \frac{W}{m \cdot K}$ auf. Von großem Interesse sind natürlich Kupfersorten die vakuumtauglich sind. OFE- Kupfer ist deshalb am besten geeignet. Diese Sorte ist ein hochreines, nicht desoxidierte und sauerstofffreies Kupfer, das im Vakuum keine verdampfbaren Elemente aufweist.

Aus der Abbildung 17 kann man die Wärmeleitfähigkeit bei 70K (-203°C) ablesen. Diese beträgt etwa $\lambda \approx 550 \frac{W}{m \cdot K}$. Der E-Modul steigt ebenso mit sinkender Temperatur. Bei Raumtemperatur liegt er bei etwa $1,25 \cdot 10^5$ MPa und bei 70K bei $E \approx 1,35 \cdot 10^5$MPa (Abbildung 18).

Die Differenz der Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und Aluminium zu anderen Werkstoffen ist so groß, dass es keinen Sinn macht weitere Werkstoffe zu untersuchen. Als Vergleich dient Abbildung 16.

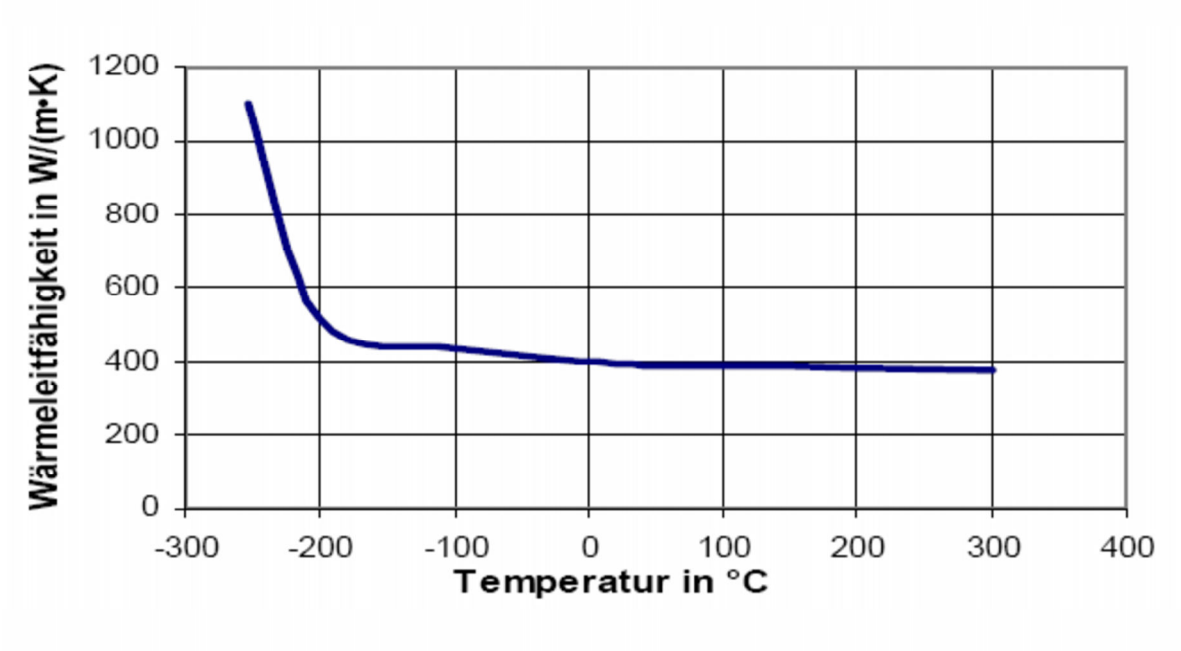


Abbildung 17: Wärmeleitfähigkeit von OFE-Kupfer [17]

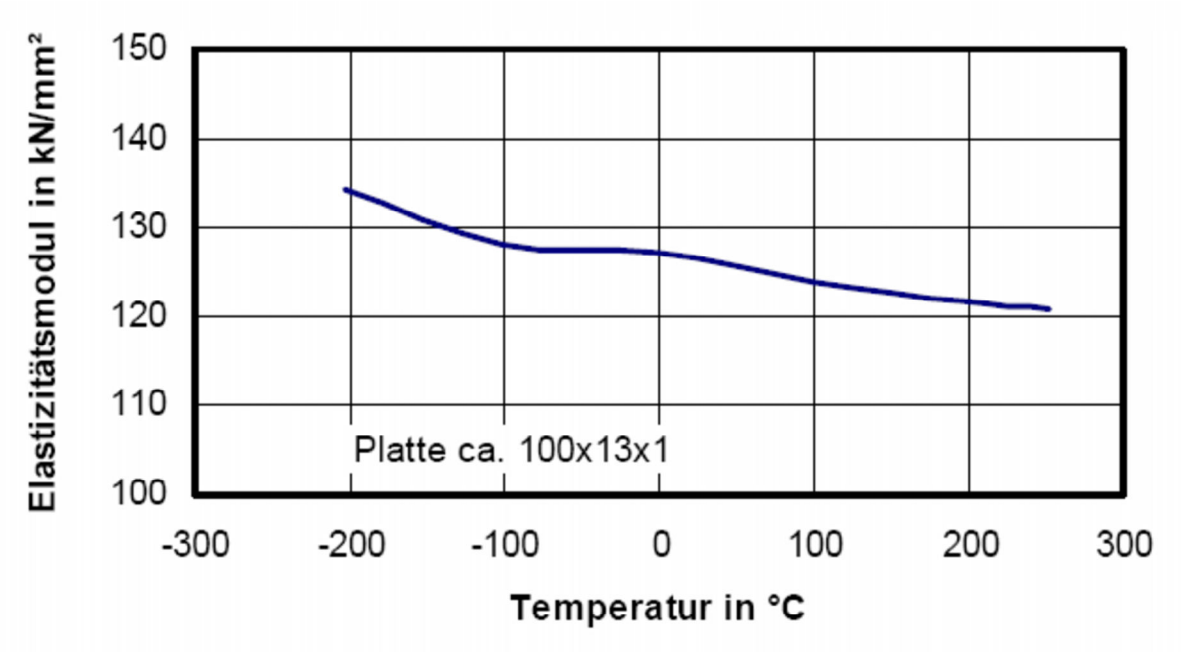


Abbildung 18: E-Modul von OFE-Kupfer [17]

Werkstoffe mit einer schlechten Wärmeleitfähigkeit (Isolatoren)

Zu Isolatoren und schlechten Wärmeleitern gehören Metalle und Kunststoffe. Bei Metallen hat besonders Edelstahl (X8CrNiMn 18 10) einen geringen Wärmetransport mit $\lambda = 0,08\frac{W}{cm \cdot K}$ [18] bei einer Temperatur von 76 Kelvin. Andere Metalle haben einen besseren Leitwert und werden aus fertigungstechnischer Sicht ausgeschlossen, wie z.B. Blei (zu weich) und Mangan (zu hart). Die Streckgrenze und Zugfestigkeit nehmen mit sinkender Temperatur deutlich zu [8].

Unter den Kunststoffen zeigen besonders glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) und Thermoplaste die niedrigsten Wärmeübertragungswerte. Allerdings fallen aufgrund der geringen Festigkeitswerte Thermoplaste nicht unter die engere Auswahl [7].

GFK-Materialien haben eine Wärmeleitfähigkeit von 0,2-0,6 $\frac{W}{m \cdot K}$ bei 293 Kelvin [21]. Mit sinkender Temperatur nimmt diese nochmals ab. Genaue Werte dazu liegen nicht vor, allerdings ist davon auszugehen, dass die Wärmeleitfähigkeit bei 70 Kelvin auf jeden Fall nicht über dem Wert bei Raumtemperatur liegt. Die Festigkeit des GFK-Werkstoffes fällt mit sinkender Temperatur. Werte für solch tiefe Temperaturen sind nach Anfrage bei verschiedenen Firmen nicht zu bekommen. Jedoch hat man im Max-Planck-Institut die Erfahrung gemacht, dass die Festigkeitswerte sich kaum von Denen bei 20°C unterscheiden. Zur Sicherheit wird daher von einer 20% geringeren Festigkeit ausgegangen.

Das GFK-Material stellt also eine sehr gute Wahl da, um das 70K Schild von dem 300K Außenbehälter thermisch zu trennen. Nachfolgend wird dieser Kunststoff noch etwas näher erläutert.

Ein glasfaserverstärkter Kunststoff ist ein Faserkunststoffverbund aus Epoxydharz oder Polyesterharz in Kombination mit Glasfasern. Der Kunststoff (Matrix) umgibt die Glasfasern, die durch Adhäsivkräfte[6] an die Matrix angebunden sind. Durch das Zusammenwirken der Eigenschaften von Matrix und Glasfasern ergibt sich ein neuer Werkstoff. Dabei hat das GFK-Material ein richtungsbezogenes Elastizitätsgesetz und ist anisotrop. Das bedeutet, dass die Belastbarkeit in Faserrichtung deutlich höher ist, als in Querrichtung. Abbildung 19 zeigt die Lage der Glasfasern zur Kunststoffmatrix.

[6]Eine Adhäsionskraft ist die Zusammenhangskraft bzw. Haftkraft zwischen den Molekülen verschiedener Werkstoffe

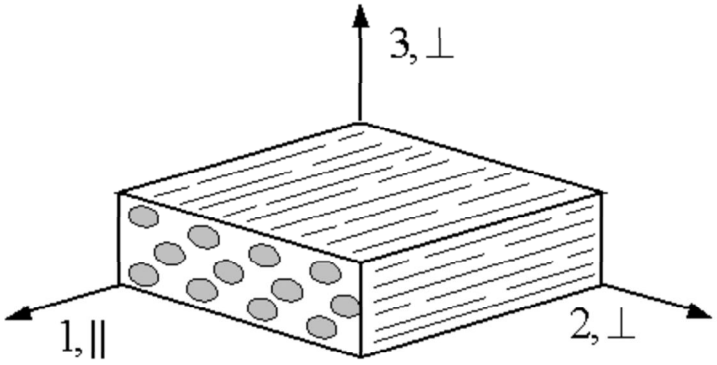


Abbildung 19: Unidirektionale Schicht [21]

Die Fasern besitzen im Gegensatz zur Matrix eine hohe Steifigkeit und nehmen deshalb bei auftretender Belastung den größten Teil der Last auf. Bei einer Belastung in Querrichtung weisen die Fasern ein ähnliches E-Modul wie die Matrix auf. Die Matrix bettet die Fasern und schützt sie vor Druckbelastung und Umgebungseinflüssen.

Liegen Abweichungen des Winkels und der Richtung der Zugbeanspruchung vor, so hat dies erhebliche Auswirkungen auf die Festigkeit und Steifigkeit des Materials, wie Abbildung 20 zeigt.

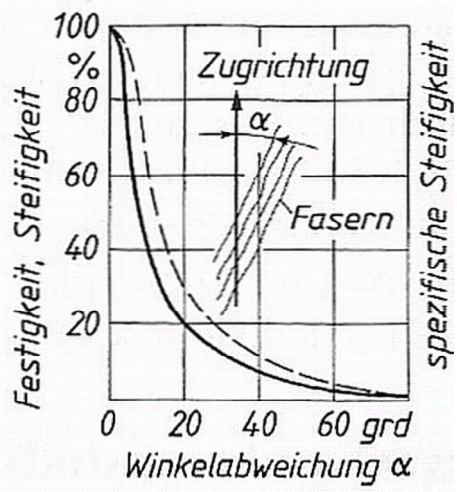


Abbildung 20: Richtungsabhängigkeit von Faserverbundwerkstoffen [7]

Wärmestrahlung

Zur Abschirmung gegen Wärme von der 300K Behälterwand muss das 70K Schild einen hohen Reflexionsgrad aufweisen. Dadurch ist es möglich, dass nur ein geringer Teil der

Wärmestrahlung absorbiert wird. Die Bauteile sollten eine feine Oberfläche besitzen und gegebenenfalls poliert werden. Überschlägig darf man behaupten: Je höher die elektrische Leitfähigkeit von Werkstoffen ist, desto kleiner ist der Emissionskoeffizient.

In der folgenden Abbildung findet man die in Frage kommenden Metalle mit der Angabe des Abstrahlkoeffizienten ε.

Werkstoff	Temperatur der Oberfläche in K		
	300	80	4
Aluminium			
getempert, elektrolyt. poliert	0,03	0,018	0,011
rauh	0,08	0,03	
mit Oxidschicht 0,25 µm	0,06		
1 µm	0,30		
7 µm	0,75		
mit Lackschicht 0,5 µm	0,05		
2 µm	0,30		
8 µm	0,57		
Kupfer			
mechanisch poliert	0,03	0,019	0,015
elektrolyt. poliert		0,015	0,006
schwarz oxidiert	0,78		
Stahl und Eisen			
Stahl 316, poliert auf 5 µm (rms)		0,045	
poliert auf 2 µm (rms)		0,027	
Stahl 302 und 18/8, poliert	0,08 - 0,15	0,048 - 0,061	
Gußeisen, poliert	0,21		
Eisen, verrostet	0,85		
Silber			
poliert	0,020	0,008	0,04
auf verkupfertem oder vernickeltem rostfreiem Stahl		0,07	
oxidiert		0,036	
Gold			
Folie 40 µm dick	0,02	0,01	
12 µm auf Kupfer	0,04	0,025	
5 µm auf Stahl 304		0,025	
12 µm auf Glas oder Plexiglas		0,016	
0,25 µm auf Glas oder Plexiglas		0,063	
metallisierte Mylarfolien (Metalldicke > 0,1 µm)			
Aluminium		0,023	
Gold		0,018	
Silber		0,012	
Kupfer		0,014	

Abbildung 21: Emissionskoeffizienten bei verschiedenen Temperaturen [2]

Wichtig ist die Betrachtung der Emissionsgrade bei 80 Kelvin. Aus Abbildung 21 kann man erkennen, dass Aluminium und Kupfer elektrolytrisch poliert eine hervorragende Abstrahlung aufweisen mit $\varepsilon - 0{,}018$ und $\varepsilon - 0{,}015$. Poliertes Silber hat sogar einen noch besseren Wert mit $\varepsilon - 0{,}008$. Beschichtet man Kupfer mit einer $12\mu m$ dicken

Goldschicht, so ist ein Wert von $\varepsilon = 0{,}025$ möglich. In der Vergangenheit hat man im Max-Planck-Institut in Bonn beim Bau von Kryostaten besonders auf diesen Typ des Strahlungsschildes gesetzt. Dabei waren Boden und Deckel der Schilder in den meisten Fällen aus poliertem Aluminium.

Auswahlentscheid der Werkstoffe für das 70K Schild

Zur Abstützung des Schildes an der 300K Behälterwand wird GFK-Material und Edelstahl in Hinsicht auf Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit ausgewählt. Beide Werkstoffe können gegebenenfalls in Verbindung verwendet werden, z.B. kann Edelstahl als Flanschmaterial wegen seiner isotropen Eigenschaften und das GFK-Material zur Superisolierung und für Belastungen in Faserrichtung verwendet werden.

Bei der Materialauswahl für das Strahlungsschild habe ich mich nach Absprache mit Frau Dipl.- Ing. Teuber und Dr. Keller auf Aluminium festgelegt. Das Bauteil soll nach der spanenden Bearbeitung elektrolytisch poliert werden, um eine Oberfläche mit einem abschließend hohen Emissionsgrad zu erreichen.

In der folgenden Tabelle werden Werkstoffe bezüglich der physikalischen Eigenschaften und der Kosten dargestellt.

Werkstoff	Emissionsgrad ε	Etwaige Wärmeleitfähigkeit λ bei 70K in $\frac{W}{m \cdot K}$	Dichte in $\frac{kg}{dm^3}$	0,2% Dehngrenze in MPa bei 293K	Kosten
Al Mg 4,5 Mn	0,018-0,03	50	2,7	125	Mittel
Al 99,5	0,018-0,03	400	2,7	20	Mittel
OFE-Kupfer	0,015-0,02	550	8,9	150	Mittel
Silber auf verkupfertem Stahl	0,007	-	7,85	235	Hoch
Kupfer mit Gold beschichtet	0,025	600	8,9	250	Hoch

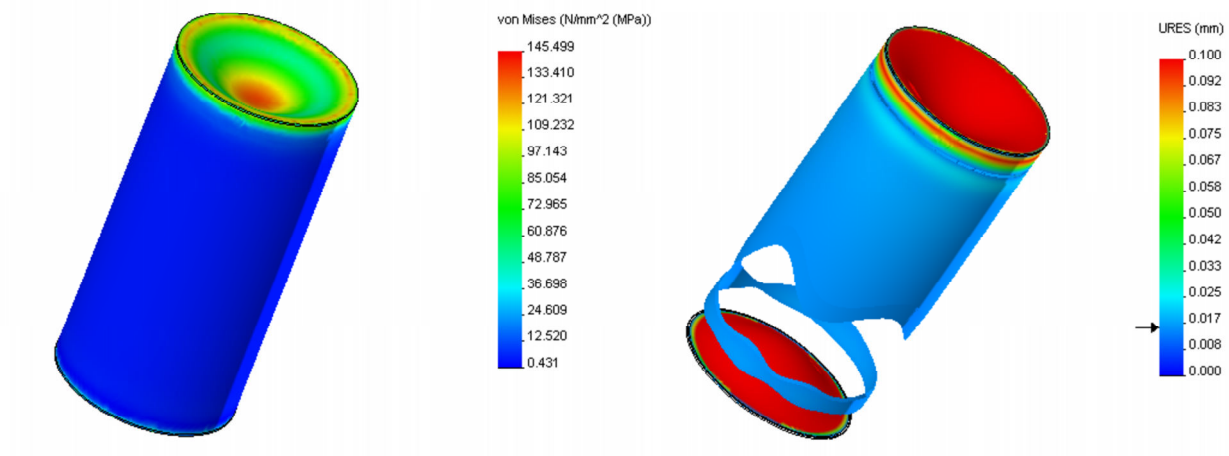
Tabelle 3: Vergleich der Werkstoffe des 70K Schildes [20], [17], [14]

6.2. Form und Gestalt

Die Form und Gestalt des Kryostaten muss unter Berücksichtigung der Fertigungsmöglichkeiten und der auftretenden Spannungen gewählt werden. Dazu hatte ich zum Vergleich die Außenbauteile der Dewarbehälter mit Hilfe von SolidWorks gezeichnet, per Finite-Elemente-Methode berechnen lassen und anschließend die Form bewertet. In den folgenden Abbildungen werden die verschiedenen Volumenformen mit ihren analysierten Werten in anschaulicher Weise dargestellt um einen Vergleich zwischen den getesteten Bauarten zu bekommen.

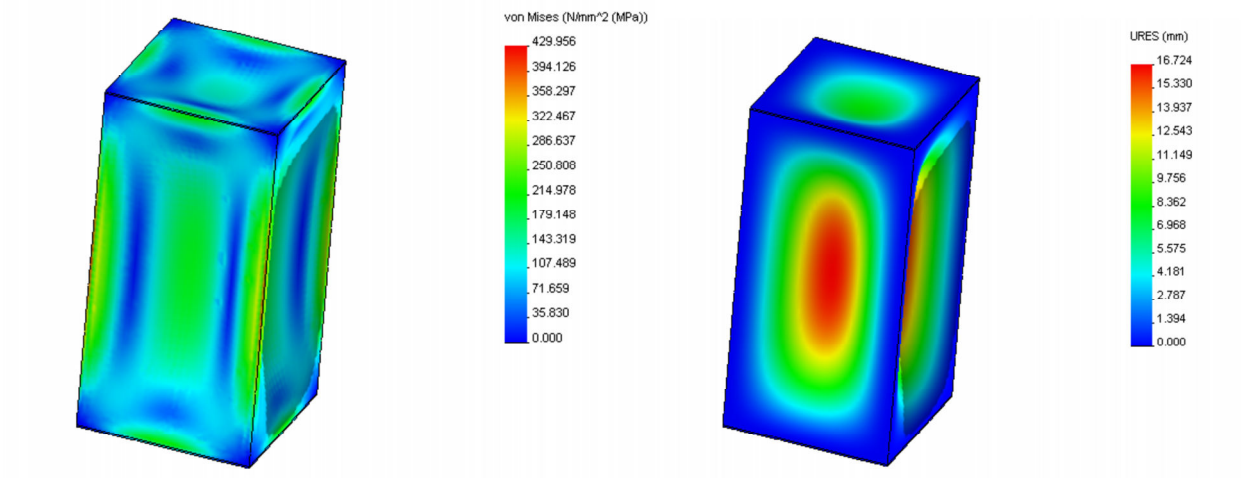
Der Vergleich von verschiedenen Dewarformen

Alle Bauteile haben eine Wandstärke von 5mm und müssen einem Druck von 1bar widerstehen. Das gewählte Material ist die Aluminiumlegierung AlMg 4,5 Mn mit einem E-Modul von $7 \cdot 10^4 MPa$ und einer Streckgrenze von 125 MPa. Der Außendurchmesser bzw. Breite der analysierten Körper beträgt 500mm mit einer Höhe von 1000mm.



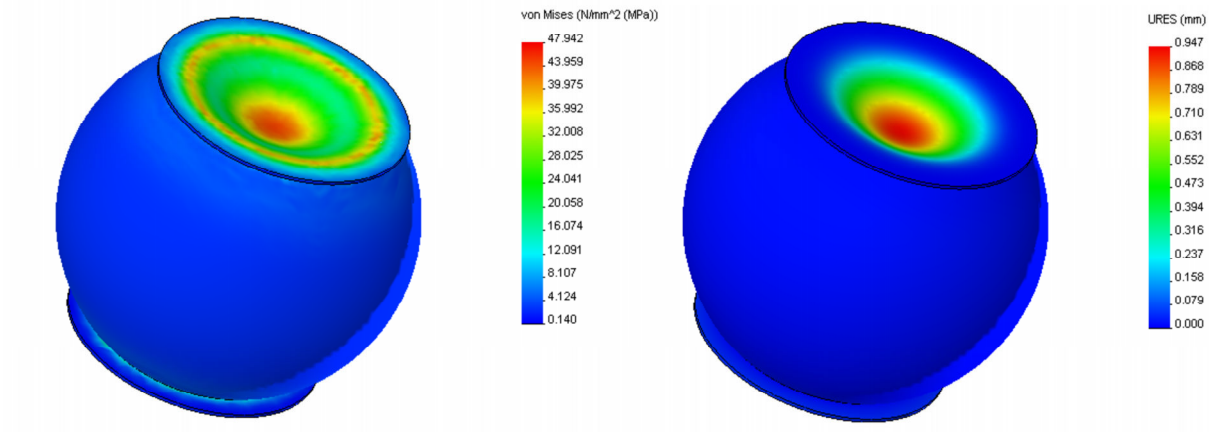
(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 22: Hohlzylinder



(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 23: Hohlquader



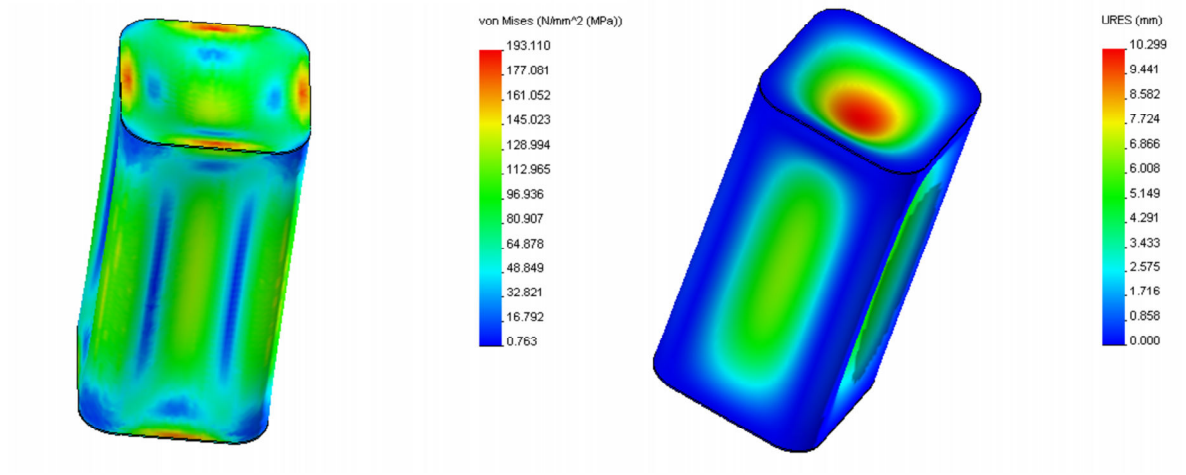
(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 24: Kugel

Aus den Analysen wird deutlich, dass runde und kugelige Formen einen guten Widerstandswert besitzen. Die Spannung an der Zylinderwand in Abbildung 22 beträgt etwa 5 MPa. Vergleicht man dazu die Spannung auf der Mitte der Hohlquaderwand (siehe Abbildung 23) so kann man eine Spannung von etwa 200 MPa ablesen. Der Unterschiedsfaktor der Streckgrenze beträgt also etwa 40. Aus der grafischen Darstellung ist ebenso erkennbar, dass die Spannungen an den Kanten am höchsten sind. Grund dafür ist eine hohe Flächenpressung, hohe Biegemomente und ein schlechter Kraftfluss zur Querwand. Durch große Radien kann man allerdings die Spannungswerte vermindern.

Die Wand der Kugel hingegen zeigt nur eine Spannung von 3 MPa und hat erwartungsgemäß die besten Werte.

Die Verschiebung an der Quaderwand beträgt etwa 16,7mm. Dagegen beträgt die Verschiebung der Zylinderwand etwa nur 0,017mm (durch ISO-Clipping dargestellt, siehe Abschnitt 4.2.4). Der Unterschiedsfaktor geht dabei gegen 1000. Die Mantelfläche der Kugel verschiebt sich etwa um 0,015mm und gleicht damit in etwa dem Ergebnis des Zylinderrohres. Der dazugehörige Deckel, mit einem Durchmesser von 300mm, drückt sich im Mittelpunkt um etwa 1 mm ein. Die Deckel des Zylinders und des Quaders haben in etwa das gleiche Durchbiegungsmaß mit 8 bis 9mm (in der Abbildung aufgrund ISO-Clipping nicht ersichtlich).



(a) Spannung (b) Verschiebung

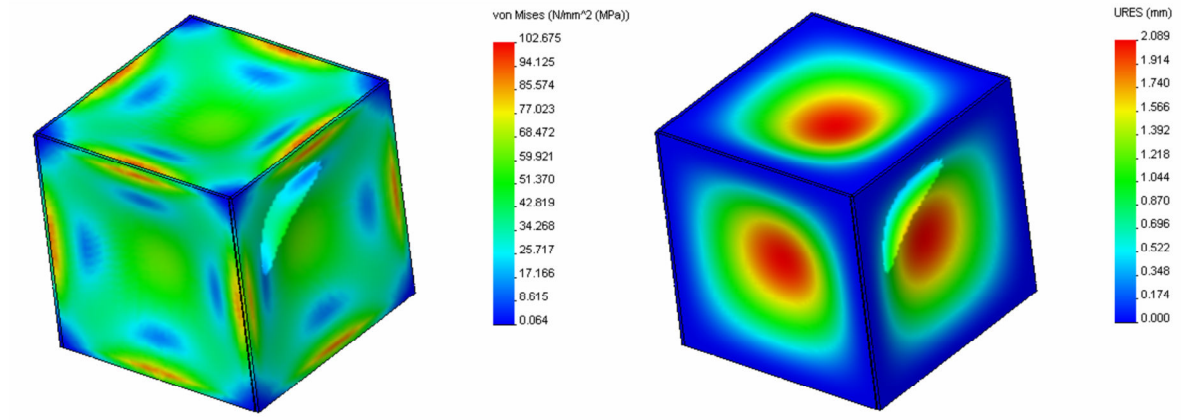
Abbildung 25: Hohlquader mit Außenradius

Form	Außenmaße in mm	max. Spannung an Seitenflächen in MPa	max. Spannung am Deckel in MPa	max. Verschiebung Seitenflächen in mm	max. Verschiebung am Deckel in mm
Zylinder	∅500x1000	5	145	0,017	8
Quader	500x500x1000	200	140	17	9
Kugel	∅500	3	48	0,013	1
Quader mit Radien	500x500x1000 mit R=100	130	135	6	10

Tabelle 4: Vergleichswerte der verschiedenen Dewarformen

Tabelle 4 gibt einen guten Überblick über die grafisch dargestellten Ergebnisse. Dabei wurden die Spannungen die an den Kanten liegen nicht beachtet. Diese sind für eine Aussage zur Grundgestaltung des Dewars nicht von Bedeutung.

Weil Kugelformen fertigungstechnisch schwer zu realisieren sind, ist eine Lösung in Form eines Zylinders erstrebenswert. Eine Quaderform sollte möglichst vermieden werden. Allerdings ist das nicht immer möglich, denn Dichtflächen benötigen eine flache Fläche. Es kann aus wartungstechnischer Sicht oder aus Platzmangel zu einer Bevorzugung von Quaderformen kommen. Bei Dewars mit den Maßen von etwa 400x400x400mm und kleiner macht es kaum noch Sinn auf einem runden Dewar zu beharren. Zum einen bietet ein Quader deutlich mehr Fläche als ein runder Dewar, zum anderen wird bei einer Wandstärke von 6mm und bei Nichtbetrachtung der Kantenspannung der Sicherheitswert nach AD- Merkblätter für AlMg 4,5Mn klar erfüllt (siehe Abschnitt 4.3.4). Abbildung 26 zeigt einen Dewar in Würfelform. Die Spannung beträgt in Flächenmitte etwa 62 MPa und die Verschiebung ca. 2 mm. Die Spitzenspannungen an den Würfelkanten werden durch Verstärken der Wanddicke und durch anschließendes Einfräsen bestimmter Konturen gesenkt. Untersuchungen von optimierten Frässtrukturen in Verschlussplatten oder Deckeln werden im nächsten Teilabschnitt gemacht.



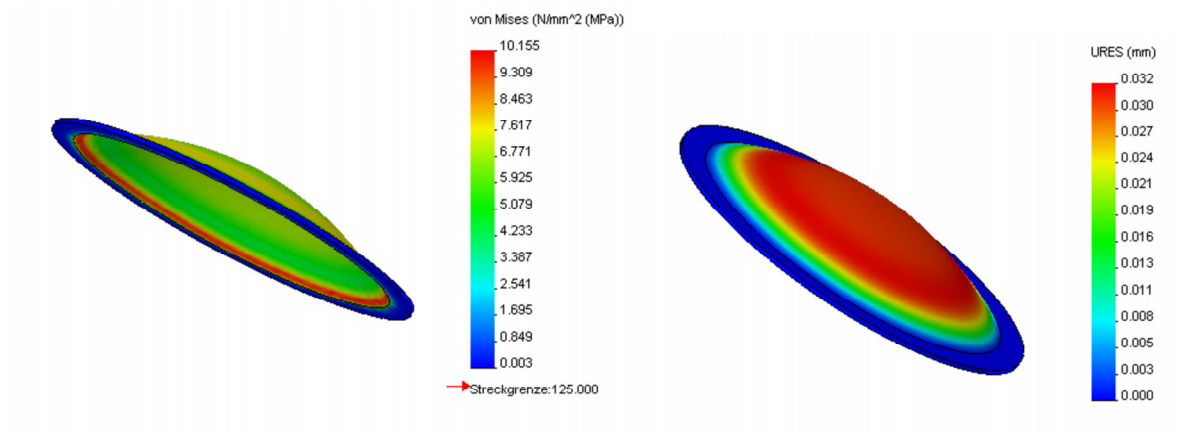
(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 26: 400er Würfel

Die Vergleiche von verschiedenen Deckelformen

Sinnvolle Deckel können zwei verschiedene Grundformen haben. Sie sind entweder flach oder gewölbt. Betrachtet man den vorherigen Abschnitt so wird klar, dass ein gewölbter Deckel bezüglich der Spannung die beste Wahl ist. Die folgenden Abbildungen zeigen

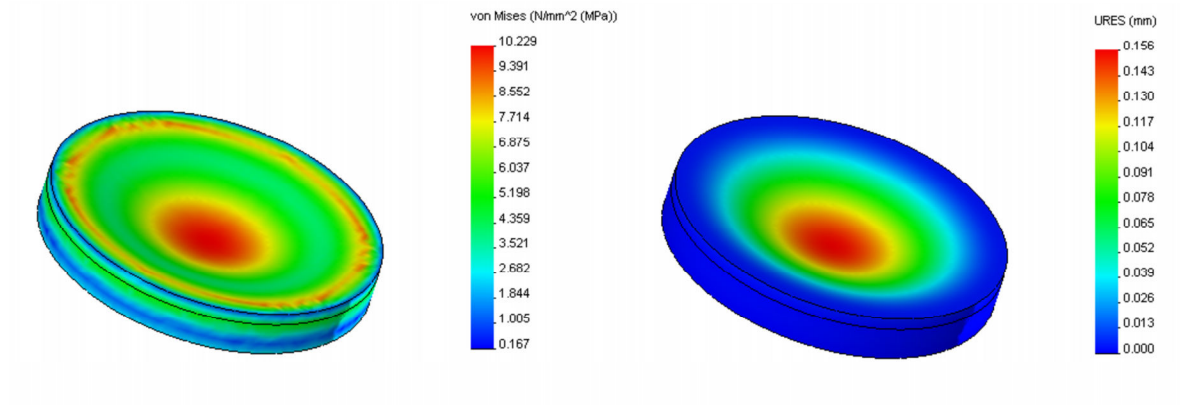
verschiedene Deckel mit kreisförmiger Außenkontur. Der Außendurchmesser aller analysierten Deckel beträgt 500mm. Als Material dient wieder AlMg 4,5 Mn. Weil von Hochvakuum im Behälter ausgegangen wird, wird der Druckunterschied auf 1bar festgelegt. Die Materialstärken, Spannungen, Verschiebungen und das Gewicht werden in Tabelle 5 dargestellt.



(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 27: Tellerboden

Damit die Spannungsanalysen realistische Ergebnisse zeigen, werden alle flachen Deckel mit einem Ringuntersatz verknüpft und berechnet. Dieser stellt die Kraftaufnahme des Deckels dar, wie er in der wirklichen Anwendung auch zu finden ist.



(a) Spannung (b) Verschiebung

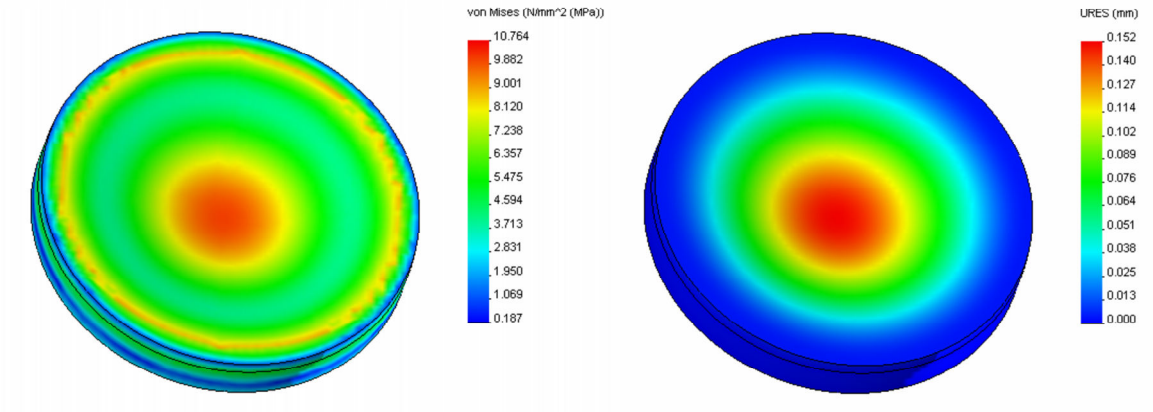
Abbildung 28: Flacher Deckel

Deckel	Materialdicke in mm	Spannung in MPa	Verschiebung in mm	Gewicht in kg
Tellerboden	3	10,16	0,032	2,1
Flacher Deckel	17,8	10,23	0,156	9,4

Tabelle 5: Vergleich des Tellerbodens mit dem flachen Deckel

Der Unterschied in Bezug auf das Gewicht ist enorm. Fast viereinhalb mal mehr Masse benötigt der flache Deckel, um der Festigkeit des Tellerbodens gleich zu kommen. Natürlich ist es nicht unbedingt nötig, eine Wandstärke von 17,8mm zu verwenden. Eine Dicke von 6,5mm würde schon den Ansprüchen in Anbetracht auf Sicherheit genügen $\left(\sigma \leq \frac{\sigma_{Re}}{1,5}\right)$. Oft ist es allerdings erforderlich, dass verschiedene Anschlüsse wie zum Beispiel der Refrigeratorstutzen, Ringschrauben für den Transport oder Elektronikstecker auf dem Deckel Platz finden sollen. Diese benötigen eine gewisse Einschraubtiefe. Deshalb haben besonders die Deckel, die auf die Runddewars gesetzt werden, eine Dicke die im Bereich von 15 bis 30mm liegt. Bei diesen Materialstärken ist es sinnvoll den Deckel unter Beachtung des Widerstandsmoments auszufräsen. Das bedeutet, man sollte schmale Stege anstreben, da die Höhe im Vergleich zur Breite in der dritten Potenz eingeht. Dadurch erreicht man eine geringere Durchbiegung.

Bei der nächsten Analyse bin ich davon ausgegangen, dass eine Wandstärke von 18mm gefordert ist. Tabelle 6 zeigt, dass ab einer gewissen Wandstärke unter Berücksichtigung des Außendurchmessers ein Außfräsen des Materials als sinnvoll erscheint.

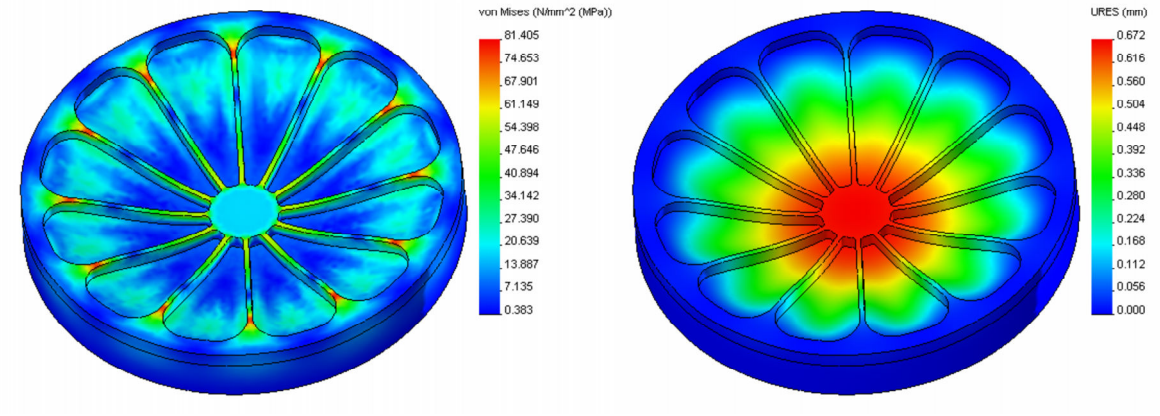


(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 29: Flacher Deckel mit geforderter Wandstärke

Deckel	Spannung in MPa	Verschiebung in mm	Gewicht in kg	Sicherheit gegen plastisches Verformen
Deckel ohne Einfräsung	81,4	0,67	3,46	1,53
Deckel mit Einfräsung	10,7	0,15	9,54	11,68

Tabelle 6: Vergleich des flachen Deckels mit dem ausgefrästen Deckel



(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 30: Flacher Deckel mit Einfräsungen

Die Ausfräsungen im Deckel in Abbildung 30 zeigen ein Blumenmuster, welches sich besonders gut zur Druckaufnahme eignet. Im Grunde genommen ist die Form nichts anderes als mehrere Verstrebungen von der Deckelmitte nach außen, die mit großen Radien versehen sind.

Der Deckel kann soweit ausgefräst werden, solange die geforderte Sicherheit von S = 1,5 für Aluminiumlegierungen (siehe Anhang A.1) eingehalten wird.

Die Auswahl der Deckelform ist abhängig von den Anforderungen. Sind beispielsweise auf einem Deckel viele Anschlüssen gefordert, so ist es nicht sinnvoll und auch kaum möglich Ausfräsungen vorzunehmen. Der Einsatz eines Tellerbodens ist dadurch auch nur bedingt möglich.

6.3. Verbindungsmöglichkeiten zum Verschließen des Dewars

Zwei Verbindungsarten finden in der Vakuumtechink Anwendung:

- Stoffschlussverbindungen: Ein Bauteil geht mit einem anderen Bauteil eine unlösbare Verbindung ein, z.B. Schweißen oder Löten
- Kraftschlussverbindungen: Bauteile können unter Vorspannung miteinander gekoppelt werden. Haftreibung gewährleistet den Zusammenhalt, z.B. Verschrauben, Verklemmen

Ein Dewar besitzt mindestens eine Öffnung für Wartungsarbeiten und sonstige Montagearbeiten. Dazu kommen Bohrungen für die benötigten Anschlüsse wie z.B. für Refrigerator, Vakuumpumpe und Elektrokabel. Diese Öffnungen werden mit O-Ringen aus Gummi, Kupfer, Silber, Gold oder Aluminium abgedichtet indem die einzelnen Bauteile miteinander verschraubt werden. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Dichtflächen eine feine Oberfläche besitzen und keine Riefen aufzeigen. Die Dichtringe können zuvor mit einer speziellen Dichtpaste versehen werden. Aufgrund des Außendruckes, ist darauf zu achten, dass der mittlere Durchmesser von O-Ringen dem Innendurchmesser der Nuten entsprechen muss [22]. Die Anzahl der Dichtringe und ihre Gesamtlänge beeinflussen die Leckrate des Vakuumbehälters. Somit es klar, dass bei Kryostaten mit wenigen Anschlüssen verhältnismäßig weniger Druck in den Behälter zurückkehren kann als bei vielen Anschlüssen. Legt man diesen Gedanken weiter aus, so kommt man zu dem Ergebnis: Je weniger Dichtflächen desto länger niedrigere Drücke im Dewar. Verschweißte oder verklebte Bauteile sind im eigentlichen Sinn dicht und lassen kein Gas in den Behälter hinein. Allerdings kann es vorkommen, dass stoffschlüssige Verbindungen Fehler beinhalten. Man hat im Institut die Erfahrung gemacht, dass Schweißnähte eher zu Fehlern neigen als geklebte Flächen. Deshalb bietet es sich an, sofern fertigungstechnisch möglich, die Bauteile des Kryostaten in einem Stück zu fräsen. So kann man beispielsweise aus einem Quader einen ausgefrästen Hohlkasten mit verbleibendem Boden fertigen. Auf diese Weise werden die zu fügenden Bauteile reduziert.

In Kryostaten ist es stets erforderlich Fenster für die Signalübermittlung vorzusehen. Jedes Wandmaterial, das als Fenster vorgesehen ist, absorbiert Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlung und der Wanddicke. Dazu kann man z.B. eine GFK-Scheibe oder aber auch eine hauchdünne Kunststofffolie einsetzen, indem man diese zwischen zwei Kreisringscheiben spannt und vor der Hornantenne an den Kryostaten

zur Abdichtung anschraubt. Das ist die einzige Stelle des Kryostaten, die nicht von Metall sondern von einem Kunststoff abgedichtet wird. Die meisten Kunststoffe, darunter auch GFK, haben die Eigenschaft im Gegensatz zu Metallen elektromagnetische Wellen durchzulassen.

Zusammenfassend sind für diesen Abschnitt folgende Punkte von Bedeutung:

- wenig Dichtfläche bzw. Dichtlänge vorsehen
- Behälter wenn möglich aus einem Block ausfräsen, um das montieren mehrere Teile zu vermeiden
- Das Schweißen und Kleben dem Abdichten durch Dichtringe bevorzugen
- Fenster mit GFK und Kunsstofffolien abdichten

6.4. Entwurf verschiedener Optionen mit Solid Works

In diesem Unterabschnitt werden verschiedene Vorschläge für die drei geforderten Kryostaten entworfen und diskutiert. Als Grundlage dienen die zuvor behandelten Unterabschnitte. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf Gestalt, Größe und Gewicht der Druckbehälter. Eine Entscheidung für die Gestaltungsform des 70K Schildes wurde daher erst im nächsten Abschnitt getroffen. Bei der Konstruktion der Dewar war vor allen Dingen darauf zu achten, dass Wartungsarbeiten ohne den Ausbau der Kryostaten aus der Empfängerbox möglich sind. Als Material wählte ich für alle Außenbehälterbauteile die Aluminiumlegierung AlMg3 mit einer Streckgrenze von 80 MPa und einem E-Modul von 70000 MPa. Spannungs- und Verschiebungswerte sind dadurch stets miteinander vergleichbar. Die meisten Bauteile wurden bis zum Erreichen der Sicherheitsgrenze ausgelegt. Der Sicherheitswert von flachen Scheiben beträgt 1,5 und bei Zylindern 1,6. Informationen dazu siehe Anhang A.1.

6.4.1. Konzipierungsmöglichkeiten des 21cm Kryostats

Im Folgenden werden drei verschiedene Möglichkeiten für die Gestalt des Dewars vorgestellt und miteinander verglichen. Der Durchmesser und die Höhe des Hohlleiters (siehe Abbildung 31) sind von Herrn Dr. Keller vorgegeben. Anhand der Maße kann der Außendurchmesser und die Höhe des Kryostaten bestimmt werden.

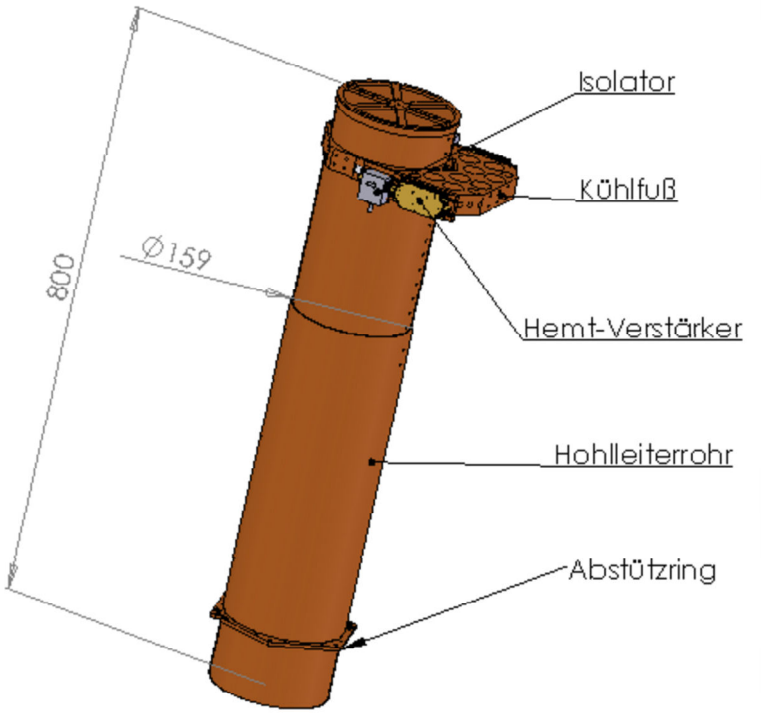


Abbildung 31: Ansicht des Hohlleiters mit Verstärkern

Vom Hohlleiter zum 70K Schild und vom 70K Schild zur Druckbehälterwand wurde jeweils ein Abstand von 30-40 mm eingeplant. Der Mindestabstand muss aufgrund der Wärmestrahlung eingehalten werden. Deshalb kommt man zu einem kleinsten Innendurchmesser von 280mm. Rechnet man jetzt noch Kühlmaschine und Kühlfuß dazu, so wird der Durchmesser des Behälters der die Bauteile umschließen soll deutlich größer.

Option 1 des 21cm Kryostats

Option 1 (siehe Abbildung 32) zeigt einen Zylinder mit Ober- und Unterdeckel. Das Rohr und die Deckel sind senkrecht geschnitten. Bei Wartungsarbeiten soll es möglich sein, dass kleinere Rohrstück vom Größeren zu trennen ohne das der Kryostat dazu aus der Empfängerbox genommen werden muss. Beide Stücke werden durch eine große Anzahl von Schrauben miteinander verbunden. Ein einziger Dichtring soll genügen um beiden Teile dicht miteinander zu koppeln. Der Trennschnitt muss dazu etwa bei $\frac{1}{3}$ des Durchmessers angebracht sein, damit das Horn weiterhin in der Mitte verbleiben kann. Setzt man das Horn, das Fenster und den Hohlleiter außer Mitte, so wird der Außendurchmesser des Kryostaten aufgrund des Mitverschiebens aller im Behälter befindlichen Bauteile größer. Als Grundlage für den Durchmesser dient das Maß eines bereits konstruierten

Single-Beam Dewar. Der Innendurchmesser beträgt 500mm und die lichte Höhe wurde mit 1200mm angenommen.

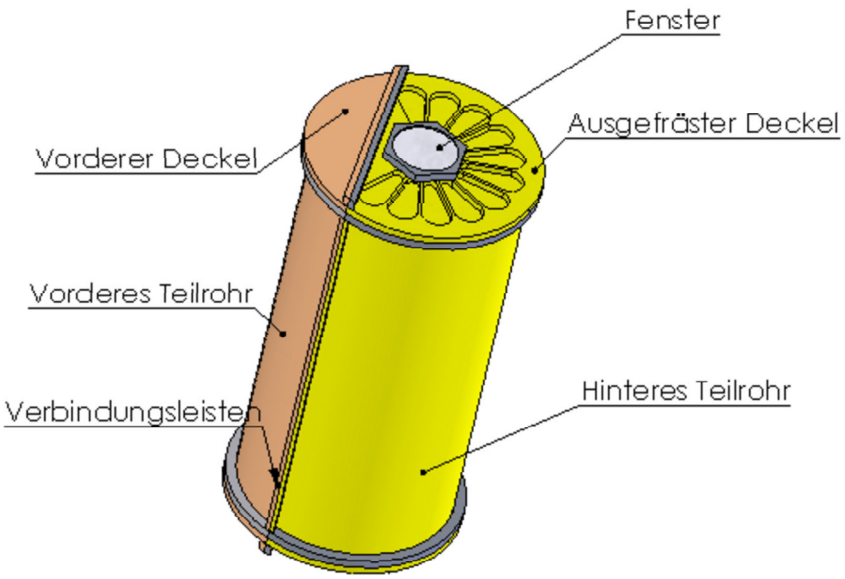
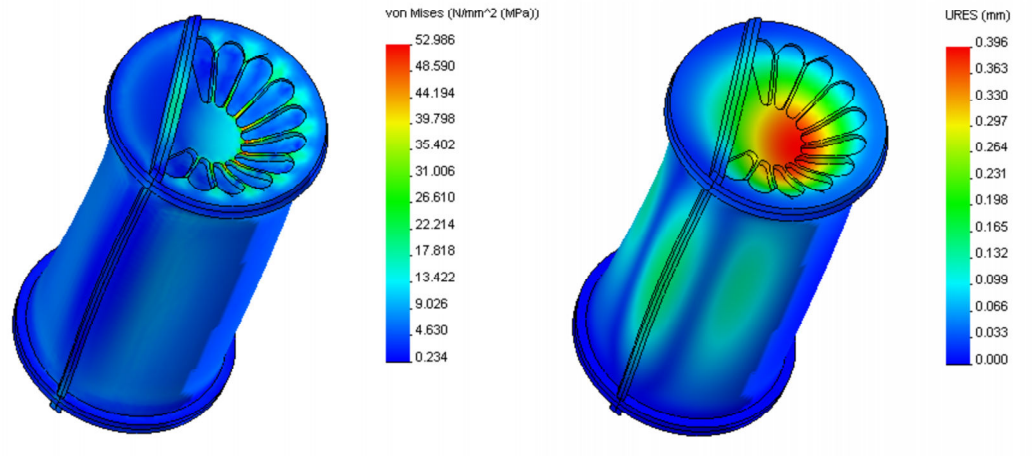


Abbildung 32: Darstellung Option 1-21cm Dewar

Die Wandstärke des Zylinders wurde mit 4mm und die der Deckel auf 18mm vorausgewählt, wobei an sinnvollen Stellen der Deckel 16mm tiefe Ausfräsungen zur Gewichtsersparnis vorgesehen sind.



(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 33: Festigkeit Option 1

Aus Abbildung 33 erkennt man, dass die angenommene Wandstärke des Zylinders den Ansprüchen genügt. Eine geringere Dicke ist aus fertigungstechnischer Sicht nicht zu empfehlen. Die höchsten Spannungen und Verschiebungen liegen etwa im Mittelpunkt des Deckels mit $\sigma_{ist} \approx 53 MPa$. Die geforderte Sicherheit nach AD- Merkblättern beträgt S 1,5. Die Spannung ist also zulässig, denn: $\frac{\sigma_{Re}}{\sigma_{ist}} = \frac{80\,MPa}{53\,MPa} > 1,5$. Die Verschiebung liegt knapp unter 0,4mm und ist daher als problemlos einzustufen.

Option 2 des 21cm Kryostats

Der Dewar besteht aus einem Zylinder, an dessen Seiten zwei große Deckel vorgesehen sind. Es ist somit möglich, den Kryostaten von dort aus zu bestücken und zu warten. Die Öffnungen im Rohr werden ausgelasert und mit einem Blech ummantelt. Das Blech wird aufgeschweißt und steht von der Zylinderfläche ab (siehe Abbildung 34). Der Deckel bekommt somit eine flache Auflagefläche.

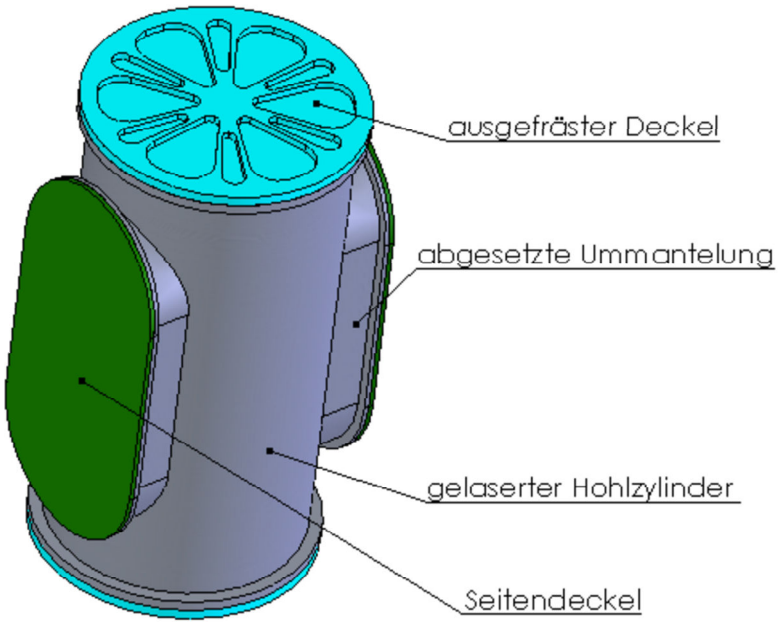
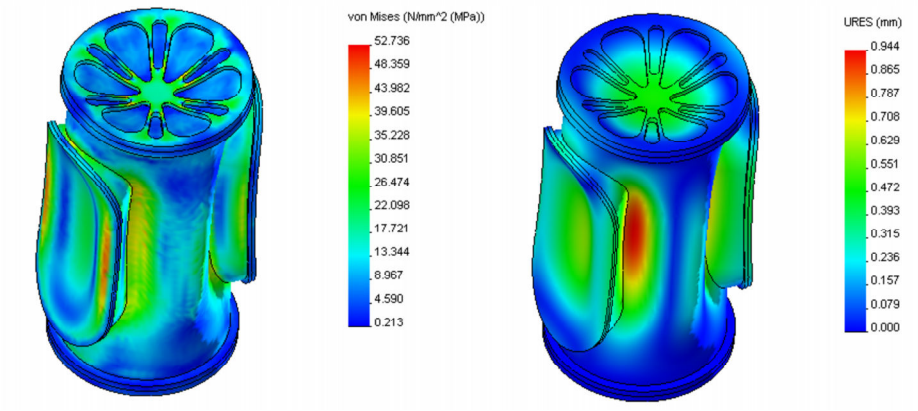


Abbildung 34: Ansicht Option 2-21cm Dewar

Für die Analyse in Abbildung 35 wurde ebenfalls eine Zylinderwand mit einer Stärke von 4mm ausgewählt. Die Deckel haben eine Dicke von 20mm und sind auf 15mm Tiefe ausgefräst. Die Seitendeckel und die abgesetzten Ummantelungen haben eine Stärke von 10mm.



(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 35: Festigkeit Option 2

Spitzenspannungen ($\sigma_{Re} \approx 50$MPa) treten an der Kontaktstelle von der abgesetzten Ummantelung zum Zylinderrohr und zum Seitendeckel auf. Grund hierfür ist die hohe Flächenpressung. Die Verschiebung (s ≈1mm) zeigt an der Zylinderwand ihre höchsten Werte auf. Die Sicherheit liegt bei etwa 1,6.

Option 3 des 21cm Kryostats

Die nächste Option stellt einen zweigeteilten Dewar dar (siehe Abbildung 36). Das 300K Rohr umschließt den größten Teil des Hohlleiters und wird an der Verbindungsplatte befestigt. In den Oberkasten ragt der Kühlstutzen des Refrigerators hinein. Dieser wird über Kühlbänder (in der Abbildung nicht dargestellt) mit dem Kühlfuß und somit mit dem Hohlleiter und Verstärkern verbunden. Am Oberkasten sind zwei Seitendeckel vorgesehen, die eventuelle Wartungsarbeiten erleichtern sollen. In den häufigsten Fällen müssen Wartungsarbeiten an den Verstärkern und am Refrigerator durchgeführt werden. Deshalb konzentriert sich die Zugriffsmöglichkeit nur auf den oberen Kasten, denn der Hohlleiter ist praktisch wartungsfrei. Das 70K Schild besteht aus vier gerollten Blechen, die zwischen der 70K-Oberplatte und der 70K-Unterplatte angeschraubt sind. Der Deckel hat eine gewölbte Form. Der Durchmesser der Verbindungsplatte wird bestimmt durch die Bohrung für das Hohlleiterrohr und für den Refrigerator. Im unteren Bereich kann somit an Platz gespart werden, allerdings wird im oberen Bereich nun mehr Raum benötigt. Anstatt des Tellerbodens ist es auch möglich einen flachen Deckel zu verwenden und auf diesen den Refrigerator setzen. Man würde dadurch einen kleineren Ausgangsdurchmesser bekommen, jedoch ist zu beachten, dass nur eine bestimmte Höhe in der Empfängerbox zur Verfügung steht. Die über dem Dewar befindlichen Schaltkästen in

der Empfängerbox behindern eventuell den Ausbau des Refrigerators aufgrund seiner langen Stutzenlänge. Deshalb wurde diese Lösung vorgeschlagen.

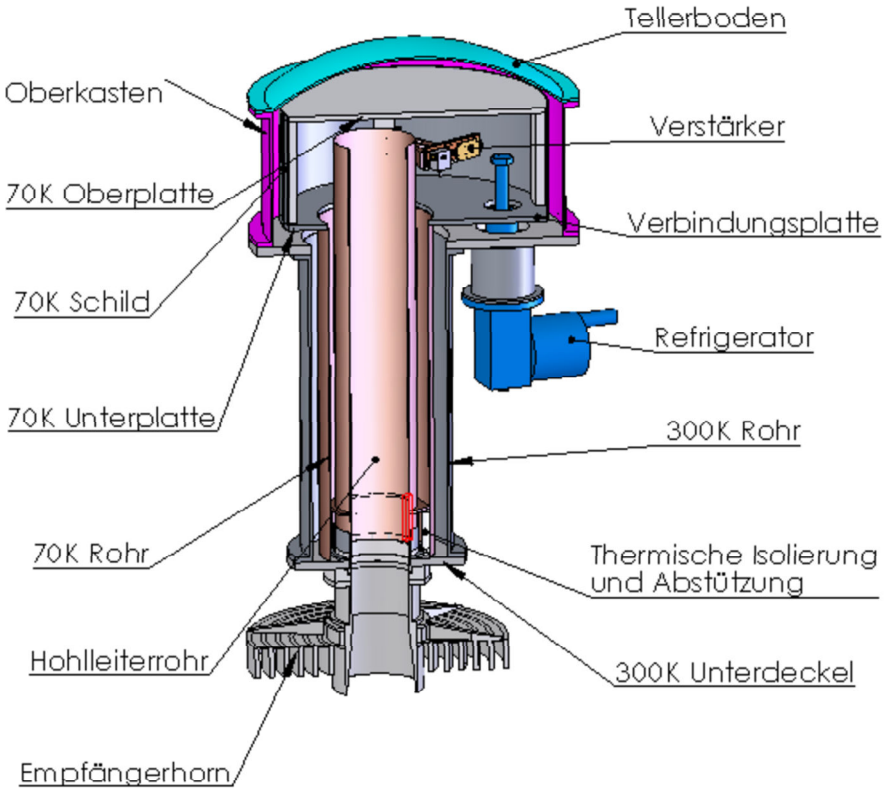
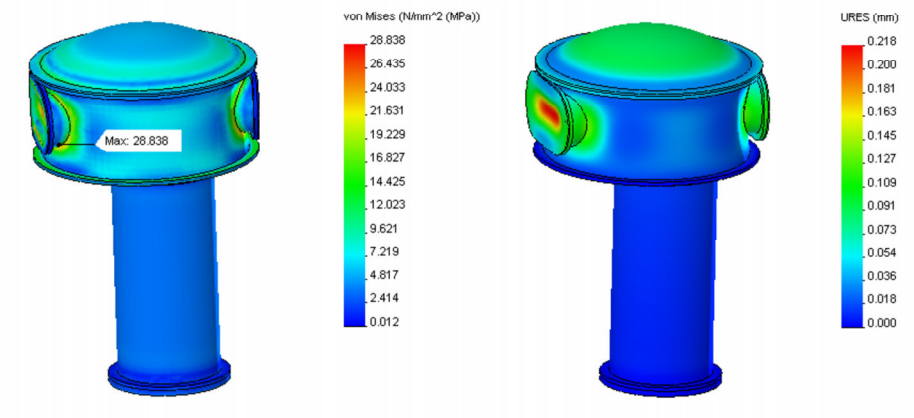


Abbildung 36: Ansicht Option 3-21cm Dewar

Das 300K Rohr, der Oberkasten, der Tellerboden und die Seitendeckel werden mit einer Wandstärke von 4mm versehen. Aufgrund der anzubringenden Gewindebohrungen an der Unterplatte und am 300K Unterdeckel werden die Wandstärken der Komponenten mit 20mm und 15mm vorausgewählt. Der Außendurchmesser des Kessels beträgt 600mm und der des 300K Rohres 280mm. Dadurch ergibt sich eine kleinere Strahlungsfläche und eine geringere Wärmestrahlung zum 70K Schild.



(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 37: Festigkeit Option 3

Trotz dünner Materialien, zeigt die Spannungsanalyse (siehe Abbildung 37) sehr gute Werte. Spannungsspitzen liegen wie schon bei Option 2 an der Kontaktstelle des abgesetzten Bleches zum Zylinderblech. Die Stelle ist in Abbildung 37a markiert. Die maximale Verschiebung liegt in Deckelmitte mit $s \approx 0,22mm$.

6.4.2. Konzipierungsmöglichkeiten des 7mm Kryostats

Der 7mm Dewar soll in etwa die Maße von 400x400x400mm haben und -wie schon der 21cm Kryostat- mit zwei Öffnungen versehen sein, an denen Wartungsarbeiten vor Ort durchgeführt werden können. Es werden nun zwei Möglichkeiten vorgestellt, bei denen bewusst von der Option eines Runddewars abgesehen wurde. Denn wie bereits in Abschnitt 6.2 auf Seite 51 erläutert wurde, macht eine runde Form bei Durchmessern von 400mm und kleiner kaum Sinn.

Option 1 des 7mm Kryostats

Abbildung 38 auf der nächsten Seite zeigt einen Dewar mit einer Höhe und Länge von 400mm. Die länglichen Seiten sind nicht flach sondern ein wenig gewölbt. Der Abstand zur gegenüberliegend gewölbten Seitenwand beträgt etwa 350mm. Die Seitenwände des Druckbehälters können miteinander verschweißt werden. Eine andere Möglichkeit wäre das Fräsen aus Vollmaterial. Die Seitendeckel sind 5mm und der Ober- und Unterdeckel 15mm dick mit einer Einfrästiefe von 12mm.

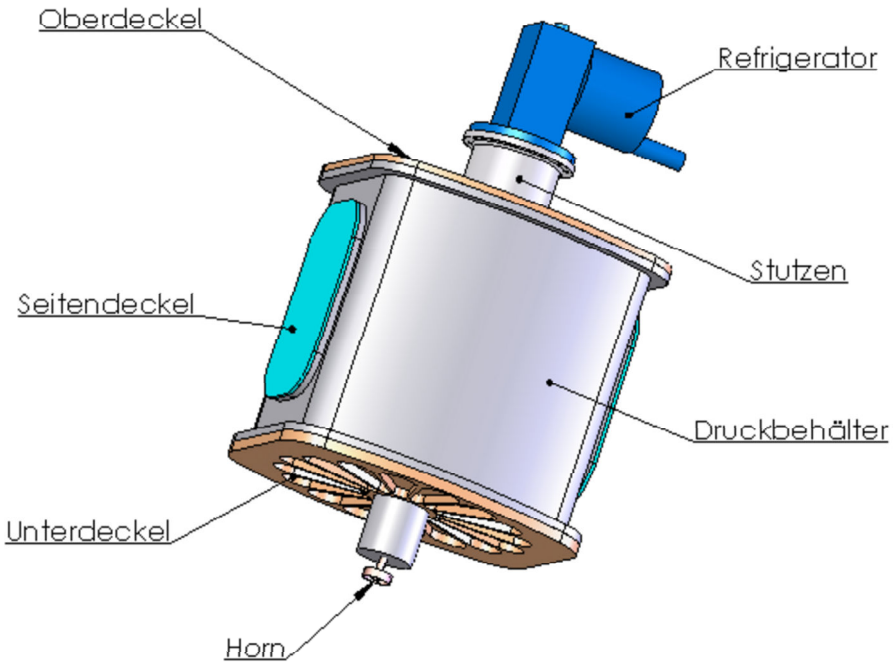
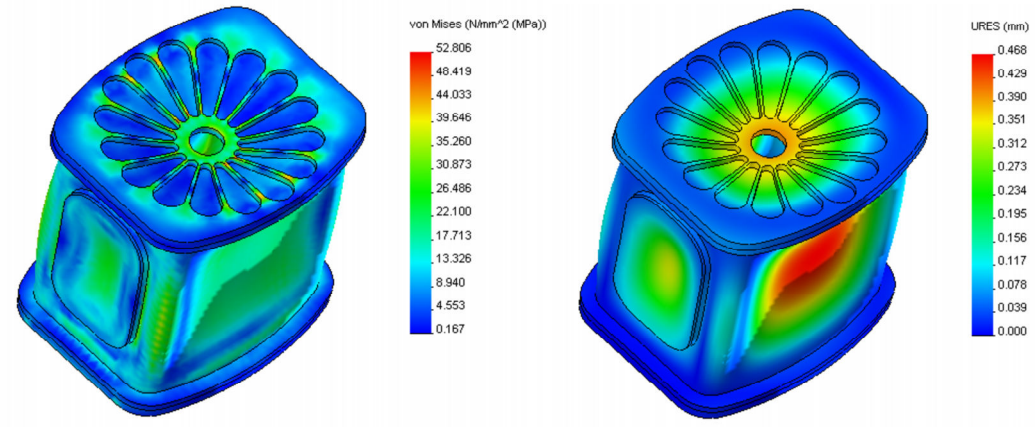


Abbildung 38: Ansicht Option 1-7mm Dewar

Der Vorteil dieser Variante ist das geringe Gewicht, was besonders auf die geringe Wanddicke des Druckbehälters zurückzuführen ist. Abbildung 39 zeigt, dass der gewölbte Druckbehälter den Belastungen problemlos standhält.



(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 39: Festigkeit Option 1-7mm Dewar

Die höchsten Spannungen treten zuerst an den ausgefrästen Deckeln auf. Die maximale

Verschiebung ist mittig der gewölbten Seitenwand zu finden, mit $s \approx 0,47mm$. Das Anbringen von Elektroniksteckern, Druckventil und anderen Anschlüssen erfordert einen gewissen Platz und eine bestimmte Materialstärke. Deshalb muss zum Teil auf Ausfräsungen verzichtet werden.

Option 2 des 7mm Kryostats

Option 2 besteht aus sechs Platten die miteinander verschraubt werden. Der Dewar hat die Form eines Würfels (siehe Abbildung 40) mit einer Seitenlänge von 400mm. Die zyanfarbige Seitenplatte wird mit der Ober- und Unterplatte verschraubt und für eine bessere Dichtigkeit zusätzlich verklebt. Eine Ausgangsmaterialstärke von 15mm wird benötigt, damit Gewindebohrungen zur Befestigung des blaufarbigen Seitendeckels (t − 12mm) vorgesehen werden können. Ausfräsungen werden bis auf 2mm Restdicke durchgeführt. An Ober- und Unterplatte (t − 12mm) werden um den Stutzen und um das Hohlleiterrohr einfache Ausfräsungen ohne Muster vorgesehen. Das bedeutet, dass dort genügend Material verbleibt, um Gewindebohrungen zur Befestigung der Bauteile anzubringen. Des Weiteren ist reichlich Platz für Anschlüsse vorhanden denen eine Restdicke von 6mm zur Verfügung steht.

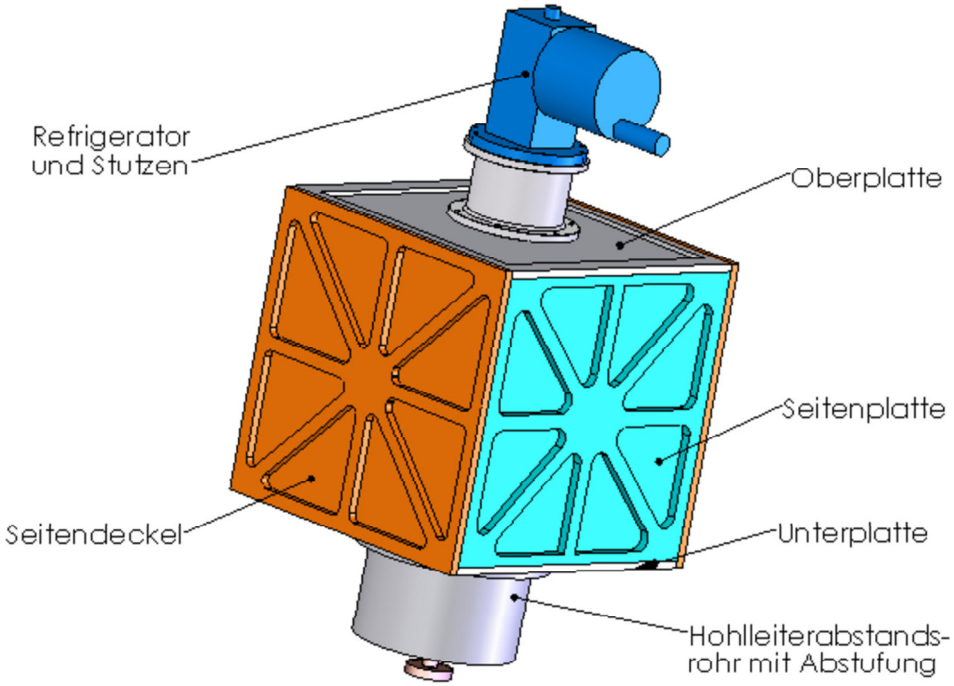
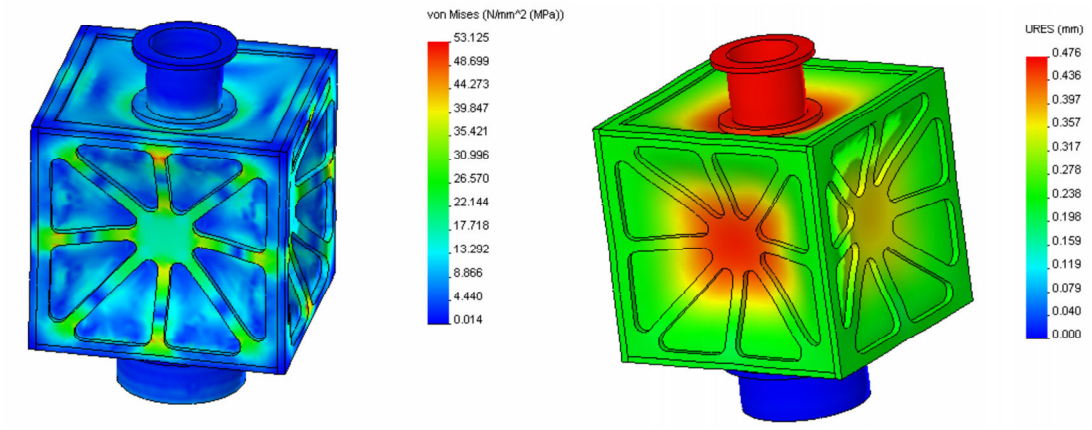


Abbildung 40: Ansicht Option 2-7mm Dewar

Zur Befestigung des Kryostaten ist am Hohlleiterrohr eine Abstufung vogesehen, die mit

der Bodenplatte der Empfängerbox verschraubt wird.



(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 41: Festigkeit Option 2-7mm Dewar

Hohe Spannungen und Verschiebungen treten an den Stegen des Montagedeckels auf (siehe Abbildung 41). Der Oberdeckel zeigt die höchsten Verschiebungen mit $s \approx 0,48mm$. Auch hier gilt zu beachten, dass an Stellen an denen Anschlüsse und Verschraubungen vorgesehen sind, die Durchbiegung möglicht gering ausfallen muss.

6.4.3. Konzipierungsmöglichkeiten des 3mm Kryostats

Der dritte Radioempfänger, der in der Empfängerbox Platz finden soll, hat eine Wellenlänge von 3mm. Dazu wird ein Druckbehälter mit Außenmaßen 300x300x300 benötigt.

Option 1 des 3mm Kryostats

Mein erster Vorschlag zeigt zwei Kästen die aufeinander geschraubt werden. Das Rohteil ist ein Aluminiumklotz, der durch Ausfräsen zu einem hohlen Kasten mit geringer Wandstärke gefertigt werden soll. Dadurch wird die Anzahl der Druckbehälterteile auf zwei begrenzt. Der Kryostat wird wie Option 2-7mm durch einen Absatz am Hohlleiterrohr mit der Bodenplatte der Empfängerbox verschraubt.

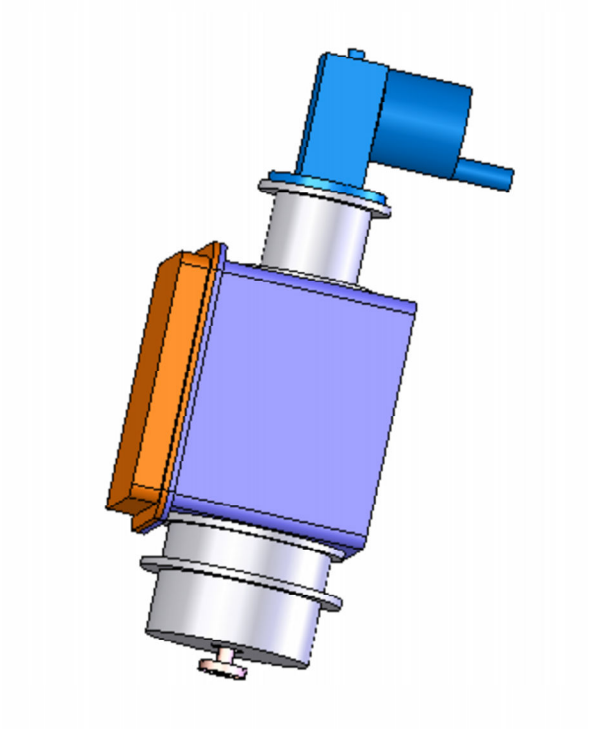
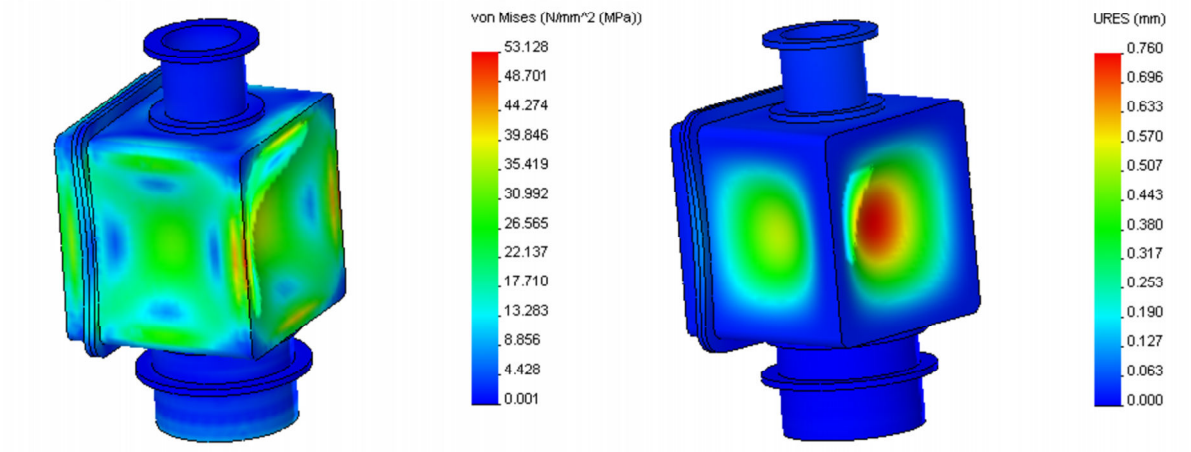


Abbildung 42: Ansicht Option 1-3mm Dewar

Die Wandstärken wurden an den beiden Kastenteilen durch eine Optimierungsstudie (siehe Abschnitt 4.2.3 auf Seite 22) soweit reduziert, bis die Grenze des Sicherheitswerts mit S − 1,5 erreicht wurde. Die Wandstärke liegt zwischen 4mm und 8mm.



(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 43: Festigkeit Option 1-3mm Dewar

An den Außenkanten der Kästen ist das Spannungsmaximum zu finden. Durch ein Vergrößern der Radien kann der Wert gesenkt werden. Allerdings muss man gegeneinander abwägen, denn es resultiert daraus auch eine kleinere zur Verfügung stehende Innenfläche. Der höchste Verschiebungswert ist auf der Rückseite des Dewars (siehe Abbildung 43 auf der vorherigen Seite) mit s 0,76mm zu erkennen.

Option 2 des 3mm Kryostats

Die folgende Möglichkeit orientiert sich an einer früheren Konstruktion eines Dewars. Die Maße ändern sich nicht und betragen bei dieser Option auch 300x300x300mm. Der Dewar besteht aus sechs Platten die miteinander verschraubt werden. Die Platten, welche nicht für Wartungsarbeiten demontierbar sein müssen, werden miteinander verklebt um eine gute Dichtheit zu erlangen. Auf der Stirnseite der grünfarbigen Platten befinden sich Gewindebohrungen (siehe Abbildung 44), die dafür vorgesehen sind, den Kryostaten mit der Fußplatte der Empfängerbox kraftschlüssig zu verbinden. Im Gegensatz zur früheren Konstruktion, werden hier zusätzlich Ausfräsungen zur Gewichtsersparnis vorgenommen.

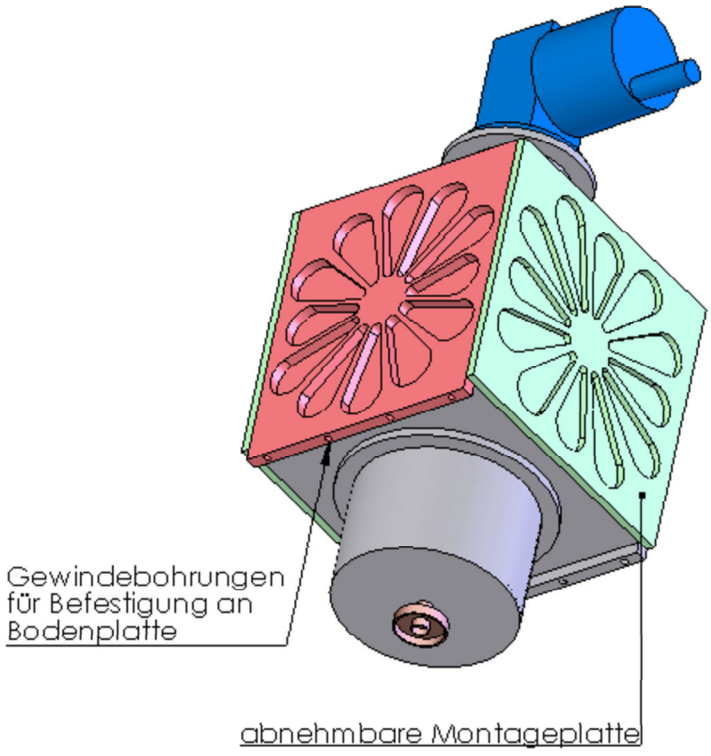
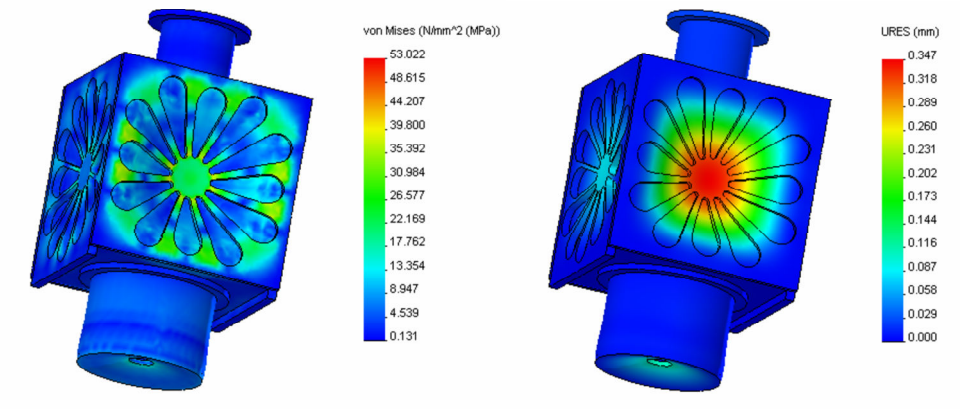


Abbildung 44: Ansicht Option 2-3mm

Die Montageplatten haben eine Stärke von 10mm und werden 8mm tief eingefräst. Die

Wandstärke der Seitenplatten beträgt 15mm mit einer Einfrästiefe von 13mm. Je nach Anforderung müssen Ausfräsungen verkleinert oder auf manche ganz verzichtet werden.



(a) Spannung (b) Verschiebung

Abbildung 45: Festigkeit Option 2-3mm Dewar

Der Mittelpunkt der Montagedeckel erfährt die größte Verschiebung mit $s \approx 0,35mm$ (siehe Abbildung 45b). Das Spannungsmaximum ist an den Radien der Ausfräsungen zu finden (siehe Abbildung 45a).

6.5. Vergleich und Auswahl der verschiedenen Optionen

Alle Optionen werden nun tabellarisch dargestellt und unter verschieden Gesichtspunkten miteinander verglichen. Die wichtigsten Kriterien sind Gewicht, Raumbedarf, Fertigung, Wartungsmöglichkeiten und Strahlungsfläche. Das Kriterium Spannung wird hier nicht weiter betrachtet, weil alle analysierten Bauteile den Sicherheitswerten entsprechen. Im Grunde genommen ersetzt der Gesichtspunkt Masse die Spannung. Die Verschiebung spielt nur noch partiell eine Rolle, aber besonders an den Stellen, die mit Anschlüssen versehen werden sollen. Verformt sich ein Bereich sehr stark, kann das zur Undichtheit eines Anschlusssteckers und zu einer erhöhten Leckrate führen (siehe dazu auch Abschnitt 8.2 auf Seite 108). Deshalb sollten nur an Stellen mit verhältnismäßig geringen Verschiebungen Anschlüsse angebracht werden.

6.5.1. Diskussion und Auswahl des 21cm Kryostaten

Der Platzbedarf ergibt sich zum einen durch die Höhe des Dewars und zum anderen durch den benötigten Kreisdurchmesser. Der benötigte Kreisdurchmesser definiert sich

durch die Silhouette der Draufsicht eines Dewars, d.h. ein Kreis wird um den kompletten Dewar gelegt. Der Kryostat kann dann um seine eigene vertikale Achse gedreht werden, ohne dass er mit einer anderen Baugruppe zusammenstößt.

Option	1	2	3
Masse	41kg	55kg	34kg
Platzbedarf	Der Außen-$\varnothing$ des Zylinders beträgt etwa 500mm, mittelgroßer Platzbedarf	Großer Platzbedarf , weil abgesetzte Ummantelung zusätzlich absteht. Benötigter Kreis-$\varnothing \approx 720mm$.	Geringer Platzbedarf im unteren Bereich ($\varnothing \approx 300mm$), großer Platzbedarf im oberen Bereich mit ($\varnothing \approx 720mm$).
Wartungsmöglichkeiten	Schrauben gut erreichbar, aber aufgrund der hohen Anzahl sehr zeitaufwendig. Das Abnehmen des Zylindervorderteils benötigt eventuell zwei Personen.	Ebenfalls gute Zugriffsmöglichkeiten zum Lösen der Schrauben, aber auch sehr zeitaufwendig.	Sehr einfaches und schnelles Lösen der Schrauben aufgrund verhältnismäßig geringer Anzahl. Hauptzugriffsmöglichkeit auf oberen Kessel und deshalb auf elektronische Bauteile und Refrigerator beschränkt.
Strahlungsfläche	2,08m^2	1,97m^2	1,56m^2

Tabelle 7: Vergleiche der 21cm Kryostaten

Das kleinste Gewicht, die beste Platzausnutzung im unteren Bereich in der Empfängerbox und die kleinste Wärmestrahlungsfläche hat Option 3 (siehe Tabelle 7). Des Weiteren kann bei Wartungsbedarf, sehr schnell und problemlos auf den oberen Kasten zugegriffen werden. Möchte man den Hohlleiter warten so muss der komplette Kryostat allerdings aus der Empfängerbox ausgebaut werden.

Das Hauptproblem bei Option 2 ist die große benötigte Fläche bezogen auf die komplette Höhe. Es wird auch nur bedingt möglich sein beidseitig Instandhaltungsarbeiten durchzuführen, weil der geringe Abstand zum 3mm und zum 7mm Kryostat ein Abnehmen der Seitendeckel zusätzlich erschwert.

Option 1 gewährleistet nur einen Eingriff in den Dewar von einer Seite. Daraus folgt ein erschwerter Zugriff auf manche Bauteile im Behälter; besonders auf diese, die hin-

ter dem Hohlleiter sitzen. Darüber hinaus ist die Fertigung der beiden Rohrteile sehr aufwendig und schwierig. Besonders das Fertigen der Dichtnut mit einer sauberen und nicht abgesetzten Oberfläche kann zum Problem werden.

Bei allen Dewars taucht das Problem auf, dass Aluminiumrohre ab einem Durchmesser von 300mm nur bedingt von Herstellern zu beziehen sind. Deshalb wird es gegebenenfalls nötig sein, ein Aluminiumblech zu rollen und anschließend zu verschweißen. Das Aluminiumschweißen ist generell möglich, allerdings muss eine Mindestdicke vorliegen, was eventuell zu einer Gewichtserhöhung des Kryostaten führt.

Unter Absprache mit dem Gruppenleiter der Gruppe Hochfrequenztechnik Herrn Dr. Keller, mit meiner Betreuerin Dipl.-Ing. Ute Teuber und mit dem Gruppenleiter in Effelsberg Herrn Dipl.-Ing. Grypstra wurden die Lösungsmöglichkeiten diskutiert und eine Option ausgewählt, die konstruiert werden sollte. Option 3 wurde bei allen Beteiligten als die beste Lösung angesehen. Der einzige Aspekt, der weiter überdacht werden sollte, war die Dimension des Kessels.

Der nächste Schritt war die Fertigstellung der Konstruktion des 21cm Kryostaten inklusive der Innenbauteile, wie z.B. die des 70K Schildes. Der Oberkasten wurde dabei überarbeitet und verkleinert (siehe Abschnitt 7 auf Seite 76)

6.5.2. Diskussion und Auswahl des 7mm Kryostaten

Option	1	2
Masse	17 kg	24 kg
Platzbedarf	Durch die leichte Wölbung und den vorhandenen Radien kann der vorhandene Platz besser genutzt werden.	Eckkanten können über den definierten und zur Verfügung stehenden Durchmesser auf der Bodenplatte herausragen
Wartungs-möglichkeiten	Gute Zugriffsmöglichkeiten über die Seitendeckel	Sehr gute Zugriffsmöglichkeiten über die Seitendeckel
Fertigung	Sehr Aufwändige Fertigung. Der Druckbehälter müsste aus dem vollen gefräst werden. Ist in Instituteigener Werkstatt nicht möglich.	Sehr einfache und billige Fertigung

Tabelle 8: Vergleich der 7mm Kryostaten

Die Größe der Strahlungsflächen beider vorgestellten Kryostaten sind annähernd gleich und wurden deshalb in der Tabelle 8 auf der vorherigen Seite nicht aufgeführt.

Betrachtet man den Platzbedarf und das Gewicht, so scheint die Wahl klar zu sein. Allerdings ist die Fertigung der ersten Option äußerst kompliziert und langwierig. Des Weiteren ist eine Fertigung im Institut nicht möglich. Der Auftrag müsste nach außerhalb gehen und würde deshalb sehr hohe Fertigungskosten verursachen.

Die Entscheidung fällt deshalb zu Gunsten der zweiten Option aus. Der Unterschied in Bezug auf den Platzbedarf ist nicht sehr groß. Die Differenz des Gewichts kann eventuell durch bessere Ausfräsungsformen erreicht werden. Angesichts des eher geringen Unterschieds der genannten Kriterien, ist der Entschluss vertretbar.

6.5.3. Diskussion und Auswahl des 3mm Kryostaten

Je kleiner die Abmessungen eines Dewars werden, desto weniger stellt sich die Frage nach der richtigen Form. Die Spannungen, welche an den Wänden auftreten, werden mit kleiner werdender Fläche immer geringer und damit sinkt auch das Gewicht. Gleichwohl habe ich nach einer Möglichkeit gesucht Masse zu sparen. In der Tabelle 9 werden beide Optionen miteinander verglichen.

Option	1	2
Masse	14,1 kg	17,3 kg
Platzbedarf	Augrund der Flansche wird ein wenig mehr Platz benötigt. Kreisdurchmesser $D \approx 445mm$.	Benötigter Kreisdurchmesser $D \approx 450mm$.
Wartungsmöglichkeiten	Zugriff nur von einer Seite möglich.	Gute Wartungsmöglichkeiten von beiden Seiten.
Fertigung	Fräsen aus Vollmaterial. Kann in institutseigener Werkstatt gefertigt werden.	Einfache Fertigung

Tabelle 9: Vergleich der 3mm Dewar

Beim Vergleich fallen zwei Dinge auf; der Gewichtsunterschied und die Wartungsmöglichkeit. Ein Zugriff auf den Dewar von mehreren Seiten ist immer von Vorteil. Aus diesem Grund wird Option 2 der ersten Option vorgezogen, der Gewichtsunterschied ist zudem sehr gering.

6.5.4. Darstellung der vorentworfenen Kryostaten in der Empfängerbox

In der Abbildung 46 erkennt man die Lage der Kryostaten und der Empfängerbox zueinander. Man stellt fest, dass der magentafarbige Kasten des 21cm Kryostaten bezüglich der Dimension das größte Problem darstellt. Die Bauteile der Kryostaten dürfen auf keinen Fall über den Rand von Bodenplatte und Deckelplatte überstehen.

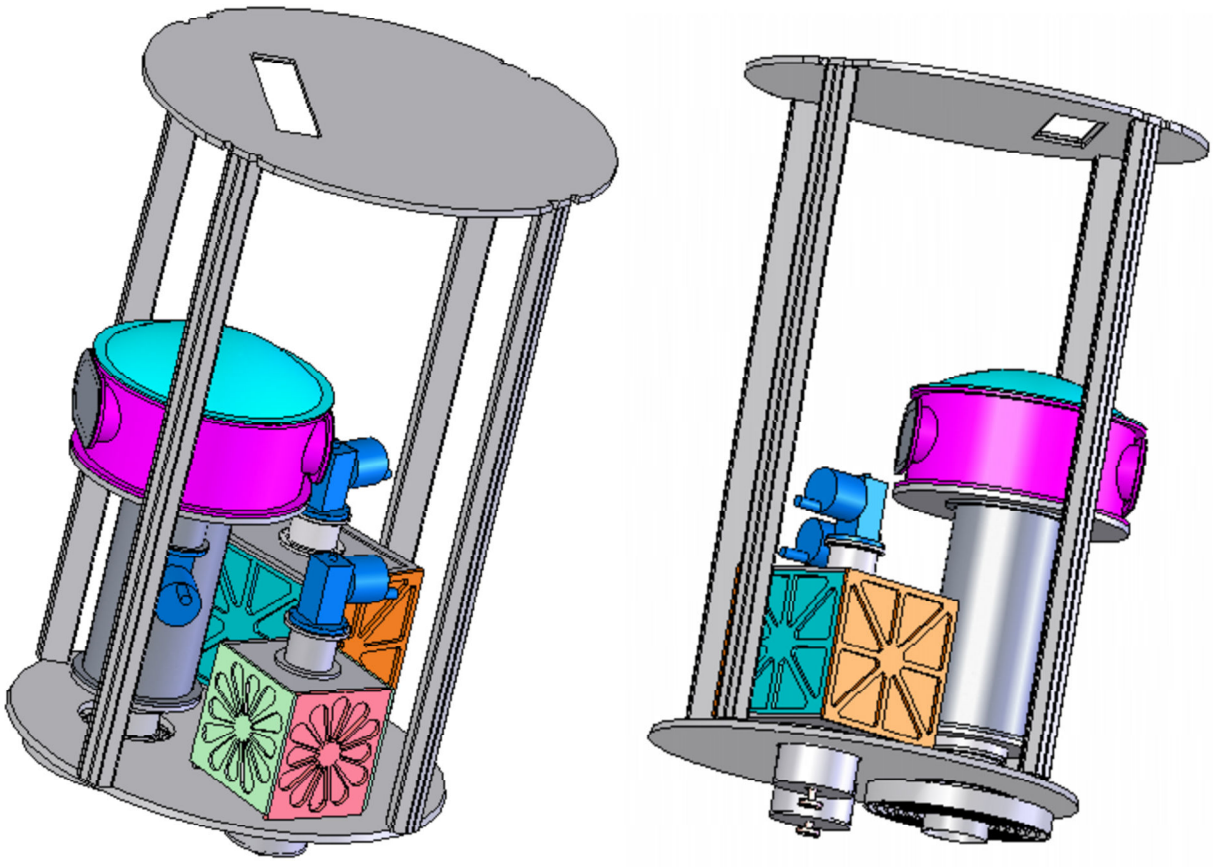


Abbildung 46: Vorentwurf der Empfängerbox mit den Kryostaten

7. Konstruktion der ausgewählten Kryostaten und deren Anordnung in der Empfängerbox

Die Bauteile des 21cm Kryostaten werden bis ins Detail konstruiert und bezüglich der Festigkeit ausgelegt. Dazu gehören vor allem der Druckbehälter, das 70K Schild und die Hohlleiteraufhängung. Dagegen wird der 7mm Kryostat nur bezüglich Wandstärke und Art des Fräsmusters geändert, verbleibt aber ansonsten in der bereits konstruierten Gestalt (siehe auf Seite 67). Der 3mm Dewar bleibt komplett erhalten, wie im Teilabschnitt 6.4.3 auf Seite 70 dargestellt, und wird konstruktiv nicht weiter betrachtet. Die beiden kleinen Kryostaten dienen im Folgenden hauptsächlich als Platzhalter in der Empfängerbox um das Positionieren der Kryostaten zueinander zu erleichtern. Der Innenaufbau wird in der Diplomarbeit nicht behandelt, weil der Typ der beiden Empfänger bis zum Verfassen dieser Zeilen noch nicht definitiv bestimmt war. Es ist z.B. möglich, anstatt des 3mm Empfängers einen 1,3cm Empfänger zum Einsatz zu bringen. Die Maße der Behälter werden sich aber kaum voneinander unterscheiden. So ist eine Darstellung der drei Empfänger und eine passende Anordnung zueinander in der Empfängerbox möglich.

7.1. Lösung zum Druckbehälter des 21cm Kryostats

7.1.1. Beschreibung des äußeren Aufbaus des Kryostaten

In der Baugruppe des 21cm Kryostaten wurden zusätzlich zu den von mir konstruierten Bauteilen auch Teile von älteren Dewars eingebaut. Alle Konstruktionszeichnungen sind dem Anhang zu entnehmen (siehe A.3 auf Seite 126). Große Rohre und Wellen sind nur beschränkt bei Herstellern zu beziehen. Deshalb musste auf die Legierung AlMg 3 zurückgegriffen werden. Bei Blöcken oder Platten war es möglich das höherwertige Material AlMg 4,5 Mn zu verwenden.

Der ausgewählte Kryostat musste an manchen Stellen überarbeitet werden. Zur Platzersparnis wurde der Oberkasten an zwei Seiten abgeflacht und anstatt des vorausgewählten Tellerbodens ein flacher Deckel verwendet. Die Form des Oberkasten wurde aus einem Aluminiumblock spanend gefertigt. Der Vorteil ist besonders die Platzersparnis. An den abgeflachten Seiten sind Öffnungen eingefräst, die mit den Seitendeckeln verschlossen sind. Auf der Oberplatte wurden Ausfräsungen zur Gewichtsersparnis vorgenommen sowie eine Gewindebohrung zum Aufschrauben einer Ringschraube gefertigt. Mit dieser ist

ein Transport des Kryostaten per Kran möglich. Auf dem Unterdeckel des Oberkastens werden alle benötigten Anschlüsse montiert, dazu zählen:

- der Refrigerator und Stutzen
- das Überdruckventil
- die Vakuumröhre
- Stecker für Signalübertragung, Spannungsversorgung und Temperaturmessungen

Zusätzlich befinden sich auf der Oberseite der Platte Bohrungen zur thermischen Abstützung des 70K Schildes.

Das 300K Rohr wird aus einem dickwandigen Rohr gefertigt und soweit überdreht, bis die Wandstärke nur noch 3mm beträgt. An beiden Enden des Rohres verbleiben allerdings Abstufungen, die ein Anflanschen an die Unterplatte möglich machen. Der 300K Unterdeckel wird auf das untere Rohrende geschraubt. Auf diesem sitzt das Fenster, das den Behälter vakuumdicht verschließt. Das Empfängerhorn mit Rillenkranz ist an den Fensterhalter geschraubt. Abbildung 47 zeigt den vollständigen und fertigen 21cm Kryostaten.

7.1.2. Festigkeitsnachweis des 21cm Kryostaten mit Cosmos Works

Bei allen Außenbauteilen wird von einem äußeren Überdruck von 1 bar $= 10^5 Pa = 10^5 \frac{N}{m^2}$ ausgegangen. Im Featuremanager wird unter "Lager und Lasten" die Option "Druck" aufgerufen und der Wert in der dafür vorgesehenen Box eingegeben. Alle Außenflächen des Kryostaten werden für die Druckbelastung ausgewählt. Zur Befestigung der zu analysierenden Teile, selektierte ich die Bauteilflächen aus, die in Wirklichkeit durch eine Schraubenverbindung mit anderen Komponenten starr verbunden sind. Bei einer Schraubverbindung ist die Komponente unbeweglich. Deshalb muss der Lagertyp "fixiert" ausgewählt werden.

Die Vernetzung sollte nicht zu grob ausfallen. Eine feinere Vernetzung gewährleistet ein genaueres Ergebnis, allerdings steigt mit einem feineren Netz die Berechnungszeit einer Studie. Um dem entgegenzuwirken, habe ich bei den berechneten Bauteilen und Baugruppen alle Bohrungen sowie kleinere Durchdringungen unterdrückt.

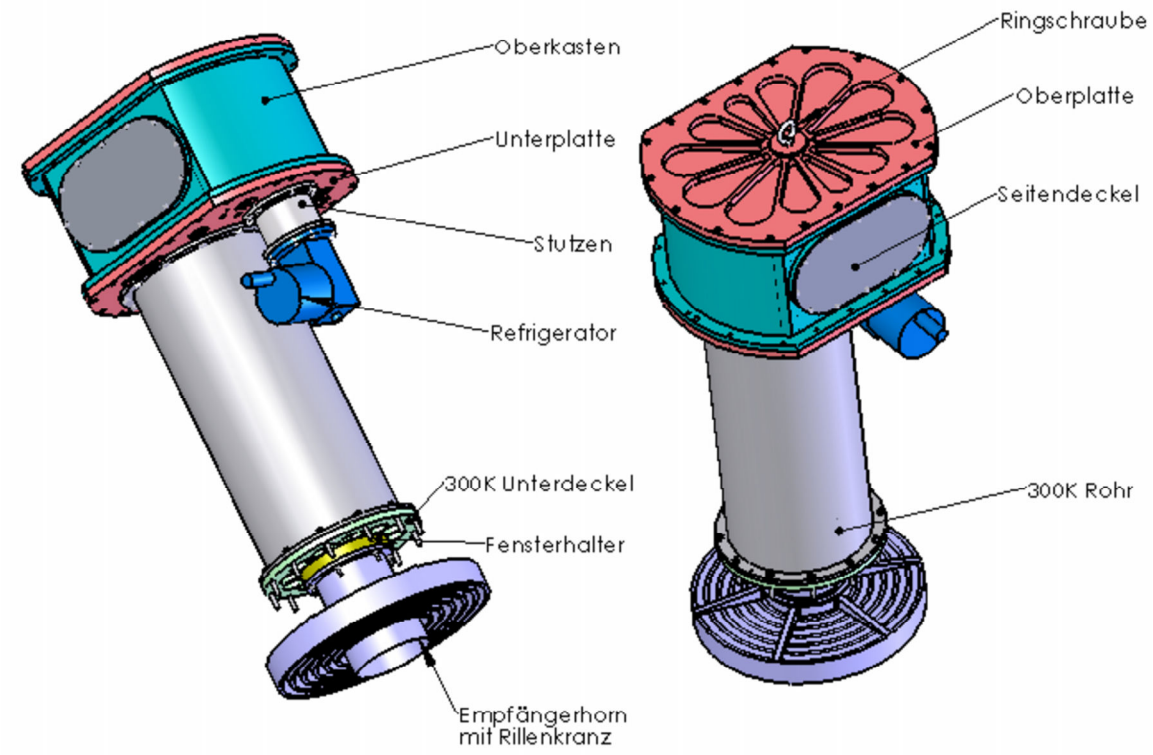


Abbildung 47: Ansicht des entgültigen 21cm Kryostaten

7.1.3. Festigkeitsanalyse von Oberkasten und Oberdeckel

Die folgende Analyse ist hauptsächlich für Oberplatte und Oberdeckel gedacht. Jedoch wurde die Unterplatte dazugenommen um die Ergebnisse der Realität besser anzupassen. Die Verschiebungen der Unterplatte rufen nämlich zusätzliche Spannungen im Oberkasten und Oberdeckel hervor. Zusätzlich ist der Oberkasten mit zwei Seitendeckeln versehen. Das verwendete Material ist AlMg 4,5 Mn, das eine Streckgrenze von 125 MPa und ein E-Modul von 70000MPa nach Tabellenbücher und Datenblätter aufweist [15], [20]. Die Deckeldicke wurde auf 20mm festgelegt mit einer Ausfräsung von 17mm Tiefe. Der Oberkessel hat eine Wanddicke von 4mm und einen Durchmesser von 558mm. Die abgeflachten Seiten haben ein Abstandsmaß von 418mm.

Wie schon in Abschnitt 4.2.4 erwähnt, gibt CosmosWorks eine Elementgröße zum Vernetzen vor. Bei dieser Baugruppe liegt sie bei etwa 22,5 mm bei einer Anzahl von 39127 Knotenpunkten. Das Ziel war es aber möglichst genaue Ergebnisse zu bekommen. Deshalb verkleinerte ich die Elementgröße auf 12mm und erhöhte dadurch die Anzahl der Knotenpunkte auf über 120000.

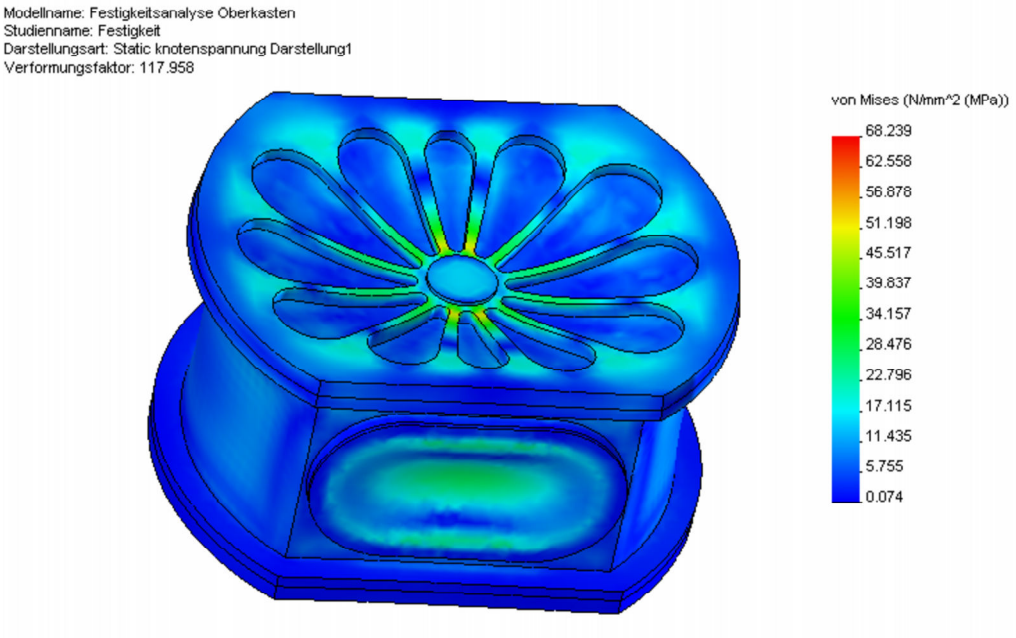


Abbildung 48: Spannung von Oberkasten und Oberdeckel

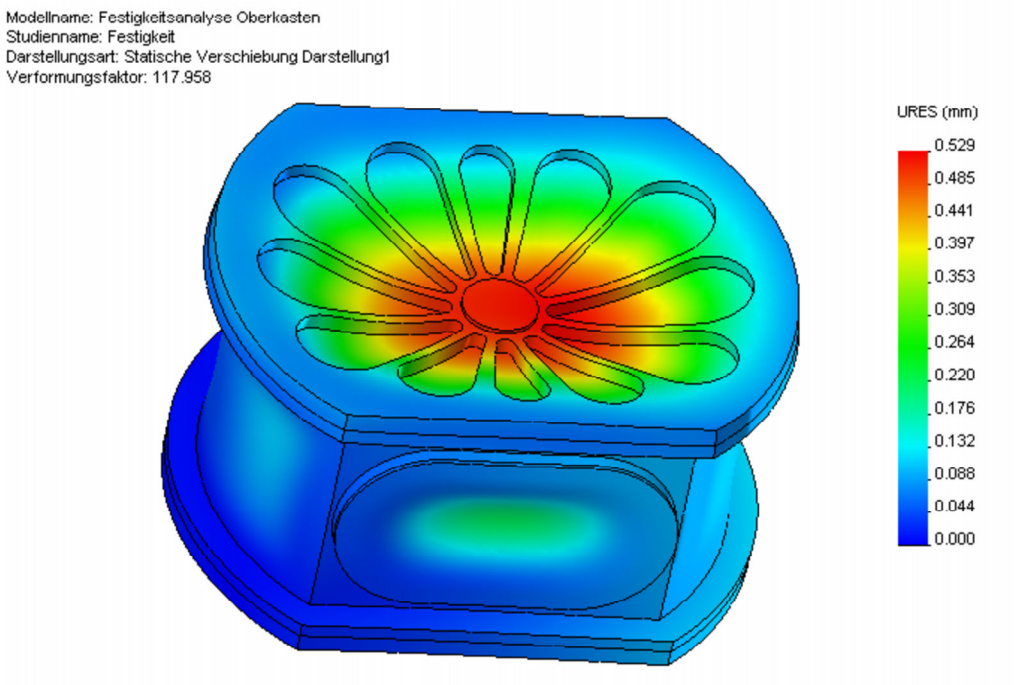


Abbildung 49: Verschiebung von Oberkasten und Oberdeckel

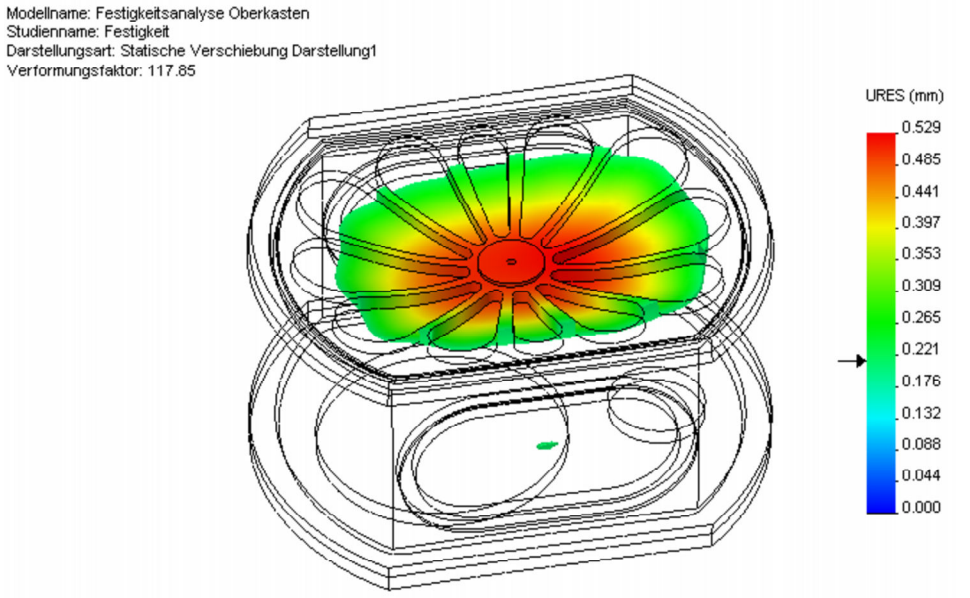


Abbildung 50: Verschiebung von Seitendeckel (Darstellung mit ISO-Clipping)

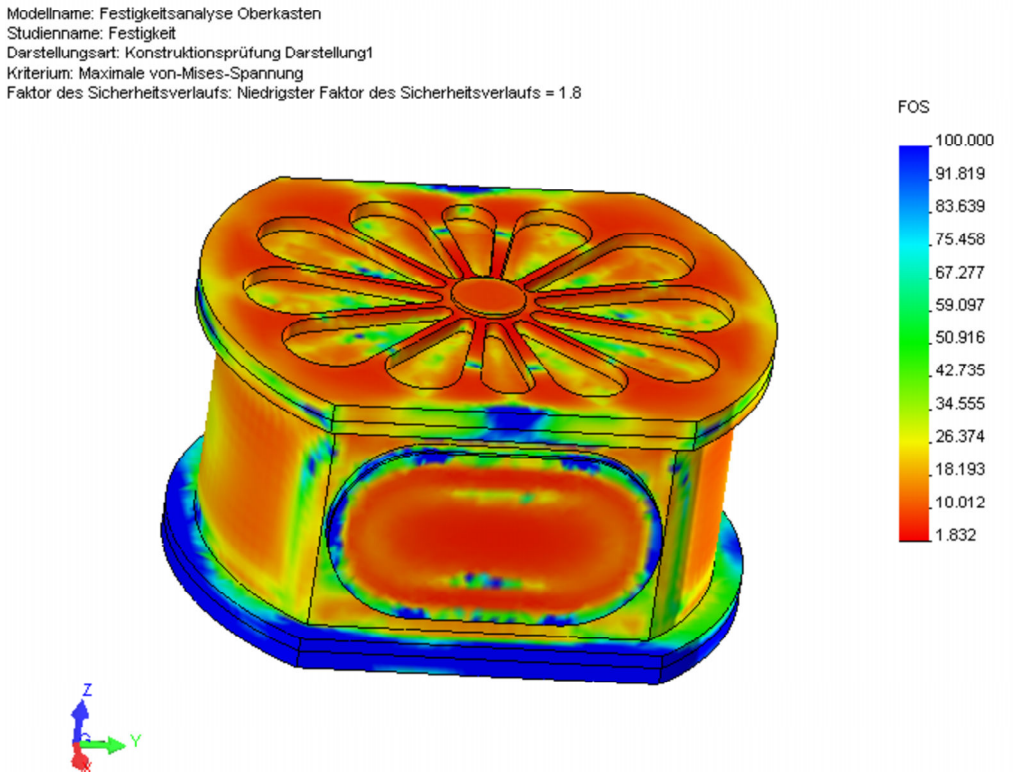


Abbildung 51: Sicherheit von Oberkasten und Oberdeckel

Die maximale Spannung liegt im Bereich der Ausfräskanten am Oberdeckel mit etwa

68,2 MPa. Zusätzlich weist der Mittelpunkt des Deckels auch die größte Verschiebung auf, mit s — 0,529mm. Um die genauen Verschiebungen der Seitendeckel zu erfahren, wurde in Abbildung 50 die Verschiebung mit ISO-Clipping dargestellt. Der Oberkasten erfährt die geringsten Spannungen und Verschiebungen und besitzt deshalb die höchsten Sicherheitswerte, die nach Abbildung 51 im Bereich von über S 10 liegen. Der kleinste Sicherheitswert beträgt 1,8 und bestätigt damit die Zulässigkeit der analysierten Bauteile.

7.1.4. Festigkeitsanalyse der Ringschraube

Die Ringschraube macht es möglich den Kryostaten mit Hilfe eines Krans aus der Empfängerbox zu heben. Allerdings muss dazu die Festigkeit des Oberdeckels analysiert werden.

Nach einem groben Gewichtüberschlag, wurde das Maximalgewicht des Kryostaten auf 120 kg geschätzt. Die Ringschraube und besonders der Oberdeckel des Oberkastens müssen einer Gewichtskraft von $F \approx 1200N$ widerstehen. Die Ringschraube ist aus Einsatzstahl C15 und hat eine Streckgrenze von 430 MPa und ein E-Modul von $2,1 \cdot 10^5 \frac{N}{mm^2}$. Die Innenfläche der Bohrung im Deckel, welche für die Ringschraube vorgesehen ist, wurde mit der Option der Vernetzungssteuerung bearbeitet. Damit ist es partiell möglich ein engmaschigeres Netz zu erstellen um genauere Ergebnisse an gewünschten Kanten, Punkten oder Flächen zu bekommen.

Im ersten Fall wurde eine Analyse für eine Situation erstellt bei der im Behälter ein winziger Absolutdruck herrscht.

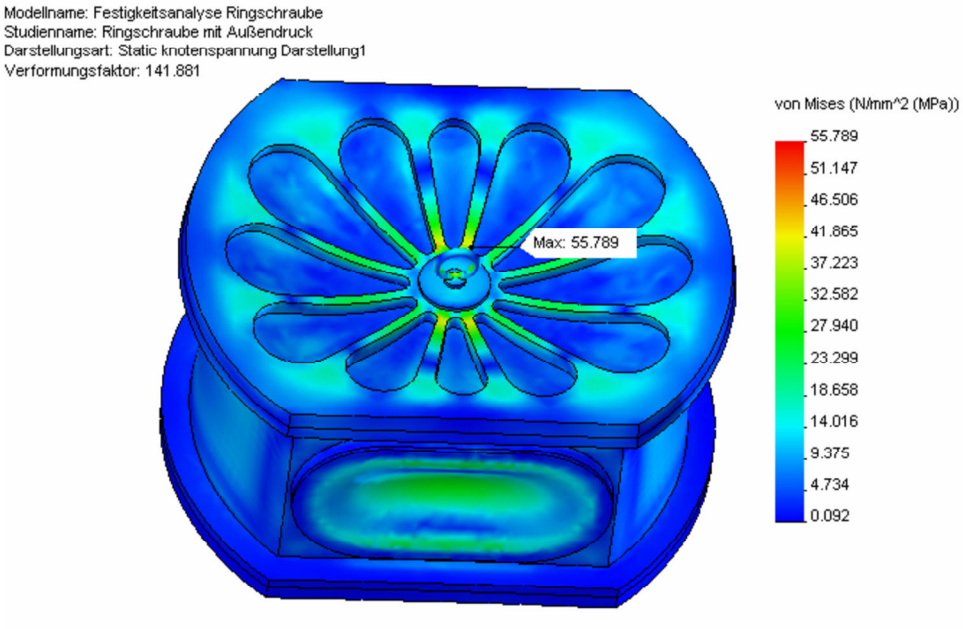


Abbildung 52: Spannung von Oberdeckel und Ringschraube mit Außendruck

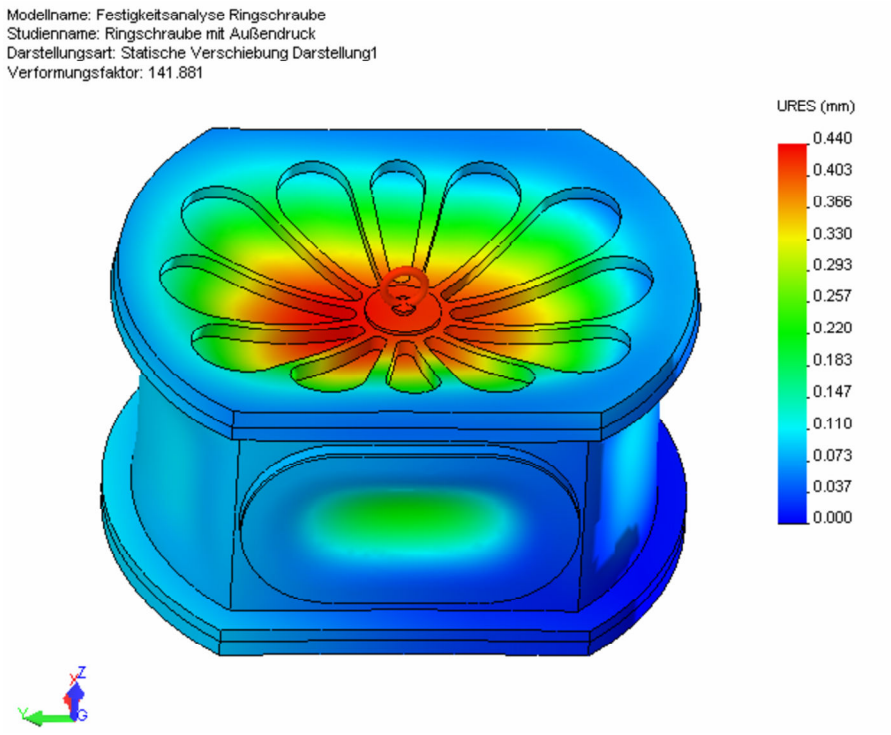


Abbildung 53: Verschiebung von Oberdeckel und Ringschraube mit Außendruck

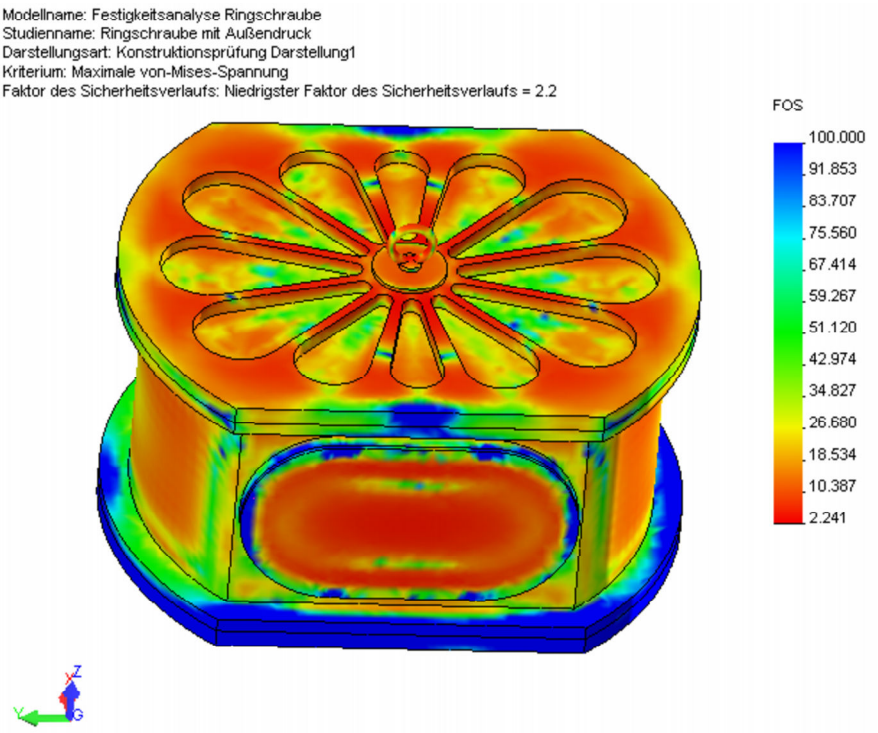


Abbildung 54: Sicherheit von Oberdeckel und Ringschraube mit Außendruck

Die Höchstspannung $\sigma_{max} \approx 55,8$ MPa liegt auch hier wieder an den Kanten der Ausfräsungen (siehe Abbildung 52). Die Verschiebung beträgt etwa 0,44mm und die Sicherheit über 2,2 (siehe Abbildungen 53, 54).

Als nächstes wird die Situation betrachtet, dass das Gewicht des Kryostats an der Ringschraube hängt und der Druck im Dewar gleich dem Umgebungsdruck ist.

Die Verschiebung des Oberdeckels findet nun in anderere Richtung statt. Allerdings sind die maximalen Spannungen mit $\sigma_{max} \approx 38,5$ MPa geringer und treten nicht am Deckel sondern an der Ringschraube auf. Der Deckel besitzt in diesem Fall nur eine maximale Spannung von $\sigma_{max} \approx 7$ MPa, wie in Abbildung 56 mit Hilfe von ISO-Clipping verdeutlicht wird.

Die Verschiebungen (s $\approx 0,1mm$) sind natürlich geringer und betragen nur ein Viertel der Auslenkung im Vergleich zur Analyse mit Außendruck. Die Sicherheit gegen bleibende Verformung ist größer als S — 3,2 und bestätigt die Festigkeit beider Bauteile.

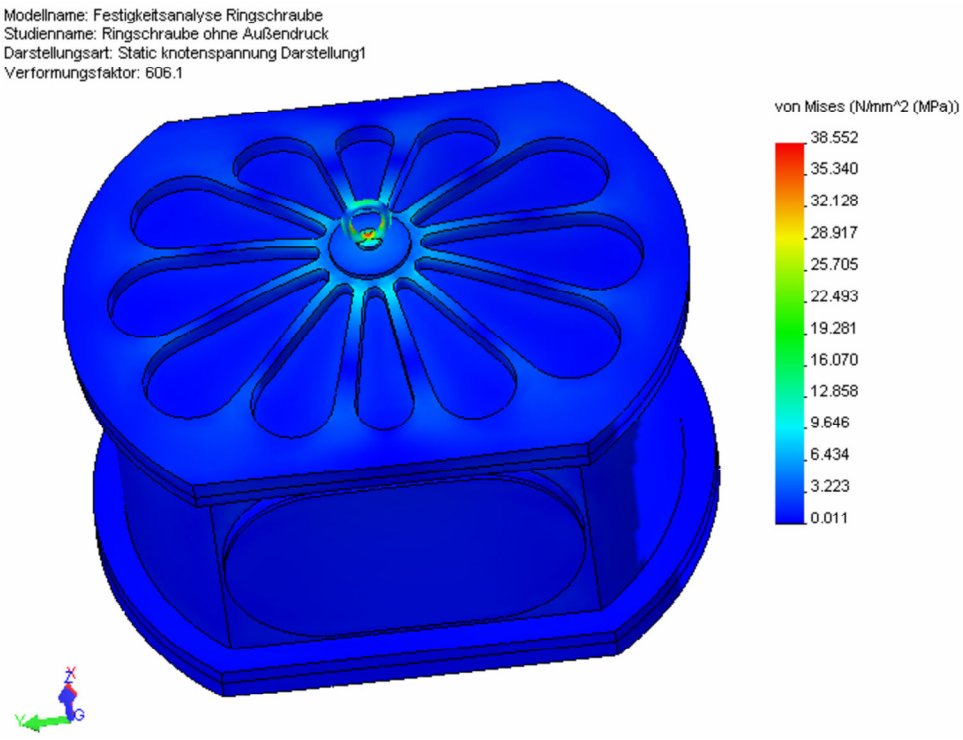


Abbildung 55: Spannung von Oberdeckel und Ringschraube ohne Außendruck

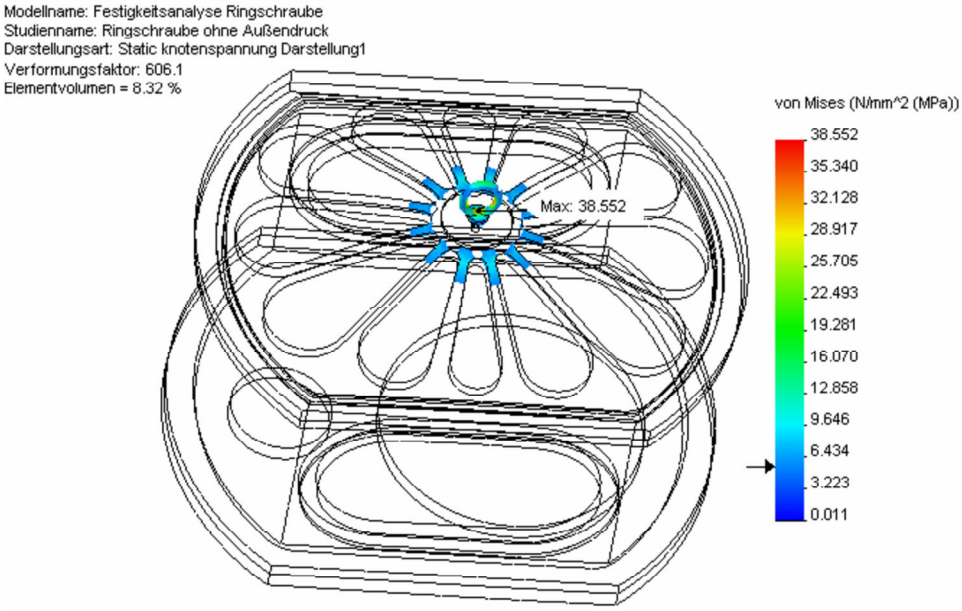


Abbildung 56: Spannung von Oberdeckel und Ringschraube ohne Außendruck mit ISO Clipping

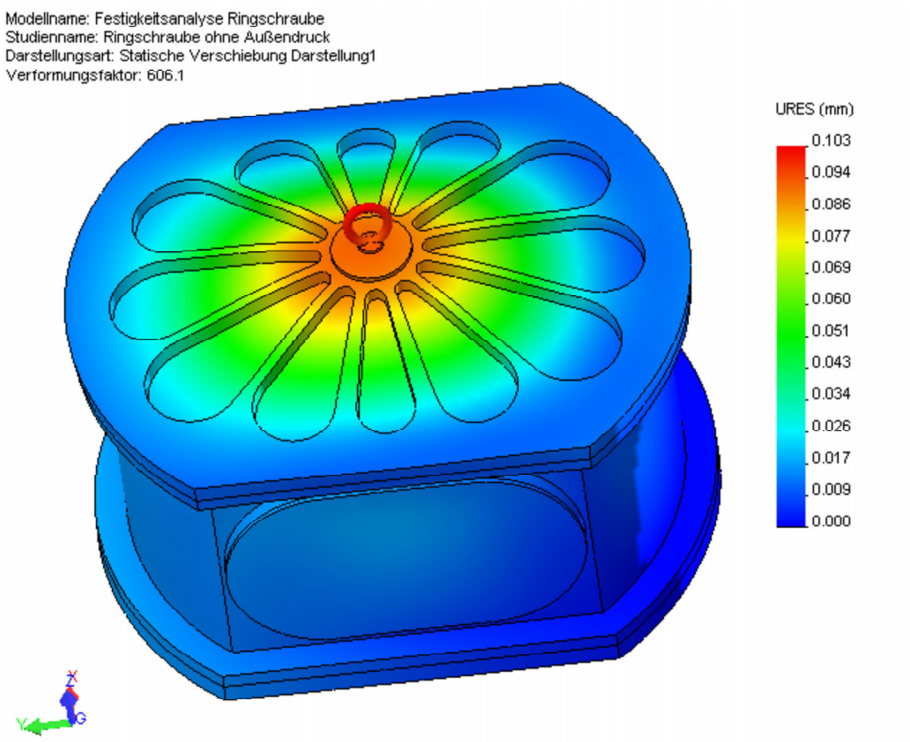


Abbildung 57: Verschiebung von Oberdeckel und Ringschraube ohne Außendruck

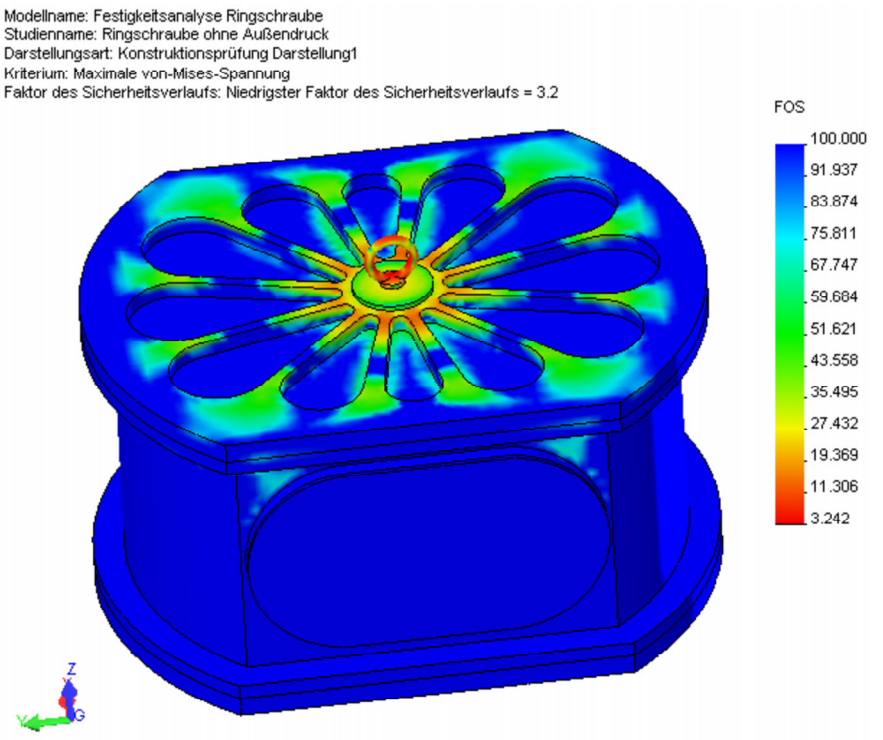


Abbildung 58: Sicherheit von Oberdeckel und Ringschraube ohne Außendruck

7.1.5. Festigkeitanalyse des 300 K Rohrs

Das 300K Rohr wurde an seinen beiden Enden gelagert und an der Zylinderaußenfläche mit einem Druckunterschied von $10^5 MPa$ belastet. Als Material war nur AlMg 3 möglich. Aluminiumlegierungen mit höherer Festigkeit konnten bei keinem Anbieter beschafft werden. Die Wandstärke des Zylinders beträgt 3mm und der Außendurchmesser 306mm. Der Flanschaußendurchmesser wurde mit 360mm und mit einer 10mm Wandstärke definiert. Die Flansche dienen dazu, das Rohr mit anderen Bauteilen zu verbinden. Zusätzlich gewährleisten sie aber auch eine gewisse Steifigkeit an den Enden des Zylinders.

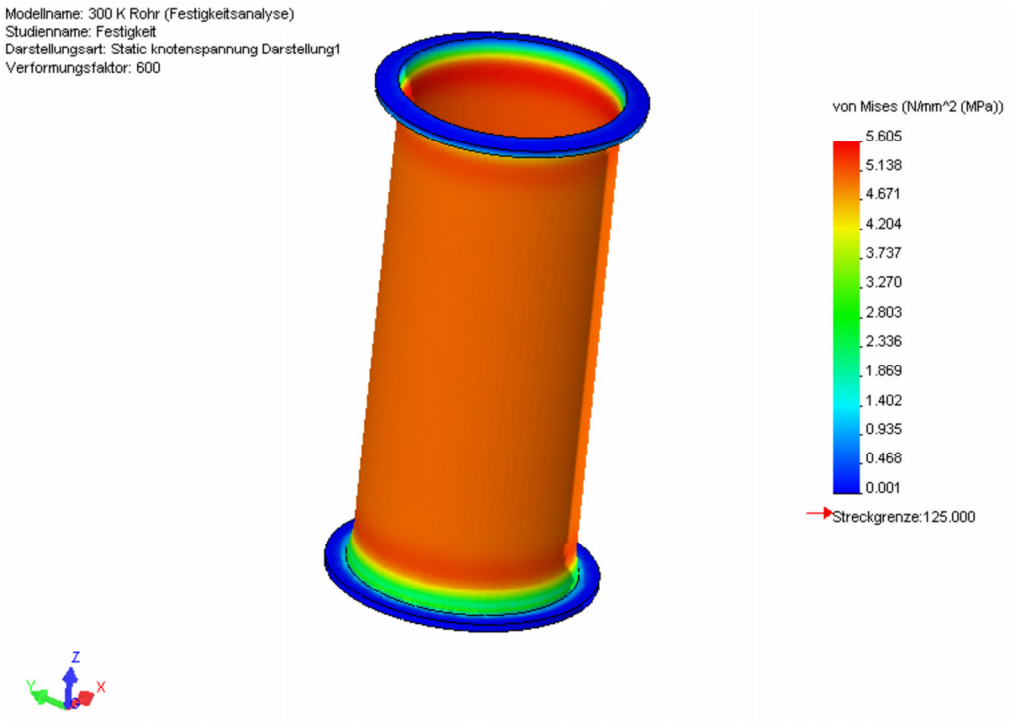


Abbildung 59: Spannung am 300K Rohr

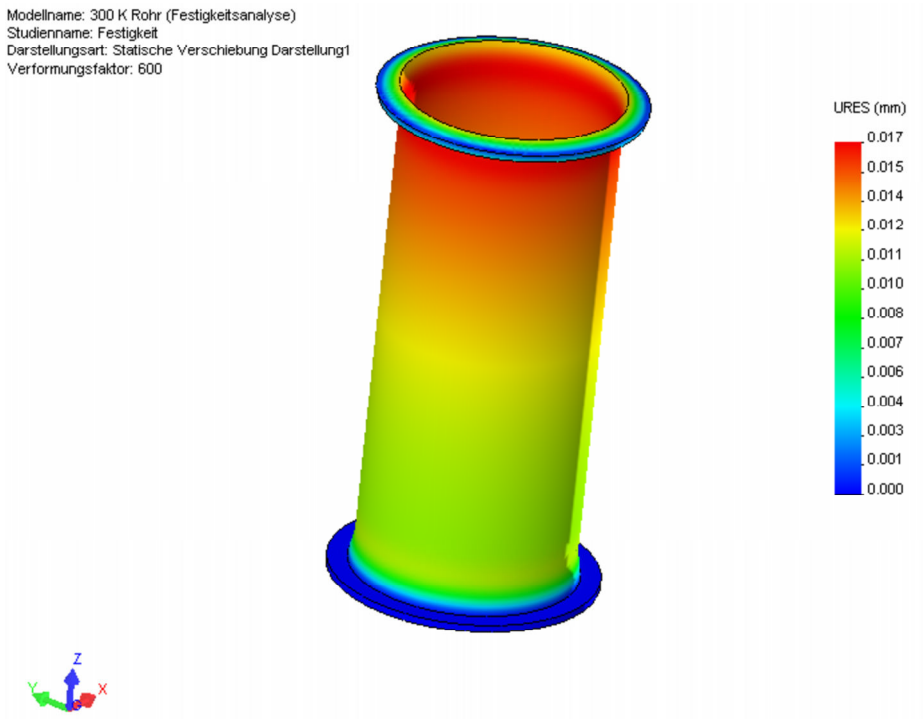


Abbildung 60: Verschiebung am 300K Rohr

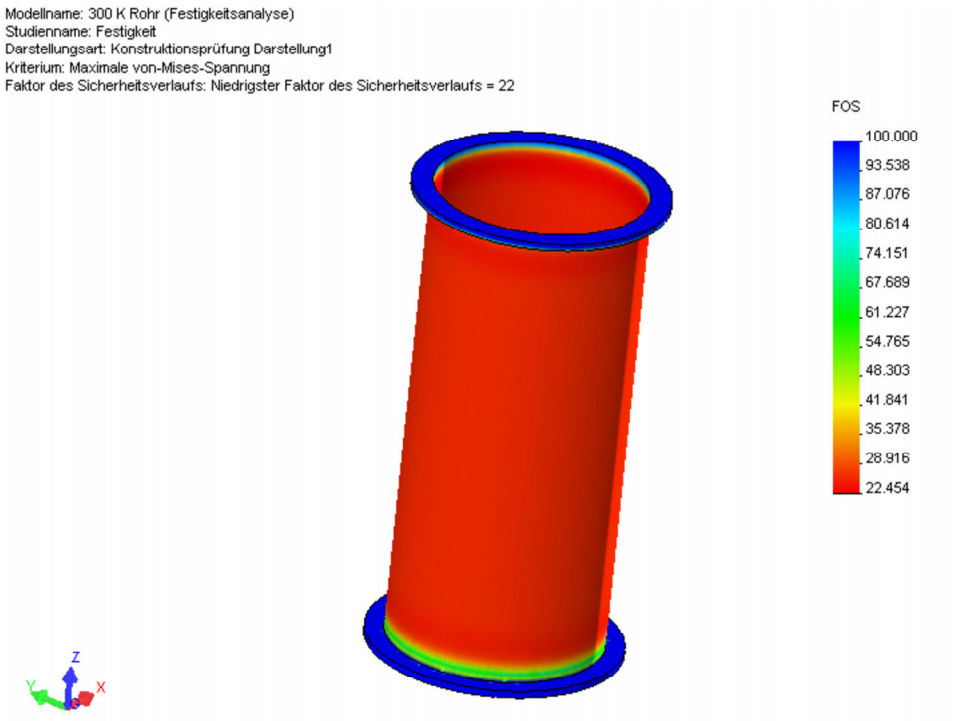


Abbildung 61: Sicherheit des 300K Rohrs

Aus den Analysen in den Abbildungen 59, 60, 61 ist zu erkennen, dass ein Material mit höheren Festigkeitswerten nicht nötig ist. Die Höchstspannung tritt im Übergangsbereich vom Rohr zum Befestigungsflansch mit nur $\sigma \approx 5,57\text{MPa}$ auf. Die Verschiebungen (s − 0,017mm) sind dementsprechend sehr klein und der Sicherheitswert sehr groß (S − 22,45). Die Spannung darf natürlich unter dem Aspekt der Gewichtsreduzierung deutlich höher ausfallen. Dazu müsste man die Wandstärke des Zylinders senken. Allerdings schreiben die AD- Merkblätter (siehe Anhang A.1 auf Seite 114) vor, dass die kleinste Wanddicke für nahtlose Zylinderschalen mit 3mm festgelegt ist. Des Weitern ist es fertigungstechnisch kaum möglich, noch mehr Material an der Wand abzudrehen, weil dann das Bauteil beim bearbeiten zu schwingen beginnt. Deshalb verbleibt das 300K Rohr in diesem Zustand.

7.1.6. Fesigkeitsanalyse des kompletten 21cm Kryostaten

Die folgende Analyse zeigt alle unter Außendruck belasteten Bauteile des 21cm Kryostats. Der 300K Unterdeckel ist über ein Abstützrohr mit der Bodenplatte der Empfängerbox verschraubt (siehe Abbildung 85 auf Seite 106) und wird deshalb für die Analyse fixiert. Um der Wirklichkeit nahe zu kommen wurde der Rand des Deckels zur Lagerung ausgewählt.

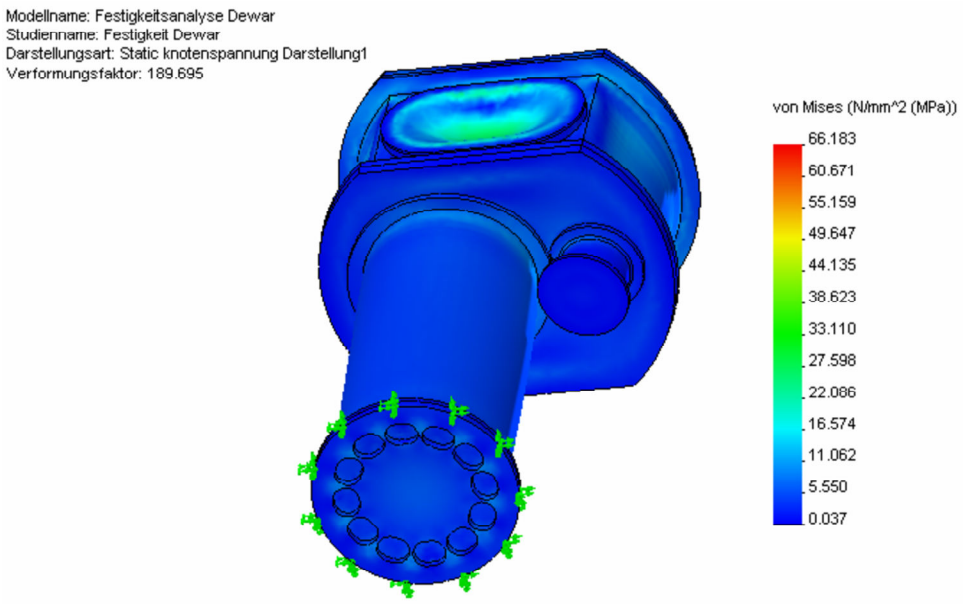


Abbildung 62: Spannung Kryostat Ansicht 1

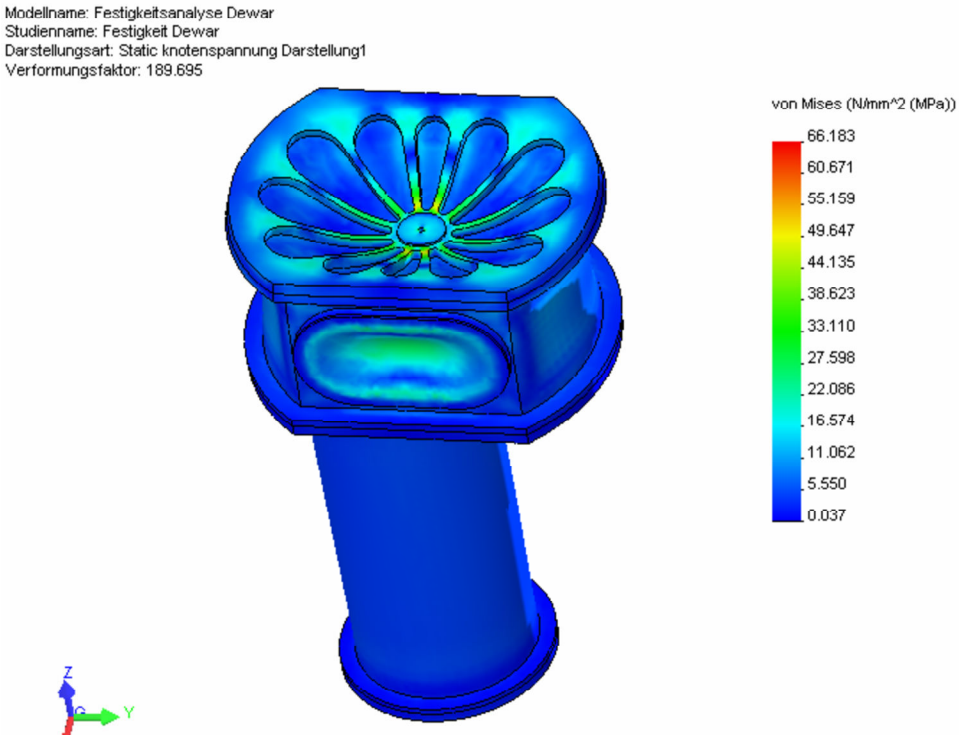


Abbildung 63: Spannung Kryostat Ansicht 2

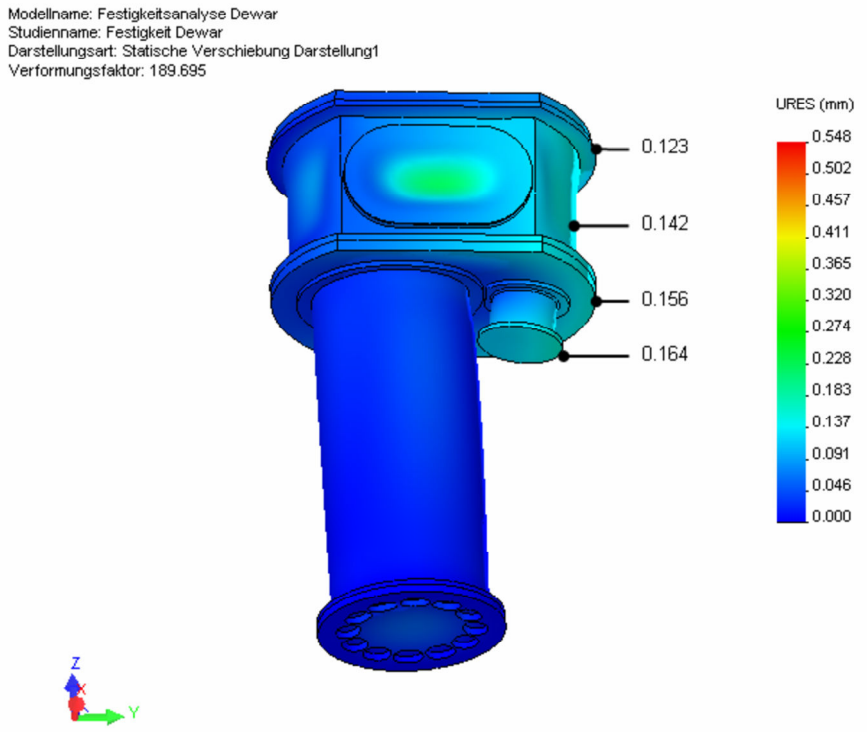


Abbildung 64: Verschiebung Kryostat Ansicht 1

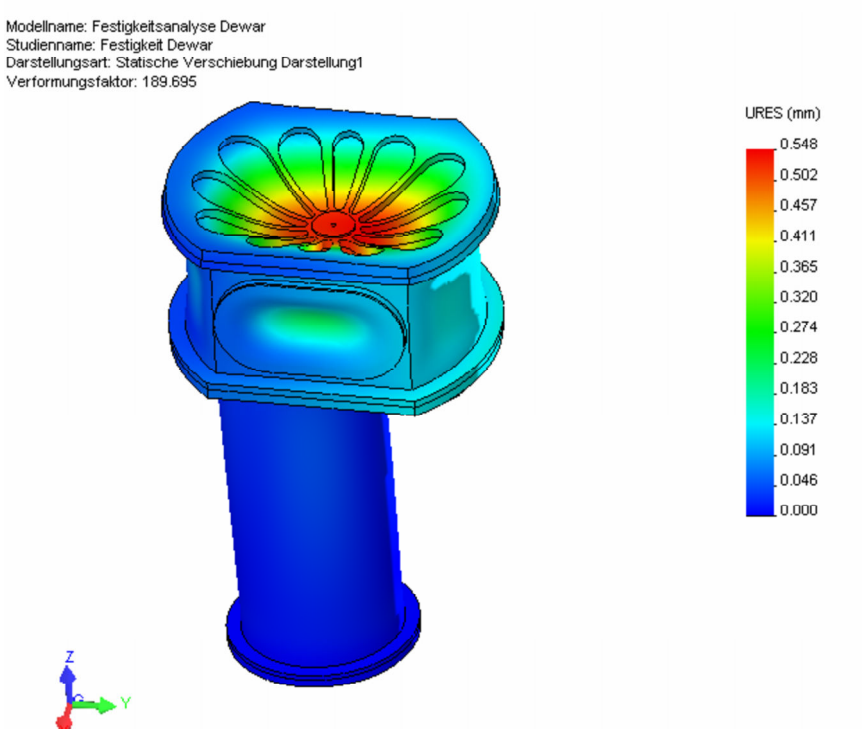


Abbildung 65: Verschiebung Kryostat Ansicht 2

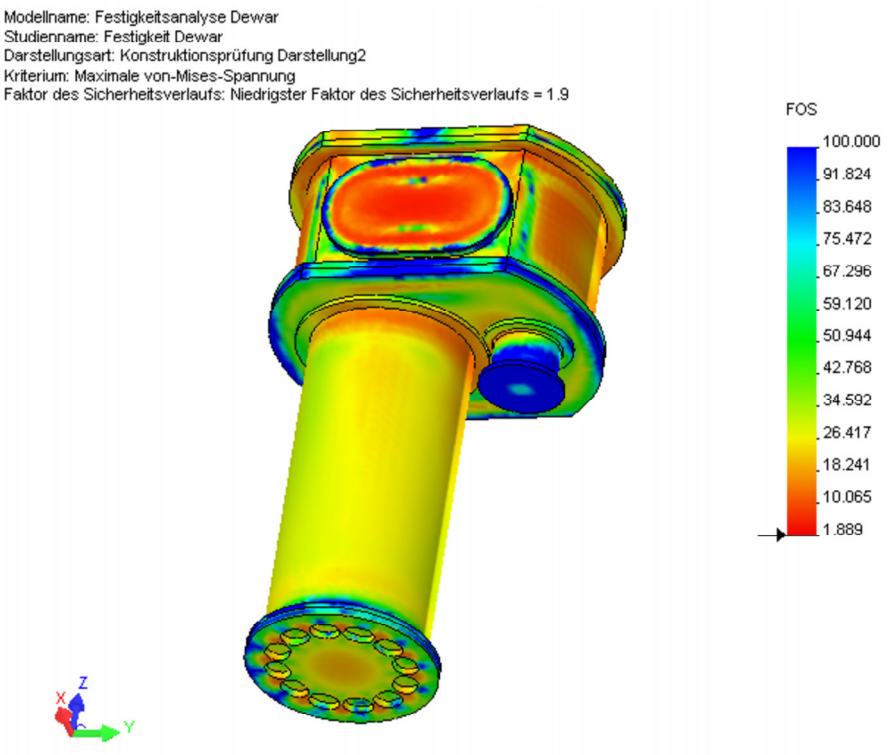


Abbildung 66: Sicherheit Kryostat Ansicht 1

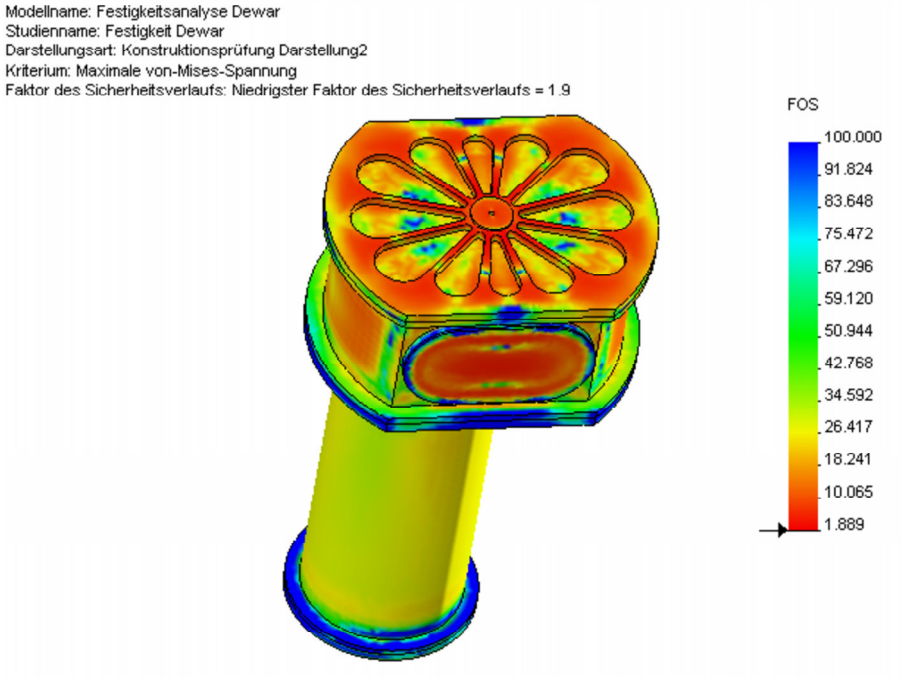


Abbildung 67: Sicherheit Kryostat Ansicht 2

Die Ergebnisse bestätigen nun endgültig, dass der Druckbehälter ausreichend ausgelegt wurde. Wie erwartet liegen nach Abbildung 62 und 63 die größten Spannungen an den Kanten und Flächen, bei denen die Ausfräsung im Oberdeckel ihren kleinsten Radius hat. Die Spannungswerte unterscheiden sich geringfügig von der Festigkeitsanalyse in Unterabschnitt 7.1.3 auf Seite 78. Der Grund liegt darin, dass die Baugruppe des Kryostaten mit einer geringeren Element- und Knotenanzahl berechnet wurde.

Da der Deckel den größten Spannungen widerstehen muss, treten auch dort die größten Verschiebungen und der geringste Sicherheitswert auf (siehe Abbildung 64, 65, 66 und 67). Die maximale Verschiebung beträgt s 0,548mm und die Mindestsicherheit S 1,8.

7.2. Lösung zum 70K Schild des 21cm Kryostaten

7.2.1. Beschreibung des inneren Aufbaus des Kryostaten

Von der Unterplatte des Oberkastens wird durch die GFK-Abstützungen und den Flansch des Refrigerators die 70K Platte getragen (siehe Abbildung 70). Der Refrigerator gibt Wärme an die 70K Bauteile weiter. Dazu gehört das 70K Gehäuse, das auf die 70K

Platte geschraubt ist. Das wiederum ist verbunden mit dem 70K Deckel und den 70K Seitendeckeln (siehe Abbildung 68). Der 70K Deckel stützt das Hohlleiterrohr mit Hilfe eines GFK Stützrohrs gegen Querkräfte ab. Unterhalb der Platte ist das 70K Rohr aufgeschraubt, an dessen anderem Ende eine 70K Kühlplatte angeschraubt ist. Diese Platte hat die Funktion die Wärmestrahlung, welche aus Richtung des Unterdeckels des 300K Rohrs kommt, zu reflektieren. Zum optimalen Wärmetransport ist die Kühlplatte über Kupferbänder mit dem 70K Choke verbunden. Die Kupferbänder haben eine ausreichende Stabilität um den kompletten 70K Aufbau zu halten. Sie sind aber dennoch gut verformbar und können somit einen eventuell auftretenden Höhenunterschied ausgleichen (siehe Abbildung 69 auf der nächsten Seite). Dieser kann zustande kommen, wenn der Abstand der Bohrungen am 70K Rohr -welche auf der Höhe der Kühlplatte liegen sollen- nicht das gewünschte Abstandsmaß von der Unterkante der 70K Unterplatte haben.

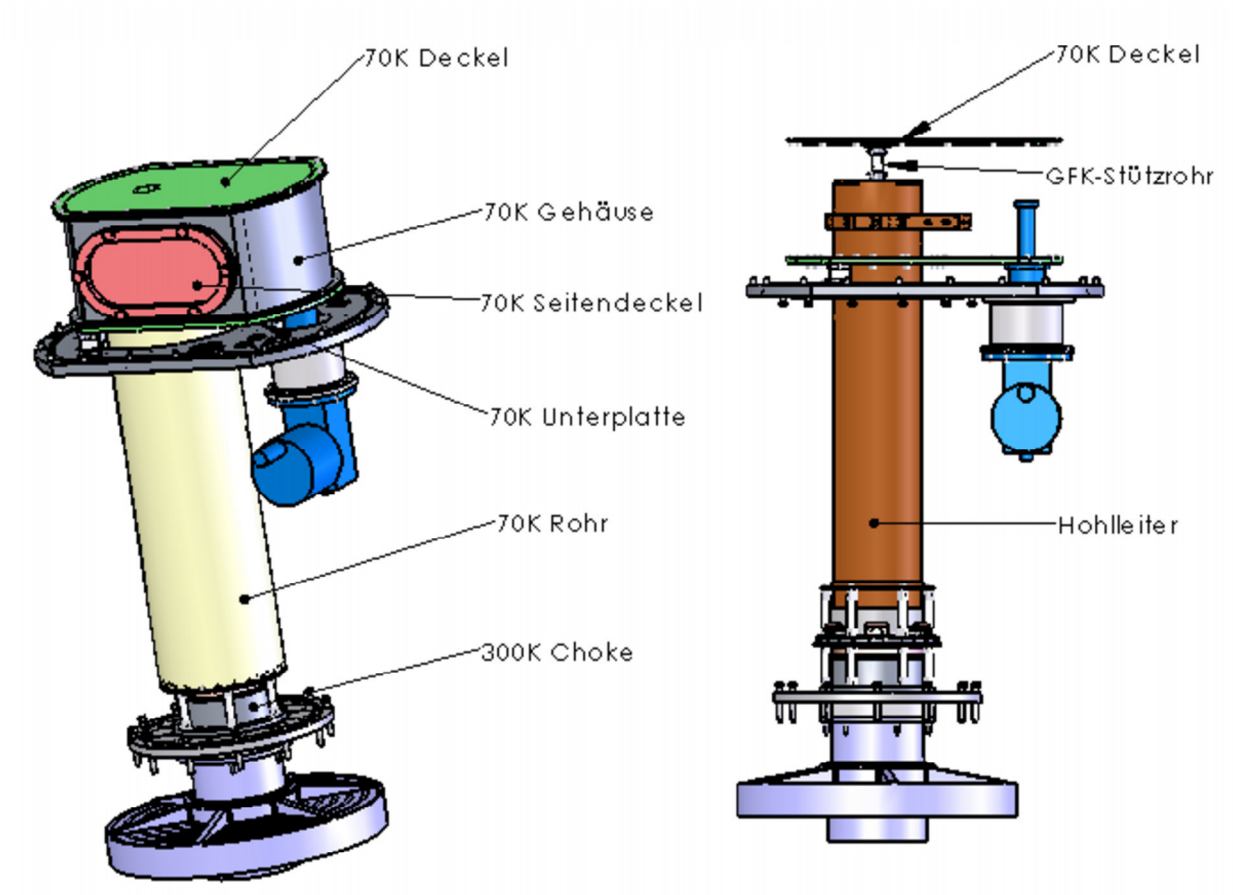


Abbildung 68: Ansicht der 70K Bauteile des 21cm Kryostaten

Der Hohlleiter sitzt konzentrisch im 70K Choke[7] berührt diesen aber nicht. Er ist fixiert durch die GFK-Stäbe und hat keine Verbindung zum 70K Hohlleiter (siehe Abbildung 69). Gegen Wärmestrahlung wird der Hohlleiter durch ein Infrarotfenster geschützt, das zwischen dem 70K Choke und dem 70K Hohlleiter geklemmt wird (nicht im Bild).

Die 15K Stufe des Refrigerators ist über Kupferkühlbänder mit dem Kühlfuß verbunden (nicht im Bild). Durch Wärmeleitung werden die Verstärker und der Hohlleiter gekühlt.

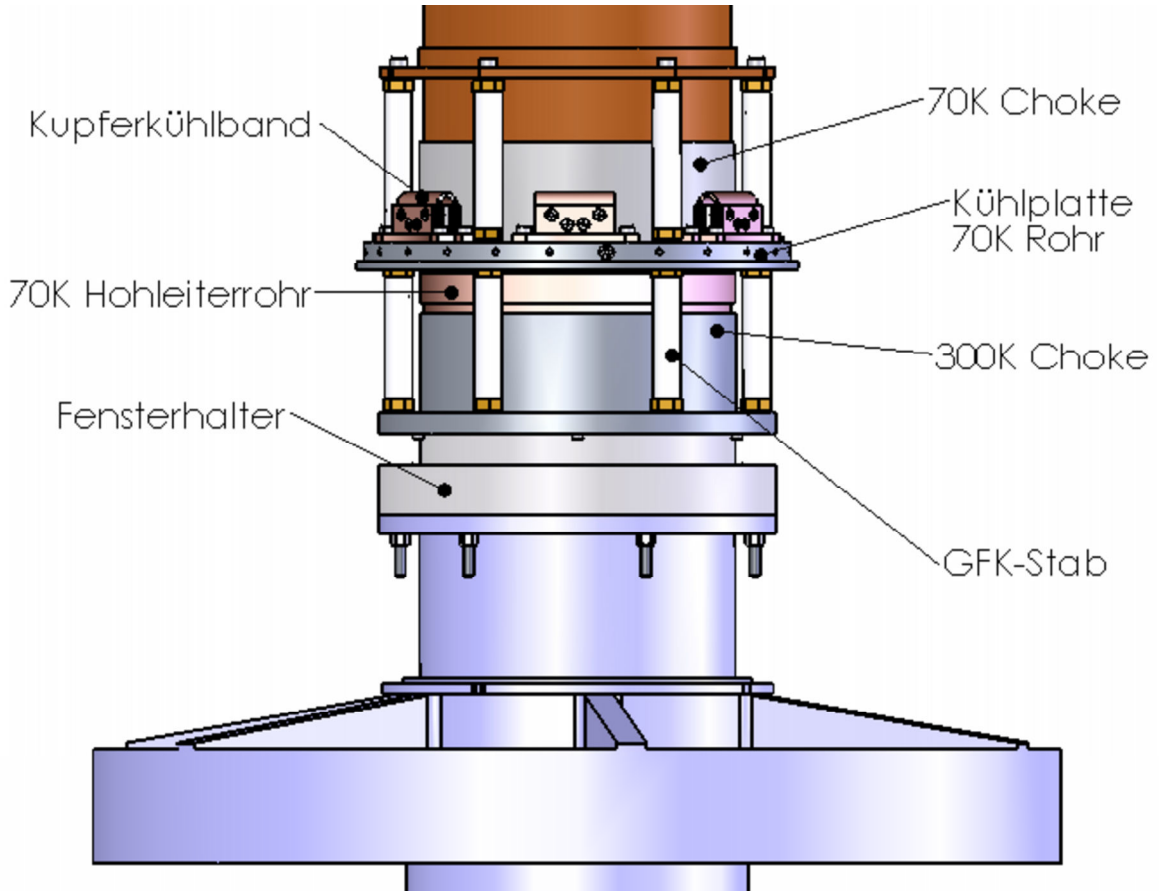


Abbildung 69: Detailansicht Hohlleiterrohraufhängung

[7] Ein Choke ist ein Abstandshalter für den Hohlleiter. Er positioniert diesen und verhindert dadurch eine Wärmeübertragung durch mechanischen Kontakt von außen liegenden Bauteilen zum Hohlleiter.

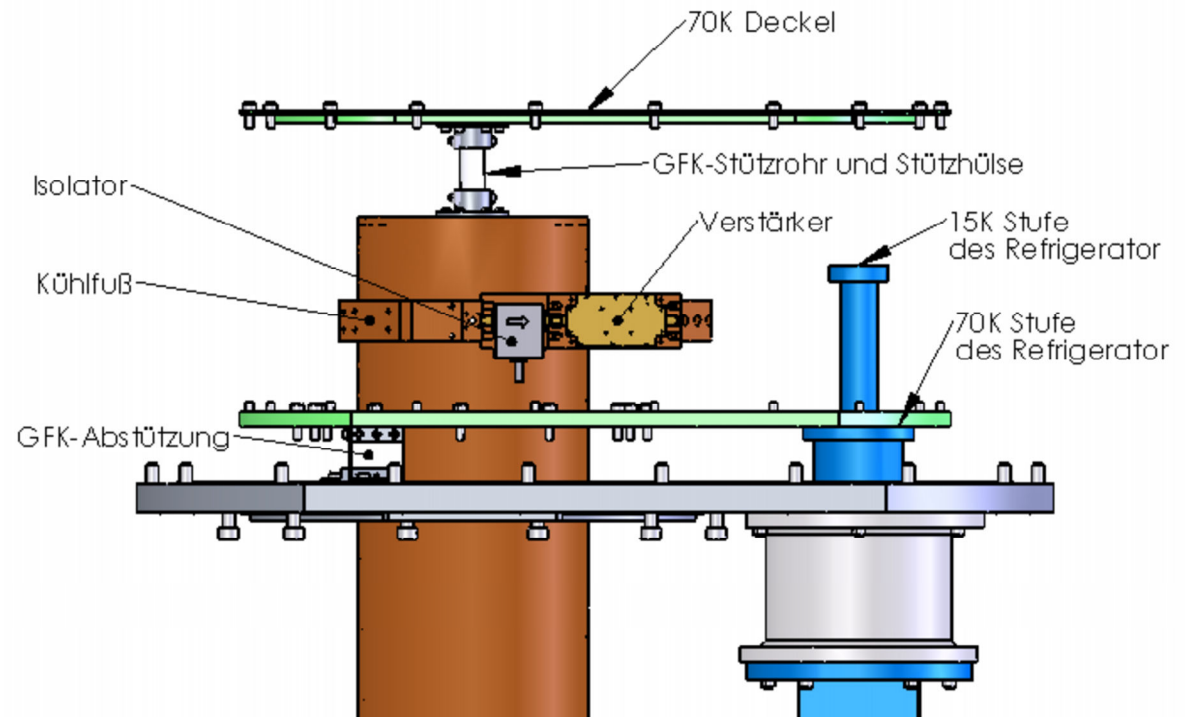


Abbildung 70: Detailansicht 70K Gehäuseabstützung

7.2.2. Thermische Analyse der 70 Kelvin Bauteile des 21cm Kryostaten

Analysiert wurden die wichtigsten Bauteile, die mit der ersten Kühlstufe, der 70K Stufe, in Verbindung stehen. Dazu gehören die 70K Unterplatte, das 70K Gehäuse, die Seitendeckel des 70K Gehäuses, das 70K Rohr und der Deckel des 70K Gehäuses. Diese stehen in mechanischem Kontakt zur GFK-Abstützung und somit zur Unterplatte des Oberkastens.

Unter der 70K Unterplatte wurde eine Trennfläche vorgesehen, die der 70K Aufnahmefläche des Refrigeratorstutzens entspricht. Diese Kreisfläche wird mit einer Temperatur von 70 Kelvin beaufschlagt. Zusätzlich wurde der 300K Unterdeckel an seinem Außenrand als Temperaturlager mit 300K bestimmt, weil ein Kontakt zur Bodenplatte der Empfängerbox besteht. Das elektrolytisch polierte Aluminium weist einen Emissionsgrad von maximal 0,04 auf. Die Innen- und Außenflächen des Gehäuses besitzen deshalb ein Abstrahlungskoeffizient von 0,04. Die innen liegenden Flächen von Bauteilen strahlen sich gegenseitig an. Im Behälter herrscht Hochvakuum, deshalb wird dort die Umgebungstemperatur, bzw. die Konvektion außer acht gelassen. Die Innen- und Außenflächen des Druckbehälters haben im schlechtesten Fall eine Abstrahlung von 0,1 (Aluminium

mit einer groben Oberflächengüte). Der Ansichtsfaktor zur Außenumgebung beträgt 1, weil die Strahlung normal auf alle Außenflächen einfällt. Diese werden zusätzlich durch Konvektion beeinflusst. Konvektion ist die Wärmeübertragung durch ein strömendes Medium. In diesem Fall ist Luft der Träger der Wärmeenergie mit einem allgemeinen Konvektionskoeffizienten von $25\frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Der folgende Abschnitt zeigt, wie unterschiedlich die Wärmeleitung von zwei verschiedenen Aluminiumlegierungen ist. Dabei wurde lediglich die 70K Unterplatte variiert. In der ersten Analyse wurde das Material AlMg 4,5 Mn und in der Zweiten Al 99,5 verwendet. Alle anderen 70K Bauteile werden (bis auf das 70K Rohr) aus fertigungstechnischen Gründen aus dem Werkstoff AlMg 4,5 Mn gefertigt. Damit die Wärmeleitung durch das Material möglichst gering ausfällt, wurde die Abstützung aus Edelstahlbefestigungswinkeln (X8CrNiMn 18 10) und aus glasfaserverstärkten Kunststoffröhrchen gefertigt.

7.2.3. Temperaturverlauf von AlMg 4,5 Mn

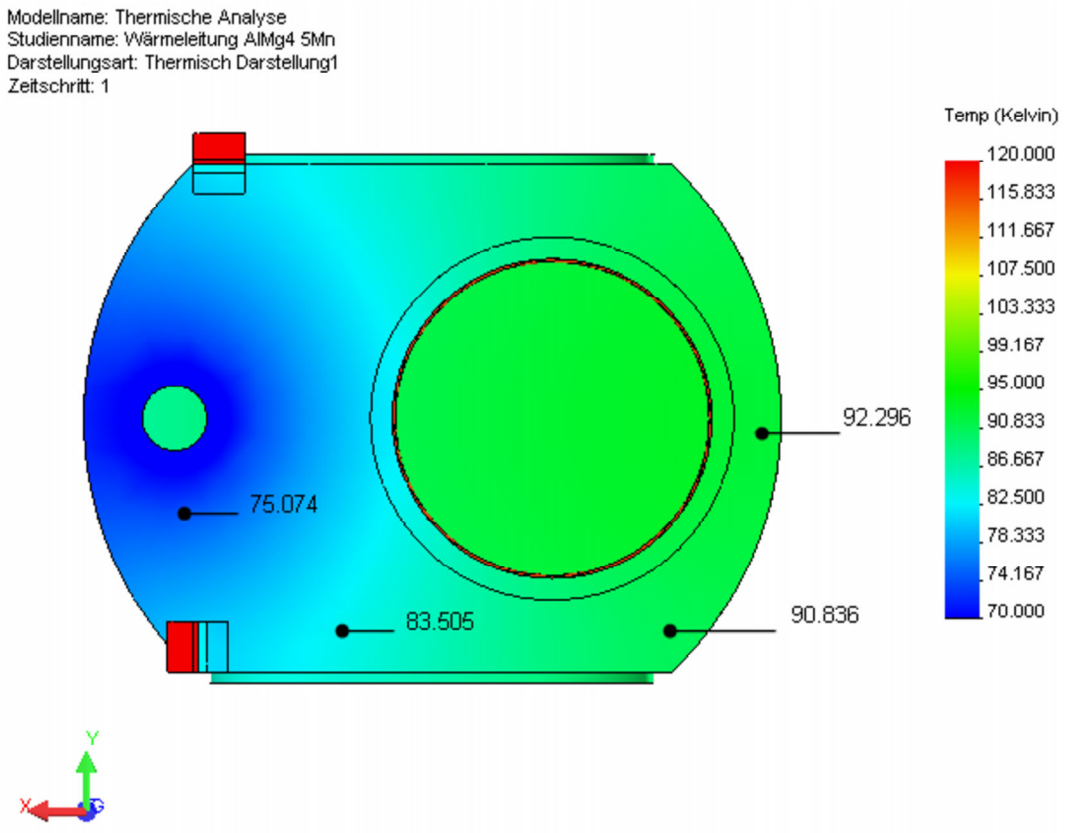


Abbildung 71: Thermische Analyse AlMg 4,5 Mn (Ansicht Unten)

AlMg 4,5 Mn hat eine Wärmeleitfähigkeit von etwa $50\frac{W}{m \cdot K}$ bei einer Temperatur von 70 Kelvin (siehe auch Abbschnitt 6.1.3 auf Seite 43).

Die Wärmeleitfähigkeit von Edelstahl wird mit $8\frac{W}{m \cdot K}$ und die von GFK mit $0,6\frac{W}{m \cdot K}$ angenommen.

Abbildung 71 zeigt den Temperaturverlauf der 70K Unterplatte. Das Loch auf der linken Seite ist der Sitz des Refrigerators. Nach ein Drittel der Unterplattenlänge beträgt die Temperatur nur noch 83,5 Kelvin. Am äußersten Rand sind etwa 92 Kelvin vorhanden. In der nächsten Abbildungen erkennt man (siehe Abbildung 72 und 73), dass an der Unterkante des 70K Rohrs nur noch eine Temperatur von etwa 116 Kelvin erreicht wird.

Auf der Oberfläche des 70K Oberdeckels existieren Temperaturen zwischenn $T \approx 86,8K$ und $T \approx 93,2K$.

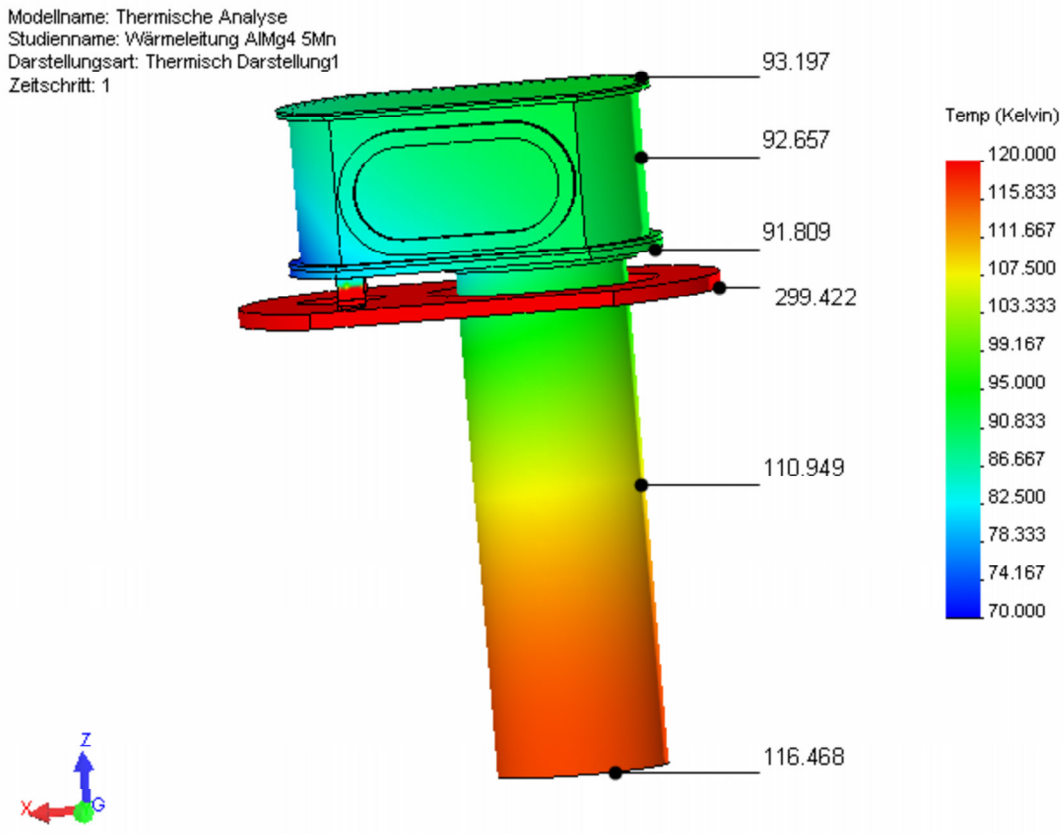


Abbildung 72: Thermische Analyse AlMg 4,5 Mn (Ansicht Hinten)

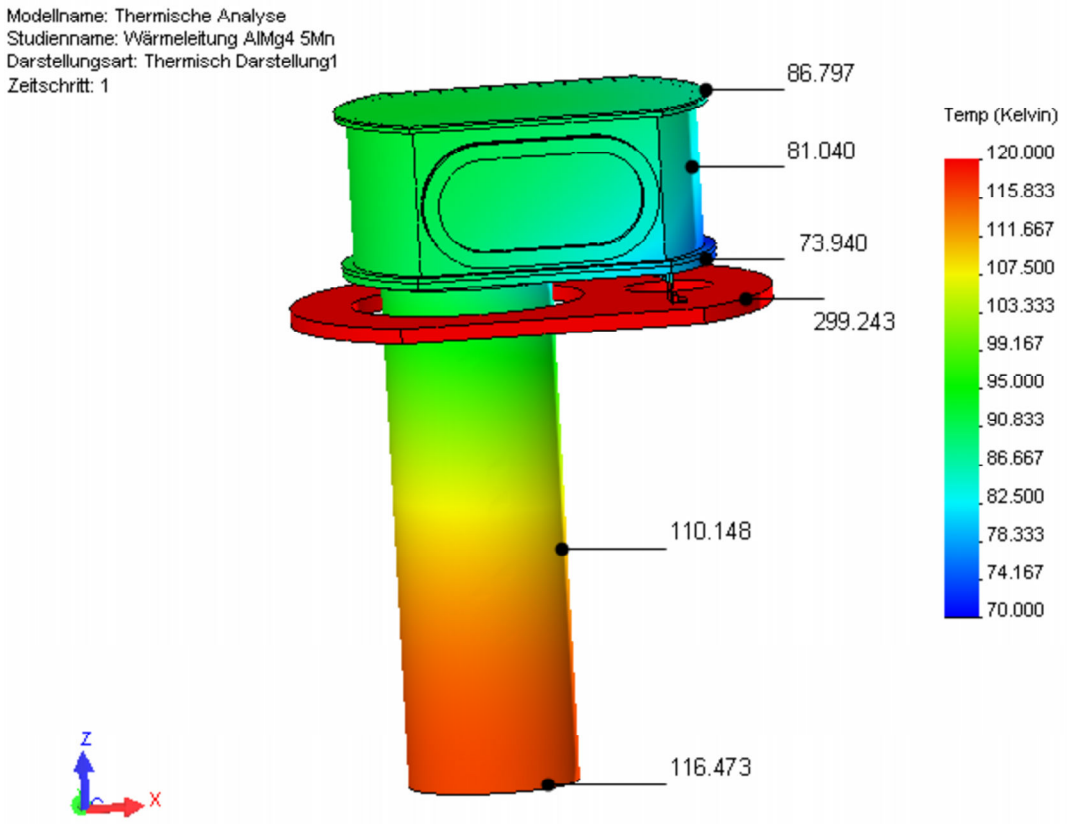


Abbildung 73: Thermische Analyse AlMg 4,5 Mn (Ansicht Vorne)

7.2.4. Temperaturverlauf von Al 99,5

In der folgenden Analyse ist eine 70K Unterplatte aus Al99,5 verwendet worden. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei 70 Kelvin etwa bei $\lambda \approx 400 \frac{W}{m \cdot K}$. Alle anderen Eigenschaften der Bauteile bleiben unverändert (siehe Abschnitt 7.2.3).

Die Wärmeleitfähigkeit der 70K Unterplatte ist nun etwa achtmal höher als im vorherigen Abschnitt. Das macht sich natürlich beim Temperaturverlauf in Abbildung 74 sehr bemerkbar. Die Platte kann viel besser die gewünschten 70 Kelvin halten. Die Höchsttemperatur der Platte beträgt lediglich 74,7K. Das sind im Vergleich zu AlMg 4,5 Mn knapp 8 Kelvin Temperaturunterschied.

In Abbildung 75 und 76 ist zu erkennen, das durch die gute Wärmeleitung von Al99,5 die Unterkante des 70K Rohres eine Temperatur von $T \approx 102K$ besitzt. Auch die Temperaturen auf der Oberseite des 70K Oberdeckels haben deutlich bessere Werte. Die Maximalen liegen bei etwa 78,7 Kelvin, was ein Unterschied von ca. 8 Kelvin bedeutet. Die Temperaturdifferenz an der Unterkante des 70K Rohres beläuft sich auf 14 Kelvin.

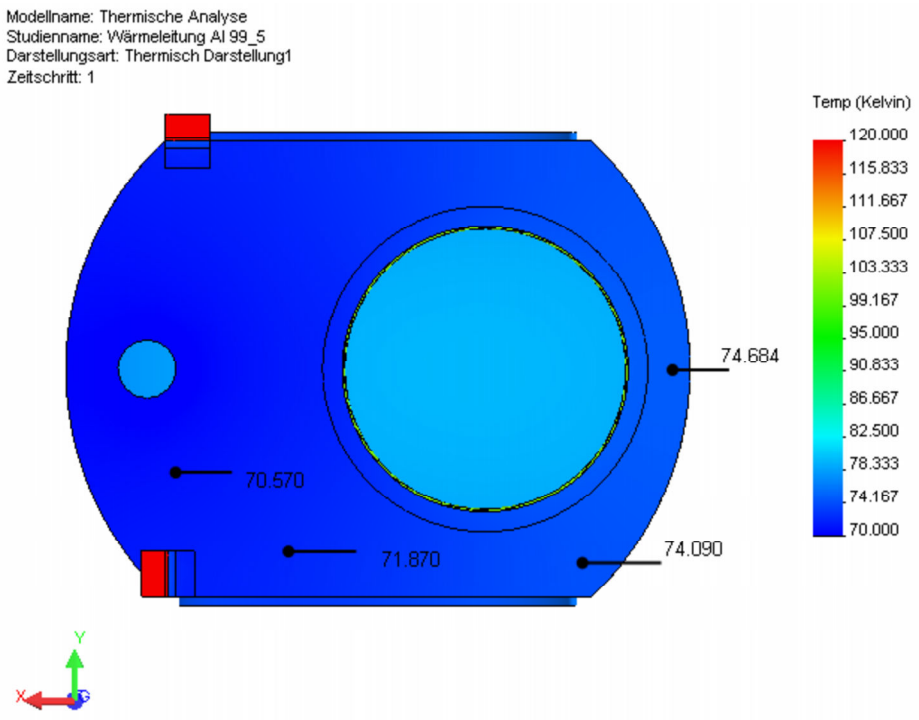


Abbildung 74: Thermische Analyse Al 99,5 Unten

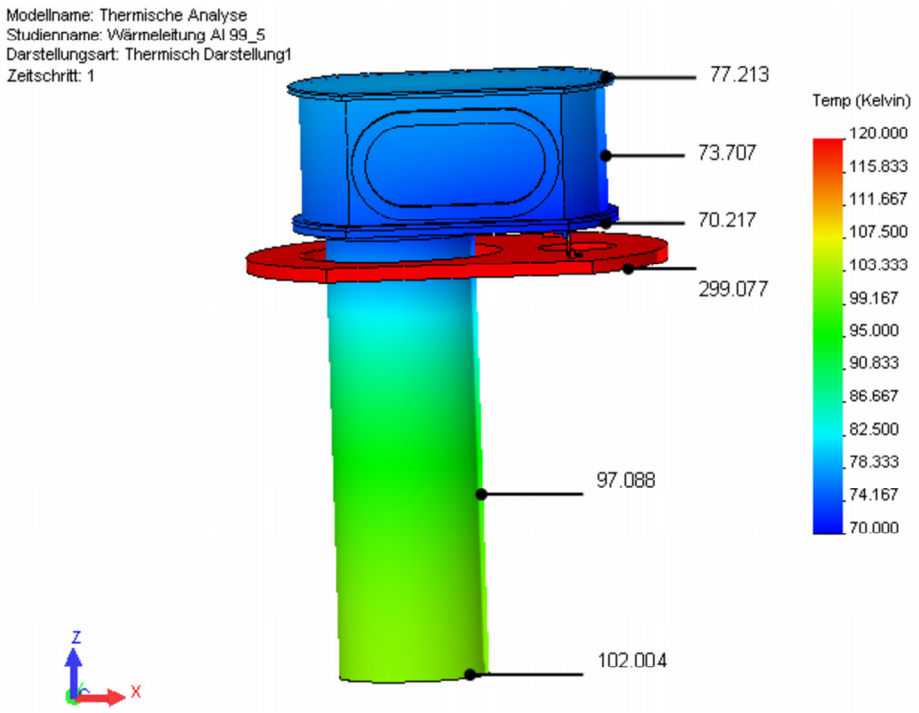


Abbildung 76: Themische Analyse Al 99,5 (Ansicht Vorne)

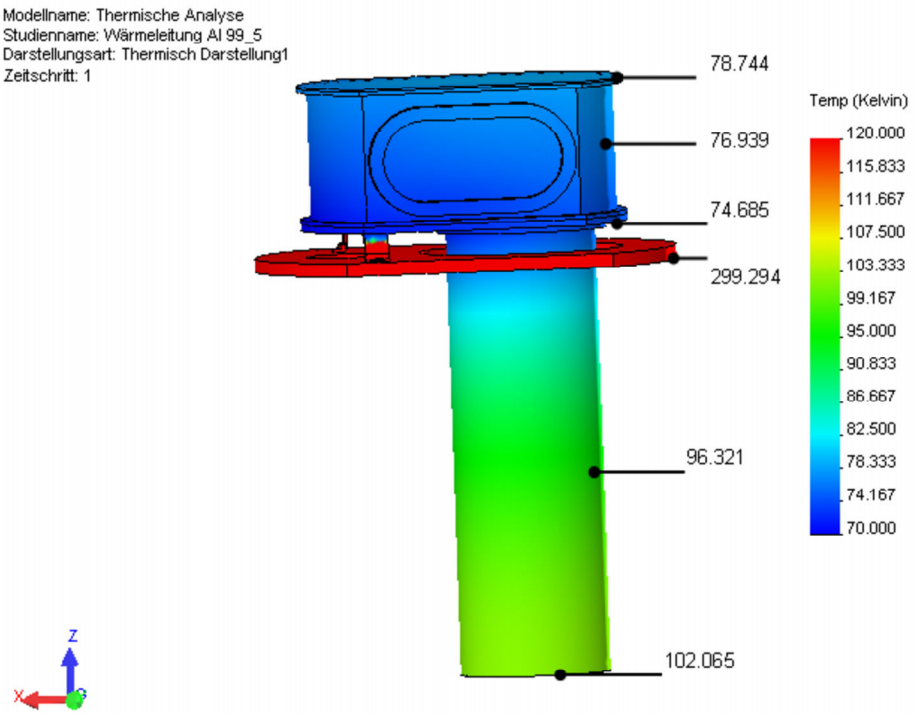


Abbildung 75: Thermische Analyse Al 99,5 (Ansicht Hinten)

7.2.5. Temperaturverlauf von Al99,5 mit einem 70K Rohr von 3mm Wandstärke

In diesem Unterabschnitt wurde eine Analyse durchgeführt, bei der die Wandstärke des 70K Rohres um einen Millimeter erhöht wurde (von 2mm auf 3mm). Dadurch soll der Unterschied des Temperaturverlaufes bei der Verwendung von dickeren Materialien deutlich werden. Verwendet wurden die Werkstoffe aus Abschnitt 7.2.4.

Vergleicht man die Abbildungen 77 und 76 miteinander, so erkennt man einen Temperaturunterschied von etwa 8 Kelvin an der Unterkante des Rohres. Die Temperaturen am 70K Gehäuse unterscheiden sich nicht voneinander. Das Gewicht erhöht sich um etwa ein drittel und liegt anschließend bei 4,0kg anstatt bei 2,8kg.

7.2.6. Diskussion der thermischen Analysen

Die deutlich besseren Temperaturwerte rechtfertigen den Einsatz von Al99,5 und das trotz der geringeren Festigkeit und der schlechteren Zerspanungseigenschaften. Deshalb sollten Bauteile, die nur geringen Zerspanungsarbeiten unterliegen, keiner hohen Belastung ausgesetzt und für einen guten Kühltransport gedacht sind aus reinem Alumi-

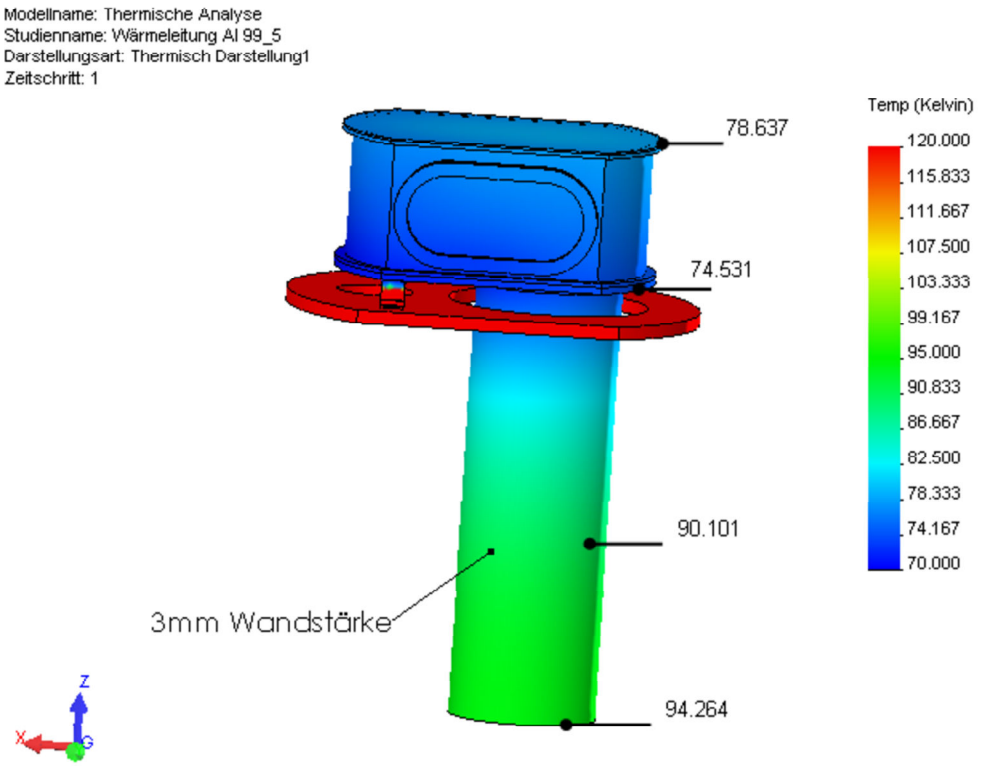


Abbildung 77: Thermische Analyse bei erhöhter Wandstärke des 70K Rohres

nium (Al99,0; Al99,5; Al99,8) bestehen. Sind zusätzlich noch bessere Temperaturwerte verlangt, dann kann durch dickere Materialien eine besserer Wärmetransport erreicht werden. Allerdings steigt dadurch wieder das Gewicht, und das soll möglichst vermieden werden. Folge dessen wurde unter Absprache mit Herrn Dr. Keller das 70K Rohr mit 2mm Wandstärke gefertigt (siehe letzte Seite). Des Weiteren ist es nicht unbedingt erforderlich an der unteren Rohrseite sehr gute Temperaturwerte zu haben, da hinter dem 70K Rohr keine elektronischen Bauteile sitzen. Es dient hauptsächlich dem Wärmestrahlungsschutz für den Hohlleiter, damit dieser nur wenig Wärme zu den Verstärkern transportieren kann.

7.3. Zusammenfassung der Ergebnisse des 21cm Kryostaten

Durch die Seitendeckel sind Wartungsarbeiten am Kryostaten gut möglich. Die Deckel des Oberkastens und des 70K Gehäuses lassen sich einfach entfernen und bieten einen guten Zugriff zu den elektronischen Bauteilen. Durch die Abflachung konnte zusätzlich an Platz und Gewicht gespart werden. Die Maße des Kryostaten sind in Tabelle 10

festgehalten.

Oberkasten	Außen- $\varnothing 620mm$, Breite 480mm
300K Rohr	$\varnothing$ am Flansch 360mm, Außen-$\varnothing$ Zylinder – 306mm
Gesamthöhe	mit Horn H – 1277,8 mm, ohne Horn h – 1032,8mm

Tabelle 10: Überblick der Maße des 21cm Kryostaten

Die Masse der einzelnen Bauteile des Kryostaten sind in der Tabelle 11 aufgelistet.

Oberkasten (OK)	10 kg	Unterplatte 70K Gehäuse	3 kg
Deckel OK	6,3 kg	Seitendeckel 70KGehäuse	1,3 kg
Unterplatte OK	9,4 kg	Hohlleiterohr, Kühlfuß, Verstärker	15 kg
Seitendeckel OK	1,8 kg	Baugruppe Kupferkühlband	0,6 kg
300K Rohr	6,8 kg	Bauteile Fensterhalter	1,5 kg
Unterdeckel 300K Rohr	2,4 kg	70 K Hohlleiter	0,5 kg
70K Rohr	2,8 kg	Refrigerator	10 kg
Kühlplatte 70K Rohr	0,3 kg	Horn + Rohr	12,8 kg
70K Gehäuse	3 kg	Schrauben, Stecker ect.	5 kg
Deckel 70K Gehäuse	1,3 kg	**Gesamtgewicht**	93,8 kg

Tabelle 11: Überblick der Gewichte der Bauteile des 21cm Kryostaten

Das Vorgängermodel des 21cm Kryostaten besteht aus einem einfachen Zylinderrohr, das aus Edelstahl mit 3mm Wandstärke gefertigt wurde. Die Höhe ist in etwa gleich des neuen Kryostaten und der Außendurchmesser ist 500mm. Der frühere Hohlleiter ist etwa um die Hälfte kürzer als der Aktuelle. Das Gewicht des älteren 21cm Single-Beam Dewar beträgt 150,5 kg. Mit der Neukonstruktion konnte das Gewicht um etwa 38% gesenkt werden.

Der Oberkasten und seine Deckel, das 300K Rohr und das 70K Rohr konnten noch vor Abgabe der Diplomarbeit fertig gestellt werden (siehe dazu die letzte Seite im Anhang).

7.4. Lösung des 7mm Kryostaten

Die ausgewählte Option des 7mm Kryostaten wird in in diesem Abschnitt nochmals überarbeitet. Die äußeren Abmessungen (Kantenlänge – 400mm) werden beibehalten, nur das Fräsmuster wird verbessert. Ich orientierte mich dabei am Muster der bereits ausgewählten Option 2 des 3mm Kryostaten.

Die festverschraubten Seitenplatten haben eine Wandstärke von 12mm. Dabei wurde auch hier das Blumenmuster als Ausfräsform gewählt. Die Tiefe der Ausfräsung beträgt 9mm. Die Seitendeckel haben eine Dicke von 15mm. An deren Innenflächen wurde ein quadratischer Vorsprung von 3mm vorgesehen, der die Zentrierung des Deckels am Behälter erleichtern soll. Die Ausfräsung wurde dementsprechend tiefer vorgenommen (t − 12mm). Ober- und Unterplatte haben eine Dicke von 15mm. Es muss eine gewisse Dicke vorhanden sein damit an deren Stirnseiten Gewindebohrungen angebracht werden können. Es ist natürlich möglich, auch dort Einfräsungen vorzusehen, allerdings wird die Gewichtsersparnis, mit 2-3 kg, nur sehr gering ausfallen. Betrachtet man das Gesamtgewicht, so kann von einer Einfräsung abgesehen werden. Das Gesamtgewicht von Platten, Deckel, Hohlleiterrohr und Refrigerator beträgt etwa 38kg. Der Innere Aufbau, welcher hier noch fehlt, unterscheidet sich in Größe und Gewicht sehr stark vom 21cm Kryostat. Deshalb wird ein Gesamtgewicht von 41kg angenommen.

Aus Abbildung 78 ist ersichtlich, dass die maximalen Spannungen an den Fräskanten der Seitenplatten vorhanden sind ($\sigma = 68,5\text{MPa}$). Die größten Verschiebungen ($s \approx 0,58mm$) in Abbildung 79 liegen deshalb wie erwartet in der Mitte jener Platten. Der Sicherheitswert S – 1,83 bestätigt die Zulässigkeit des Kryostaten (siehe Abbildung 80).

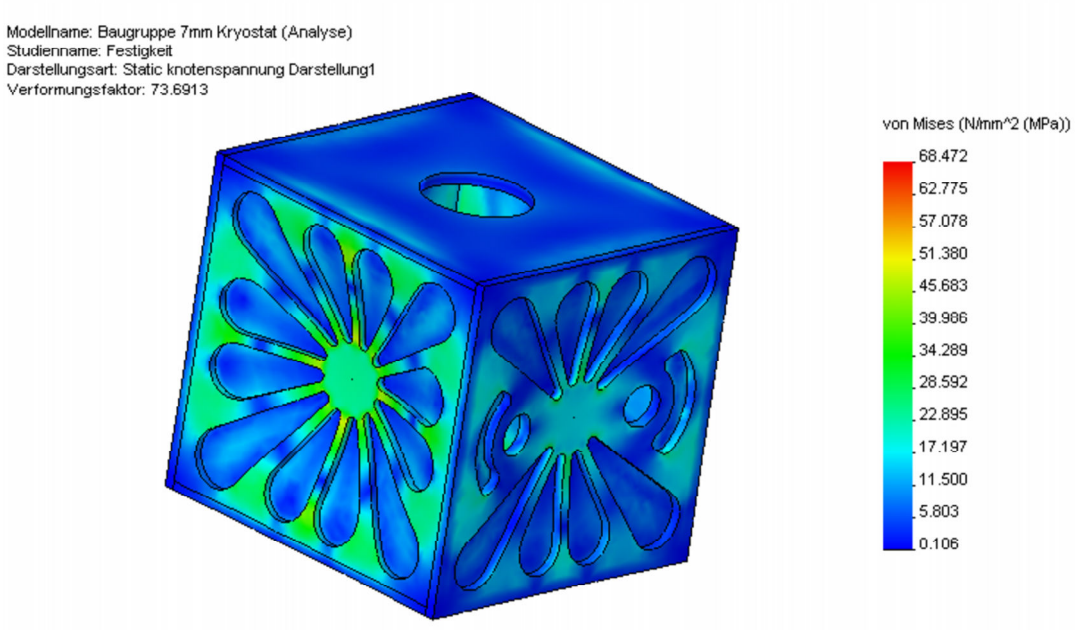


Abbildung 78: Spannung des 7mm Kryostaten

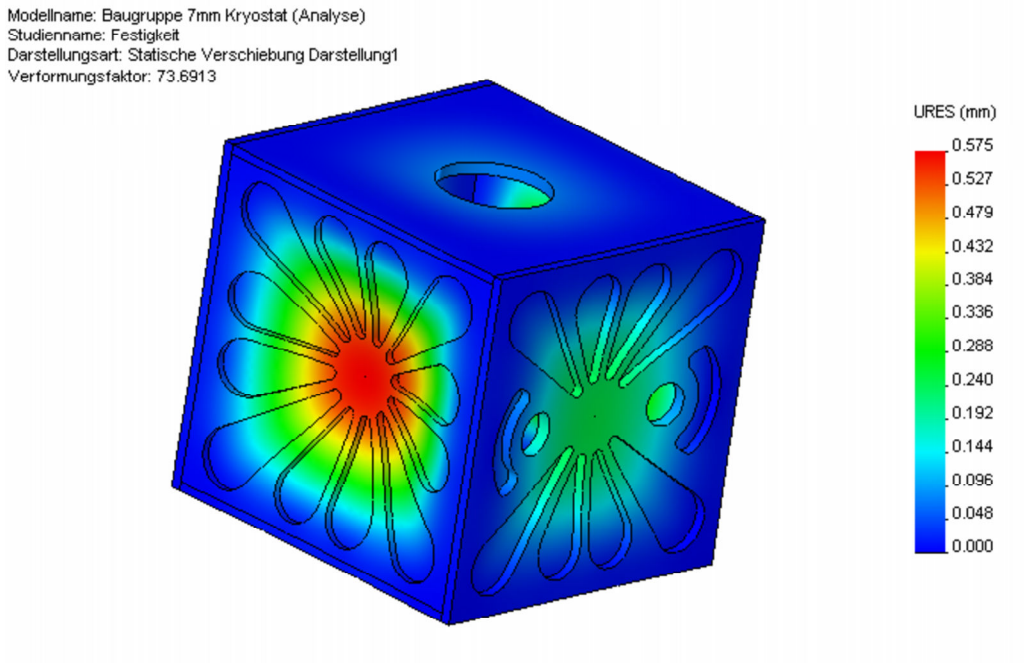


Abbildung 79: Verschiebung des 7mm Kryostaten

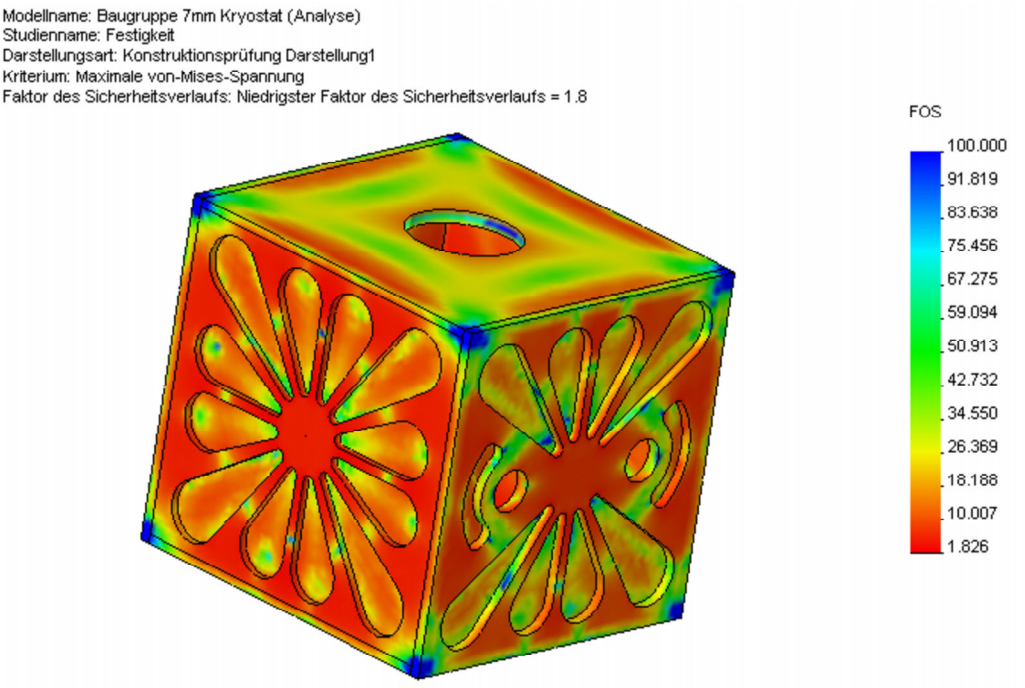
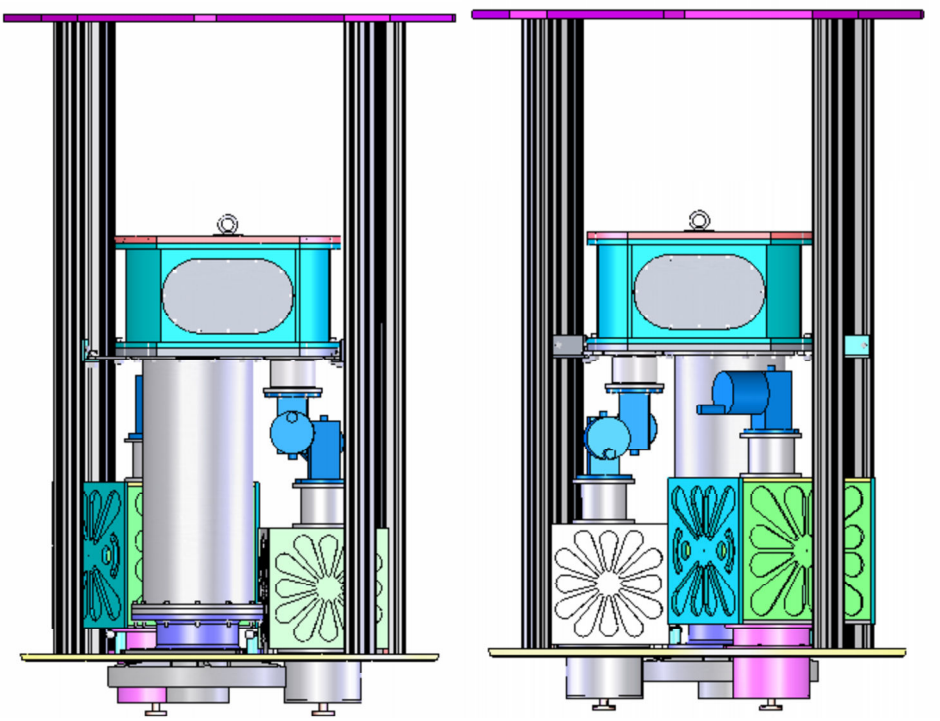


Abbildung 80: Sicherheit des 7mm Kryostaten

7.5. Anordung der Kryostaten in der Empfängerbox

Der Abstand vom Mittelpunkt der Hohlleiter der Kryostaten bis zum Zentrum der Empfängerbox beträgt jeweils 260mm. Die Behälter wurden in einem Winkel zueinander positioniert, der es erlaubt, dass jeder Deckel und jeder Refrigerator für Wartungsarbeiten problemlos demontierbar ist (siehe Abbildung 82). Alle Kryostaten werden per Schraubverbindung auf der Bodenplatte befestigt. Der 21cm Kryostat wurde zusätzlich mit einer Scharnierverbindung ausgestattet, welche ein Kippen des Behälters ermöglicht (siehe Abbildung 84 und 85. Dadurch kann der Kryostat in eine bessere Lage gebracht und am Haken eines Krans befestigt werden. Die Bolzen des Scharniers werden über einen Exzenterhebel eingefahren und ermöglichen somit das Lösen des Dewars von der Bodenplatte. Durch Rückstellfedern gleiten die Bolzen nach dem Loslassen in Ausgangsstellung zurück. Zum Abfangen der Querkräfte wurde der 21cm Kryostat zusätzlich mit zwei Laschen unterhalb des Oberkastens an den Aluminiumprofilen befestigt. Informationen zu den einzelnen Details sind den Konstruktions- und Baugruppenzeichnungen im Anhang zu entnehmen.



(a) Vorderansicht (b) Hinteransicht

Abbildung 81: Empfängerbox Vorder- und Hinteransicht

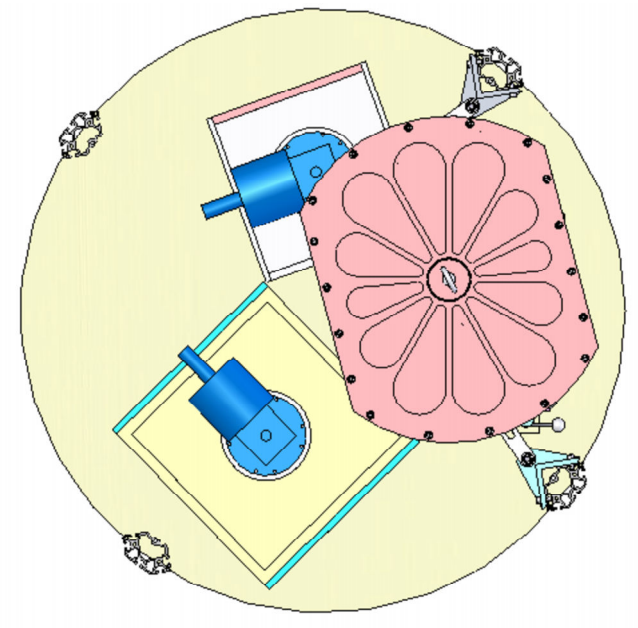
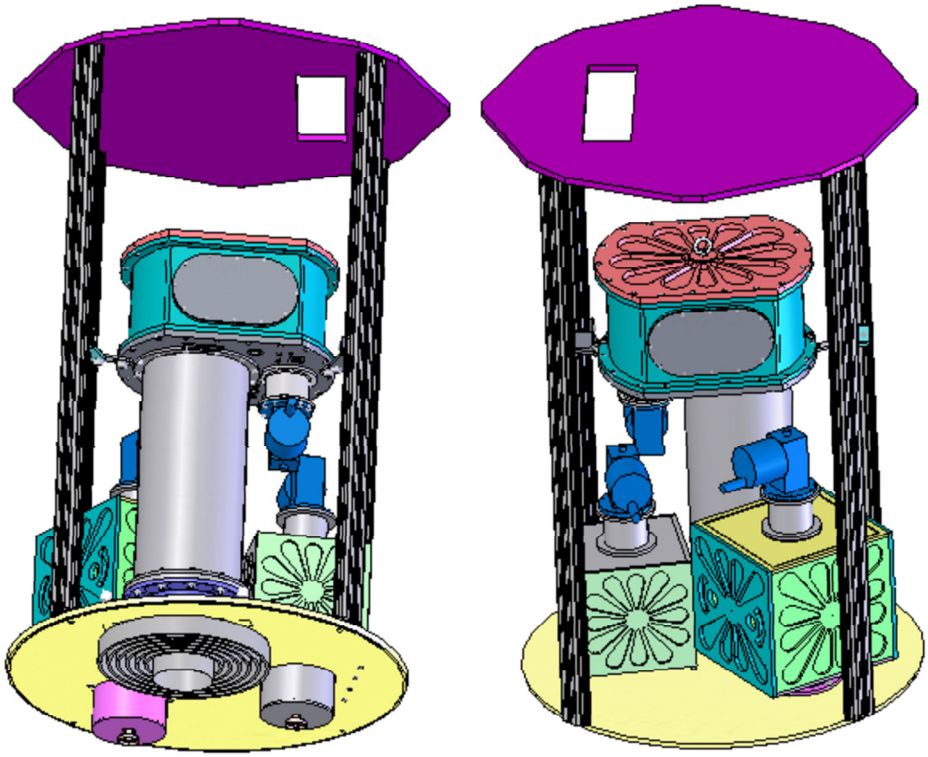


Abbildung 82: Empfängerbox Draufsicht



(a) Ansicht 4 (b) Ansicht 5

Abbildung 83: Empfängerbox Ansicht 4 und 5

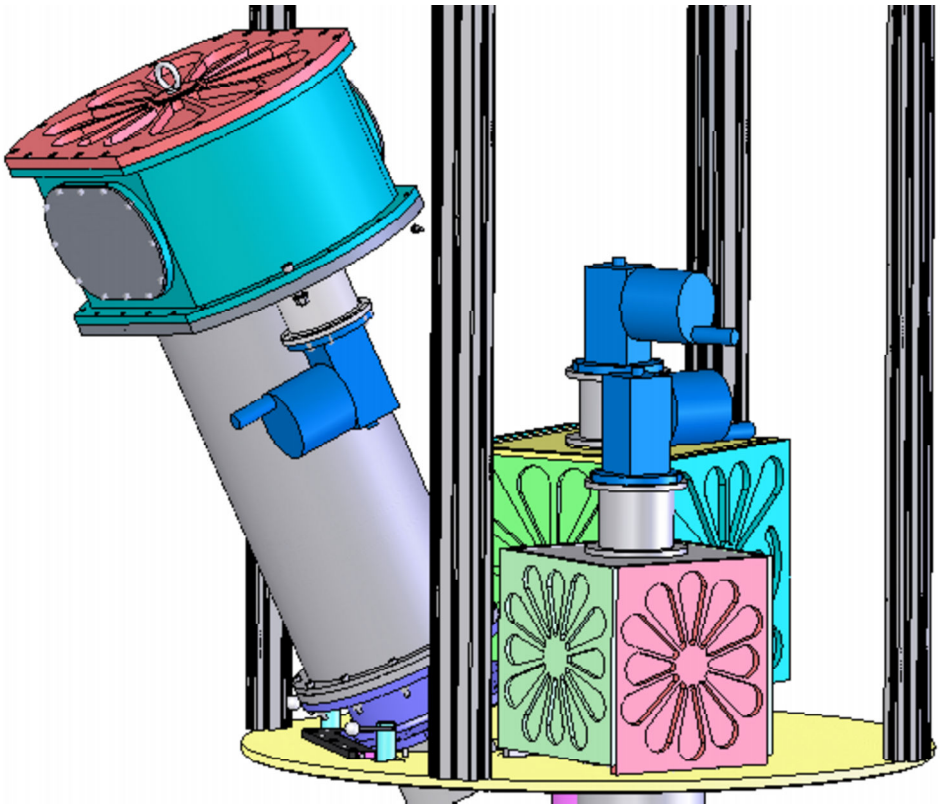


Abbildung 84: Empfängerbox Ansicht 6, Kroyostat gekippt

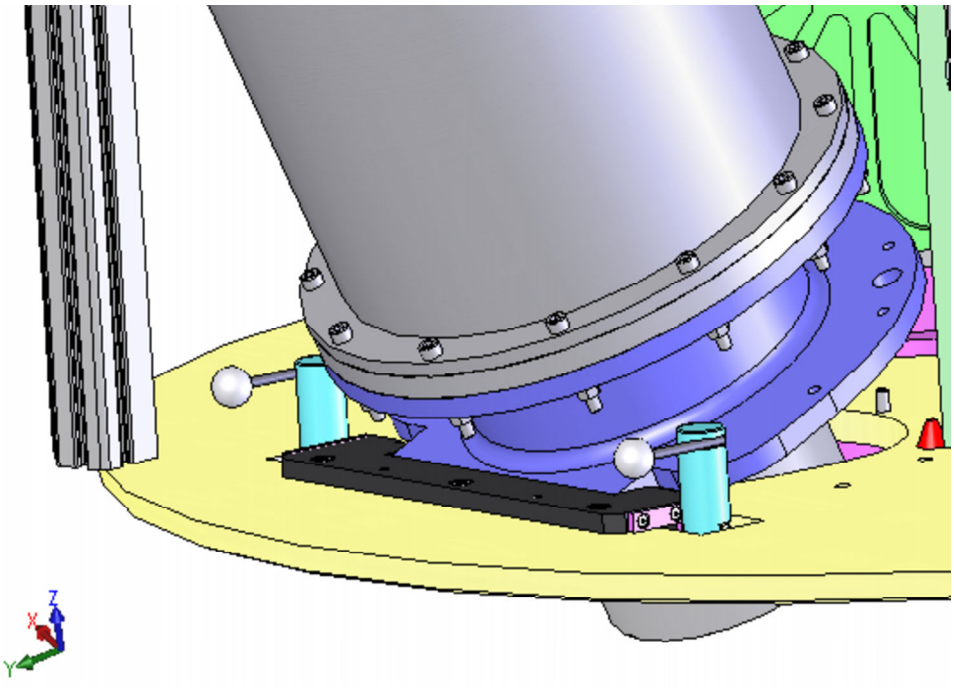


Abbildung 85: Empfängerbox Ansicht 7, Kryostat gekippt

8. Messergebnisse

8.1. Messaufbau

Der Oberkasten, der Deckel des Oberkastens, die Seitendeckel und die Unterplatte des 21cm Kryostaten konnten noch vor Abgabe der Diplomarbeit in der institutseigenen Werkstatt gefertigt werden. Daher war es möglich eine Leckratenmessung und eine Verschiebungsmessung für diese Bauteile bzw. den oberen Behälter zu machen. Öffnungen für Refrigerator und 300K Rohr wurden provisorisch mit Blinddeckeln verschlossen. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau.

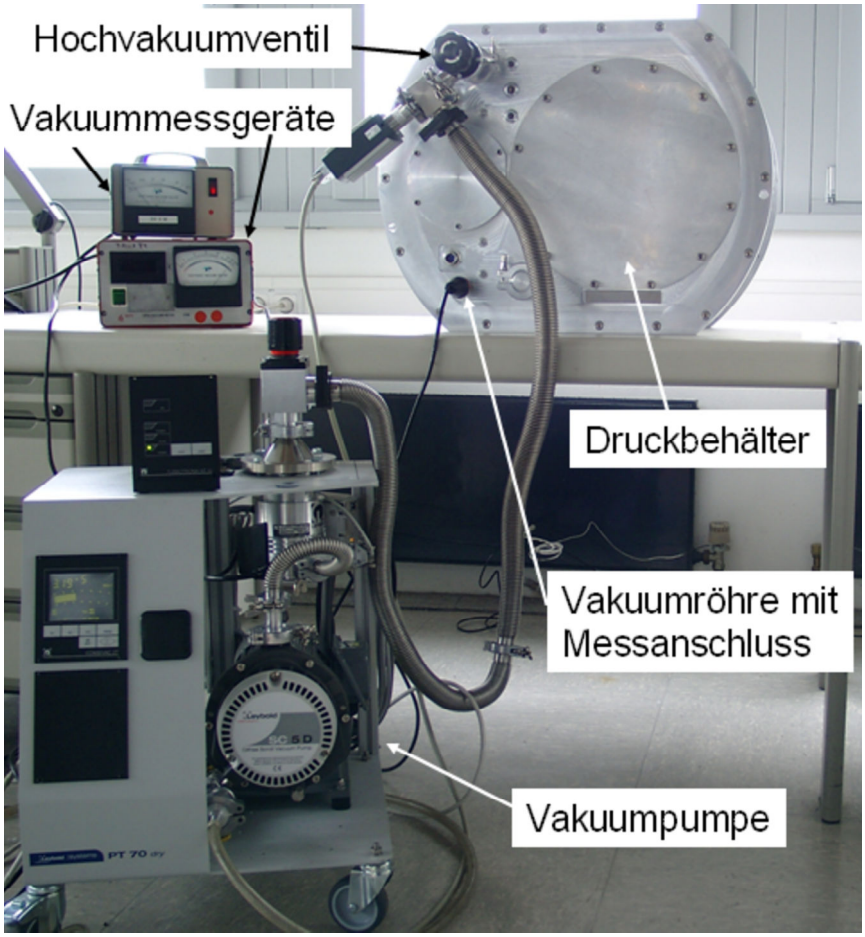


Abbildung 86: Messaufbau

8.2. Grundlagen zur Leckratenbestimmung

Alle Gasquellen, die eine Einströmung von Gas in einen Behälter bewirken, bezeichnet man als Leck. Die dazu in Verbindung stehende Gasstromstärke ist die Leckrate. Tabelle 12 zeigt gängige Messeinheiten und deren Umrechnungsfaktoren ineinander.

Einheit	$mbar \cdot l \cdot s^{-1}$	$Torr \cdot l \cdot s^{-1}$	$Pa \cdot l \cdot s^{-1}$
$1\,mbar \cdot l \cdot s^{-1}$	1	0,75	100
$1\,Torr \cdot l \cdot s^{-1}$	1,33	1	133
$1\,Pa \cdot l \cdot s^{-1}$	10^{-2}	$7,5 \cdot 10^{-3}$	1

Tabelle 12: Verschiedene Einheiten für die Leckrate

Eine Vakuumanlage ist niemals absolut dicht, deshalb steigt der Absolutdruck mit der Zeit an. Aus diesem Grund muss dafür gesorgt werden, dass die Leckrate bestimmte Werte nicht überschreitet. Bei Behältern im Feinvakuum gilt für die Leckrate ql überschlägig:

ql $\leq 10^{-5} \cdot mbar \cdot l \cdot s^{-1}$: sehr dicht

ql $\leq 10^{-4} \cdot mbar \cdot l \cdot s^{-1}$: hinreichend dicht

ql $\geq 10^{-4} \cdot mbar \cdot l \cdot s^{-1}$: undicht

Die Messung von ql geschieht am einfachsten durch eine Druckanstiegsmessung im zu prüfenden Behälter. Ändert sich die Druckdifferenz Δp während des Messvorgangs (Δt), so ergibt sich die Leckrate aus der Gleichung 22.

$$q_L = V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} \tag{22}$$

V ist dabei das Behältervolumen.

8.3. Messung der Leckrate

Mit Hilfe einer Vakuumpumpe wurde der Behälter evakuiert und anschließend mit der Druckanstiegsmethode die Leckrate bestimmt.

Das Volumen des Behälters beträgt $59,3 dm^3$. Der Druck im Behälter betrug vier Stunden nach dem Starten des Evakuierungsvorgangs 0,0014mbar. Bei diesem Druck wurde

Datum	Druckdifferenz in mbar	Zeitdifferenz in s	Leckrate ql in $mbar \cdot l \cdot s^{-1}$
08.08.2006	0,0036	745	$2,87 \cdot 10^{-4}$
09.08.2006	0,0058	2910	$1,18 \cdot 10^{-4}$
10.08.2006	0,003	2350	$7,5 \cdot 10^{-5}$
11.08.2006	0,003	2990	$5,95 \cdot 10^{-5}$
12.08.2006	0,005	5280	$5,62 \cdot 10^{-5}$
13.08.2006	0,0065	7560	$5,1 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 13: Messergebnisse Leckratenmessung

Bauteil	Max. Verschiebung mit FEM	Gemessene Verschiebung
Oberdeckel	0,53mm	0,72mm
Seitendeckel	0,21mm	0,52mm

Tabelle 14: Vergleich der Verschiebungsergebnisse

zum ersten Mal eine Leckratenmessung vorgenommen. Diese wurde täglich wiederholt. Am zweiten und dritten Tag waren bereits viel niedrigere Anfangsdrücke und bessere Leckraten zu messen. Der Grund lag in der Ausgasung[8] der im Behälter befindlichen Materialen.

Aus den Ergebnissen in Tabelle 13 ist ersichtlich, dass die Leckrate am sechsten Tag bei $ql = 5,1 \cdot 10^{-5} mbar \cdot l \cdot s^{-1}$ lag. Dieser Wert liegt im hinreichend dichten Bereich und genügt den Forderungen.

8.4. Messung der Verschiebung

Die theoretischen Verschiebungen des Oberkastendeckels und der Seitendeckel sind durch die Finite-Elemente-Methode schon bekannt. Für den Oberdeckel konnte der maximale Verschiebungswert aus Abbildung 53 übernommen werden. Die größte Durchbiegung der Seitendeckel kann aus Abbildung 50 per Iso-Clipping abgelesen werden. Beide Werte werden im Folgenden mit den praktischen Messungen verglichen, die nach dem Evakuieren des Behälters durchgeführt worden sind. Die Messergebnisse wurden mit Hilfe eines ebenen Aluminiumprofils und eines Messschiebers erfasst.

Die Ergebnisse der gemessenen Verschiebung sind deutlich größer als die Berechneten (siehe Tabelle 14). Der Grund für die Abweichung kann dabei sehr vielseitig sein:

[8] Ausgasen bedeutet das Freisetzen von Gasen aus flüssigem oder festen Materialien. Diese wird durch Druckminderung und Temperaturerhöhung hervorgerufen.

- die angenommenen Materialeigenschaften, wie z.B. der Elastizitätsmodul stimmen nicht mit den tatsächlichen Werten überein
- die vereinfachten Annahmen der Modelle und ihrer Randbedingungen können das Ergebnis beeinflussen, wie z.B. das Unterdrücken von Bohrungen. Daraus folgt auch eine vereinfachte Annahme von Lagerstellen. Das heißt, Lager werden nicht an den Bohrungen fixiert sondern beispielsweise nur auf den Flächen die für die Bohrungen vorgesehen sind
- die Deckel sind uneben
- die Materialstärken der gefertigten Bauteile sind nicht exakt
- zu grobe Vernetzung des Modells

Allerdings stellen die höheren Verschiebungswerte kein Problem dar, weil sie weiterhin sehr gering sind und die Dichtigkeit des Behälters nicht beeinflussen.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Inhalt dieser Diplomarbeit war die Konstruktion von platzsparenden und leichten Kryostaten und deren Anordnung zueinander in einer Empfängerbox.

Mit Hilfe des CAD-Programms SolidWorks wurden 3-D Modelle erstellt und anschließend mit dem Finiten-Elemente Programm CosmosWorks bezüglich Gewicht und Form optimiert. Dabei war darauf zu achten, dass der Sicherheitswert gegen plastisches Verformen nicht überschritten wird. Des Weiteren wurden Bauteile für die erste Kühlstufe (70K Schild) unter Beachtung der Wärmestrahlungseigenschaften, der Wärmeleitung über das Material und des Gewichts ausgelegt. An allen Kryostaten befinden sich einfach demontierbare Deckel, die den Zugriff auf wartungsanfällige Bauteile im Behälter ermöglichen. Die Kryostaten sind mit einer einfach zu lösenden Schraubverbindung auf die Bodenplatte der Empfängerbox aufgeschraubt. Durch eine bestimmte Anordnung zueinander sind uneingeschränkte Wartungsarbeiten an den elektronischen Bauteilen möglich ohne das ein Ausbau aus der Empfängerbox nötig ist.

Mit Hilfe von Optimierungsstudien des FE- Programms, konnte allein für den 21cm Kryostat eine Gewichtsersparnis von etwa 40% erreicht werden. Dies entspricht einem Gewicht von ca. 40kg. Zusätzlich konnten Konstruktionen entstehen, die ohne das Programm nicht möglich gewesen wären. Spezielle, gewichtssparende Ausfräsungen und besondere Dewarformen wurden entworfen und gefertigt.

Die Messergebnisse des Dewars sind akzeptabel. Die Leckrate zeigt einen guten Wert und bestätigt dadurch die Dichtheit des Druckbehälters. Deutlich unterschiedliche Ergebnisse sind zwischen gemessener und berechneter Verschiebung der Dewardeckel zu erkennen. Zurückzuführen ist das auf die vereinfachenden Annahmen bei den Programmberechnungen. Diese wurden deshalb unternommen, um die Berechnungszeit der statischen und thermischen Analysen zu verringern. Allerdings sind die Verschiebungen trotzdem so klein, dass sie den Druckbehälter nicht negativ beeinträchtigen.

Die unterschiedlichen Analysemöglichkeiten bieten dem Konstrukteur eine schnelle und genaue Möglichkeit sowohl einfache als auch komplexe Bauteile sicher auszulegen. Das Ergebnis und die Lösung der gestellten Aufgabe bestätigen nachdrücklich die sinnvolle Wahl dieser Methodik. Die für diese Diplomarbeit angelegten Tabellen zu Werkstoffeigenschaften bei tiefen Temperaturen und die Hinweise zu den verschiedenen Dewarformen werden zukünftige Konstruktionen vereinfachen und beschleunigen.

Literatur

[1] Wutz,M./ Adam, H./ Walcher, W.: Theorie und Praxis der Vakuumtechnik
3.überarbeitete und ergänzende Auflage, Friedrich Vieweg und Sohn
Braunschweig 1986

[2] Haefer, R.A.: Kryo-Vakuumtechnik
Berlin/ Heidelberg/ New York 1981

[3] Edelmann, C.: Vakuumtechnik
Dr. Alfred Hüthig Verlag Heidelberg, Leipzig 1986

[4] Langeheinecke, K./ Jany, P./ Sapper, E.: Thermodynamik für Ingineure
4.überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg Verlag
Auflage 2003

[5] AD-Merkblätter-Taschenbuchausgabe 1999
Hrsgg. vom Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e.V.; Essen
Carl Heymanns Verlag KG/ Beuth Verlag GmbH; November 1998

[6] Aluminium Taschenbuch
Hrsgg. von der Aluminium-Zentrale Düsseldorf,13.Auflage, Aluminium-Verlg Gmbh
Düsseldorf 1974

[7] Weissbach, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung
14. verbesserte Auflage, Vieweg Verlag
Braunschweig/ Wiesbaden 2001

[8] Frey, H./ Haefer, R.A./ Hrsgg. von Eder, F.X.: Tieftemperaturtechnologie
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1981

[9] Sron: Engineering data of Metals used for space experiments under Cryogenic conditions
Prepared by Jacobs, H.M., 20.04.2000

[10] Hahn,W.: Begleittext zur Vorlesung "Konstruktionssystematik"
Fachhochschule Köln, Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Auflage 2004

[11] Hallmann, H.
Vorlesungsskript FEM

[12] SolidWorks 2005
Hilfedatei

[13] CosmosWorks 2005
Hilfedatei

[14] Tabellenbuch Metall
39. überarbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Europa Lehrmittel
Haan-Gruiten 1994

[15] Matek, W./ Muhs, D./ Wittel, H./ Becker, M./ Jannasch, D.: Roloff/ Matek Maschinenelemente
15.Auflage, Vieweg Verlag

[16] www.mpifr-bonn.mpg.de

[17] www.kupfer-institut.de

[18] www.schoch-edelstahl.de

[19] www.hebezone.de

[20] www.metallstore.de

[21] www.fibrolux.de

[22] www.westring-dichtungstechnik.de

A. Anhang

A.1. Auszüge aus den AD-Merkblättern

DK 621.642-98.001.24 — Ausgabe Januar 1995

Berechnung von Druckbehältern	Berechnung von Druckbehältern	AD-Merkblatt B 0

Die AD-Merkblätter werden von den in der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter" (AD) zusammenarbeitenden, nachstehend genannten sieben Verbänden aufgestellt. Aufbau und Anwendung des AD-Regelwerkes sowie die Verfahrensrichtlinien regelt das AD-Merkblatt G 1.

Die AD-Merkblätter enthalten sicherheitstechnische Anforderungen, die für normale Betriebsverhältnisse zu stellen sind. Sind über das normale Maß hinausgehende Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter zu erwarten, so ist diesen durch Erfüllung besonderer Anforderungen Rechnung zu tragen.

Wird von den Festlegungen dieses AD-Merkblattes abgewichen, muß nachweisbar sein, daß der sicherheitstechnische Maßstab dieses Regelwerkes auf andere Weise eingehalten ist, z. B. durch Werkstoffprüfungen, Versuche, Spannungsanalyse, Betriebserfahrungen.

Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e. V. (FDBR), Düsseldorf
Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e. V., Sankt Augustin
Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI), Frankfurt/Main
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), Fachgemeinschaft Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate, Frankfurt/Main
Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), Düsseldorf
VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e. V., Essen
Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e. V. (VdTÜV), Essen

Die AD-Merkblätter werden durch die Verbände laufend dem Fortschritt der Technik angepaßt. Anregungen hierzu sind zu richten an den Herausgeber:

Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e. V., Postfach 10 38 34, 45038 Essen.

Inhalt

1 Geltungsbereich
2 Allgemeines
3 Formelzeichen und Einheiten
4 Berechnungsdruck
5 Berechnungstemperatur
6 Festigkeitskennwert
7 Sicherheitsbeiwert
8 Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen
9 Zuschläge
10 Kleinste Wanddicke

1 Geltungsbereich

1.1 Die AD-Merkblätter der Reihen B und S behandeln Berechnungsregeln für drucktragende Teile von Druckbehältern. Ihre Anwendung setzt voraus, daß bei der Wahl der Werkstoffe und deren Verarbeitung die AD-Merkblätter der Reihen W und HP sowie die allgemein anerkannten Regeln der Technik beachtet werden. Auf AD-Merkblatt G 1 wird verwiesen.

1.2 Die AD-Merkblätter der Reihen B und S3 gelten für überwiegend statische Beanspruchung. Bei wechselnder Beanspruchung gelten zusätzlich die AD-Merkblätter S1 und S2.

2 Allgemeines

2.1 Dieses AD-Merkblatt enthält gemeinsame Grundregeln der AD-Merkblätter der Reihen B und S. Die übrigen AD-Merkblätter der Reihen B und S können daher nur in Verbindung mit diesem AD-Merkblatt benutzt werden.

2.2 Sofern in den AD-Merkblättern für die Bemessung drucktragender Teile nichts festgelegt ist, muß im Einzelfall durch Anwendung anderer anerkannter Regeln der Technik oder durch andere Berechnungsverfahren, durch Dehnungsmessungen, durch einschlägige Betriebserfahrungen oder dergleichen belegt werden, daß die Bauteile je nach Werkstoff und Verwendungszweck nicht unzulässig beansprucht werden.

2.3 Die AD-Merkblätter enthalten sicherheitstechnische Anforderungen, die für normale Betriebsverhältnisse zu stellen sind. Sind über das normale Maß hinausgehende Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter zu erwarten, so ist diesen durch Erfüllung besonderer Anforderungen Rechnung zu tragen.

2.4 Wird von den Festlegungen der AD-Merkblätter abgewichen, muß nachweisbar sein, daß der sicherheitstechnische Maßstab dieses Regelwerkes auf andere Weise eingehalten ist, z. B. durch Werkstoffprüfungen, Versuche, Spannungsanalyse, Betriebserfahrungen.

3 Formelzeichen und Einheiten

a	Hebelarm	in mm
b	Breite	in mm
c_1	Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung	in mm
c_2	Abnutzungszuschlag	in mm
d	Durchmesser eines Ausschnitts, eines Flansches, einer Schraube usw.	in mm
d_a	Außendurchmesser eines Rohres, Stutzens, Flansches	in mm
d_i	Innendurchmesser eines Rohres, Stutzens, Flansches	in mm

Ersatz für Ausgabe März 1990; | = Änderungen gegenüber der vorangehenden Ausgabe

d_t	Teilkreisdurchmesser	in mm
d_D	mittlerer Dichtungsdurchmesser	in mm
e	breite Seite einer rechteckigen oder elliptischen Platte	in mm
f	schmale Seite einer rechteckigen oder elliptischen Platte	in mm
g	Schweißnahtdicke	in mm
h	Höhe	in mm
k_0	Dichtungskennwert für die Vorverformung	in mm
k_1	Dichtungskennwert für den Betriebszustand	in mm
l	Länge	in mm
n	Anzahl	–
p	Berechnungsdruck	in bar
p'	Prüfdruck	in bar
r	Radius allgemein, z. B. Übergangsradius	in mm
s	erforderliche Wanddicke einschl. Zuschlägen	in mm
s_e	ausgeführte Wanddicke	in mm
v	Faktor zur Berücksichtigung der Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen oder Faktor zur Berücksichtigung von Verschwächungen	–
x	Abklinglänge	in mm
A	Fläche	in mm^2
C, β	Berechnungsbeiwerte	–
D	Durchmesser des Grundkörpers	in mm
D_a	Außendurchmesser, z. B. einer Zylinderschale	in mm
D_i	Innendurchmesser, z. B. einer Zylinderschale	in mm
E	Elastizitätsmodul bei Berechnungstemperatur	in N/mm^2
F	Kraft	in N
J	Flächenträgheitsmoment	in mm^4
K	Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur	in N/mm^2
K_D	Formänderungswiderstand des Dichtungswerkstoffes bei Raumtemperatur	in N/mm^2
K_{20}	Festigkeitskennwert bei 20 °C	in N/mm^2
M	Moment	in N mm
R	Radius einer Wölbung	in mm
S	Sicherheitsbeiwert beim Berechnungsdruck	–
S'	Sicherheitsbeiwert beim Prüfdruck	–
S_D	Sicherheitsbeiwert gegen Undichtheit	–
S_K	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen beim Berechnungsdruck	–
S'_K	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen beim Prüfdruck	–
S_L	Lastspielsicherheit	–
W	Widerstandsmoment	in mm^3
Z	Hilfswert	–
ν	Querkontraktionszahl	–
σ	Spannung	in N/mm^2
ϑ, T	Temperatur	in °C

4 Berechnungsdruck

4.1 Die Berechnung ist im allgemeinen mit dem zulässigen Betriebsüberdruck durchzuführen. Die durch die Füllung sowohl *während des Betriebes als auch während der Prüfung* hervorgerufenen statischen Drücke brauchen nur berücksichtigt zu werden, soweit sie die Beanspruchung der Wandung um mehr als 5 % erhöhen[1]).

4.2 Wird eine drucktragende Wand von beiden Seiten gleichzeitig durch Druck beansprucht, darf in der Regel nicht mit der Druckdifferenz gerechnet werden. Die Berechnung ist für jeden der beiden Überdrücke einzeln durchzuführen. Ausnahmen sind zulässig, wenn nachgewiesen wird, daß eine höhere Beanspruchung als durch die Druckdifferenz nicht auftreten kann.

4.3 Bei gleichzeitigem Auftreten von Überdruck und Unterdruck an einer drucktragenden Wand wird als Berechnungsdruck die Druckdifferenz eingesetzt. Dies gilt auch für die Festlegung des Prüfdruckes. Ist der Unterdruck nicht zuverlässig begrenzt, ist die Berechnung mit dem um 1 bar erhöhten Überdruck durchzuführen.

4.4 Wird bei der Druckprüfung ein Prüfdruck angewendet, der das 1,3fache des Berechnungsdruckes überschreitet, dann ist in Verbindung mit dem Festigkeitskennwert bei Prüftemperatur rechnerisch nachzuweisen, daß der Sicherheitsbeiwert S' nach Tafel 2 nicht unterschritten wird.

4.5 Statische Zusatzkräfte sind in der Zeichnung anzugeben, wenn dadurch die Beanspruchung der Behälterwand um mehr als 5 % erhöht wird (z. B. Auflagerkräfte, Wind- und Schneelast, Ausmauerung[2])). Eine statische Berechnung ist vorzulegen, wenn die Zusatzkräfte die Auslegung des Druckbehälters wesentlich beeinflussen. Spannungserhöhungen durch Zusatzkräfte sind erfahrungsgemäß zu erwarten, wenn die Kriterien in den AD-Merkblättern der Reihe S 3 zutreffen.

5 Berechnungstemperatur

5.1 Für die Auswahl des Werkstoffes und für die Festlegung des Festigkeitskennwertes ist die höchste bei dem jeweiligen Betriebsüberdruck zu erwartende Wandtemperatur maßgebend. Diese ergibt sich aus der zulässigen Betriebstemperatur sowie einem Zuschlag für die Beheizungsart und wird als Berechnungstemperatur bezeichnet. Bei unbeheizten Wandungen kann hierfür die höchste Temperatur des Beschickungsgutes eingesetzt werden. Bei beheizten Wandungen kann sie in der Regel nach Tafel 1 bestimmt werden; andernfalls, z. B. bei Ausmauerungen, ist sie rechnerisch oder durch Messung nachzuweisen.

5.2 Liegt die höchste zu erwartende Wandtemperatur unter + 20 °C, so beträgt die Berechnungstemperatur + 20 °C. Für Temperaturen des Beschickungsgutes unter – 10 °C wird zusätzlich auf AD-Merkblatt W 10 verwiesen.

6 Festigkeitskennwert

6.1 Die Festigkeitskennwerte K sind gemäß den Festlegungen in den AD-Merkblättern der Reihe W entsprechend der Berechnungstemperatur zu wählen.

---

[1]) Beispiel: zulässiger Betriebsüberdruck 2 bar
Bauhöhe = 5 m
Beschickung: Wasser
$p = 2 + 0{,}5 - 0{,}05 \cdot 2 = 2{,}4$ bar

[2]) Vergleiche DIN 28 060