

Konstruktion eines Kryostaten für ein Multihorn- Empfangssystem im Radioteleskop Effelsberg

Diplomarbeit

von Michael Szymczak

Köln

Matrikelnummer: 11054637

Erstprüfer

Prof. Dr. Ing. H. Hallmann

Zweitprüfer

Prof. Dr. Ing. A. Boryczko

Betreuer

Dr. Ing. R. Keller

erstellt im Wintersemester 2009/2010
eingereicht am 25. März 2010

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.

Köln, den 24. März 2010

Unterschrift

Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde zum Abschluss des Studiengangs Maschinenbau der Fachrichtung Produktentwicklung und Konstruktionstechnik mit der Vertiefungsrichtung Kraft- und Arbeitsmaschinen an der Fakultät für Anlagen-, Energie- und Maschinensysteme der Fachhochschule Köln verfasst. Die Ausarbeitung erfolgte von November 2009 bis März 2010 in der Gruppe Hochfrequenztechnik am Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn.

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

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Ing. Reinhard Keller für seine Unterstützung in organisatorischen und technischen Angelegenheiten.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Frau Dipl.-Ing. Ute Teuber, sowie den Herren Dipl.-Ing. Karl Müller, Dipl.-Ing. Michael Nahlbach, Dipl.-Ing. Thomas Berenz, Peter Winkelmann und Joachim Breuer, die mir ebenfalls bei technischen und organisatorischen Fragen stets zur Seite standen.

Seitens der Fachhochschule Köln bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ing. Henning Hallmann, sowie bei Herrn Prof. Dr. Ing. Alexander Boryczko für die gute Beratung und Betreuung während dieser Ausarbeitung.

Köln, den 24. März 2010

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Theoretischer Teil: Grundlagen	8
2.1	Funktion und Aufbau von Radioteleskopen	8
2.2	Elektromagnetische Wellen	10
2.2.1	Elektrisches Rauschen	11
2.2.2	Transmission, Reflektion und Absorption	11
2.3	Grundlagen der Wärmeübertragung	12
2.3.1	Wärmeübertragung durch Strahlung.....	12
2.3.2	Wärmeübertragung durch Leiten	13
2.3.3	Wärmeübertragung durch Konvektion	14
2.4	Vakuumtechnik.....	14
2.4.1	Abpumpzeiten	15
2.5	Wärmeausdehnung	16
2.6	CA-Hilfsmittel bei der Konstruktion.....	16
2.6.1	FEM-Werkzeug	17
2.6.2	Optimierungsstudie.....	18
2.6.3	Gemeinsame Werte	19
2.6.4	Konfigurationen.....	19
2.7	Methodisches Konstruieren	19
3	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	21
3.1	Hauptaufgabe des Dewar	21
3.2	Aufbau der bisherigen Kryostaten	21
3.3	Anforderungen an das Multihorn-Empfangssystem.....	24
3.4	Erstellung der Funktionsgliederung.....	28
4	Lösungen für die Einzelfunktionen	30
4.1	Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Leiten.....	30
4.1.1	Wärmeübertragung durch Leiten zwischen dem Vakuumbehälter und dem Verstärker 30	
4.1.2	Wärmeübertragung durch Leiten zwischen den 70 Kelvin Empfangskomponenten bzw. dem Horn und den 15 Kelvin Empfangskomponenten	32
4.2	Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Konvektion	32
4.2.1	Konstruktion des Vakuumbehälters.....	32
4.3	Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung	36

4.3.1	Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen der 300 Kelvin Behälterwand und dem 70 Kelvin Schild	38
4.3.2	Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen dem 70 Kelvin Schild und den 15 Kelvin Empfangskomponenten	39
4.3.3	Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen dem 300 Kelvin Vakuumfenster und dem 70 Kelvin Hornpaket.....	39
4.4	Längenausgleich	40
5	Konzeptauswahl	48
5.1	Bestimmung des Wärmestroms der Lösungsvarianten	49
5.2	Ausarbeitung und Beschreibung des Lösungskonzeptes.....	52
6	Gestaltung des Dewar	56
7	Überprüfung und Optimierung der Konstruktion	71
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	74
9	Literaturverzeichnis	76

1 Einleitung

Jahrtausendlang galt das Licht, also das sichtbare elektromagnetische Wellenspektrum, als einziger Bote aus dem Weltall. Erst 1931 entdeckte der Physiker und Radioingenieur Karl Guthe Jansky, dass (elektromagnetische) Radiowellen aus dem Weltall durch unsere Atmosphäre gelangen. Ein Jahr später konnte er die Radiowellen einem Sternbild in der Milchstraße zuordnen.

Diese Entdeckung war der Auslöser für die Entwicklung von Radioteleskopen, die im Gegensatz zu optischen Teleskopen durch intergalaktischen Staub sowie Nebelwolken hindurch sehen können. So konnten durch den Einsatz von Radioteleskopen unter anderem eine genauere Struktur der Milchstraße erstellt und neue Himmelskörper entdeckt werden. Die - verglichen mit einem optischen Teleskop - schlechtere Auflösung wird durch den Zusammenschluss mehrerer Radioteleskope nahezu ausgeglichen.

Ein Pixel in einem Sternbild entspricht einer Aufnahme eines Empfängers. Dies hat zur Folge, dass sehr viele Aufnahmen nötig sind, um ein großes Sternbild zu erhalten. Hierbei ist es von Vorteil, wenn das Radioteleskop mehrere Empfänger in einem Empfangssystem besitzt, die jeweils eine Aufnahme erstellen, um so mehrere Pixel des Sternbilds gleichzeitig aufnehmen zu können.

Das Max-Planck-Institut für Radioastronomie unterhält in Effelsberg ein Radioteleskop, das Empfängersysteme mit einem bis neun Empfängern besitzt

Ziel dieser Diplomarbeit ist, ein Multihorn-Empfangssystem zu konstruieren, bei dem 24 Empfänger auf die notwendige Temperatur gekühlt werden können. Hierfür sollen neue Lösungskonzepte erarbeitet werden.

Als Zielgruppe richtet sich die Diplomarbeit in erster Linie an das Max-Planck-Institut für Radioastronomie, aber auch an weitere radioastronomische Institute.

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit werden zunächst im theoretischen Teil relevante Grundlagen zur Funktion und zum Aufbau von Radioteleskopen, zu elektromagnetischen Wellen, zur Wärmeübertragung, zur Vakuumtechnik und zur Wärmeausdehnung dargelegt. Außerdem werden einige CA-Hilfsmittel, die bei der Konstruktion genutzt werden können, sowie die Vorgehensweise beim methodischen Konstruieren beschrieben.

Im darauffolgenden Kapitel 3 wird die Aufgabenstellung der Diplomarbeit erläutert und präzisiert, indem unter anderem eine Anforderungsliste sowie eine Funktionsgliederung erstellt werden.

In Kapitel 4 werden Lösungen für die bei der Funktionsgliederung herausgestellten Einzelfunktionen erarbeitet, bevor in Kapitel 5 ein Lösungskonzept durch die Wahl mindestens einer Lösungsvariante pro Einzelfunktion dargestellt und begründet wird.

Kapitel 6 beinhaltet im Anschluss die Gestaltung des Dewar auf Grundlage des im vorherigen Kapitel erarbeiteten Lösungskonzepts. Hier werden diverse CAD-Bilder zur Veranschaulichung genutzt.

In Kapitel 7 findet schließlich eine Überprüfung und Optimierung der Konstruktion statt, indem mit Hilfe des Programms „Solid Works Simulation“ eine Optimierungsstudie durchgeführt wird.

Schließlich werden die Ergebnisse der Diplomarbeit in Kapitel 8 zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

2 Theoretischer Teil: Grundlagen

2.1 Funktion und Aufbau von Radioteleskopen

Radioteleskope dienen der Erforschung des Weltalls. Mit Hilfe der Bilder von Radioteleskopen können Radioastronome:

- fundamentale Fragen der Physik klären,
- unterschiedliche Phänomene des Universums untersuchen und
- Karten des Weltalls erstellen.

Kenntnisse über die aufgezählten Aspekte werden aus außerordentlich schwachen elektromagnetischen Wellen¹ im Bereich der Mikro- und Radiowellen aus dem Weltall gewonnen. Diese Wellen werden bei Radioteleskopen über einen Parabolspiegel² gebündelt. Die Intensität der gebündelten Wellen ist abhängig von der Größe des Parabolspiegels. Das Signal, das trotz Bündelung immer noch eine geringe Intensität aufweist, kann anschließend im Fokus des Parabolspiegels (Primärfokus genannt) über ein Empfangsgerät aufgenommen werden. Im Anschluss daran kann es durch einen weiteren gekrümmten Spiegel erneut gebündelt und schließlich von einem Empfangsgerät im Fokus des zweiten Spiegels (Sekundärfokus) empfangen werden.

Der Vorteil eines Sekundärfokusempfängers liegt darin, dass in ihm mehrere Empfänger gleichzeitig betrieben werden können.

Der soeben beschriebene Aufbau eines Radioteleskops ist in Abbildung 1 dargestellt.

¹ Nähere Erläuterungen hierzu siehe Kapitel 2.2 Elektromagnetische Wellen

² Ein Parabolspiegel ist ein Reflektor, dessen Oberfläche einer Parabel folgt. Er reflektiert einfallende ebene Wellen so, dass sie auf einen Punkt zulaufen.

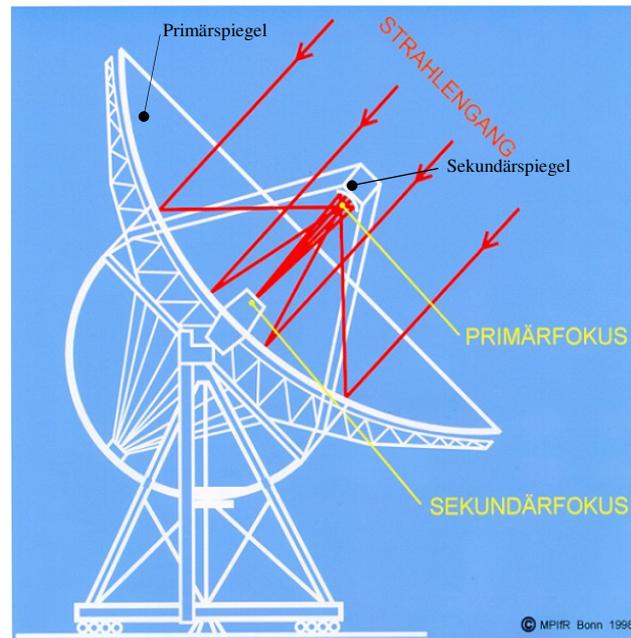


Abbildung 1 Radioteleskop
 Quelle: [16]

Bei Radioteleskopen können starre und bewegliche Teleskope unterschieden werden. Des einen Vorteil ist des anderen Nachteil: so kann ein starres Teleskop im Gegensatz zu einem beweglichen Teleskop unproblematischer abgestützt werden, was größere Dimensionen des Spiegels ermöglicht. Das bewegliche Teleskop ist hingegen in der Himmelsbetrachtung wesentlich flexibler.

Das Max-Planck-Institut für Radioastronomie betreibt in Effelsberg unter anderem das weltweit zweitgrößte bewegliche Radioteleskop. Dieses besitzt einen Primärspiegel mit einem Durchmesser von 100 Metern und einen Sekundärspiegel mit einem Durchmesser von 6 Metern. Welche Wellenlängen ein Teleskop empfangen kann, ist abhängig von der Verformung und der Oberfläche des Spiegels. Mit höher werdender Frequenz, also mit kleiner werdender Wellenlänge, werden die Anforderungen an das Radioteleskop größer. Der Primärspiegel des Radioteleskops in Effelsberg besitzt eine ausreichend kleine Verformung und eine geeignete Oberfläche, um auch Bilder im Millimeterwellenbereich aufnehmen zu können. Der Sekundärspiegel des Radioteleskops in Effelsberg besitzt noch eine weitere Besonderheit: er kann über Stellmotoren, die sich hinter dem Spiegel befinden, die Stellung seines Spiegels verändern. Dadurch kann der Sekundärfokus an unterschiedlichen Stellen positioniert werden, wodurch mehrere Empfangssysteme im Sekundärfokus untergebracht und je nach Aufnahmewunsch fokussiert werden können. Der Aufnahmewunsch entspricht dabei der Aufnahme in einem bestimmten Wellenlängenbereich. Für jeden Wellenlängenbereich gibt es speziell abgestimmte Empfangssysteme.

Da sich die Primärempfangsgeräte im Sekundärspiegel befinden, können beim Betrieb des Primärempfangsgerätes keine elektromagnetischen Wellen in den Sekundärfokus reflektiert werden. Aus diesem Grund ist der gleichzeitige Betrieb beider Empfangssysteme (Sekundär-

und Primär-) nicht möglich und die Primärempfänger müssen zum Betrieb der Sekundärempfänger eingefahren werden.[16]

2.2 Elektromagnetische Wellen

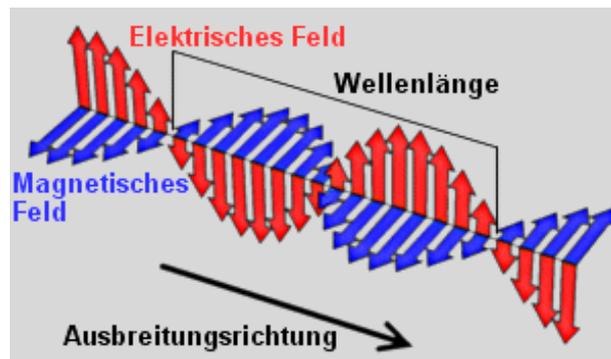


Abbildung 2 Elektromagnetische Wellen
Quelle: [15]

Elektromagnetische Wellen bestehen aus elektromagnetischen Feldern, die orthogonal in Ausbreitungsrichtung schwingen (siehe Abbildung 2). Sie benötigen kein Medium um sich auszubreiten und können sich daher auch im Vakuum fortpflanzen.

Elektromagnetische Wellen werden in Frequenzen oder in Wellenlängen angegeben. Frequenzen werden - benannt nach dem deutschen Physiker Heinrich Herz - in der Einheit Herz [Hz] angegeben. Ein Herz entspricht einer Schwingung pro Sekunde. Die Wellenlänge ist der Quotient aus der Lichtgeschwindigkeit ($c=299.792,458 \text{ km/s}$) und der Frequenz.

Radiowellen, Mikrowellen, Licht, Infrarotstrahlung, Röntgenstrahlung und Gammastrahlung sind unterschiedliche Formen von elektromagnetischen Wellen. Sie unterscheiden sich lediglich in ihrer Frequenz bzw. ihrer Wellenlänge. Die gebräuchlichen Namen für die verschiedenen Frequenzen und Wellenlängen bereiche sind in Abbildung 3 aufgeführt.[6]

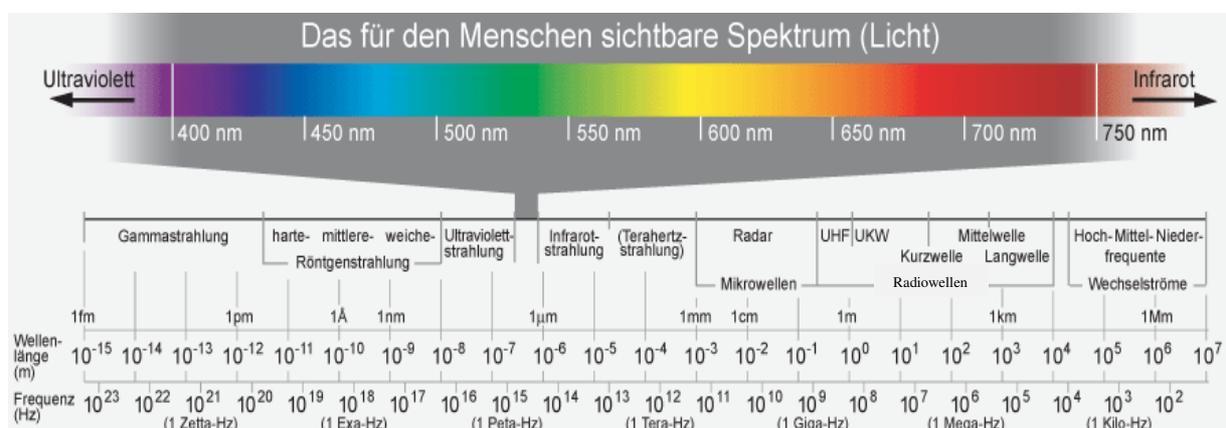


Abbildung 3 Elektromagnetisches Wellenspektrum
Quelle: [15]

2.2.1 Elektrisches Rauschen

Elektrisches Rauschen ist eine spezielle Form von elektromagnetischen Wellen. Ein Rauschsignal, das in Folge eines elektrischen Rauschens entsteht, ist ein nicht vorhersagbares Signal, das keine nutzbaren Informationen beinhaltet und das Empfangssignal verfälscht. Aus diesem Grund ist elektrisches Rauschen nicht erwünscht.

Es können verschiedene Typen des Rauschens unterschieden werden. Ein Typ ist das thermische Rauschen, das bei elektrischen Leitern mit einem ohmschen Widerstand bei einer Temperatur über 0 Kelvin entsteht. Die Temperatur ist dabei eine wichtige Größe für die thermische Rauschintensität. Die elektrischen Verluste, die aus dem ohmschen Widerstand resultieren, verursachen eine unregelmäßige Gitterschwingung, die durch Stöße auf die Ladungsträger das thermische Rauschen bedingt. Ein ideales, verlustfreies elektrisches Bauteil wird hingegen selbst bei endlicher Temperatur kein Rauschsignal abgeben.

Da nur das thermische Rauschen für diese Diplomarbeit relevant ist, sollen die weiteren Rauschtypen vollständigheitshalber lediglich kurz erwähnt werden. Das Schrotrauschen ist ein elektrisches Rauschen, welches bei Halbleiterbauelementen auftritt. Dieses Rauschen ist von dem durchfließenden Strom abhängig. Als letztes sei das Funkelrauschen erwähnt, welches ebenfalls vom durchfließenden Strom abhängig ist.[18,5]

2.2.2 Transmission, Reflektion und Absorption

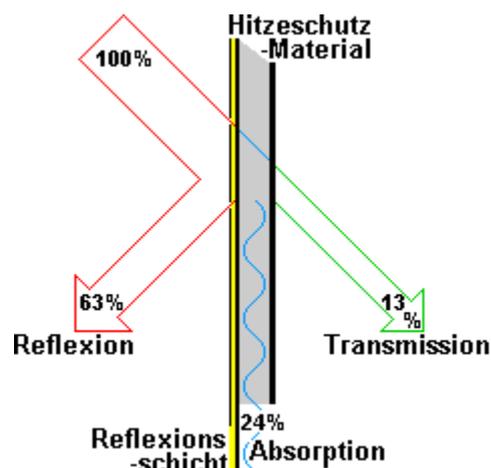


Abbildung 4: Reflexion, Transmission und Absorption von elektromagnetischen Wellen
Quelle: [15]

Elektromagnetische Wellen bewegen sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit. Treffen elektromagnetische Wellen auf einen Stoff, können sie - wie das Beispiel in Abbildung 4 zeigt - von der Oberfläche reflektiert werden, vom Material absorbiert werden und/oder durch den Stoff hindurch strahlen, also transmittieren. Wie hoch die Absorption, die

Reflektion und die Transmission im Verhältnis zueinander ausfallen, hängt von der Wellenlänge, dem Material und der Dicke des Materials ab.

Beim Durchdringen eines Stoffes wird immer ein Teil der Strahlen absorbiert bzw. die Intensität der elektromagnetischen Wellen geschwächt. Dabei bleibt die Frequenz unverändert. Das Verhältnis der Ausgangsintensität zur Eingangsintensität nennt man Dämpfung, die in der logarithmischen Einheit Dezibel [dB] angegeben wird.[5]

2.3 Grundlagen der Wärmeübertragung

Wärme wird im Wesentlichen auf drei Arten übertragen:

- Wärmeübertragung durch Strahlung
- Wärmeübertragung durch Leiten
- Wärmeübertragung durch Konvektion

Im Folgenden werden diese Arten näher erläutert.

2.3.1 Wärmeübertragung durch Strahlung

Wärmestrahlen sind elektromagnetische Wellen, deren technisch gebräuchliches Spektrum vom Infrarotbereich bis zum sichtbaren Licht reicht¹.

Wärmestrahlung entsteht dadurch, dass jeder Stoff, der eine Temperatur über 0 Kelvin besitzt, kontinuierlich elektromagnetische Wellen emittiert², weil die innere Energie des Materials nicht verschwindet. Mit der Temperatur wächst die innere Energie proportional.

Mit dem Wienschen Strahlungsgesetz lässt sich aus der Temperatur T der Wellenlängenbereich λ_m , in dem sich die höchste Strahlungsintensität Q befindet, berechnen:

$$\lambda_m = \frac{0,2897756 * 10^{-2} m * K}{T}$$

Die Emission, also die emittierte Strahlung, hängt somit von der Temperatur ab. Als Produkt der Stefan-Boltzmann-Konstante und der Temperatur in der vierten Potenz erhält man die Strahlungsintensität einer schwarzen Oberfläche.

$$Q = \sigma * T^4$$

¹ Siehe hierzu auch Abbildung 3 Elektromagnetisches Wellenspektrum

² Lateinisch für „aussenden“

$$\sigma \text{ Stefan-Boltzmann-Konstante} = 5,674 * 10^{-6} \left[\frac{W}{K^4 * m^2} \right]$$

Alle Oberflächen, die eine Temperatur über 0 Kelvin besitzen, haben die Fähigkeit, Strahlung zu emittieren. Die Fähigkeit, elektromagnetische Wellen zu absorbieren, ist proportional hierzu. Die Emissionszahl ε einer Oberfläche ist das Maß für die Fähigkeit, elektromagnetische Wellen zu emittieren bzw. zu absorbieren. Sie hängt von dem Material der Oberfläche und dem Oberflächenzustand ab. Eine schwarze Oberfläche hat eine Emissionszahl von eins, da sie die kompletten Wärmestrahlen emittiert bzw. absorbiert. Daraus ergibt sich, dass alle Emissionszahlen zwischen 0 - was bedeutet, dass überhaupt keine Wärmestrahlen von der Oberfläche emittiert bzw. absorbiert werden - und eins, wie bei der bereits erklärten schwarzen Oberfläche, liegen. [1,5]

Die folgende Gleichung gibt den Wärmestrom \dot{Q} für zwei sich anstrahlende Flächen A_1 und A_2 wieder:

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} * A_1 * \sigma * (T_2^4 - T_1^4)$$

wobei C_{12} der Korrekturfaktor ist.

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Bei Flächen, die in einem Winkel von φ_{12} zueinander stehen, wird der Korrekturfaktor folgendermaßen berechnet:

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varphi_{12}} + \frac{1}{\varepsilon_1 - 1} + \frac{A_1}{A_2} \frac{1}{\varepsilon_2 - 1}}$$

$$\varphi_{12} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \int_{A_1}^0 \int_{A_2}^0 \frac{\cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{s^2} dA_1 \cdot dA_2$$

2.3.2 Wärmeübertragung durch Leiten

In festen oder *unbewegten* flüssigen und gasförmigen Körpern geschieht die Wärmeübertragung durch Leiten. Dieser Wärmetransportmechanismus beruht auf dem Energietransport durch Impulsaustausch zwischen schwingenden benachbarten Atomen und Molekülen bei vorhandenen Temperaturdifferenzen. Daher wird die Wärmeübertragung durch

Leiten auch als molekularer Wärmetransport bezeichnet.

Die Fähigkeit, Wärme zu leiten, wird mit der vom Werkstoff abhängigen Größe λ [W*m/K] definiert. Diese ist zusätzlich von der Temperatur abhängig. Des Weiteren haben die Querschnittsfläche A , die Temperaturdifferenz ΔT und die Distanz x einen Einfluss auf die Wärmeübertragung durch Leiten, was die nachfolgende Formel des Wärmestroms \dot{Q} zeigt:[4]

$$\dot{Q} = \lambda * A * \frac{\Delta T}{x}$$

2.3.3 Wärmeübertragung durch Konvektion

Bei der Wärmeübertragung durch Konvektion sind die *bewegten* gasförmigen oder flüssigen Körper (Fluide genannt) für den Wärmeenergietransport verantwortlich. Die Moleküle der Fluide haften an der Oberfläche des festen Körpers und nehmen seine Temperatur an. Mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche wird der Temperatur- und der Geschwindigkeitsunterschied der Fluide größer. Die Moleküle der Fluide vermischen sich und es stellt sich im Raum eine einheitliche Temperatur ein. Voraussetzung für die Haftung der Moleküle an der Oberfläche ist eine genügend hohe Dichte bzw. ein genügend hoher Druck. Mit abnehmendem Druck ist die Verweildauer der Moleküle und somit der Kontakt der Moleküle untereinander geringer, wodurch sie die Temperatur des festen Körpers bzw. der Moleküle, auf die sie treffen, nicht vollständig annehmen können. Die Wärmeübertragung durch Konvektion kann somit durch Druckreduzierung verkleinert werden.[4]

2.4 Vakuumtechnik

Wie im vorangegangenen Unterkapitel erwähnt, kann mit einer Druckreduzierung, also z.B. durch ein Vakuum, die Wärmeübertragung durch Konvektion so weit verkleinert werden, dass sie bei der Berechnung der Wärmeübertragung nicht mehr berücksichtigt werden muss.

Druckbereich	Druck / mbar	Teilchenzahldichte / cm ⁻³
Großvakuum	10 ³ – 10 ⁰	2,65 · 10 ¹⁹ – 2,65 · 10 ¹⁶
Feinvakuum	10 ⁰ – 10 ⁻³	2,65 · 10 ¹⁶ – 2,65 · 10 ¹³
Hochvakuum	10 ⁻³ – 10 ⁻⁷	2,65 · 10 ¹³ – 2,65 · 10 ⁹
Ultrahochvakuum	10 ⁻⁷ – 10 ⁻¹²	2,65 · 10 ⁹ – 2,65 · 10 ⁴

Tabelle 1 Einteilung der Vakuumarten
Quelle:[3]

In der Vakuumtechnik werden die Vakuumdrücke in verschiedene Druckbereiche eingeteilt. Diese sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Bereiche unterscheiden sich nicht nur in ihren Drücken, sondern auch in ihren Eigenschaften.

Eine dieser Eigenschaften ist die Strömungsart, die unter anderem für die Wärmeübertragung entscheidend ist.

Im Grobvakuum bewegen sich die Gasteilchen noch wie Fluide mit turbulenter oder laminarer Strömung. Sie haben untereinander Kontakt, was eine gewisse Verweildauer der Moleküle auf den Oberflächen bewirkt. Dadurch nehmen die Gasteilchen fast vollständig die Temperatur der Oberfläche, auf die sie stoßen, an und es findet ein Wärmetransport statt.

Im Hochvakuum existiert lediglich eine molekulare Strömung. Es bewegen sich nur noch einzelne Moleküle (Gasteilchen) durch den Behälter. Die auf eine wärmere oder kältere Fläche treffenden Gasteilchen können meist nicht die Temperatur der Flächen annehmen, da der Kontakt nur aus einem einmaligen Stoß besteht und somit zu kurz ist.[3,9]

2.4.1 Abpumpzeiten

Ein Vakuum kann nicht mit dem Gegenteil von Druckluft gleichgesetzt werden. Bei der Konstruktion eines Vakuumbehälters und der Wahl der Materialien sind diverse Kriterien zu beachten. Um ein Vakuum zu erzeugen, müssen die Gasmoleküle aus dem Behälter evakuiert werden. Dabei umfasst die Evakuierung der Gasmoleküle mehr als nur die Gasentfernung aus dem Rauminhalt. Gasmoleküle haften an den Oberflächen fester Stoffe; diesen Vorgang bezeichnet man als Adsorption. Um die Gasmoleküle zu lösen, muss eine Desorption stattfinden. Das Evakuieren der Moleküle von den Oberflächen wird als Oberflächenentleerung bezeichnet, das Entfernen des Rauminhalts als Volumenentleerung. Somit kann der Abpumpprozess eines Vakuumbehälters in die Volumenentleerung und die Oberflächenentleerung unterteilt werden.

Die Abpumpzeiten werden bei Vakuumdrücken unter 10^{-4} mbar zum größten Teil von der Oberflächenentleerung bestimmt. Um eine schnellere Oberflächenentleerung zu erreichen, kann vorher die Desorptionsrate, also der Anteil an Molekülen, der an den Oberflächen haftet, verkleinert werden. Dies ist durch gründliches Reinigen der Oberflächen von Fett- und Schmutzschichten, durch Entfernen von Lösungsmitteln und durch wirkungsvolle Trocknung möglich. Außerdem lässt sich mehr als 90% der adsorbierten Wassermenge von den Oberflächen abdampfen, wenn das Material unmittelbar vor seinem Einsatz im Vakuum etwa 2 Stunden lang mit Hilfe von 100° bis 150°C warmer Luft erwärmt wird. Auch durch chemisches Beizen oder Elektropolieren kann eine bessere Desorptionsrate erzeugt werden.

Um eine schnelle Abpumpzeit zu erreichen und das Vakuum lange aufrecht zu erhalten, müssen weitere Kriterien beachtet werden. Zu diesen Kriterien gehört unter anderem, dass

sich nicht nur auf der Oberfläche Gasmoleküle befinden können, sondern auch in den Materialien. Diese Gasmoleküle entweichen nur langsam und verschlechtern permanent das Vakuum, was ein früheres Nachpumpen zur Folge hat. Des Weiteren kann auch Permeation ein schlechtes Vakuum erzeugen. Permeation liegt vor, wenn ein Gasmolekül von außen durch das Material in den Behälter wandert. Dies geschieht bei Kunststoffen sowie bei Metallen und Nichtmetallen. Dabei ist die Permeationsrate bei Kunststoffen um einiges höher als bei Metallen. Aus konstruktiver Sicht betrachtet sollten in dem Vakuumbehälter außerdem keine kleinen Spalte und keine Sacklöcher¹ vorhanden sein, da sich die Gasmoleküle dort nur schwer bzw. langsam abpumpen lassen.[3,8]

2.5 Wärmeausdehnung

Alle Stoffe verändern ihre Ausmaße bei Temperaturänderung. Der Ausdehnungskoeffizient α ist das Maß für die Ausmaßänderung Δx in Abhängigkeit von der Temperaturänderung ΔT und der Ausgangsdistanz x .

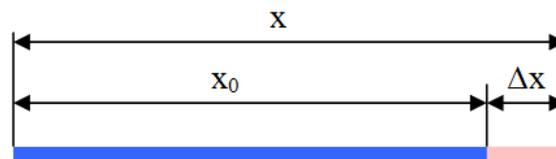


Abbildung 5 Maßgrößen bei der Wärmeausdehnung
Quelle: eigene Abbildung

Die Wärmeausdehnung wird durch die Formel

$$\Delta x = \alpha * x_0 * \Delta T$$

$$x = x_0(1 + \alpha * \Delta T)$$

berechnet.[15]

2.6 CA-Hilfsmittel bei der Konstruktion

Bei der Konstruktion von Bauteilen bietet der heutige Markt eine große Auswahl an computergestützten (engl.: Computer Aided; abgekürzt: CA) Systemen, um schneller Produkte entwickeln zu können. In der vorliegenden Diplomarbeit wird das CAD²-Programm von Solid Works 2009/2010 mit dem integrierten FEM-Programm „Solid Works Simulation“ genutzt.

¹ Sacklöcher sind z.B. Bohrungen, die im Material enden. Das Gegenteil von Sacklöchern sind Durchgangslöcher.

² Kurz für: Computer Aided Design

Im Folgenden werden einige Werkzeuge von Solid Works 09/10 erläutert, die bei der Erstellung dieser Diplomarbeit angewandt worden sind.

2.6.1 FEM-Werkzeug

Die Finite Elemente Methode (kurz: FEM) in Solid Works teilt ein CAD-Modell in endliche Elemente auf, die miteinander vernetzt sind. Diesen Elementen wird je eine Differenzialgleichung zugeordnet. Auf diese Weise können alle physikalischen Probleme mit Hilfe einer Differenzialgleichung berechnet werden.

Das Ergebnis einer FEM-Berechnung hängt stark von der Vernetzung des Modells ab. Eine Verbesserung des Netzes kann durch die Wahl kleinerer Elemente geschehen. Durch zu große Elemente werden kleine Radien in dem CAD-Modell zu Ecken in der Vernetzung und es entsteht ein Ergebnis, das nicht der Realität entspricht. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 6 dargestellt.

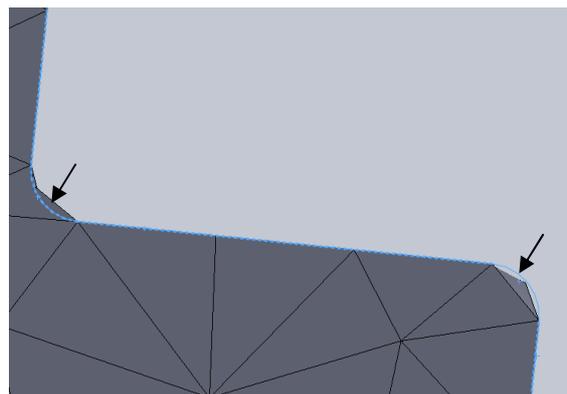


Abbildung 6 Grobe Vernetzung von Radien
Quelle: eigene Abbildung

Eine Verkleinerung der Elementgröße bedeutet jedoch automatisch, dass mehr Elemente für die Vernetzung eines Modells nötig sind. Dadurch erhöhen sich die Differenzialgleichungen und in Folge dessen auch die Rechenzeit. Aus diesem Grund sollte nicht von vornherein die kleinstmögliche Elementgröße gewählt werden.



Abbildung 7 Volumenvernetzungstypen
Quelle: [11]

Zusammen mit der Netzqualität wird in Solid Works der Elementtyp gewählt, wobei lineare Elemente für eine Entwurfsqualität und parabolische Elemente für eine hohe Netzqualität zur Verfügung stehen. Gleichzeitig ändert sich bei der Wahl des Netztyps die Ordnungszahl der Differenzialgleichung eines Elements. Eine hohe Netzqualität erzeugt eine modellgetreuere Vernetzung und geringeren Rechenaufwand durch eine höhere Ordnung der Differenzialgleichung.[11,19]

2.6.2 Optimierungsstudie

Die Optimierungsstudie ist eine Funktion von „Solid Works Simulation“, die bei der Suche nach der optimalen Dimensionierung eines Bauteiles hilft. Optimierungsstudien stützen sich immer auf eine vorher ausgeführte Studie (FEM-Berechnungen). Dies können statische, thermische, Frequenz- oder Knicken-Studien sein.

Die Optimierungsstudie sucht nach einer optimalen Lösung für die Zwangsbedingungen. Zwangsbedingungen definieren die Bedingungen, die die optimierte Konstruktion erfüllen *muss*. Dabei können maximal 60 Zwangsbedingungen in einer Optimierungsstudie festgelegt werden. Die Zwangsbedingungen können je nach Auswahl der Studienart (statische, Knicken- usw.) von der gesamten Konstruktion bis hin zu einzelnen Knotenpunkten reichen.

Für die Suche nach der optimalen Konstruktion benötigt das Programm Angaben über das Ziel der Optimierung. Dabei kann die Vorgabe sein, die Masse, das Volumen, die Frequenz oder das Knicken so klein oder so groß wie möglich zu realisieren. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen Konstruktionsvariablen deklariert werden. Diese Variablen sind geometrische Abmaße des CAD-Modells und dürfen von dem Programm zur Optimierung in einem anzugebenden Toleranzbereich verändert werden. Die Anzahl der Simulationen (Experimente) ist von der Anzahl der Konstruktionsvarianten abhängig. Tabelle 2 zeigt, wie schnell die Anzahl der Simulationen bei der Erhöhung der Konstruktionsvariablen steigt. Der Unterschied zwischen hoher Qualität und Standardqualität ist lediglich die Anzahl der Simulationen, um die optimale Konstruktion zu erhalten.

Anzahl der Konstruktionsvariablen	Anzahl der Experimente	
	Hohe Qualität	Standardqualität
1	3	Nicht zutreffend
2	9	Nicht zutreffend
3	13	Nicht zutreffend
4	25	15
5	41	21
6	49	28
7	57	36

Tabelle 2 Simulationen (Experimente) in Abhängigkeit von den Konstruktionsvariablen
Quelle:[11]

Nach erfolgreichem Beenden der Optimierungsstudie besitzt die Konstruktion die optimierten Maße, wobei selbstverständlich nur die Maße optimiert wurden, die vorher bei den Konstruktionsvariablen deklariert wurden.

Die erfolgreiche Beendigung der Optimierungsstudie hängt dabei davon ab, ob die Zwangsbedingungen mit den angegebenen Konstruktionsvariablen erfüllt werden können.[2,11]

2.6.3 Gemeinsame Werte

Mit der Funktion "gemeinsame Werte" von Solid Works können in Bauteilen mehrere Bemaßungen verknüpft werden, ohne dass sie über eine Gleichung oder einer Beziehung verbunden sind. Dadurch wird eine steuernde Bemaßung geschaffen, mit deren Hilfe bei der Änderung eines Wertes in der Gruppe alle anderen Maße automatisch mit geändert werden. Gleichzeitig haben alle gemeinsamen Werte einen gemeinsamen Variablennamen. Somit genügt es, in einer Konstruktionstabelle eine Spalte für einen gemeinsamen Wert zu reservieren.[2]

2.6.4 Konfigurationen

Mit Hilfe der Funktion "Konfigurationen" können in Solid Works mehrere Varianten eines Teil- oder Baugruppenmodells in einem einzigen Dokument erstellt werden. Konfigurationen bieten die Möglichkeit, Modellfamilien mit unterschiedlichen Bemaßungen, Komponenten oder anderen Parametern mit geringem Aufwand zu erstellen. Die Erstellung neuer Konfigurationen kann im Konfigurationsmanager oder in einer Konstruktionstabelle festgelegt werden. Die Konstruktionstabelle ermöglicht zusätzlich eine Verknüpfung bzw. funktionelle Abhängigkeit von anderen Parametern in der Tabelle. Da es sich bei der Tabelle um eine gewöhnliche Windows-Excel-Tabelle handelt, können alle Funktionen und Gleichungen in der Konstruktionstabelle von Excel verwendet werden.[2,12]

2.7 Methodisches Konstruieren

Das methodische Konstruieren ist ein Werkzeug, das bei der Produktentwicklung eingesetzt wird. Es beschreibt eine Herangehensweise, um neue Konzepte zu entwickeln.

Der erste Schritt beim methodischen Konstruieren ist das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. Dieser Arbeitsschritt dient dazu, Informationen zu beschaffen, um die sogenannte Anforderungsliste erstellen zu können.

Aus den gesammelten Informationen werden einzelne Funktionen abgeleitet (sogenannte Einzelfunktionen), welche der Erfüllung der Gesamtfunktion dienen. Eine Funktion beschreibt dabei immer ein Umsetzen von Energie, Stoff oder Information und sollte keine angestrebte Lösung umschreiben, sondern lediglich die Funktion in einer allgemeineren Form. Bei Funktionen, die nicht direkt der Gesamtfunktion zugewiesen werden können, aber

dennoch für die Erfüllung der Gesamtfunktion wichtig sind, spricht man von Nebenfunktionen.

Für die Einzelfunktionen werden im nächsten Schritt Lösungsprinzipien gesucht. Für die Lösungsprinzipien können bereits bekannte einzelne Wirkmechanismen verwendet werden. Die gesammelten Lösungsprinzipien werden in realisierbare Module gegliedert. Die daraus entstehenden Lösungskonzepte werden unter Berücksichtigung der Anforderungsliste miteinander verglichen und bewertet.

Das gewählte Konzept wird im folgenden Schritt konkretisiert. Hier werden mit CAD-Modellen erste grobe Strukturen erstellt, die nach und nach detailliertere Gestalt annehmen. Dazu dienen unter anderem erste FEM-Berechnungen, aber auch vereinfachte Rechnungen zur Abschätzung der Dimensionen. Insbesondere erhalten die Modelle ihre Struktur durch die langsam wachsende Baugruppe, die auch maßgeblich für die Geometrie verantwortlich ist. Die Gestaltung der Modelle bzw. der einzelnen Module unter Berücksichtigung der Gesamtbaugruppe ist ein stark interaktiv geprägter Arbeitsschritt, in dem die Ergebnisse ständig mit den gesetzten Anforderungen verglichen werden. Nach erfolgreicher Bewertung können schließlich die für die Fertigung und Nutzung des Produktes erforderlichen Unterlagen erstellt werden.[10,14]

3 Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung

3.1 Hauptaufgabe des Dewar

Das Empfangen und Verarbeiten der sehr schwachen elektromagnetischen Wellen ist die Hauptaufgabe der Empfangskomponenten des Radioteleskops. Wie bereits in Kapitel 2.2.1 Elektrisches Rauschen erläutert, wird bei elektrischen Leitern mit einem ohmschen Widerstand ein Rauschsignal erzeugt. Eine Empfangskomponente ist ein elektrischer Verstärker, der unvermeidlich ohmsche Widerstände aufweist. In Folge dessen würde der Verstärker bei Raumtemperatur ein Rauschsignal erzeugen, das das empfangene Signal unbrauchbar machen würde. Vor diesem Hintergrund muss insbesondere der Verstärker bei einer niedrigen Temperatur betrieben werden. Da jeder Stoff über 0 Kelvin elektromagnetische Wellen erzeugt, müssen zur Verbesserung des Signals auch die Empfangskomponenten, die sich vor dem Verstärker befinden, gekühlt werden. Hinter dem Verstärker ist dies nicht nötig, da das Signal dort eine ausreichende Intensität besitzt und unempfindlich gegen Rauschen ist.

Die Hauptaufgabe des Dewar ist demnach, das Rauschen zu verkleinern. Die Gesamtfunktion des Dewar beinhaltet somit das Kühlen der Empfangskomponenten.

3.2 Aufbau der bisherigen Kryostaten

Im folgenden Kapitel wird der Aufbau eines einzelnen Empfängers beschrieben. Dies ist relevant, da sich der Aufbau des Kryostaten unter anderem nach den Empfängern richtet.

Beim Empfang von elektromagnetischen Wellen im Empfänger wird ein Horn als Antenne genutzt. Im Primärfokus gleicht das Horn einem länglichen Trichter. Er besitzt eine freie Sicht auf den Spiegel, damit die elektromagnetischen Wellen ungehindert in das Horn gelangen können. Dies bedeutet, dass sich nur Materialien im Sichtbereich des Horns befinden dürfen, die für die empfangenen Wellenlängen durchlässig sind. Die im Horn empfangenen Wellen werden durch Hohlleiter weitergeleitet. Hohlleiter sind für elektromagnetische Wellen das, was Kabel für Strom sind.

Durch geometrisch unterschiedlich geformte Hohlleiterkomponenten wird jede elektromagnetische Welle in zwei elektromagnetische Wellen transformiert. Zur Transformation der empfangenen elektromagnetischen Wellen wird unter anderem ein konstantes Signal elektromagnetischer Wellen benötigt, welches standardmäßig von außen über Hohlleiter in den Dewar geleitet wird. Des Weiteren werden elektrische Kabel für die Spannungsversorgung des Verstärkers in den Dewar geführt. Jede transformierte Welle wird zum Schluss über einen der erwähnten elektrischen Verstärker verstärkt und gelangt über einen Hohlleiter aus dem Dewar zur weiteren Verarbeitung.

Die Betriebstemperatur der Verstärker im Dewar liegt bei 15 Kelvin. Die Betriebstemperatur der Empfangskomponenten vor dem Verstärker ist von Dewar zur Dewar unterschiedlich. Dabei gibt es ungekühlte oder auf 70 Kelvin gekühlte Hörner. Bei den restlichen Empfangskomponenten variiert die Betriebstemperatur zwischen 15 und 70 Kelvin.

Die unterschiedlichen Temperaturen werden durch Kühlgeräte (Refrigeratoren) geschaffen. Der in Effelsberg standardmäßig genutzte CTI 350 Refrigerator besitzt zwei Kühlstufen. Der Refrigerator hat in der Praxis bei einer Temperatur von 15 Kelvin auf der zweiten Stufe und 70 Kelvin auf der ersten Stufe eine Kühlleistung von 4 Watt (W) auf der zweiten und 20W auf der ersten Stufe erbracht. Durch seine Bauart erzeugt der Refrigerator im Betrieb eine dynamische Kraft¹ nach außen mit einer Frequenz von 1Hz. Diese wird durch einen oszillierenden² Zylinder im Inneren des Refrigerators erzeugt.

Um die leistungsschwache zweite Stufe von der Wärmeübertragung durch Strahlung zu entlasten, wird eine von der ersten Stufe gekühlte Wand zwischen der 300 Kelvin warmen Behälterwand und den 15 Kelvin warmen Empfangskomponenten positioniert. Die gekühlte Wand wird von dem Vakuumbehälter eingeschlossen, um die Wärmeübertragung durch Konvektion - wie in Kapitel 2.4 erläutert - auszuschließen. Der Vakuumbehälter ist bei den neueren Dewar aus Aluminium gefertigt, was das Gewicht reduziert. An dem Vakuumbehälter werden alle eingebauten Bauteile und Komponenten befestigt.

Des Weiteren hat sich in manchen Kryostaten eine Superisulationsfolie bewährt, die zwischen der 70 Kelvin gekühlten Wand und der 300 Kelvin warmen Außenwand befestigt ist. Sie dient ebenfalls zur Minimierung der Wärmeübertragung durch Strahlung. Die Superisulationsfolie besteht aus mehreren sehr dünnen Metallfolien, zwischen denen sich schlecht-wärmeleitende Fasern oder Schüttungen befinden. Die Folien besitzen eine sehr geringe Emissionszahl, wodurch die Strahlungswärme sehr klein ist. Durch die Fasern oder Schüttungen gibt es nur eine geringe Kontaktfläche mit geringem Auflagedruck, wodurch die Wärmeübertragung an den Kontaktstellen klein ist. Dieses Paket aus Folien und Füllmaterial wird durch eine Hülle vakuumverpackt, um zusätzlich die Wärmeübertragung durch Konvektion zu verhindern. Dabei besteht das Risiko, dass die Superisolationfolie bei ihrem Einsatz im Hochvakuum zerstört wird.

Da der Hohlleiter zur Übertragung der elektromagnetischen Wellen aus einem elektrisch sehr gut leitenden Material bestehen muss, um eine dämpfungsarme Übertragung zu gewährleisten, wird meist Kupfer benutzt. Als Alternative zu einem reinen Kupfer-Hohlleiter mit einem sehr guten Wärmeleitkoeffizienten werden auch Edelstahl-Hohlleiter mit einer dünnen Kupferschicht verwendet. Diese Schicht ist für die Übertragung der elektromagnetischen Wellen ausreichend. Edelstahl besitzt einen wesentlich geringeren

¹ Eine Kraft wird dynamisch genannt, wenn sie in einer bestimmten Frequenz (Zeitintervall) ihre Kraftgröße ändert.

² Eine oszillierende Bewegung ist im Fall des Refrigerators eine gradlinige, sich ständig wiederholende Auf- und Ab-Bewegung.

Wärmeleitwert als Kupfer oder Aluminium und vermindert so die Wärmeübertragung durch Leiten.

Eine weitere Lösung zur Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Leiten bei Hohlleitern bietet der Thermo-Choke (siehe Abbildung 8). Der Thermo-Choke besteht aus zwei Hohlleitern, die durch einen Spalt thermisch getrennt sind. Dadurch ist über die Hohlleitern keine Wärmeübertragung durch Leiten möglich. Durch eine bestimmte Geometrie an den Stirnflächen der Hohlleiter wird ein Austreten der elektromagnetischen Wellen am Spalt verhindert. Zusätzlich muss der Spalt eine definierte Größe aufweisen, was eine Distanzhülse aus glasfaserverstärktem Kunststoff, die einen sehr geringen Wärmeleitkoeffizienten besitzt, erfüllt. Deshalb müssen bei dem Thermo-Choke einmal die Wärmeübertragung durch Leiten über die Distanzhülse und die Wärmeübertragung durch Strahlung in dem Spalt berücksichtigt werden.



Abbildung 8: Thermo-Choke
Quelle: MPIfR

Um das Vakuum zu halten, wird im Sichtbereich des Horns und am Hohlleiterausgang bisher eine spezielle Folie, die für den Wellenlängenbereich elektromagnetisch durchsichtig ist, eingesetzt. Zur Verkleinerung der Strahlungswärme im Sichtbereich des Horns gibt es Forschungen mit einem Dämmschaum, der für die elektromagnetischen Wellen im Bereich der empfangenen Wellenlängen lediglich eine geringe Dämpfung aufweist und somit geeignet ist. Der Dämmschaum senkt die Temperatur, die auf das Horn strahlt, und senkt dadurch die Wärmeübertragung durch Strahlung um ein Vielfaches, da die Temperatur quadratisch in die Wärmeübertragung eingeht.

3.3 Anforderungen an das Multihorn-Empfangssystem

Die Hauptanforderung an die Konstruktion des Dewar besteht darin, in ihm 24 Empfänger für einen Frequenzbereich von 33-50 GHz zu betreiben. Der schematische Aufbau der 24 Empfänger ist in Abbildung 9 beispielhaft für einen dargestellt. Darin ist ein Horn mit den Empfangskomponenten zu sehen. Dabei entsprechen der Phasenschieber und die Polarisationsweiche den in Kapitel 3.2 beschriebenen geometrisch geformten Hohlleiterkomponenten, welche durch ihre Form die elektromagnetischen Wellen transformieren. Hinter der Polarisationsweiche sind die Verstärker angesiedelt. Es werden zwei Verstärker pro Empfänger benötigt, da die Polarisationsweiche das empfangene Signal in zwei Signale aufteilt, die jeweils von einem Verstärker verstärkt werden (siehe Kapitel 3.2). Da alle Empfangskomponenten eines Empfängers als ein kompaktes Bauraummodell angenommen werden, sind die beiden Verstärker in Abbildung 9 nur als ein Bauteil dargestellt. Dies ist wegen des bisherigen Standes des Projekts über die Empfängerkomponenten nicht anders möglich. Auch die 24 Hörner werden als ein Bauraummodell angenommen. Dabei wird die Geometrie eines Horns, die aus vorherigen Projekten bekannt ist, für die Modellierung des Bauraummodells verwendet. Zur Stromversorgung der Verstärker werden zusätzlich Kabel benötigt, zu denen ebenfalls keine genauen Daten vorhanden sind. Die beiden elektromagnetischen Signale pro Empfänger werden über Hohlleiter aus dem Dewar geführt.

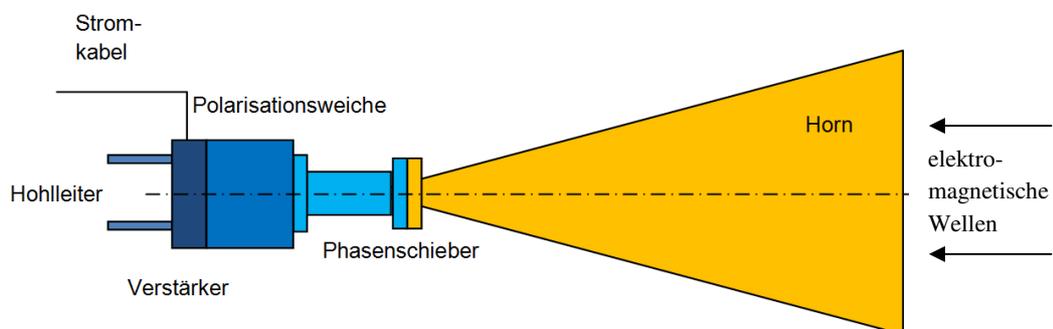


Abbildung 9 Empfangskomponenten Multihorn
 Quelle:eigene Abbildung

Die Verstärker können, bedingt dadurch, dass sie elektronische Bauteile sind, ausfallen. Daher muss gewährleistet werden, dass die Verstärker ohne großen Aufwand gewechselt werden können. Die Verstärker müssen aus den in Kapitel 3.1 aufgeführten Gründen auf 15 Kelvin gekühlt werden. Die restlichen Empfangskomponenten müssen mindestens auf 70 Kelvin gekühlt werden, wobei eine Temperatur von 15 Kelvin wünschenswert wäre. Das Horn sollte am Fuß mindestens eine Temperatur von 70 Kelvin aufweisen und kann zur Signaleingangsseite hin wärmer sein.

Für die Erzeugung der niedrigen Temperaturen wird der Refrigerator CTI 350 benutzt. Dabei ist es aus Energiespargründen gewünscht, den Dewar mit nur einem Refrigerator zu betreiben.

Die maximale Anzahl der Refrigeratoren ist auf drei beschränkt, da mehr Refrigeratoren aus versorgungstechnischen Gründen nicht betrieben werden können.

Um die Wärmeübertragung durch Konvektion ausschließen zu können, wird auch hier ein Hochvakuum genutzt. Dabei soll in dem Vakuumbehälter nach dem Abpumpen ein Maximaldruck von $2 \cdot 10^{-5}$ mbar herrschen. Nach 160 Tagen, also ca. einem halben Jahr, darf der Druck auf maximal $2 \cdot 10^{-4}$ mbar ansteigen. Durch Einbeziehung des Volumeninhalts im Vakuumbehälter kann so später die Leckrate q_L ermittelt werden, die sich aus dem Druckanstieg Δp , der Zeitdifferenz Δt , in dem der Druckanstieg erfolgt ist, und dem Behältervolumen V zusammensetzt.

$$q_L = V \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

Die Empfangskomponenten werden mit der Annahme konstruiert, dass keinerlei mechanische Belastungen auf sie einwirken. Eine mechanische Belastung hätte eine Verformung zur Folge, die besonders bei den Empfangskomponenten, deren geometrische Form bei der Transformation der elektromagnetischen Wellen ausschlaggebend ist, einen großen Einfluss auf das Empfangsergebnis haben könnte. In Folge dessen darf keine zusätzliche mechanische Belastung auf den Empfangskomponenten lasten. Aus diesem Grund ist auch die dynamische mechanische Belastung der Refrigeratoren auf die Empfangskomponenten zu unterbinden. Die erzeugte dynamische Belastung kann die Empfangskomponenten in Schwingung versetzen, was das Empfangsergebnis negativ beeinflussen kann. Daher müssen die Refrigeratoren von den Empfangskomponenten mechanisch entkoppelt werden. Es gab in der Praxis bereits den Fall, dass der gesamte Dewar im Betrieb zu schwingen begann. Durch diese Schwingung entsteht eine sogenannte Mikrofonie, die das Empfangsergebnis ebenfalls negativ beeinflusst.

Da sich das Teleskop zur Beobachtung eines Himmelsobjekts wegen der Erdrotation ständig neu auf das Objekt ausrichten muss, ist es - um unabhängig von der Lage des Teleskops ein gleichmäßiges Signal zu erhalten - erforderlich, dass die Hörner immer auf den gleichen Punkt ausgerichtet sind. Aus diesem Grund dürfen die Hörner einen maximalen Neigungswinkel von $\pm 0,3$ Grad besitzen. Dies ist in Abbildung 10 dargestellt.

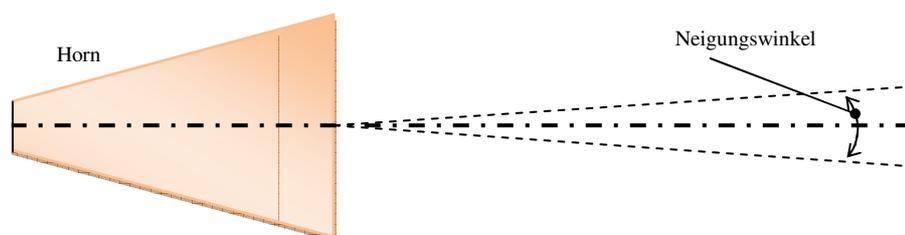


Abbildung 10 Darstellung des Neigungswinkels des Horns
 Quelle: eigene Abbildung

Der Dewar darf nicht mehr als 200kg wiegen. Diese Grenze resultiert aus den zulässigen Massen, die im Sekundärfokus untergebracht werden dürfen.

Die soeben beschriebenen Anforderungen werden in Tabelle 3 noch einmal übersichtlich aufgeführt. Dabei werden zusätzlich Anforderungen aufgelistet, von denen bisher lediglich die Problematik dargestellt wurde und die im Laufe der Diplomarbeit noch näher erläutert werden.

Max-Planck-Institut MPIfR		Anforderungsliste für: Multi-Horn		Name: M. Szymczak Datum: 10.12.2009
Ander.	Nr.	F/W	Anforderungen	Verantw.
Geometrie				
	1.1	F	Bauraum: 1350 x 2250 x 1100 [mm] B/H/T	MS
	1.2	F	Anzahl der Empfangseinheiten: mind. 24	
	1.3	F	Pro Empfangseinheit: 1 Horn, 1 Polarisationsweiche, 1 Phasenschieber und 2 Verstärker	
	1.5	F	Polarisationsweiche	
	1.6	F	Verstärker	
	1.7	F	OMT	
	1.8	F	Hörner: D=100mm, d= 30mm, l=375mm	
	1.9	F	Je Empfangseinheit zwei Hohlleiter WR22 und 5 Kabel mit 0,25 mm ² Querschnitt	
	1.10	F	Hohlleiter und Kabel werden auf der Unterseite des Kryostaten hergeausführen	
	1.11	F	Es darf nichts im Sichtbereich des Horns liegen, was nicht elektromagnetisch von 33Ghz bis 50Ghz zu 95% transparent ist.	
Kräfte				
	2.1	F	max. Gewicht: 200kg	MS(23.02.10)
	2.2	F	Ein Hochvakuum von mindestens $p=2 \cdot 10^{-5}$ mbar im Inneren des Dewar direkt nach dem Abpumpen	
	2.3	F	Maximaler Neigungswinkel der Hörner von $\varphi = \pm 0,3^\circ$ (in allen Pos. des Teleskops)	
	2.4	F	keine plastischen Verformungen	
	2.5	F	Es darf keine mechanische Belastung auf den Empfangskomponeten lasten	
	2.6	F	Schwingungsentkopplung des Refrigerators von den 15 Kelvin Empfangskomponenten	
	2.7	F	keine Mikrofonie	
Energie				
	3.1	F	Verstärker $P_{\text{Verstärker}} = \text{ca. } 0,05\text{W}$	MS (26.01.10)
	3.2	F	Maximaler Vakuumdruck nach 160 Tagen von $2 \cdot 10^{-4}$ mbar	
	3.3	F	Verstärker soll $T = 15\text{K} \pm 2\text{K}$ besitzen	
	3.4	F	Polarisationsweiche und OMT sollen $T = 70\text{K} \pm 3\text{K}$ besitzen	
	3.5	W	Polarisationsweiche und OMT sollen $T = 15\text{K} \pm 2\text{K}$ besitzen	
	3.6	F	70K - Reflektionsschild soll $T = 70\text{K} \pm 4\text{K}$ besitzen	
	3.7	W	Hörner sollen am Fuß $T = 70\text{K} \pm 3\text{K}$ besitzen	
	3.8	W	Ein Refrigerator (CTI 350 Kühlleistung $P_{K15} = 4\text{W}$ $P_{K70} = 20\text{W}$)	
	3.9	F	Maximale Verlustleistung des Sichtfensters von -30dBm ($1\mu\text{W}$)	
Stoffe				
	4.1	F	Werkstoffe müssen vakuumtauglich sein (Gasdichtheit, geringer Eigendampfdruck, geringer Fremdgasgehalt und saubere Oberflächen)	
	4.2	F	Oberflächen müssen dauerhaft einen geringen Emissionsgrad vorweisen	
Ergonomie				
	5.1	F	Einfacher Zugriff auf die Verstärker durch jeweils einen Montagedeckel pro Empfangseinheit	
Fertigung				
	6.1	W	soviel wie möglich in der eigenen Werkstatt herstellen lassen	
	6.2	F	Schweißverbindung unter 1mm Blechstärke \Leftrightarrow Bördelnaht	
	6.3	F	Schweißnähte sollten vakuumseitig durchgehend und möglichst glatt sein	
	1.11	F	Genauigkeiten der Hörner = $\pm 10\mu\text{m}$	
Transport				
	7.1	F	Befestigungsmöglichkeiten für einen Kran, sodass man den Kryostaten in den Sekundärfokus herablassen kann	
Termin				
	8.1	F	Fertigung der ersten Teile Anfang März	
	8.2	F	Abgabe der Diplomarbeit Ende März	

Tabelle 3: Anforderungsliste
Quelle:eigene Tabelle

3.4 Erstellung der Funktionsgliederung

Die Funktionsgliederung soll die komplexen Funktionen des Dewar in einer übersichtlichen Struktur aufzeigen. Dies geschieht durch das Ermitteln von Elementarfunktionen.

Die Hauptfunktion des Kryostaten ist, das Rauschen zu verkleinern, um ein besseres Empfangsergebnis zu erzielen. Aus den im vorherigen Kapitel beschriebenen Anforderungen und den Erklärungen zum Rauschen erschließt sich, dass dies durch Kühlen der Empfangskomponenten und der Hörner geschieht. Daraus ergibt sich die Funktion, dass Wärmeenergie aus dem System (Empfangskomponenten mit Hörnern) entzogen werden muss. Dabei muss die Wärmeenergie von den Empfangskomponenten und den Hörnern zu dem Refrigerator geleitet werden. Daraus ergibt sich eine weitere Funktion, nämlich Wärmeenergie zu leiten. Aus der Anforderungsliste ist bekannt, dass zur Entziehung der Wärme ein Refrigerator genutzt wird, daher wird diese Funktion nicht weiter ausgeführt.

Gleichzeitig muss der Dewar zur Ermöglichung der benötigten Temperaturen isoliert werden. Daraus ergibt sich die Funktion, die Wärmeübertragung zu verkleinern. Dies ist eine Teilfunktion, da sich die Wärmeübertragung, wie schon in Kapitel 2.3 näher erläutert, in die drei Wärmeübertragungen Strahlung, Leiten und Konvektion aufteilen lässt. Die Elementarfunktionen lauten somit: Wärmeenergie durch Strahlung, Leiten und Konvektion verkleinern.

Neben der Hauptfunktion ergeben sich aus den Anforderungen zusätzlich Funktionen, die der Hauptfunktion nicht direkt zugeordnet werden können, jedoch zur Erfüllung der Gesamtfunktion (nämlich das Empfangen von elektromagnetischen Wellen) beitragen. Eine dieser Funktionen besteht darin, einen Längenausgleich zu schaffen, da die Komponenten beim Kühlen von ca. 300 Kelvin auf 15 bzw. 70 Kelvin ihre Abmaße verkleinern, was ohne den Längenausgleich eine mechanische Belastung der Empfängerkomponenten zur Folge hätte.

In der folgenden Abbildung ist die Funktionsgliederung mit allen soeben beschriebenen Funktionen zu sehen.

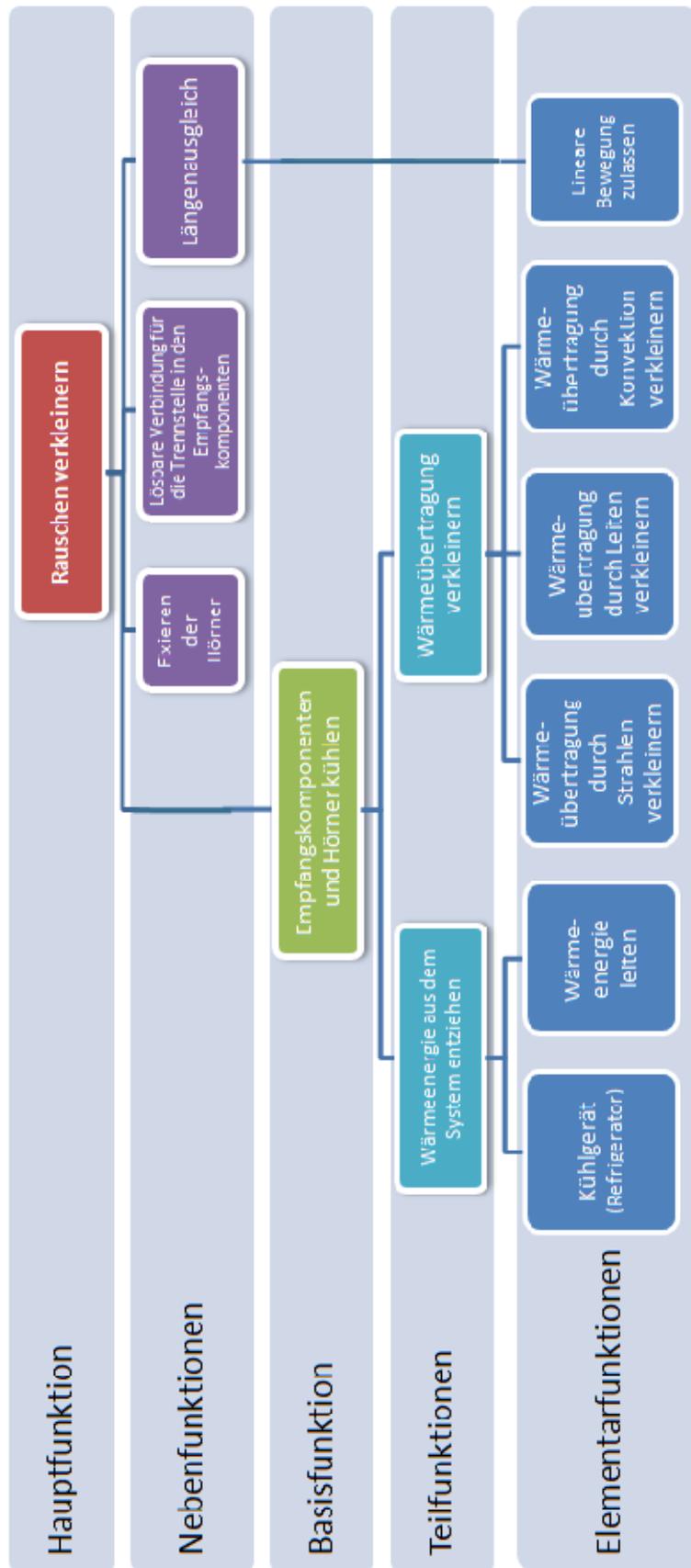


Abbildung 11 Funktionsgliederung
 Quelle: eigene Abbildung

4 Lösungen für die Einzelfunktionen

Die Elementarfunktionen lassen sich verschiedenen Stellen im Kryostaten zuordnen. Diese Stellen haben nicht alle die gleichen Anforderungen und werden deswegen in Einzelfunktionen untergliedert.

Aus Zeitgründen können in dieser Diplomarbeit jedoch nicht alle Einzelfunktionen erarbeitet werden, die in dem Kryostaten auftreten.

4.1 **Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Leiten**

In diesem Kapitel sollen Lösungsmöglichkeiten erarbeitet werden, um die Wärmeübertragung durch Leiten zu verkleinern. Stellen, an denen Wärmeübertragung durch Leiten in dem Kryostaten auftritt, sind Halterungen, Stromleiter und Leiter von elektromagnetischen Wellen, also die Hohlleiter.

Dadurch, dass jede Stelle unterschiedlichen Anforderungen entsprechen muss, werden sie in den folgenden Unterkapiteln einzeln behandelt.

Allgemein gilt die in Kapitel 2.3.2 bereits erklärte Formel zur Wärmeübertragung durch Leiten. So kann sie

- durch eine geringere Wärmeleitfähigkeit λ ,
- durch Verkleinern des Querschnitts A und/oder
- durch eine größere Distanz Δx zwischen den Temperaturen

verkleinert werden.

4.1.1 **Wärmeübertragung durch Leiten zwischen dem Vakuumbehälter und dem Verstärker**

Zwischen dem Vakuumbehälter und dem Verstärker übertragen die Hohlleiter die Wärme. Nach den Anforderungen gemäß Anforderungsliste müssen die inneren Abmaße eines WR22 Hohlleiters eingehalten werden, das bedeutet, dass die Hohlleiter eine rechteckige Form mit inneren Abmaßen von 2,84mm x 5,69mm vorweisen müssen. Des Weiteren muss sich eine Kupferschicht von mindestens $2\mu\text{m}$ auf der Innenfläche befinden, um eine gute Übertragung der elektromagnetischen Wellen zu gewährleisten.

Bei den Variationen der Lösungskonzepte ist die Innenkontur des Hohlleiters vorgegeben. Daher kann lediglich die Wandstärke des Hohlleiters verringert werden, um eine Verkleinerung des Querschnitts zu erreichen.

Bzgl. der Distanz gibt es keinerlei Einschränkungen. Sie kann theoretisch bis zur gewünschten Wärmeübertragung vergrößert werden. Praktisch wird jedoch mit der Verlängerung des Hohlleiters auch der gesamte Dewar länger bzw. größer. Hieraus folgt ein höheres Gewicht und eine größere Wandfläche, was wiederum die Abpumpzeit erhöht, die notwendig ist, um den gewünschten Vakuumdruck zu erreichen.

Bzgl. der Variation der Wärmeleitfähigkeit gibt es bis auf die sehr dünne Kupferschicht keinerlei Beschränkungen. Folgende Werkstoffe stehen zur Auswahl:

- Kupfer mit $\lambda = 400 \text{ W*m/K}$
- Aluminiumlegierung (3.3547) mit $\lambda = 110 \text{ W*m/K}$
- Edelstahl (1.4301) mit $\lambda = 15 \text{ W*m/K}$
- glasfaserverstärkter Kunststoff mit $\lambda = 0,3 \text{ W*m/K}^1$

Da primär die Wärmeleitfähigkeit entscheidend ist und Kupfer und Aluminium zu hohe Wärmeleitfähigkeiten besitzen, kommen nur Edelstahl und glasfaserverstärkter Kunststoff in Frage. Dabei ergeben sich folgende Variationen:

1. ein Hohlleiter aus glasfaserverstärktem Kunststoff, in dem sich eine sehr dünne Kupferschicht als Wellenleiter befindet oder
2. ein Hohlleiter aus Edelstahl mit einer sehr dünnen Wandstärke ($t=0,25\text{mm}$), in dem sich eine sehr dünne Kupferschicht als Wellenleiter befindet

Eine weitere Variation ist bereits in Kapitel 3.2 erwähnt worden: der Thermo-Choke, der aufgrund eines kleinen Spalts die Wärmeübertragung unterbricht. Bei dem Thermo-Choke wird jedoch über die Distanzhülse noch Wärme geleitet und über den Spalt kann noch Wärme mittels Strahlung übergehen. Als weitere Variation ergibt sich somit also:

3. ein Thermo-Choke, eine Eigenkonstruktion des MPIfR²

Das Zwischen-Schalten der 70 Kelvin Stufe des Refrigerators ist keine direkte Verkleinerung der Wärmeübertragung, bewirkt jedoch eine Verringerung des Wärmestroms auf den 15 Kelvin kalten Verstärker. Das Zwischen-Schalten ist möglich, da die 70 Kelvin Stufe des Refrigerators eine wesentlich höhere Leistung besitzt als die 15 Kelvin Stufe. Man kann sagen, dass die 70 Kelvin Stufe des Refrigerators den Wärmestrom von der 300 Kelvin warmen Vakuumbehälterwand auf den 15 Kelvin kalten Verstärker abfängt. Daraus ergibt sich folgende Variation:

4. Abfangen der Wärmeübertragung durch die 70 Kelvin Stufe des Refrigerators

¹ Der Wert entspricht einem glasfaserverstärkten Kunststoff mit 10% Faseranteil (90% Harz),
DIN Bezeichnung: EP GC 201

² Abkürzung für: Max-Planck-Institut für Radioastronomie

4.1.2 Wärmeübertragung durch Leiten zwischen den 70 Kelvin Empfangskomponenten bzw. dem Horn und den 15 Kelvin Empfangskomponenten

Da zwischen den 70 Kelvin Empfangskomponenten bzw. dem Horn und den 15 Kelvin Empfangskomponenten ebenfalls ein Hohlleiter als Wärmeüberträger zwischen den Temperaturzonen eingesetzt wird, können hier fast die gleichen Lösungsvarianten verwendet werden wie im vorherigen Kapitel. Lediglich Variation 4 ist hier nicht möglich, da die 70 Kelvin Stufe des Refrigerators hier bereits an die 70 Kelvin Empfangskomponenten bzw. das Horn angeschlossen ist.

4.2 Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Konvektion

Die Lösung für die Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Konvektion ist einfach, da sie bereits durch die Anforderungsliste vorgegeben wird. Sie liegt in einem Hochvakuum.

Um ein Vakuum zu erzeugen, muss ein geschlossener Raum geschaffen werden. Daraus folgt die Notwendigkeit zur Konstruktion eines Vakuumbehälters, für den im nächsten Kapitel Lösungsvarianten erarbeitet werden.

4.2.1 Konstruktion des Vakuumbehälters

Bei der Lösungsfindung in Bezug auf den Vakuumbehälter wurde das CAD früh mit eingebunden, da die Form und die Dimension des Vakuumbehälters von seinem Innenleben abhängen. Dabei prägt die Anordnung der Hörner die Form des Vakuumbehälters. Das Resultat bzgl. der Anordnung der Hörner ist eine hexagonale Form des Hornpakets, die in Abbildung 12 zu sehen ist.

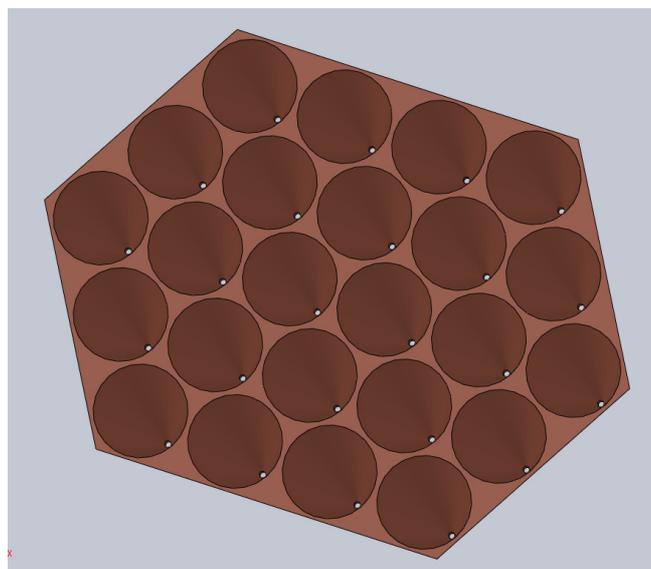


Abbildung 12 Hornpaket
 Quelle:eigene Abbildung

So kommen zur Variation der Außenwand des Vakuumbehälters entweder ebenfalls eine hexagonale Form oder eine runde Form in Frage, da diese der hexagonalen Form am nächsten kommt (siehe Abbildung 13). Eine annähernd gleiche Form des Hornpakets und der Außenwand des Vakuumbehälters ist zur Erreichung einer geringen Wandfläche maßgeblich, die wiederum ausschlaggebend für eine geringe Abpumpzeit ist, da die Abpumpzeit zum größten Teil von der Oberflächenentleerung abhängt (siehe Kapitel 2.4.1). Eine geringere Wandfläche wirkt sich zusätzlich positiv auf das Gewicht aus.

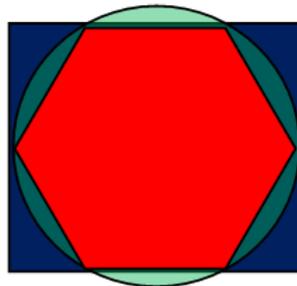


Abbildung 13 Veranschaulichung der Varianten der Außenwand des Vakuumbehälters
Quelle:eigene Abbildung

Bei der Konstruktion des Vakuumbehälters müssen neben den Variationen der Form der Mantelfläche außerdem Varianten für die Ober- und Unterseite erstellt werden. Dabei ist die Oberseite die Hornseite, also die Seite, wo die elektromagnetischen Wellen einfallen. Daher muss dort ein Werkstoff verwendet werden, der einerseits elektromagnetische Wellen ohne große Verluste durchlässt und andererseits eine genügend hohe Vakuumdichtigkeit aufweist. Die Literatur- und Internetrecherchen ergaben ein großes Spektrum an Möglichkeiten, jedoch sind bei diesen Möglichkeiten die Verluste beim Durchdringen der elektromagnetischen Wellen für die Radioastronomie zu hoch. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Recherche hauptsächlich im Bereich der Radartechnik von Autos oder Flugzeugen stattfand und dort die gesendeten und empfangenen Wellen eine wesentlich höhere Intensität besitzen, sodass dort gewisse Verluste in Kauf genommen werden können. Schließlich bleibt als Lösung nur die bereits vom MPIfR verwendete Mylarfolie, eine Kunststofffolie, die sich in vielen Kryostaten bewährt hat.

Eine weitere Anforderung an den Vakuumbehälter liegt darin, dass an der Unterseite des Vakuumbehälters ein Montage deckel für jede Empfangseinheit vorhanden sein muss, an dem die Ausgänge der Hohlleiter und die Anschlüsse der elektrischen Leitungen heraustreten. Im Folgenden werden Variationen des Materials und der Struktur des unteren Deckels erarbeitet.

Bei den Materialien, die für den Deckel bzw. den Vakuumbehälter eingesetzt werden sollen, spielen folgende Faktoren eine Rolle:

- die Dichte,
- das Elastizitätsmodul,
- die Bearbeitungseigenschaften (z.B. Zerspanbarkeit und Schweißbarkeit),
- die Permeation sowie
- die Oberflächeneigenschaften, die durch Behandlung erreichbar sind.

Die Dichte und das Elastizitätsmodul spielen eine Rolle bei dem Gewicht des Vakuumbehälters. Die Abhängigkeit der Dichte vom Gewicht ergibt sich über das Volumen, da sich das Gewicht aus Dichte mal Volumen errechnen lässt. Bei dem Elastizitätsmodul gibt es keine direkte Abhängigkeit vom Gewicht, sondern es ist über die Biegesteifigkeit mit dem Flächenträgheitsmoment verbunden. Dabei ist das Flächenträgheitsmoment von den Abmaßen des Profils abhängig. Wie in Abbildung 14 bei dem Beispiel des einseitig eingespannten Balkens erkennbar, ist bei gleichbleibender Durchbiegung f , Länge l und Kraft F durch eine höheres Elastizitätsmodul ein geringeres Flächenträgheitsmoment I notwendig.

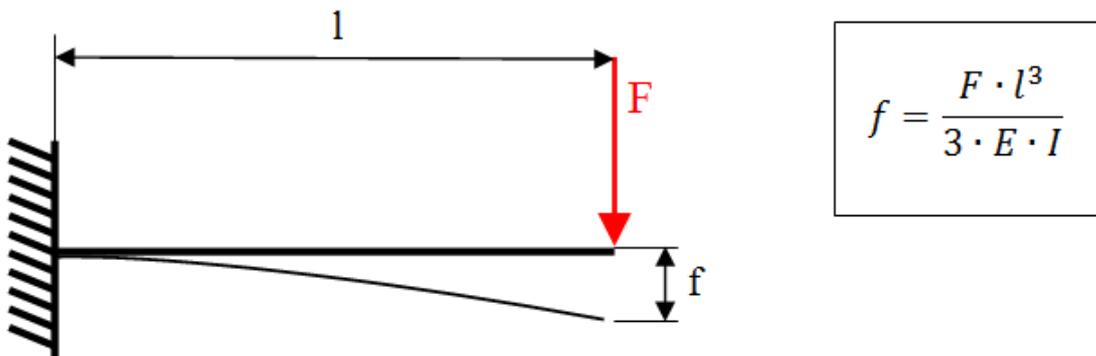


Abbildung 14 Einseitig eingespannter Balken
Quelle:eigene Abbildung

Das Flächenträgheitsmoment hängt zum größten Teil vom Profil des Materials ab. Um bei einem rechteckigen Profil das Flächenträgheitsmoment zu verdreifachen, muss die Fläche um 44% vergrößert werden; bei einem Doppel-T-Profil hingegen im optimalen Fall nur um 30%. Dieses Beispiel zeigt das ungefähre Verhältnis von Stahl mit einem Elastizitätsmodul von 210.000 N/mm^2 zu einer Aluminiumlegierung mit 71.000 N/mm^2 . Dabei hat Aluminium eine Dichte von $2,66 \text{ g/cm}^3$ und Stahl eine fast dreimal so hohe Dichte von $7,6 \text{ g/cm}^3$. Da zum Ausgleich der Biegesteifigkeit des schlechteren Elastizitätsmoduls nur ein Bruchteil mehr an Fläche und somit auch an Volumen benötigt wird, ist Aluminium zur Gewichtseinsparung nominal besser geeignet. Der prozentuale Mehranteil des Volumens kommt zum Großteil durch die größere Höhe des Profils zu Stande, was einen größeren Bauraum¹ in Anspruch nehmen würde.

¹ Der Bauraum wird durch die äußeren Abmaße des Bauteils bestimmt.

Ein weiterer Punkt bei der Wahl des Materials sind die Bearbeitungseigenschaften, die die Konstruktion insbesondere bei größeren Bauteilen maßgeblich beeinflussen. Dies liegt daran, dass es bei größeren Bauteilen aus materialwirtschaftlichen Gründen zu teuer ist, die Konstruktion aus einem Block zu fertigen. Stattdessen wird das Bauteil aus mehreren Einzelteilen gefertigt und zusammengefügt. Erst ab einer bestimmten Stückzahl ist es wirtschaftlich, das Bauteil zu gießen oder zu schmieden. Da dieser Kryostat ein Einzelstück wird, kommen eine Gusskonstruktion oder eine Konstruktion aus einem geschmiedeten Bauteil nicht in Frage.

Bei der Erstellung eines Bauteils aus mehreren Teilen - hier spricht man von einer Baugruppe - werden zu konstruierende Verbindungselemente benötigt. Dabei unterscheidet man lösbare und unlösbare Verbindungselemente. Eine lösbare Verbindung ist definiert als eine Verbindung, die ohne Materialzerstörung wieder trennbar ist, wie z.B. eine Schraubverbindung. Eine unlösbare Verbindung entsteht beispielsweise durch Schweißen, Kleben oder Nieten. Da ein Wunsch in der Anforderungsliste ist, so viel wie möglich in der eigenen Werkstatt zu fertigen, werden Verbindungselemente wie

- Schraubverbindungen,
- Schweißverbindungen und
- Klebeverbindungen

bevorzugt.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass es im MPIfR keine Seltenheit ist, Bauteile aus einem Block zu fertigen, deren Volumen nur noch 30% des Ausgangsvolumens des Blocks beträgt.

Bei der Permeation und den Oberflächeneigenschaften spielen, wie schon in Kapitel 2.4.1 aufgeführt, die Vakuumerzeugung und das Aufrechterhalten des Vakuumdrucks eine Rolle. Zusätzlich ist bei den Oberflächeneigenschaften der Einfluss der Wärmeübertragung durch Strahlung relevant, denn, wie bereits in Kapitel 2.3.1 erläutert, hängt die Emissionszahl von dem Material bzw. der Oberfläche ab. Dabei muss bei der Wahl des Materials und der eventuellen Oberflächenbehandlung auf die Beständigkeit der Oberflächenqualität geachtet werden. Insbesondere durch Oxidation ändert sich die Oberflächenqualität der Materialien negativ. Dadurch verändern sich wiederum die Vakuumeigenschaften und die Wärmeübertragung durch Strahlung.

Wie in Kapitel 3.3 erläutert, müssen bei der Variation der Struktur des Deckels Montageöffnungen für den Wechsel der Verstärker vorgesehen werden. Es ist jeweils eine Montageöffnung pro Horn, also pro Verstärkerpaar, vorzusehen. Da der Aufbau der Empfangskomponenten gerade aus dem Horn hinaus verläuft, entspricht die Anordnung der Montageöffnungen der Hörneranordnung. Somit ergibt sich folgender Grundriss des Deckels:

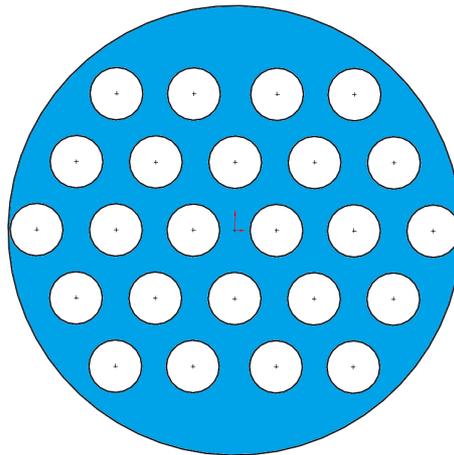


Abbildung 15 Grundriss des unteren Deckels
 Quelle:eigene Abbildung

Da der Grundriss somit vorgegeben ist, kann nur noch die Form des Deckels in der Tiefe variiert werden. Dabei kann entweder eine flache Platte oder eine gewölbte Platte genutzt werden. Beide Varianten sind in Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 16 Varianten der Deckelform
 Quelle:eigene Abbildung

4.3 Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung

Bei den Lösungsvarianten für die Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung wird zwischen den einzelnen Stellen im Kryostaten differenziert, an denen Wärme durch Strahlung übertragen wird, da die Lösungen für die einzelnen Stellen unterschiedlichen Anforderungen entsprechen müssen. Dabei gilt für alle Stellen die bereits in Kapitel 2.3.1 erläuterte mathematische Formel zur Wärmeübertragung durch Strahlung, nach der folgende Größen zur Verkleinerung des Wärmestroms wie beschrieben verändert werden können:

- die Emissionszahlen sind zu verkleinern
- die Temperatur T_1 der Fläche A_1 ist zu verkleinern und/oder
- die Temperatur T_2 der Fläche A_2 ist zu vergrößern

Die Emissionszahlen sind von den Oberflächen der Stellen, an denen Wärme durch Strahlung übertragen wird, abhängig. Die Oberfläche wiederum ist vom Material und der Oberflächenbehandlung abhängig. Daher liegen die Variationsmöglichkeiten der Emissionszahlen in der Variation des Materials und der Oberflächenbehandlung.

Tabelle 4 zeigt einige Emissionswerte, die in drei Oberflächentemperaturen unterteilt werden. Dabei lässt sich festhalten, dass die Emissionswerte mit sinkender Temperatur geringer, also besser werden.

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 verkupferten 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	

Tabelle 4 Emissionswerte bei verschiedenen Temperaturen
Quelle:[9]

Mit Hilfe des 70 Kelvin Schildes wird bereits standardmäßig die Temperatur T_2 vergrößert bzw. erhöht. So strahlt die Wärme des 300 Kelvin warmen Vakuumbehälters auf das 70 Kelvin warme Schild statt auf die 15 Kelvin warmen Empfangskomponenten, wie es ohne das 70 Kelvin Schild wäre. Durch den Einsatz des 70 Kelvin Schildes wird außerdem die Temperatur T_1 gesenkt, da die 15 Kelvin warmen Empfangskomponenten nicht mehr von dem 300 Kelvin warmen Vakuumbehälter angestrahlt werden, sondern von dem 70 Kelvin

warmen Schild. So ist die Vergrößerung der Temperatur T_2 immer gleichzeitig mit einer Verkleinerung der Temperatur T_1 verbunden, wenn ein weiteres Reflektionsschild, wie z.B. ein 70 Kelvin Schild, eingesetzt wird.

Dabei muss zur Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung nicht unbedingt ein gekühltes Reflektionsschild (70 Kelvin Schild) benutzt werden. Wird ein Reflektionsschild zwischen zwei sich anstrahlenden Flächen positioniert und die Wärmeübertragung durch Leiten in der Aufhängung des Reflektionsschildes vernachlässigt, so stellt sich bei dem Reflektionsschild eine Temperatur ein, die zwischen den beiden Flächentemperaturen liegt. Die Temperatur des Reflektionsschildes hängt zusätzlich von den Emissionswerten der bei der Wärmeübertragung beteiligten Flächen ab.

Eine weitere Methode, um die Temperaturen positiv zu verändern, ist das Verkleinern der Wärmeübertragung durch Leiten. Eine auf dieser Methode basierende Konstruktion wurde bereits in Kapitel 3.2 aufgezeigt. Die Temperatur wurde über einen Dämmschaum, der innenseitig am Vakuumfenster anliegt, gesenkt, um die reguläre Wärmestrahlung auf die Hörner von 300 Kelvin auf 210 Kelvin (Angabe aus einem Versuch mit dem Dämmschaum) zu verkleinern. Dabei ist herauszustellen, dass die Temperatur mit der vierten Potenz in die Wärmeübertragung durch Strahlung eingeht.

4.3.1 Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen der 300 Kelvin Behälterwand und dem 70 Kelvin Schild

Bei der Wärmeübertragung zwischen der 300 Kelvin Behälterwand und dem 70 Kelvin Schild gibt es sowohl Materialvorgaben an die Behälterwand als auch an das 70 Kelvin Schild. Dabei kann die Vakuumbehälterwand aus einer Aluminiumlegierung oder aus Edelstahl bestehen (siehe Kapitel 4.2.1 Konstruktion des Vakuumbehälters).

Bei der Materialwahl für den Vakuumbehälter muss für das Lösungskonzept ein Kompromiss zwischen dem optimalen Emissionswert und den optimalen Eigenschaften gefunden werden. Daher wird bei der Verbesserung der Emissionswerte kein spezielles Material angegeben. Bei dem 70 Kelvin Schild muss ein gut wärmeleitender Werkstoff verwendet werden. Hier ist Kupfer die optimale Lösung.

Im Folgenden werden die Lösungsvarianten zur Erreichung eines besseren Emissionswertes numerisch aufgezählt:

1. durch elektrolytisches oder mechanisches Polieren der Oberfläche des Vakuumbehälters
2. durch elektrolytisches Polieren der Oberfläche des 70 Kelvin Schildes
3. durch ein zusätzliche Reflektionsschild
4. durch zwei zusätzliche Reflektionsschilde

5. durch Versilbern oder Vergolden und Polieren des 70 Kelvin Schildes
6. Keine zusätzliche Maßnahme

4.3.2 Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen dem 70 Kelvin Schild und den 15 Kelvin Empfangskomponenten

Als Lösungsvarianten zur Erreichung eines besseren Emissionswertes bei der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen dem 70 Kelvin Schild und den 15 Kelvin Empfangskomponenten können die gleichen wie bei der im vorherigen Unterkapitel beschriebenen Wärmeübertragung zwischen der 300 Kelvin Behälterwand und dem 70 Kelvin Schild genutzt werden:

1. durch elektrolytisches Polieren der Oberfläche des 70 Kelvin Schildes
2. durch elektrolytisches Polieren der Oberfläche des 15 Kelvin Schildes
3. durch ein zusätzliche Reflektionsschild
4. durch zwei zusätzliche Reflektionsschilde
5. durch Versilbern oder Vergolden und Polieren des 70 Kelvin Schildes
6. Keine zusätzliche Maßnahme

4.3.3 Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen dem 300 Kelvin Vakuumfenster und dem 70 Kelvin Hornpaket

An das Material des Vakuumfensters werden, wie schon in Kapitel 4.2.1 beschrieben, spezielle Anforderungen gestellt. Eine dieser Vorgaben ist eine sehr geringe Verlustleistung der elektromagnetischen Wellen bei ihrer Bewegung durch das Material.

Da die Hörner eine Trichterform besitzen und in der Mantelinnenfläche mit Rippen versehen sind, entsteht in dem Horn eine mehrfache Reflektion der Wärmestrahlen, die ihren Ursprung im 300 Kelvin Vakuumfenster haben. Durch die mehrfache Reflektion werden die Wärmestrahlen in dem Horn fast vollständig absorbiert, ähnlich wie bei einer schwarzen Oberfläche, die eine Emissionszahl von eins besitzt¹. Daher wird bei dem Horn ebenfalls eine Emissionszahl von eins angenommen.

In Bezug auf die bereits erwähnte, standardmäßig als Vakuumfenster genutzte Mylarfolie sind keine genauen Daten über die Emissionswerte bekannt. Daher wird der Worst-Case Fall² angenommen, also ebenfalls eine Emissionszahl von eins.

Dadurch, dass bei beiden Flächen ein Emissionswert von eins vorliegt bzw. angenommen wird, liegt zwischen der 300 Kelvin Behälterwand und dem 70 Kelvin Schild die Stelle, wo die meiste Wärme übergeht. Bis jetzt ist der Dämmschaum die einzige Lösung zur Verkleinerung des Wärmeübergangs.

¹ Siehe Kapitel 2.3.1

² Der Worst-Case Fall ist der schlechteste bzw. ungünstigste (anzunehmende) Fall.

Bei Recherchen ist der Verfasser dieser Diplomarbeit über RF¹-Komponenten gestoßen, die aus Folien mit sehr dünnen Metallschichten (Schichtdicken im Mikrometer-Bereich) bestehen. Hierbei wird mit der Dicke der Folie und der Metallschichten der durchlässige Wellenlängenbereich vorgegeben. Die Bestimmung der Dicken folgt aus sehr komplexen Berechnungen und aufwändigen Versuchen. Da eine Mylarfolie mit einer dünnen Metallschicht genauso aufgebaut ist wie eine RF-Komponente, können die Emissionswerte aus Tabelle 4 als Anhaltspunkte für die Emissionswerte der RF-Komponenten dienen. Der Vergleich der beim Vakuumfenster angenommen Emissionszahl von eins mit der Emissionszahl einer metallbeschichteten Folie von 0,02 zeigt, dass die Wärmeübertragung bei der metallbeschichteten Folie lediglich ein Fünfzigstel betragen würde. Jedoch ist der Frequenzbereich, in dem die Folie mit Metallschicht die elektromagnetischen Wellen verlustarm durchlässt, zu klein. So ist es nicht möglich eine Folie mit einer Metallschicht zu erstellen, die über den gesamten Frequenzbereich von 33GHz bis 50GHz eine konstant geringe Verlustrate der elektromagnetischen Wellen aufweist.

Aus diesem Grund gibt es nur eine Methode, um die Wärmeübertragung durch Strahlung zu verkleinern, nämlich einen Dämmschaum im Vakuum zu nutzen, der vor dem Vakuumfenster positioniert wird und zur Verkleinerung der Temperatur T_1 dient.

4.4 Längenausgleich

Der Längenausgleich ist in Kapitel 3.4 bereits kurz erläutert worden. Dabei entsteht durch die Temperaturveränderung in Folge des Kühlens von Raumtemperatur (300 Kelvin) auf 15 Kelvin bzw. 70 Kelvin eine Temperatur-Längenausdehnung bzw. -schrumpfung. Diese macht einen Längenausgleich erforderlich, da durch das Nicht-Ausgleichen der Längenveränderung sonst Kräfte entstehen würden, die auf die Empfangskomponenten einwirken.

Der Längenausgleich kann mechanisch oder thermisch geschehen. Dabei kann der thermische Ausgleich einmal durch ein Material vorgenommen werden, welches sich beim Kühlen ausdehnt, z.B. Aramidfasern mit einem Ausdehnungskoeffizienten von $-4 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Alternativ kann als Längenausgleich ein Werkstoff verwendet werden, der einen hohen Ausdehnungskoeffizienten besitzt und den Längenausgleich durch Erwärmen des Werkstoffes gewährleistet.

Die soeben aufgeführten thermischen Ausgleichsmöglichkeiten sind jedoch nicht praktikabel. Einerseits ist das Erwärmen in einem System, was gekühlt werden soll, kontraproduktiv. Bei dem Ausgleich über einen Werkstoff mit negativem Ausdehnungskoeffizienten ist der Ausdehnungskoeffizient von Kupfer, woraus die Empfangskomponenten und die Hörner hauptsächlich bestehen, mit $16 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ um ein Vielfaches größer als der

¹ RF, kurz für Radio Frequency, ist die englische Bezeichnung für Hochfrequenz und Ultrahochfrequenz sowie das Radiofrequenzband im Speziellen.

Ausdehnungskoeffizient von Aramidfaser. Daher müsste der Werkstoff zum Ausgleich um ein Vielfaches länger sein als die Empfangskomponenten und die Hörner. Hinzu käme ein zusätzlicher Kühlaufwand.

Aus diesem Grund wird nach einer mechanischen Lösung für den Längenausgleich gesucht. Dabei werden mittels einer Variantenkonstruktion die Variantenmerkmale Form, Lage, Größe und Anzahl variiert. Auf diese Weise sollen neue Lösungsansätze gefunden werden, aus denen Lösungen abgeleitet werden können.

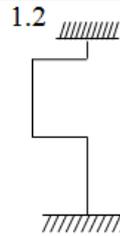
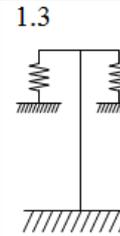
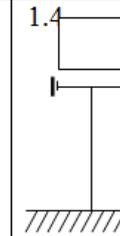
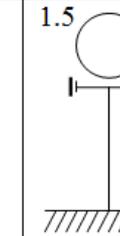
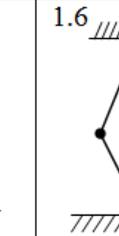
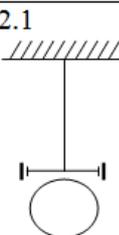
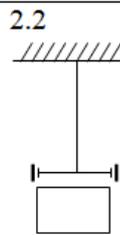
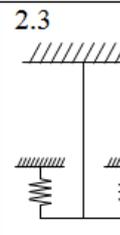
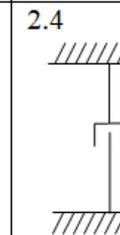
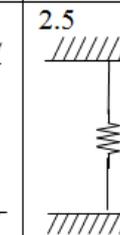
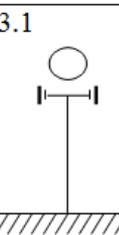
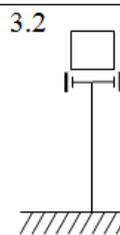
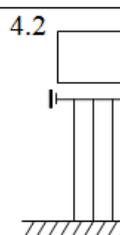
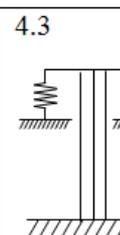
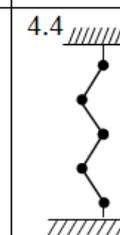
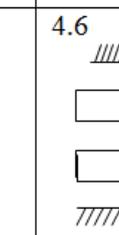
Form	1.1 	1.2 	1.3 	1.4 	1.5 	1.6 
Lage	2.1 	2.2 	2.3 	2.4 	2.5 	
Größe	3.1 	3.2 	3.3 			
Anzahl	4.1 	4.2 	4.3 	4.4 	4.5 	4.6 

Tabelle 5 Varianten des Längenausgleichs
Quelle: eigene Tabelle

In Tabelle 5 sind die Lösungsansätze aufgelistet, die zur Ableitung der Lösungen dienen. Dabei bedeuten mehrere diagonale Striche nebeneinander eine feste Einspannung. Diese taucht in jedem Feld mindestens einmal auf. Die langen Striche bzw. die Kreisbögen nach den festen Einspannungen stehen vereinfacht für die Hohlleiter, die Empfangskomponenten und die Hörner. Dabei steht ein Linienzug für eine Empfangseinheit, die ein Horn mit den zugehörigen Empfangskomponenten und Hohlleitern beinhaltet. Somit ist in den Feldern 4.2

und 4.3 eine Variation der Anzahl der Empfangseinheiten, die an einem Längenausgleich angeschlossen sind, zu erkennen.

Bei der Variation der Form in den Feldern 1.1, 1.2 und 1.3 verläuft der Längenausgleich über eine elastische Verformung. Dabei sind in den Feldern 1.1 und 1.2 die Hohlleiter so durch den Dewar verlegt, dass die Hohlleiterstruktur wie ein Federelement wirkt. Dies spiegelt das Prinzip wider, das bisher in fast allen Kryostaten angewendet wurde. Bei dieser Lösung entsteht immer eine Kraft, hervorgerufen durch die elastische Verformung bei der Temperaturlängenausdehnung, die auf die Empfangskomponenten wirkt. Aus diesem Grund entsprechen diese Lösungen nicht den vorliegenden Anforderungen und können somit nicht verwendet werden.

In Feld 1.3 gibt es ein zusätzliches Federelement, das eine Temperaturlängenausdehnung bzw. eine -verschiebung zulässt. Solch eine Variante wird standardmäßig in der Vakuumtechnik verbaut. Dabei ist das Federelement ein Membranbalg, wie in den beiden linken Bildern in Abbildung 17 dargestellt. Der Membranbalg - wie rechts in Abbildung 17 erkennbar - schließt zusammen mit dem Vakuumbehälter das Vakuum ein, sodass der Atmosphärendruck von außen sowohl auf dem Vakuumbehälter als auch auf dem Membranbalg lastet.

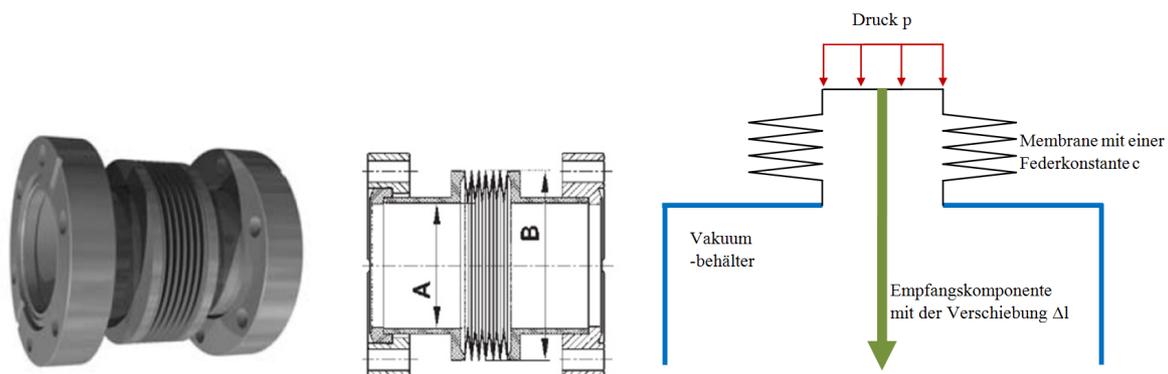


Abbildung 17 linke und mittlere Abbildung: Membranbalg von Vacom, Quelle: Vacom;
rechte Abbildung: Einbaulage des Membranbalgs Quelle:eigene Abbildung

Der Druck p , der rechts in Abbildung 17 nur für die Fläche des Membranbalgdeckels eingezeichnet wurde, ist der atmosphärische Druck. Mit der Fläche des Membranbalgdeckels A und dem Druck p entsteht eine Kraft F . Eine weitere Kraft resultiert aus der Verschiebung und der Federkonstante des Membranbalgs. Die Kräfte aus dem Druck und der Fläche wirken der Kraft aus der Verschiebung und der Federkonstante der Membran entgegen. Um keine Kräfte auf die Empfangskomponenten zu erhalten, müssen diese beiden Kräfte gleich groß sein. Wenn die Verschiebung, die Federkonstante der Membran und der Druck bekannt sind, kann mit der passenden Fläche des Membranbalgdeckels das Kräftegleichgewicht geschaffen werden. Dazu können folgende Formeln genutzt werden:

$$F_{Feder} = c * \Delta l$$

$$F_{Druck} = p * A$$

$$F_{Feder} = F_{Druck}$$

$$A = \frac{c * \Delta l}{p}$$

Wie soeben erwähnt kann das Kräftegleichgewicht nur geschaffen werden, wenn unter anderem die Verschiebung bekannt ist. Die Verschiebung bzw. die Temperaturlängenausdehnung ist von der Temperatur abhängig. Somit setzt eine genaue Bestimmung der Verschiebung ein exaktes Temperaturbild der Empfangskomponenten und des Hornpakets voraus. Hinzu kommt, dass durch unvermeidliche Maßungenaugigkeiten bei der Fertigung der Empfängerkomponenten und des Vakuumbehälters eine zusätzliche Verschiebung zur Stande kommt, durch die sich eine andere Gesamtverschiebung einstellt. In Folge dessen ist das Kräftegleichgewicht nicht mehr hergestellt, da die Verschiebung mit der Federkonstante der Membran eine unterschiedlich große Kraft hervorruft. Somit kann nicht garantiert werden, dass keine Kräfte auf die Empfangskomponenten wirken.

Feld 1.6 zeigt eine Lösung durch Gelenke. Hierdurch würde die beidseitig fest eingespannte Empfängereinheit bei einer Temperaturlängenausdehnung über die Gelenkpunkte wegnicken. Man kann sagen, dass die Empfangseinheit nicht mehr statisch überbestimmt wäre.

In der Zeile der Variation der Lage findet der Längenausgleich in Feld 2.1, 2.2 und 2.3 durch die Verschiebung des Horns statt. Da eine Verschiebung der Hörner wegen der Anforderung, dass ihre Position genau sein muss, nicht möglich, sind diese Lösungsvarianten nicht nutzbar.

In Feld 2.4 handelt es sich um eine Änderung der Lage des Längenausgleichs von Feld 1.4 und 1.5. Für den Längenausgleich dieser Variante können zwei Hohlleiter wie eine Hülse ineinandergesteckt und verschoben werden. Dabei ist die Variation zwischen rundem oder rechteckigem Hohlleiterform von der Lage der Hülse abhängig. Dabei ist bis zur Polarisationsweiche eine runde Hohlleiterform und ab der Polarisationsweiche eine rechteckige Hohlleiterform vorhanden. Da ab der Polarisationsweiche zwei Hohlleiter pro Empfangseinheit vorgesehen sind und eine runde Hohlleiterform einfacher zu fertigen ist als eine rechteckige, kommen nur die Positionen zwischen Horn und Phasenschieber sowie Phasenschieber und Polarisationsweiche für den Längenausgleich in Frage. Der Aufbau der Hülse entspricht dem des Thermo-Chokes, außer, dass der Spalt nicht an den Stirnflächen liegt, sondern an den Außen- bzw. Innenflächen des Rundhohlleiters (siehe Abbildung 18). Dabei dient der schwarze Ring in Abbildung 18 als Führungsring, der für ein gleichmäßiges Spaltmaß sorgen soll. Zusätzlich wird wie beim Thermo-Choke auch die Wärmeübertragung

durch Leiten verkleinert, da das gleiche Prinzip angewendet wird. Diese Variante hätte dem zu Folge sogar einen doppelten positiven Effekt.

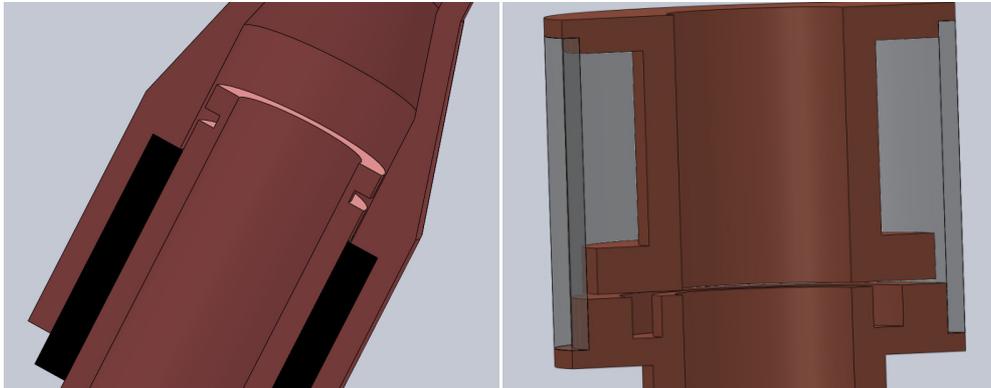


Abbildung 18 Hülsevariante beim Rundhohlleiter, analog zum Thermo-Choke des Rundhohlleiters
 Quelle:eigene Abbildung

Bei einem Meeting im MPIfR wurde bekannt, dass das soeben beschriebene Prinzip bereits von einem radioastronomischen Institut in Europa angewendet wurde. Dabei gab es erhebliche Probleme, da der Führungsring aus einem schlecht leitenden Kunststoff bestand und dieser einen vielfach höheren Ausdehnungskoeffizienten besitzt als das zum Leiten der elektromagnetischen Wellen verwendete Kupfer. Dadurch ändern sich beim Kühlen die Abmaße unterschiedlich stark und das geforderte Spaltmaß kann somit nicht mehr eingehalten werden. Die Folge dessen war, dass die elektromagnetischen Wellen nicht durch den Hohlleiter gingen, sondern aus der Hülse-Konstruktion traten und damit in den Dewar gelangten. Die Folgen bei einem Mulihorn wären verheerend, da dort die ausgetretenen Empfangssignale die anderen Empfangssignale beeinträchtigen würden und dadurch das Bild verfälscht würde. Aus diesem Grund wird diese Lösungsvariante ausgeschlossen und nicht weiter behandelt.

In Feld 2.5 der Tabelle 5 wird mittels eines elastischen Hohlleiters der Längenausgleich angedeutet. Dabei ist hier nicht wie in den Feldern 1.1 und 1.2 die Elastizität dadurch gegeben, dass die Hohlleiter so durch den Dewar geführt werden, dass sie wie eine Feder wirken. Vielmehr ist hier der Hohlleiter selbst wie eine Feder aufgebaut, ähnlich einer Ziehharmonika (siehe Abbildung 19). Diese Bauform ist als Kaufteil zu erwerben, jedoch wird diese Lösung wegen der zu hohen Verlusten, die aus der Form des Hohlleiters resultieren, als nicht relevant ausgeschlossen.



Abbildung 19 Flexible Hohlleiter der Firma MEGA Industries
 Quelle:Firma MEGA Industries

In Feld 1.4 und 1.5 ist das Prinzip einer Hülse dargestellt, wobei der Unterschied zwischen den beiden Feldern lediglich in der Form der Hülse liegt. Im Gegensatz zu Feld 2.4 findet die Verschiebung bei Feld 1.4 und 1.5 nicht durch zwei ineinandergesteckte verschiebbare Hohlleiter statt. Stattdessen wird der Hohlleiter mittels einer verschiebbaren Hohlleiterdurchführung durch den Montage- deckel geführt. Vergleichbar mit der Lösung auf Grundlage von Feld 1.3, bei der der atmosphärische Druck auf den Membranbalgdeckel wirkt, wirkt bei den Lösungen in Feld 1.4 und 1.5 der atmosphärische Druck auf die verschiebbare Hohlleiterdurchführung (siehe Abbildung 20). Es entsteht also auch hier eine Kraft aus der zylindrischen Fläche der verschiebbaren Hohlleiterdurchführung und dem Druck. Um auch hier ein Kräftegleichgewicht herzustellen, muss eine entsprechende Gegenkraft erzeugt werden, vergleichbar mit der Kraft aus Federkonstante und Verschiebung in der Lösung von Feld 1.3.

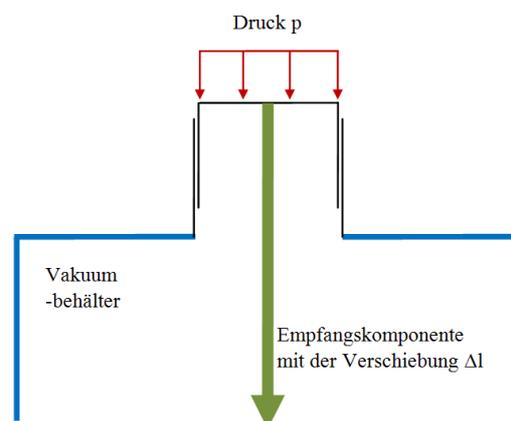


Abbildung 20 Skizze des Hülseprinzips
 Quelle:eigene Abbildung

Die Kraft, die die verschiebbare Hohlleiterdurchführung in den Dewar und damit auf die Empfangskomponenten drückt, könnte mit einer Kraft, die aus einer Fläche eines zusätzlichen Zylinders und dem Atmosphärendruck resultiert, mittels eines Hebels ausgeglichen werden.

Dabei dient der Hebel in erster Linie der Umlenkung der Gegenkraft. Der Hebel kann aber auch als Kraftverstärker dienen, indem das Hebelverhältnis von l_1 zu l_2 verändert wird (siehe Abbildung 21).

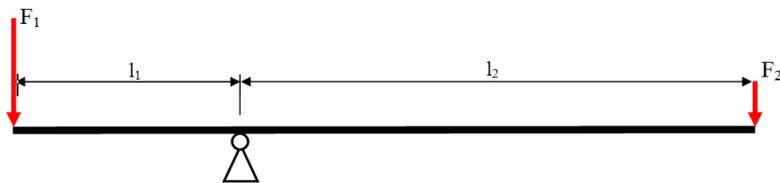


Abbildung 21 Hebel
 Quelle:eigene Abbildung

Aufgrund der Kraftverstärkung des Hebels kann die Gegenkraft um das Hebelverhältnis verkleinert werden, was gleichzeitig eine kleinere Fläche des Zylinders, der die Gegenkraft erzeugt, zur Folge hat.

Bei dem Längenausgleich nach dem Hülsenprinzip mit einer Gegenkraft, bei dem eine Kraft aus einem zusätzlichen Zylinder über einen Hebel umgeleitet wird, haben weder die Verschiebung noch der Druck einen Einfluss auf das Kräftegleichgewicht. Das Kräftegleichgewicht bleibt erhalten, da sich bei einer Druckänderung die beiden Kräfte aus der verschiebbaren Hohlleiterdurchführung und dem zusätzlichen Zylinder gleich groß verändern. Im Folgenden wird die Unabhängigkeit des Kräfteausgleichs vom Druck und der Verschiebung an Hand von einigen Formeln aufgezeigt:

$$F_{H.Durchf.} = \frac{\pi \cdot d_{H.Durchf.}^2}{4} p$$

$$F_{Ausgl.} = \frac{\pi \cdot d_{Ausgl.}^2}{4} p$$

$$\sum M = 0 = F_{H.Durchf.} \cdot l_1 - F_{Ausgl.} \cdot l_2$$

$$\frac{\pi \cdot d_{H.Durchf.}^2}{4} p \cdot l_1 = \frac{\pi \cdot d_{Ausgl.}^2}{4} p \cdot l_2$$

$$d_{H.Durchf.}^2 \cdot l_1 = d_{Ausgl.}^2 \cdot l_2$$

Wie in Feld 4.2 dargestellt, kann außerdem die Anzahl der Hohlleiter, die sich in einer verschiebbaren Hohlleiterdurchführung befinden, variiert werden. Da jede Empfangseinheit einen eigenen Montagedeckel besitzt, ist maximal die Anzahl an Hohlleitern pro Empfangseinheit möglich, die in einer verschiebbaren Hohlleiterdurchführung untergebracht werden kann. Aus diesem Grund kann die Anzahl der Hohlleiter pro verschiebbarer Hohlleiterdurchführung zwischen einem oder zwei Hohlleiter(n) variiert werden.

In Bezug auf die Anzahl der Hohlleiter in einer verschiebbaren Hohlleiterdurchführung kann zusätzlich variiert werden, ob die Gegenkraft des Zylinders für *eine* verschiebbare Hohlleiterdurchführung oder für beide verschiebbaren Hohlleiterdurchführungen verwendet wird.

5 Konzeptauswahl

Das Konzept bzw. der Vorentwurf bildet das Grundgerüst, auf dem im nächsten Schritt die Konstruktion aufbaut. Das Konzept ergibt sich aus der Wahl mindestens einer Lösungsvariante pro Einzelfunktion. Dabei ist auf die jeweiligen Anforderungen der Anforderungsliste zu achten. Bei der Wahl sollte nicht zwingend die beste Lösungsvariante gewählt werden, sondern die Lösungsvariante, die die Anforderung am ehesten erfüllt. Außerdem muss bei der Konzeptwahl auf eine Kompatibilität der einzelnen Lösungsvarianten geachtet werden.

Um eine bessere Übersicht bei der Konzeptwahl zu gewinnen, werden die Lösungsvarianten nach Funktionen geordnet in einem Morphologischen Kasten aufgelistet. Dieser ist in folgender Tabelle zu sehen.

Funktionen						
WLVz Vakuumbehälter und EmKo	1.1 Glasfaser- verstärkter Hohlleiter	1.2 Edelstahl- Hohlleiter	1.3 Thermo- Choke	1.4 Abfangen durch die 70K Stufe		
WLVz Horn bzw. 70K EmKo und 15K EmKo	2.1 Glasfaser- verstärkter Hohlleiter	2.2 Edelstahl- Hohlleiter	2.3 Thermo- Choke			
Mantelform des Vakuumbehälters	3.1 Hexagonal	3.2 Rund				
Material des Vakuumfensters	4.1 Mylarfolie					
Untere Vakuumdeckelform	5.1 Gewölbte Platte	5.2 Flache Platte				
WSVz der 300K Behälterwand und dem 70K Schild	6.1 Elektron. oder mechan. Polieren der Oberfläche des Vakuum- behälters	6.2 Elektron. Polieren der Oberfläche des 70K Schildes	6.3 <i>Ein</i> zusätzliches Reflektions- schild	6.4 <i>Zwei</i> zusätzliche Reflektions- schilde	6.5 Versilbern / Vergolden und Polieren des 70K Schildes	6.6 Keine zusätzlichen Maßnahmen

WSVz dem 70K Schild und 15K EmKo	7.1 Elektron. Polieren der Oberfläche des 70K Schildes	7.2 Elektron. Polieren der Oberfläche der 15K EmKo	7.3 <i>Ein</i> zusätzliches Reflektions-schild	7.4 <i>Zwei</i> zusätzliche Reflektions-schilde	7.5 Versilbern / Vergolden und Polieren des 70K Schildes	7.6 Keine zusätzlichen Maßnahmen
WSVz dem Sichtfenster und dem Horn	8.1 Kein Dämm-schaum	8.2 Dämm-schaum				
Längenausgleich für die Temperatur-differenzen	9.1 VHd für <i>einen</i> Hohlleiter	9.2 VHd für <i>zwei</i> Hohlleiter	9.3 GZH für <i>eine</i> VHd	9.4 GZH für <i>zwei</i> VHd		

Tabelle 6: Morphologischer Kasten
Quelle:eigene Tabelle

Abkürzungen:

VHd Verschiebbare Hohlleiterdurchführung

GZH Gegenkraft aus einem zusätzlichen Zylinder und einem Hebel

EmKo Empfangskomponenten

WSVz Wärmeübertragung durch Strahlung verkleinern zwischen

WLVz Wärmeübertragung durch Leiten verkleinern zwischen

5.1 Bestimmung des Wärmestroms der Lösungsvarianten

Um gemäß der Anforderungsliste eine passende Wahl zu treffen, ist es notwendig, eine ungefähre Abschätzung des Wärmestroms in den Dewar zu errechnen.

Als erstes sollen die Lösungsvarianten bzgl. der Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Leiten verglichen werden und zwar zwischen Vakuumbehälter und Verstärker sowie zwischen Horn bzw. 70 Kelvin Empfangskomponenten und 15 Kelvin Empfangskomponenten. Wie schon in Kapitel 4.1.1 beschrieben handelt es sich hierbei um Hohlleiter-Komponenten. Da die Längen der Hohlleiter einerseits Auswirkungen auf die Länge des Dewar haben (und daraus resultierend auf die Vakuumwandfläche sowie die Abpumpzeit) und andererseits auf sein Gewicht, ist die Länge (Distanz) des Hohlleiters bzw. Thermo-Chokes bei der Wahl des Konzepts entscheidend.

In Tabelle 7 sind die Distanzen so gewählt worden, dass sich bei den beiden Wärmeübergängen an jeder Stelle der gleiche Wärmestrom ergibt. Dabei ist der rechteckige Hohlleiter für die Wärmeübertragung zwischen der Vakuumbehälterwand und dem Verstärker und der runde Hohlleiter für die Wärmeübertragung zwischen Horn bzw. 70 Kelvin Empfangskomponente und 15 Kelvin Empfangskomponente zuständig. An dieser Stelle sei

darauf hingewiesen, dass der Wärmestrom nicht zu groß sein darf, da die Refrigeratoren nur eine gewisse Leistung erbringen können.

Da hinter dem Verstärker *zwei* Hohlleiter positioniert sind, beträgt dort - bis auf eine Ausnahme - die Anzahl der Stellen, an denen Wärme übergeht, 48 statt 24.

Da bei den Thermo-Chokes die Wärmeübertragung hauptsächlich über die Distanzhülse verläuft, wird hier auch nur diese berechnet. Dabei besteht der Unterschied zwischen den beiden in Tabelle 7 aufgelisteten Thermo-Chokes beim rechteckigen Hohlleiter darin, dass der Thermo-Choke mit einer Distanzhülse von 15mm Durchmesser nur einen Hohlleiter beinhaltet und der Thermo-Choke mit einer Distanzhülse von 40mm Durchmesser zwei Hohlleiter beinhaltet. Die Tatsache, dass der Thermo-Choke mit einer Distanzhülse von 40mm Durchmesser zwei Hohlleiter beinhaltet, ist der Grund dafür, warum dort die Anzahl der Stellen, an denen Wärme übergeht, gleich 24 ist. Bei den beiden ersten Lösungsvarianten des rechteckigen Hohlleiters entsprechen die angenommenen Abmaße denen des WR22-Hohlleiters.

	Breite / Durch- messer b/d [mm]	Höhe h [mm]	Wandstärke t [mm]	Fläche A [mm]	Wärme- leitko- effizient λ [W/K*m]	Temperatur T_1 [K]	Temperatur T_2 [K]	Distanz x [mm]	Wärme- strom Q [W]	Anzahl im Dewar	Ges. Wärme- strom Q_{Ges} [W]
rechteckiger-Hohlleiter											
GFK Hohlleiter	5,7	2,85	1	21,1	0,5	300	15	48	0,063	48	3,007
Edelstahl Hohlleiter	5,7	2,85	0,25	4,5	15	300	15	308	0,063	48	3,015
Thermo-Choke	\emptyset 40		2	128,8	0,5	300	15	146	0,126	24	3,017
Thermo-Choke	\emptyset 15		1	24,3	0,5	300	15	55	0,063	48	3,028
runder-Hohlleiter											
GFK Hohlleiter	\emptyset 8		1	13,4	0,5	70	15	29	0,013	24	0,304
Edelstahl Hohlleiter	\emptyset 8		0,25	3,2	15	70	15	210	0,013	24	0,301
Thermo-Choke	\emptyset 15		1	24,3	0,5	70	15	53	0,013	24	0,303

Tabelle 7 Vergleich der Lösungsvarianten "Wärmeübertragung durch Leiten verkleinern"
Quelle:eigene Tabelle

Bei den Lösungsvarianten bzgl. der Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen Vakuumbehälter und 70 Kelvin Schild ist der Wärmestrom das entscheidende Kriterium. Dies ist in Tabelle 8 ersichtlich. Dabei hat der Verfasser dieser Diplomarbeit zum Vergleichen der Wärmeströme eine Fläche von einem Quadratmeter gewählt.

Bei den Emissionszahlen wurde für die Außenwand der Wert 0,1 gewählt, weil dieser sowohl einer polierten Edelstahloberfläche sowie einer leicht oxidierten Aluminiumoberfläche entspricht. Für die Reflektionsschilde wurde ein Wert für eine metallbeschichtete Folie, vergleichbar mit den Werten der metallisierten Mylarfolien in Tabelle 4, angenommen. Die Emissionszahl für das 70 Kelvin Schild wurde für eine leicht oxidierte Kupferoberfläche angenommen.

	Temperatur $T_{\text{Außenwand}}$ [K]	Temperatur $T_{\text{Reflektionsschild 1}}$ [K]	Temperatur $T_{\text{Reflektionsschild 2}}$ [K]	Temperatur $T_{70\text{K-Schild}}$ [K]	Emissions- zahl $\epsilon_{\text{Außenwand}}$	Emissions- zahl $\epsilon_{\text{Reflektionsschild 1}}$	Emissions- zahl $\epsilon_{\text{Reflektionsschild 2}}$	Emissions- zahl $\epsilon_{70\text{K-Schild}}$	Fläche A [m ²]	Wärme- strom Q [W]
ohne	300			70	0,1			0,1	1	24,10
mit einem Refl.	300	252,5		70	0,1	0,03		0,1	1	5,4
mit zwei Refl.	300	276,3	219,0	70	0,1	0,03	0,03	0,1	1	3,05

Tabelle 8 Vergleich der Lösungsvarianten "Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen Vakuumbehälterwand und 70K Schild"
Quelle:eigene Tabelle

Bei den Lösungsvarianten für die Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen dem 70 Kelvin Schild und den 15 Kelvin Empfangskomponenten sind in Tabelle 9 größtenteils die gleichen Emissionszahlen wie in Tabelle 8 gewählt worden, da die Materialien und Oberflächeneigenschaften bei den Lösungsvarianten beider Tabellen gleich sind. Eine Ausnahme bildet die Emissionszahl der 15 Kelvin Empfangskomponenten. Da die Empfangskomponenten durch ihre Anordnung wie ein Labyrinth wirken, in dem die Wärmestrahlen des 70 Kelvin Schildes verschwinden (also absorbiert werden), wird hier eine Emissionszahl von eins angenommen.

	Temperatur $T_{70\text{K-Schild}}$ [K]	Temperatur $T_{\text{Reflektionsschild 1}}$ [K]	Temperatur $T_{\text{Reflektionsschild 2}}$ [K]	Temperatur $T_{15\text{K-Empfangsk.}}$ [K]	Emissions- zahl $\epsilon_{70\text{K-Schild}}$	Emissions- zahl $\epsilon_{\text{Reflektionsschild 1}}$	Emissions- zahl $\epsilon_{\text{Reflektionsschild 2}}$	Emissions- zahl $\epsilon_{15\text{K-Empfangsk.}}$	Fläche A [m ²]	Wärme- strom Q [W]
ohne	70			15	0,1			1	0,6	0,082
mit einem Refl.	70	57,1		15	0,1	0,03		1	0,6	0,011
mit zwei Refl.	70	64,1	48,9	15	0,1	0,03	0,03	1	0,6	0,006

Tabelle 9 Vergleich der Lösungsvarianten "Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen 70K Schild und Empfangskomponenten"
Quelle:eigene Tabelle

Für die Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen dem Vakuumfenster und den Hörnern wird die bereits in Kapitel 4.3.3 erläuterte Emissionszahl von eins angenommen. Die Emissionszahl von eins für das Hornpaket bezieht sich dabei nur auf die Flächen der Hörneröffnungen. Die Stirnfläche des Hornpakets besitzt hingegen eine Emissionszahl von einer leicht oxidierten Kuperoberfläche. Die Flächen wurden aus dem CAD-Modell des Hornpakets entnommen. Die Temperatur der Oberfläche des Dämmschaums beruht, wie in Kapitel 4.3.3 erwähnt, aus einem Versuch, der im MPIfR durchgeführt wurde. Alle Zahlen sind in Tabelle 10 zu sehen.

	Temperatur $T_{\text{Außenwand}}$ [K]	Temperatur $T_{\text{K70-Schild}}$ [K]	Emissions- zahl $\epsilon_{\text{Außenwand}}$	Emissions- zahl $\epsilon_{\text{70K-Schild}}$	Fläche A [m ²]	Wärme- strom Q [W]
ohne Dämmschaum						
ins Horn	300	70	1	1	0,1885	86,32
Horn Stirnfläche	300	70	1	0,1	0,053	2,44
mit Dämmschaum						
ins Horn	220	70	1	1	0,1885	24,78
Horn Stirnfläche	220	70	1	0,1	0,053	0,70

Tabelle 10 Vergleich der Lösungsvarianten "Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen Vakuumfenster und Hörnern"
Quelle:eigene Tabelle

5.2 Ausarbeitung und Beschreibung des Lösungskonzeptes

Für das Lösungskonzept wird aus dem Morphologischen Kasten mindestens eine Lösungsvariante pro Einzelfunktion ausgewählt.

Als Material für das Vakuumfenster wird die Mylarfolie genutzt.

Bei der Wahl der Lösungsvariante für die Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Leiten bei den Hohlleiterkomponenten zeigt Tabelle 7 die erforderliche Distanz für einen vorgegebenen Wärmestrom. Das Ausschlusskriterium für den Hohlleiter aus Edelstahl und den Thermo-Choke mit einer Distanzhülse von 40mm Durchmesser beim rechteckigen Hohlleiter ist die jeweils große Distanz. Somit stehen nur noch der Hohlleiter aus glasfaserverstärktem Kunststoff und der Thermo-Choke mit einer Distanzhülse von 15mm Durchmesser zur Auswahl. Betrachtet man lediglich die Distanz, wäre der Hohlleiter aus glasfaserverstärktem Kunststoff die erste Wahl für das Lösungskonzept. Hier gilt es jedoch zu bedenken, dass der Thermo-Choke sich bereits als Lösungsvariante bewährt hat, wohingegen der Hohlleiter aus glasfaserverstärktem Kunststoff erst in der Herstellbarkeit und seiner Funktionalität getestet werden müsste.

Aus diesem Grund wird für die Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Leiten zwischen dem Behälter und dem Verstärker ein Thermo-Choke mit einer Distanzhülse von 15mm Durchmesser gewählt.

Da die Ergebnisse beim runden Hohlleiter die gleichen Tendenzen wie beim rechteckigen Hohlleiter aufzeigen, wird für die Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Leiten zwischen dem Horn bzw. den 70 Kelvin Komponenten und den 15 Kelvin Komponenten ebenfalls ein Thermo-Choke mit einer Distanzhülse von 15mm Durchmesser als Lösungskonzept gewählt.

Bei der Entscheidung in Bezug auf die Mantelform des Vakuumbehälters besteht ein Kriterium in der Verfügbarkeit der Form, also ob die Form direkt als Halbwerkzeug gekauft werden kann. Dadurch könnte bei der Fertigung ein Arbeitsschritt, nämlich das Schweißen, eingespart und somit das Risiko eines Lecks durch unsauberes Schweißen ausgeschlossen

werden. Diesbezüglich lässt sich festhalten, dass die runde Form im Gegensatz zur hexagonalen Form selbst in großen Dimensionen (über einem Meter Durchmesser) ohne Schweißnaht erhältlich ist.

Das zweite Kriterium bei der Entscheidung bezüglich der Mantelform des Vakuumbehälters ist die Steifigkeit gegen eine Verformung durch eine Druckkraft. Hier ist die hexagonale Form ebenfalls im Nachteil, da ihre geraden Flächen nur eine geringe Steifigkeit gegen eine Verformung aufweisen. Die runde Form weist hingegen durch ihre Wölbung eine hohe Steifigkeit gegen eine Verformung durch eine Druckkraft auf.

Aus den soeben aufgeführten Gründen wird für den Vakuumbehälter eine runde Form gewählt.

Bei der Wahl der unteren Vakuumdeckelform ist ebenso wie bei der Wahl der Mantelform des Vakuumbehälters die Steifigkeit gegen eine Verformung durch eine Druckkraft relevant. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert ist die gewölbte Platte diejenige, die, im Gegensatz zu der flachen Platte, durch ihre Form eine hohe Steifigkeit gegen eine Verformung aus einer Druckkraft aufweist. Ein Nachteil der gewölbten Platte ist jedoch, dass die Hohlleiter, die sich zwischen dem Verstärker und dem Deckel des Vakuumbehälters befinden, durch die Wölbung des Deckels unterschiedlich lang sind, was wiederum unterschiedliche Signalqualitäten zur Folge hat.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird die flache Platte als Lösungsvariante für die Vakuumdeckelform gewählt, weil dort alle Hohlleiter die gleiche Länge aufweisen.

Für die Einzelfunktion der Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlen zwischen dem Behälter und dem 70 Kelvin Schild zeigt die Tabelle 8 eine Übersicht über drei Varianten in Hinblick auf ihren Wärmestrom. Dabei wurden stets Emissionswerte von leicht oxidiertem Kupfer oder Aluminium verwendet und nicht von elektrolytisch oder mechanisch polierten Oberflächen, da die Oberflächen in der Praxis nach dem Polieren meist wieder leicht oxidiert. Die Werte der Tabelle 8 zeigen, dass ohne ein Reflektionsschild ein Wärmestrom von 24,1W entstehen würde und dieser Wert durch ein Reflektionsschild auf fast ein Fünftel verkleinert werden kann. Der Einsatz eines zweiten Reflektionsschildes bewirkt im Vergleich zu einem Reflektionsschild keine deutliche Verbesserung. Jedoch bewirkt der Einsatz eines zweiten Reflektionsschildes eine Erhöhung der Oberflächen, die sich im Vakuumbehälter befinden, was wiederum die Abpumpzeit durch anhaftende Moleküle verlängert.

Die Lösungsvariante in Feld 7.5 des Morphologischen Kastens, bei der eine Verkleinerung der Wärmeübertragung durch ein Versilbern oder Vergolden mit anschließendem Polieren bewirkt wird, wird aus Kostengründen und aufgrund der Tatsache, dass bereits eine ausreichende Verkleinerung der Wärmeübertragung durch ein Reflektionsschild vorliegt, ausgeschlossen.

Bei der Wahl der Lösungsvariante in Bezug auf die Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen dem 70 Kelvin Schild und den 15 Kelvin Empfangskomponenten zeigt die Tabelle 9, dass selbst ohne ein Reflektionsschild kaum Wärme übergeht. Aus diesem Grund und da die Abpumpzeit beim Einsatz eines Reflektionsschildes durch die größere

Oberfläche verlängert würde, werden keine zusätzlichen Maßnahmen zur Verkleinerung der Wärmeübertragung getroffen.

Als Lösungskonzept bezüglich der Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen dem Vakuumfenster und dem Horn ist der Dämmschaum zu wählen. Diese Entscheidung kann folgendermaßen begründet werden: gemäß der Anforderungsliste ist die Anzahl der Refrigeratoren auf maximal drei begrenzt. Diese würden auf der 70 Kelvin Stufe gemeinsam eine maximale Leistung von 60W erbringen. Der Wärmestrom ohne Dämmschaum würde somit mit 86W die Leistung der drei Refrigeratoren überschreiten, was bedeutet, dass die geforderte Temperatur im Dewar nicht eingehalten werden könnte.

Bei den Lösungsvarianten des Längenausgleichs sollten die Kräfte so klein wie möglich gehalten werden, um den Hebel, auf dem die Kräfte wirken, so klein wie möglich dimensionieren zu können und somit Gewicht einzusparen. Um die Kräfte klein zu halten, müssen die Flächen des zusätzlichen Zylinders zum Kräfteausgleich und der verschiebbaren Hohlleiterdurchführung klein sein. Bei einer verschiebbaren Hohlleiterdurchführung für zwei Hohlleiter können die Hohlleiter nicht unmittelbar nebeneinander geführt werden, sondern es ist ein gewisser Abstand zwischen den beiden Hohlleitern vonnöten, um nach dem Austritt der Hohlleiter aus dem Dewar noch ausreichend Platz für einen Anbindungsflansch¹, der an jedem Hohlleiterende sitzt, zu bieten.

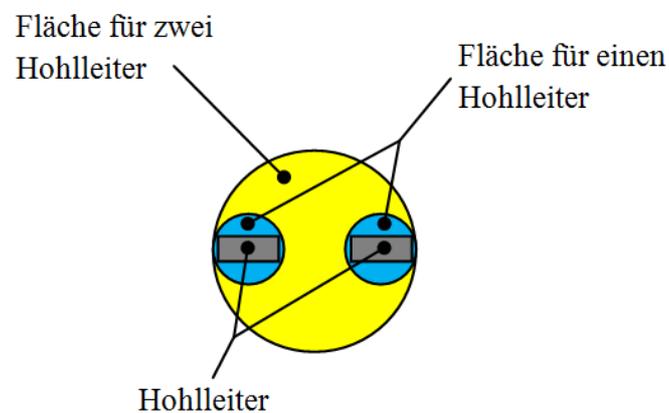


Abbildung 22 Flächenvergleich der Lösungsvarianten des Längenausgleichs
Quelle: eigene Abbildung

In Abbildung 22 ist deutlich zu erkennen, dass die Fläche einer verschiebbaren Hohlleiterdurchführung, die zwei Hohlleiter beinhaltet, deutlich größer ist als die beiden Flächen der Hohlleiterdurchführungen, die jeweils nur einen Hohlleiter beinhalten, zusammen. Somit werden die verschiebbaren Durchführungen, die jeweils einen Hohlleiter beinhalten, gewählt.

¹ Ein Anbindungsflansch ist eine Verbindungstück zwischen zwei Leitern

Die Wahl, ob die Gegenkraft aus einem zusätzlichen Zylinder für eine oder zwei verschiebbare Hohlleiterdurchführung(en) genutzt wird, fällt zu Gunsten beider Hohlleiterdurchführungen aus. Um die Gefahr der Leckage an den Dichtstellen so gering wie möglich zu gehalten, wird hier die kleinstmögliche Anzahl an Dichtstellen verbaut.

Als Lösungskonzept beim Längenausgleich werden somit für eine Empfangseinheit zwei verschiebbare Hohlleiterdurchführungen für je einen Hohlleiter sowie ein zusätzlicher Zylinder mit einem Hebel als Gegenkraft gewählt.

6 Gestaltung des Dewar

Die Gestaltung des Dewar auf Grundlage des im vorherigen Kapitel erarbeiteten Lösungskonzepts beginnt mit den vorgegebenen Empfangskomponenten und dem Hornpaket. Dabei dienen diese Komponenten lediglich als Platzhalter, da bis zum Zeitpunkt der Abgabe der Diplomarbeit keine genaueren CAD-Modelle von Seiten des MPIfR vorliegen. Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt eine Empfängereinheit als Bauraummodell.

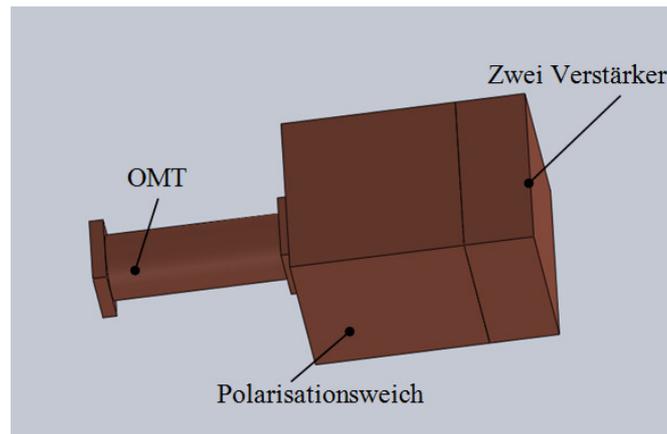


Abbildung 23 Empfangskomponenten
 Quelle: eigene Abbildung

In das Hornpaket wurde zur besseren Erkennbarkeit der einzelnen Hörner - wie in der Schnittansicht im rechten Bild der Abbildung 24 zu sehen - lediglich die Trichterform eines Empfangshorns einmodelliert.

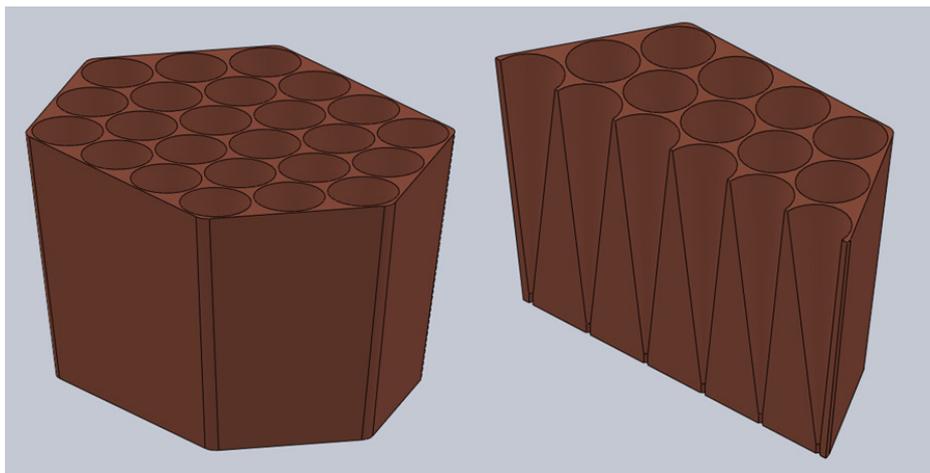


Abbildung 24 Hornpaket
 Quelle: eigene Abbildung

Die Abbildung 25 zeigt den Refrigerator CTI 350 mit der 70 und der 15 Kelvin Stufe. Dabei ist der Refrigerator bis auf den Kühlzylinder, in dem sich die Kühlstufen befinden, stark vereinfacht gezeichnet worden.

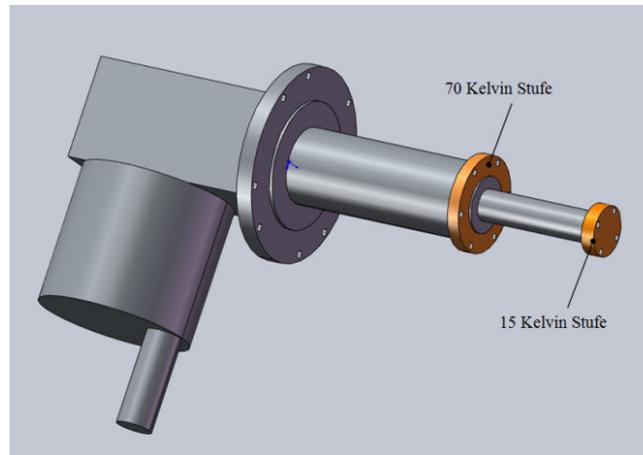


Abbildung 25 Refrigerator
Quelle: eigene Abbildung

Gemäß des Lösungskonzepts werden für die Verkleinerung der Wärmeübertragung durch Leiten an zwei Stellen Thermo-Chokes eingesetzt. Dabei unterscheiden sich die Thermo-Chokes der beiden Stellen in ihrer Hohlleiterform und ihrer Länge.

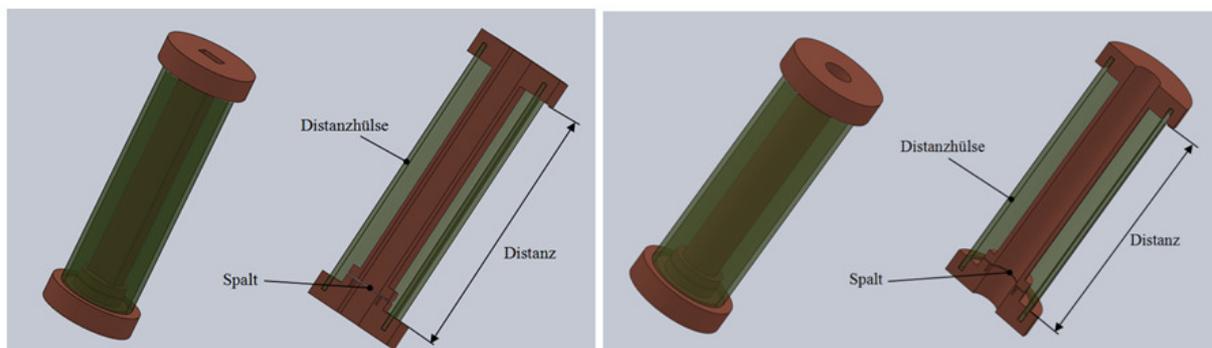


Abbildung 26 Thermo-Choke; linkes Bild: mit rechteckigem Hohlleiter; rechtes Bild: mit rundem Hohlleiter
Quelle: eigene Abbildung

Dadurch, dass sich die beiden Thermo-Chokes in ihrem Aufbau nicht unterscheiden, können sie in *einer* Baugruppe konfiguriert werden (Abbildung 27).

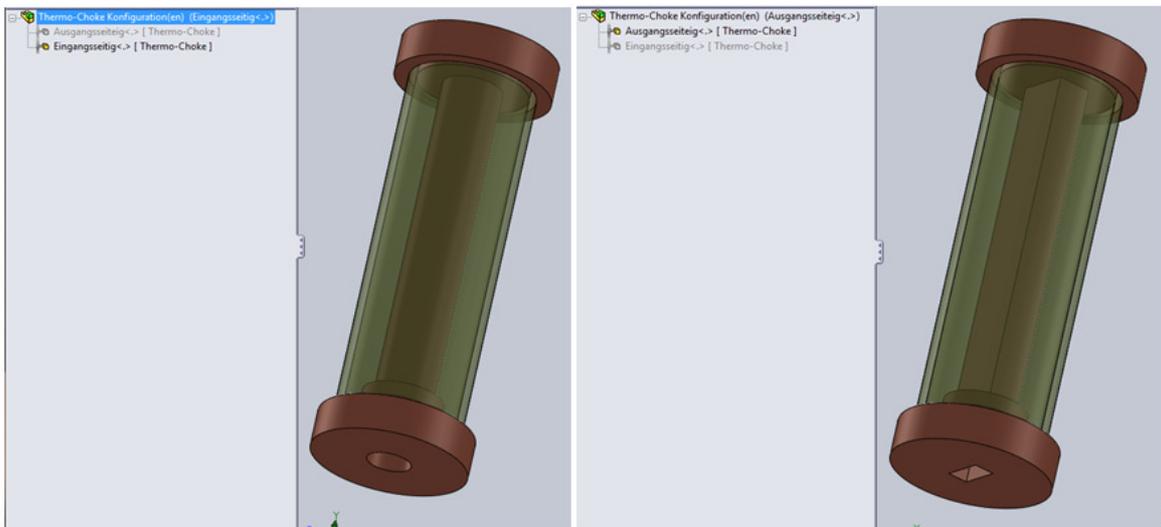


Abbildung 27 Baugruppen-Konfiguration des Thermo-Chokes
 Quelle: eigene Abbildung

Bei den beiden Thermo-Chokes, die aus je drei Einzelteilen bestehen, wurde ebenfalls mit Konfigurationen gearbeitet, sodass, im Gegensatz zur standardmäßigen Modellierung (bei der alle Einzelteile aus einzelnen Modellen bestehen) statt 6 CAD-Dateien lediglich 2 CAD-Dateien benötigt werden.

Die Abbildung 28 zeigt alle sechs benötigten Bauteile, wobei in der ersten Reihe die Bauteile des Thermo-Chokes für die rechteckigen Hohlleiter dargestellt sind und in der zweiten Reihe die für die runden Hohlleiter. Links von jedem Bild ist die dazugehörige Konfigurationsliste zu sehen. Dabei sind auf den Bildern in den linken beiden Spalten jeweils CAD-Modelle mit ihren vier verschiedenen Konfigurationen erkennbar. Die beiden Bilder in der rechten Spalte zeigen das CAD-Modell der Distanzhülse, welches einmal für den rechteckigen und einmal für den runden Hohlleiter Konfigurationen mit unterschiedlichen Längen besitzt.

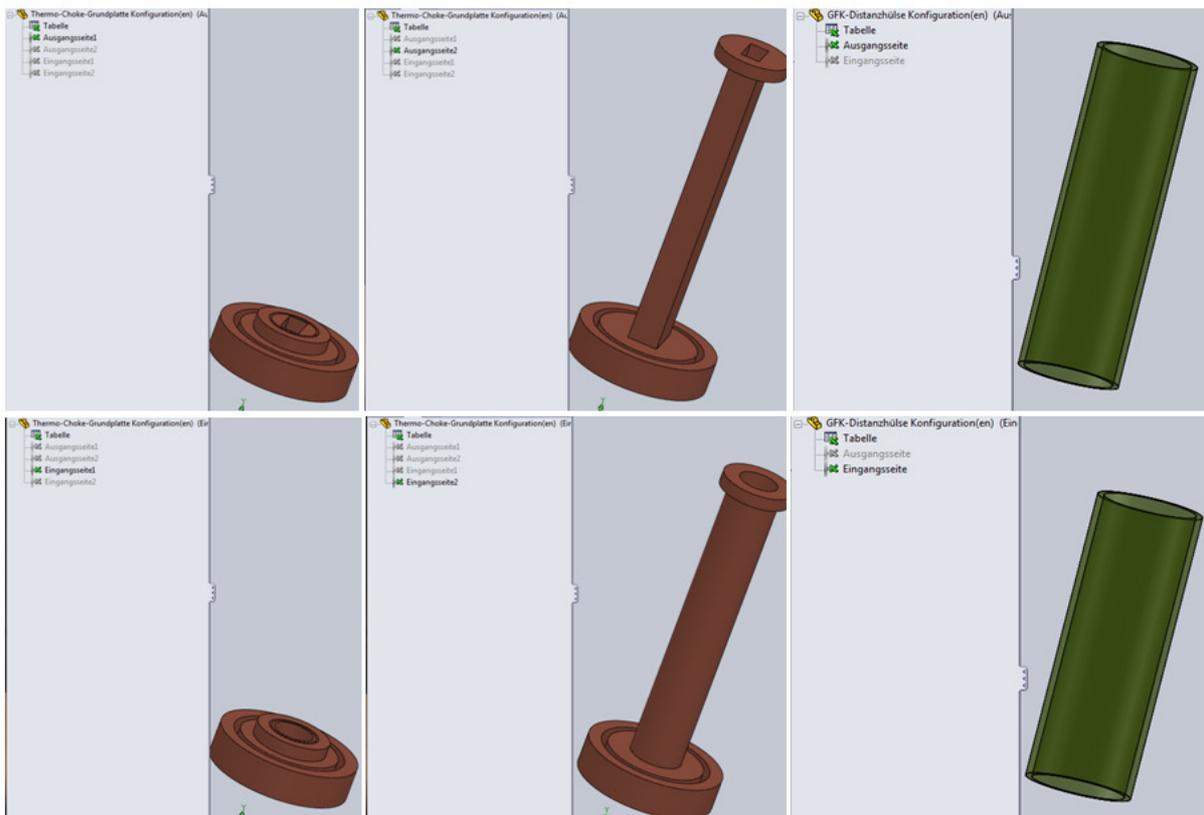


Abbildung 28 Einzelteil-Konfigurationen des Thermo-Chokes
 Quelle: eigene Abbildung

An einer Seite einer jeden Empfangseinheit werden zwei Thermo-Chokes mit rechteckigen Hohlleitern an den Verstärkern platziert. Außerdem wird an der gegenüberliegenden Seite (am Phasenschieber) ein Thermo-Choke mit einer runden Hohlleiter-Form mit der Empfangseinheit verknüpft. Die erweiterte Empfangseinheit ist in Abbildung 29 dargestellt.

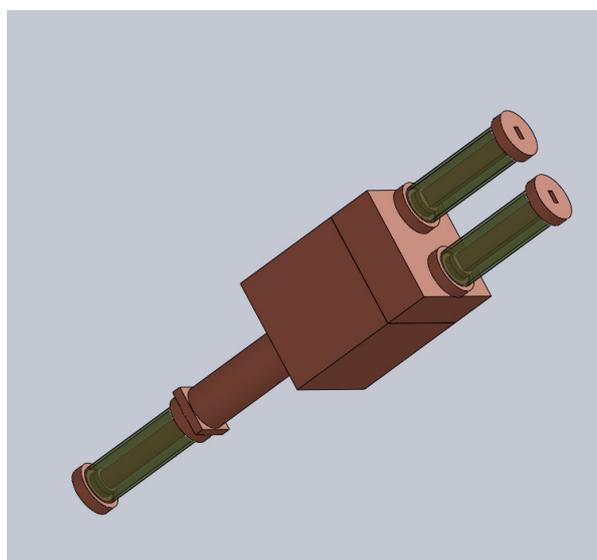


Abbildung 29 Empfangseinheit mit Thermo-Chokes

Quelle: eigene Abbildung

Somit ergibt sich zusammen mit dem Hornpaket und den 24 erweiterten Empfangseinheiten die nachstehende Abbildung.

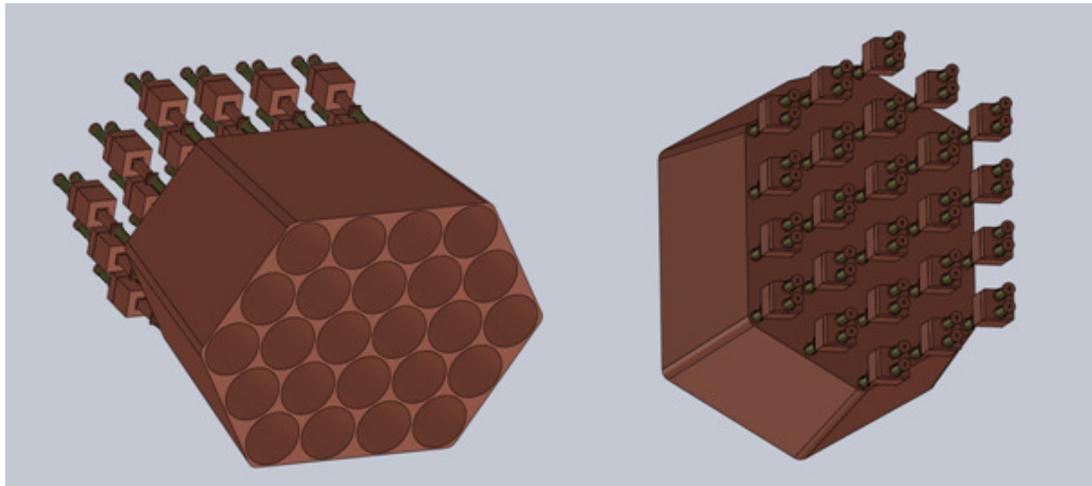


Abbildung 30 Hornpaket mit allen Empfangseinheiten und den Thermo-Chokes
Quelle: eigene Abbildung

Abbildung 31 zeigt den Montagedeckel einer Empfangseinheit mit dem Längenausgleich. Dabei ist in dem Montagedeckel bereits eine Bohrung für die Kabeldurchführung der Spannungsversorgung der Verstärker modelliert. Des Weiteren sind an den beiden Hohlleiterdurchführungen und an dem zusätzlichen Zylinder jeweils drei weiße Dichtungen zu erkennen. Mit der Anzahl der Dichtungen verringert sich die Permeation in den Dichtungen, also die Leckrate des Dewar. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich zwischen den Dichtungen mit der Zeit ein vom Vakuumdruck aufsteigender höherer Druck einstellt. Die Anzahl von drei Dichtungen wurde zunächst aus Sicherheitsgründen gewählt, da in der Literatur keine Angaben über die Leckrate von verschiebbaren Durchführungen bzw. die benötigte Anzahl an Dichtungen für eine geringe Leckrate gefunden werden konnten. In einem Versuch mit einer Test-Hohlleitdurchführung soll im Anschluss an die Diplomarbeit ermittelt werden, mit welcher Anzahl an Dichtungen die Leckrate wie hoch ist.

Beim Montagedeckel wurde am äußeren Rand ein Absatz vorgesehen, der zur Kosteneinsparung in der Fertigung dient. Da die äußere Fläche des Montagedeckels auf der Dichtung am Vakuumdeckel aufliegt, wird dort eine gute Dichtfläche bzw. eine gute Oberflächenqualität benötigt. An die restliche Oberfläche des Montagedeckels werden hingegen keine hohen Qualitätsanforderungen gestellt.

Dank des Absatzes kann die untere Fläche des Montagedeckels bis auf die Dichtoberfläche mit geringerer Genauigkeit sowie schlechterer Oberflächenqualität gefertigt werden, was die Produktion schneller und kostengünstiger macht.

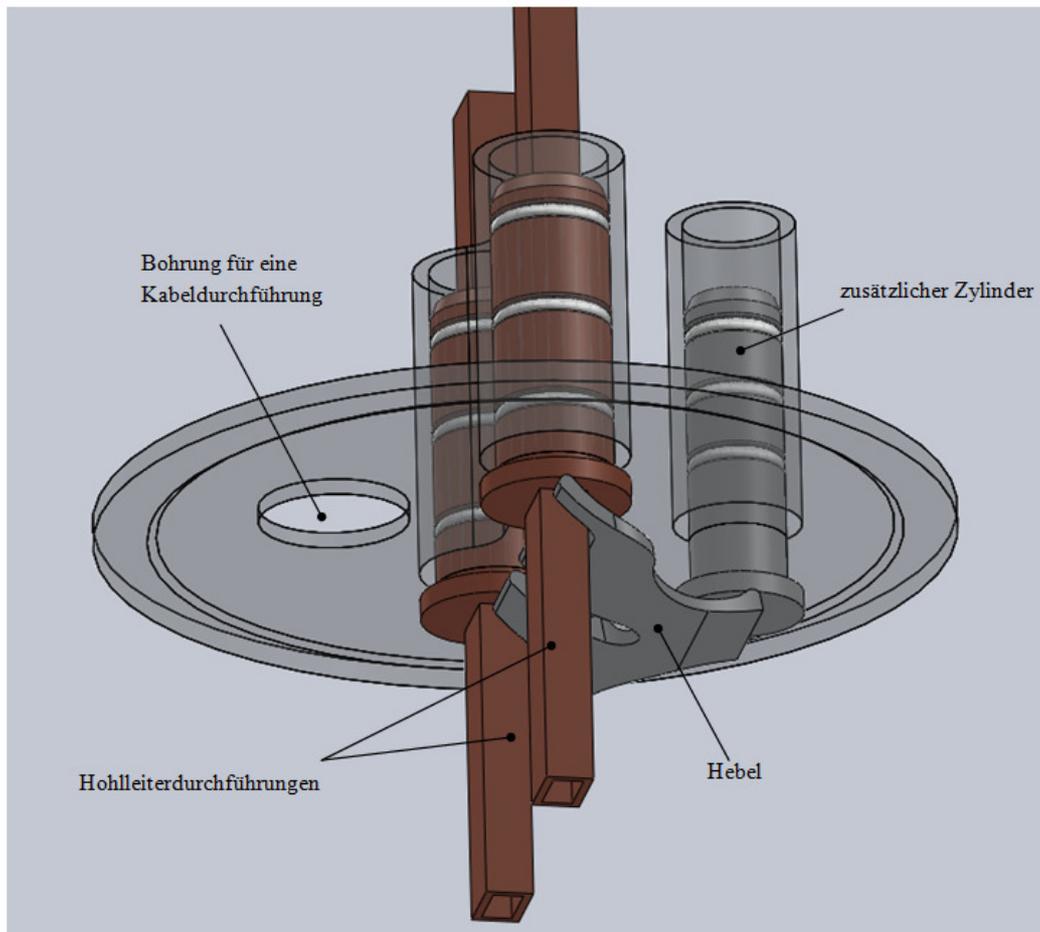


Abbildung 31 Montagedeckel mit Längenausgleich und einer Bohrung für die Kabeldurchführung
 Quelle: eigene Abbildung

Wie bereits in Kapitel 4.4 erarbeitet, ist das Kräftegleichgewicht durch die Formel:

$$2 \cdot d_{H.Durchf.}^2 \cdot l_1 = d_{Ausgl.}^2 \cdot l_2$$

beschreibbar.

Der Durchmesser der Hohlleiterdurchführungen wird durch die Abmaße des Hohlleiters bestimmt. Aus den Abmaßen des WR22-Hohlleiters und einer gewählten Dichtungsdicke von 1,5mm wurde für die Hohlleiterdurchführung ein Durchmesser von 13mm ($d_{h.Durchf.}$) errechnet. Beim Hebel wurde eine Länge des Hebelarms l_1 von 5mm gewählt. Aus der oben aufgeführten Formel wurde mit einem angenommenen Durchmesser des zusätzlichen Zylinders von 11mm ($d_{Ausgl.}$) ein Hebelarm l_2 von 13,96 mm ermittelt. Aus den beiden Hebelarmlängen ergibt sich ein Abstand zwischen den Hohlleiterdurchführungen und dem zusätzlichen Zylinder von 18,96mm. Um sicherzustellen, dass das Hebelverhältnis gleich bleibt, wurden die beiden Hebelarmlängen in dem CAD-Modell über eine Gleichung verknüpft. Die Formel, die in dem CAD-Modell verwendet wurde, wurde durch Auflösen der oben aufgeführten Formel nach dem Hebelarm l_2 ermittelt.

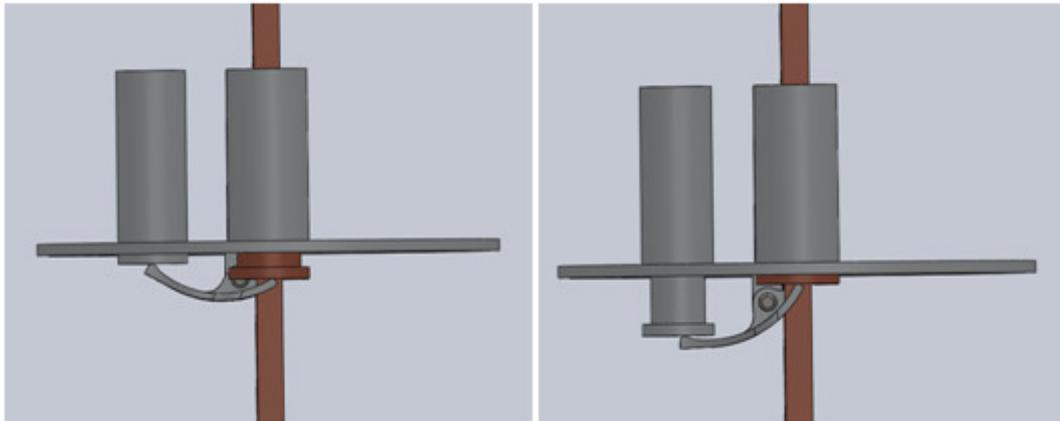


Abbildung 32 Längenausgleich in min. und max. Stellung
 Quelle: eigene Abbildung

Zusätzlich musste wegen des Höhenversatzes (in Abbildung 32 zu erkennen), der sich bei der Verschiebung der Hohlleiterdurchführung zwischen dem zusätzlichen Zylinder und den Hohlleiterdurchführungen ergibt, eine Verschiebung des Hebelpunktes in seiner Höhe vorgenommen werden. Die Höhenverschiebung wurde ebenfalls über eine Formel verknüpft. Die Formel wird vergleichbar mit der Formel zur Berechnung der Hebellängen $l_{1,2}$ berechnet, bis auf die Tatsache, dass hier anstatt der Größen $l_{1,2}$ die Größen $h_{1,2}$ eingesetzt werden. Somit ergibt sich mit dem gewählten Durchmesser der Hohlleiterdurchführungen von 13mm und dem zusätzlichen Zylinder von 11mm die in Abbildung 33 aufgeführte Formel.

Bei der Berechnung des Hebelarms l_2 bzw. des Höhenausgleichs h_2 mit der ermittelten Formel werden als Ergebnisse keine geraden Zahlen herauskommen, was bereits an dem Ergebnis des Hebelarms l_2 mit 13,96mm zu erkennen ist. Für solche Fälle bietet Solid Works eine Funktion an, die das Ergebnis auf eine ganze Zahl rundet. Durch die Rundung des Ergebnisses für den Hebelarm l_2 auf eine ganze Zahl würde das Hebelverhältnis nicht mehr eingehalten und damit der Kräfteausgleich nicht mehr gewährleistet. Alternativ kann das Ergebnis durch vorheriges Multiplizieren der Formel mit 10 und Dividieren der gerundeten Zahl durch 10 mit einer Nachkommastelle angegeben werden.

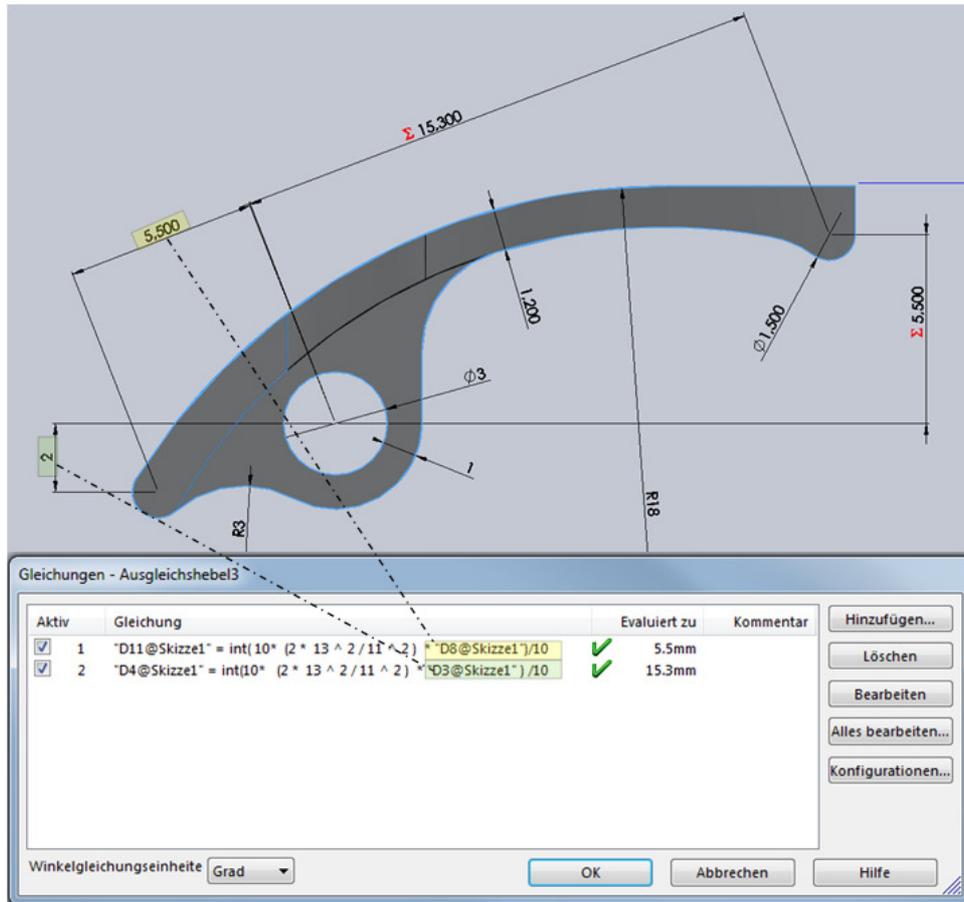


Abbildung 33 Hebel mit Gleichungen zur Einhaltung des Hebelverhältnisses
Quelle: eigene Abbildung

Die Hohlleiterdurchführung und der zusätzliche Zylinder wurden aus den gleichen Gründen wie der Thermo-Choke durch Konfigurationen gebildet. Die Abbildung 34 zeigt in der vorderen Reihe die Konfiguration der Bauteile und in der hinteren Reihe die Baugruppe mit den weißen Dichtungen.



Abbildung 34 Konfigurationen der Baugruppe und der Einzelteile der Hohlleiterdurchführung und des zusätzlichen Zylinders
Quelle: eigene Abbildung

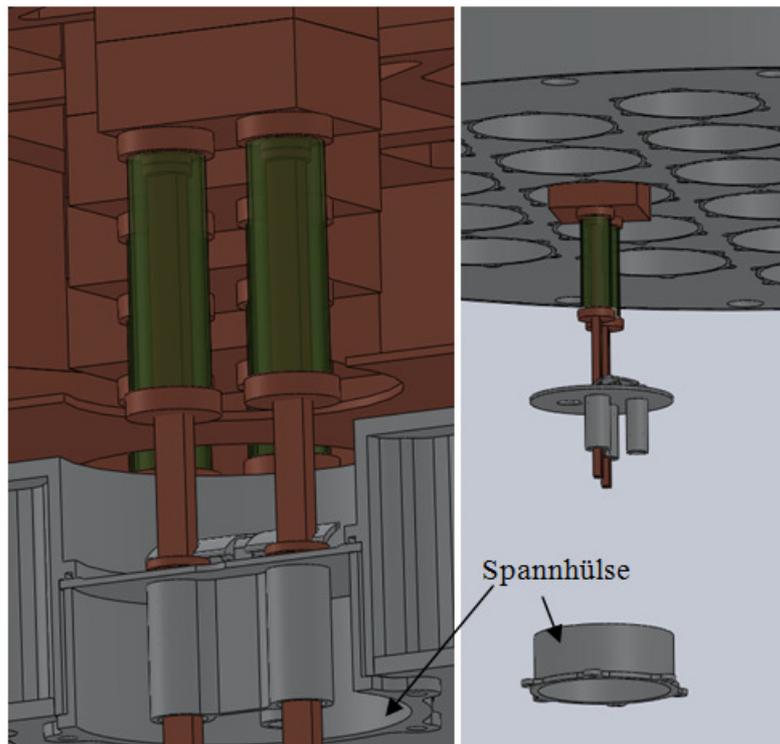


Abbildung 35 Modulare Entnahme der Verstärker
Quelle: eigene Abbildung

In Falle eines notwendigen Verstärkerwechsels wird der Längenausgleich im Montage- deckel mit den beiden Thermo-Chokes und den Verstärkern nach unten herausgenommen. Hierfür muss vorher die Spannhülse demontiert werden. Dies ist in Abbildung 35 zu sehen

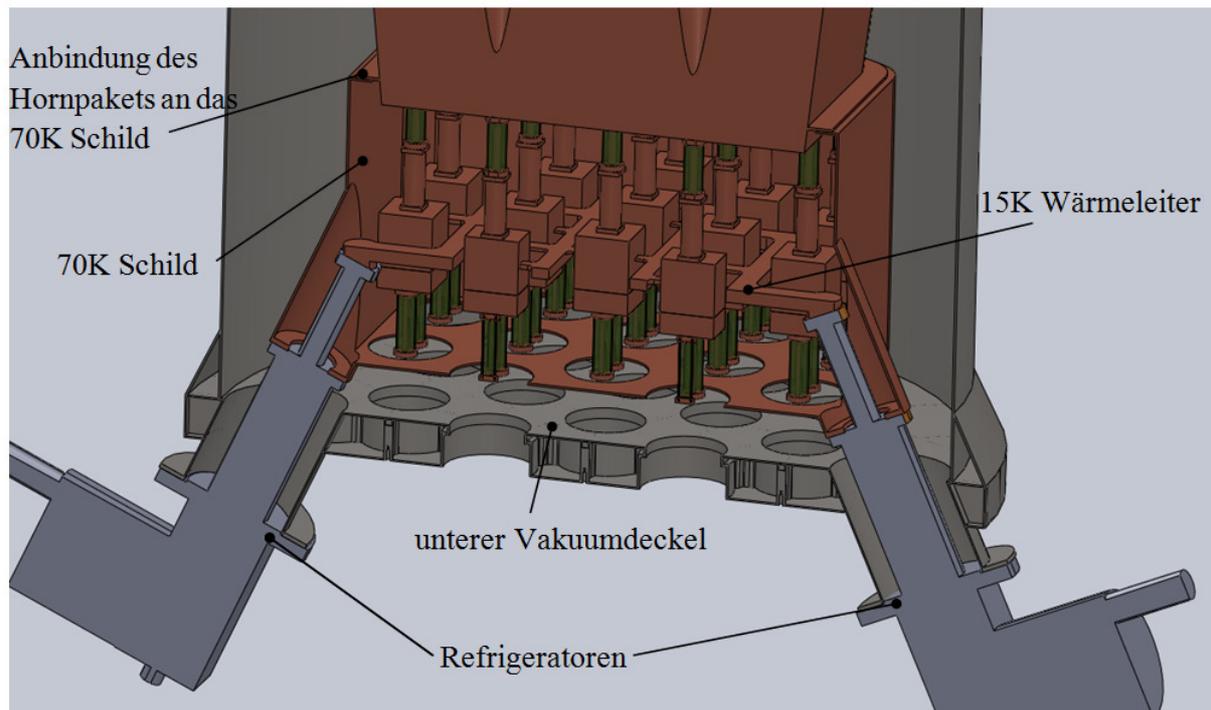


Abbildung 36 Erster Entwurf der Anordnung der Refrigeratoren und des an den Refrigerator angepassten 70K Schildes sowie des angepassten 15K Wärmeleiters

Quelle: eigene Abbildung

Die Refrigeratoren ragen im obenstehenden Entwurf (Abbildung 36) schräg von unten in den Dewar hinein und werden am unteren Deckel montiert. Durch die schräge Stellung der Refrigeratoren kommt die 15 Kelvin Stufe des Refrigerators näher an die Mitte des Dewar heran, sodass die Wärmeleitwege des 15 Kelvin Wärmeleiters so kurz wie möglich werden. Dies ist wünschenswert, da der 15 Kelvin Wärmeleiter die Wärmeenergie von den 15 Kelvin Empfangskomponenten zur der 15 Kelvin Stufe des Refrigerators leiten soll und hierbei eine kurze Distanz für eine gute Wärmeübertragung von Vorteil ist (siehe Kapitel 2.3.2).

Dadurch, dass die Refrigeratoren am unteren Deckel montiert sind und erst nach der Montage des Deckels montieren werden können, sind zu diesem Zeitpunkt der 15 Kelvin Wärmeleiter und das 70 Kelvin Schild im Vakuumbehälter nicht mehr zugänglich. Dadurch ist ein Anschließen der Refrigeratoren an den 15 Kelvin Wärmeleiter und das 70 Kelvin Schild nicht mehr möglich. Dies wird in Abbildung 37 veranschauligt.

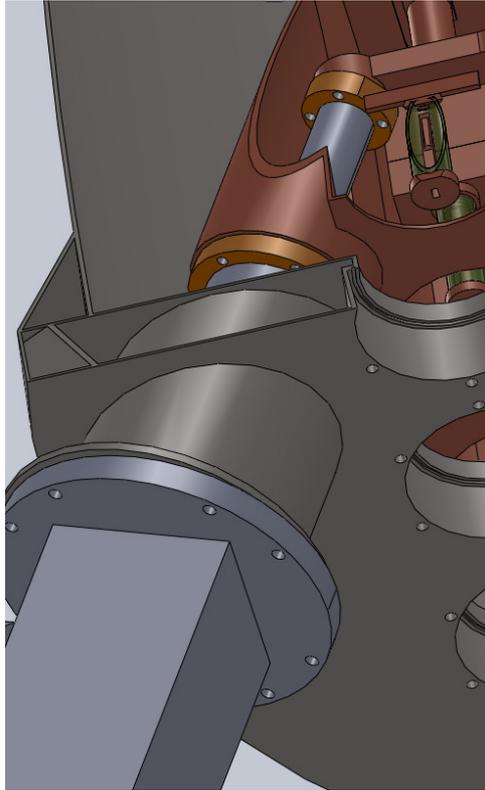


Abbildung 37 Refrigerator, der am unteren Deckel montiert ist
Quelle: eigene Abbildung

Alternativ könnten die Refrigeratoren über die Außenwand in den Dewar geführt werden. Diese Möglichkeit wird am Ende dieses Kapitels noch einmal aufgegriffen. Zunächst wird jedoch der Aufbau des unteren Deckels beschrieben.

Bei dem unteren Deckel bietet es sich durch die Anordnung der Montagedeckel an, die Versteifungsstruktur wie einen Wabenkern aufzubauen (siehe

Abbildung 38).

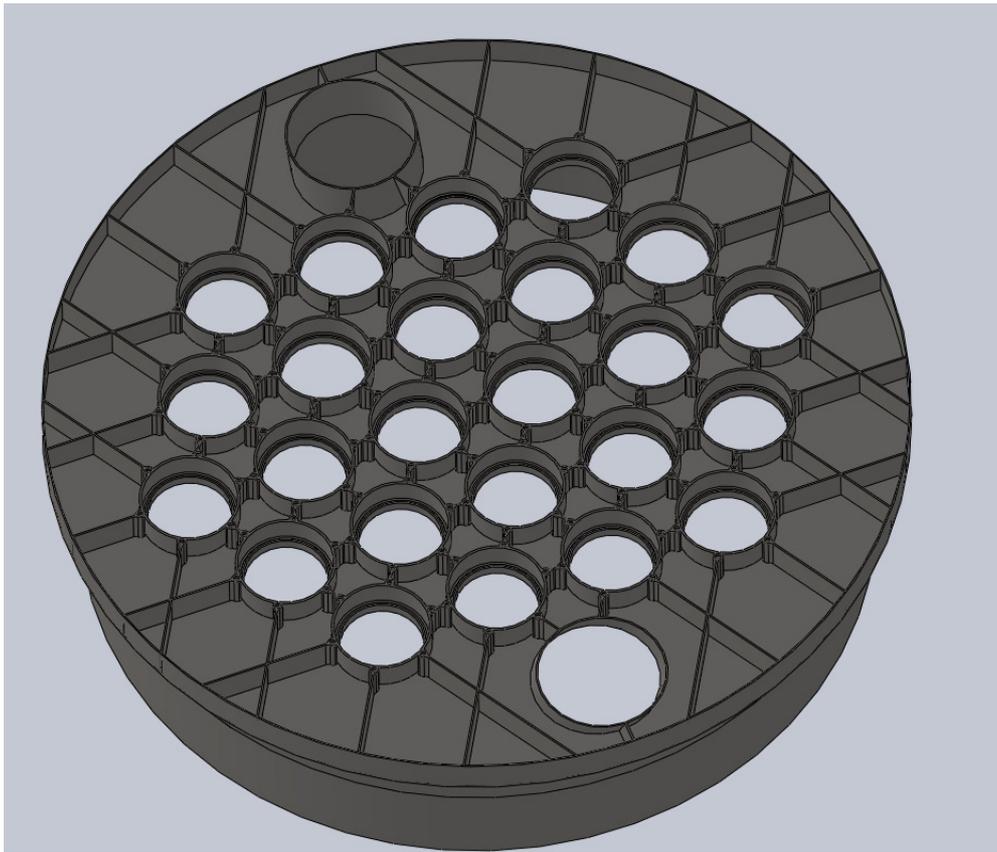


Abbildung 38 Unterer Deckel mit einer Wabenstruktur als Versteifung des Deckels

Wie im verlaufe der Diplomarbeit bereits mehrfach beschrieben, wirkt der Atmosphärendruck von außen auf den Vakuumbehälter. Durch die Druckkraft wird der Vakuumbehälter in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul, dem Flächenträgheitsmoment und der Einspannung des Bauteils verformt.

Um ein hohes Flächenträgheitsmoment zu erhalten und damit die Verformung zu verkleinern, muss im Falle des unteren Deckels der Abstand zwischen dem Ober- und dem Unterblech (siehe Abbildung 39) und/oder die Dicke des Ober- und Unterblechs vergrößert werden. Eine Verstärkung der Rippen zwischen dem Ober- und Unterblech würde lediglich eine kleine Verbesserung des Flächenträgheitsmoments bewirken.



Abbildung 39 Abstand zwischen Ober- und Unterblech des unteren Vakuumdeckels

Um die Einspannung zu verbessern, ist der Deckel etwas größer als der Vakuumbehälter konstruiert worden und wird über ein zusätzliches Blech von der Kante des Deckels zum Vakuumbehälter abgestützt (siehe untere vereinfachte Darstellung in Abbildung 40). Mit größer werdendem Überstand des Deckels über den Vakuumbehälter und desto weiter das zusätzliche Blech vom Deckel entfernt am Vakuumbehälter befestigt wird, desto steifer wird die Einspannung (siehe obere vereinfachte Darstellung mit einer Torsionsfeder in Abbildung 40).

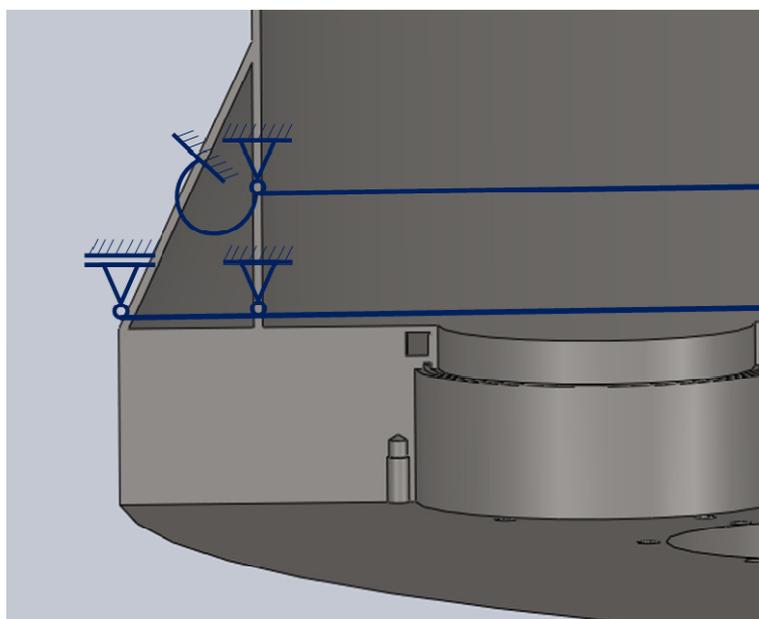


Abbildung 40 Vereinfachte Darstellung der Lagerung des unteren Deckels

Abbildung 41 zeigt die veränderte Anordnung der Refrigeratoren, die jetzt statt von unten von der Seite in den Dewar hineinragen. Durch die neue Anordnung der Refrigeratoren kann der Durchmesser des Deckels verkleinert werden, was einen positiven Einfluss auf die Steifigkeit des Deckels hat.

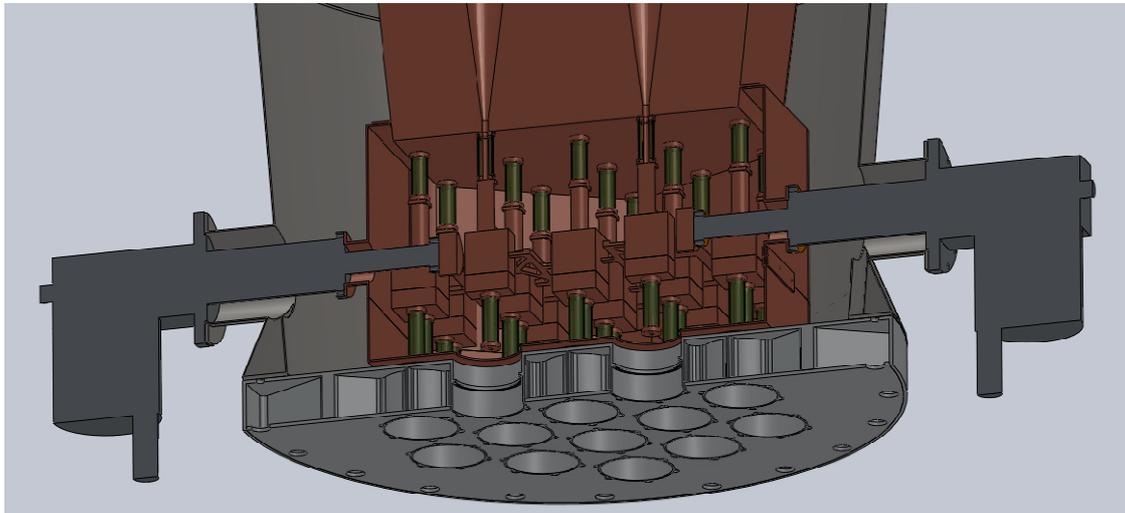


Abbildung 41 Dewar mit Refrigeratoren von der Seite

Dadurch, dass die Refrigeratoren nicht mehr an dem Deckel montiert sind, können sie bei noch nicht montiertem Deckel und noch nicht montiertem oberen Teil des 70 Kelvin Schildes wie in Abbildung 42 zu sehen leicht montiert bzw. demontiert werden.

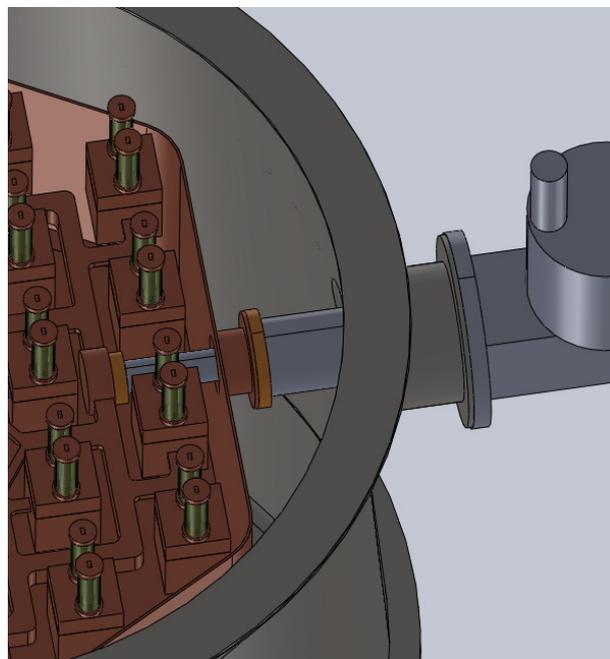


Abbildung 42 Zugänglichkeit zum Anschließen der Kühlstufen eines Refrigerators

Zusätzlich ermöglicht die neue Anordnung, dass die 15 Kelvin Stufe des Refrigerators weiter in den Dewar hineinreicht und damit die Distanz zu den zu kühlenden Empfangereinheiten verkürzt wird (Abbildung 43). Dies bewirkt einen niedrigeren Wärmeleitwiderstand zu den einzelnen Empfangskomponenten und eine niedrigere Temperatur an den

Empfangskomponenten durch eine bessere Wärmeabfuhr als Folge des niedrigeren Wärmeleitwiderstandes.

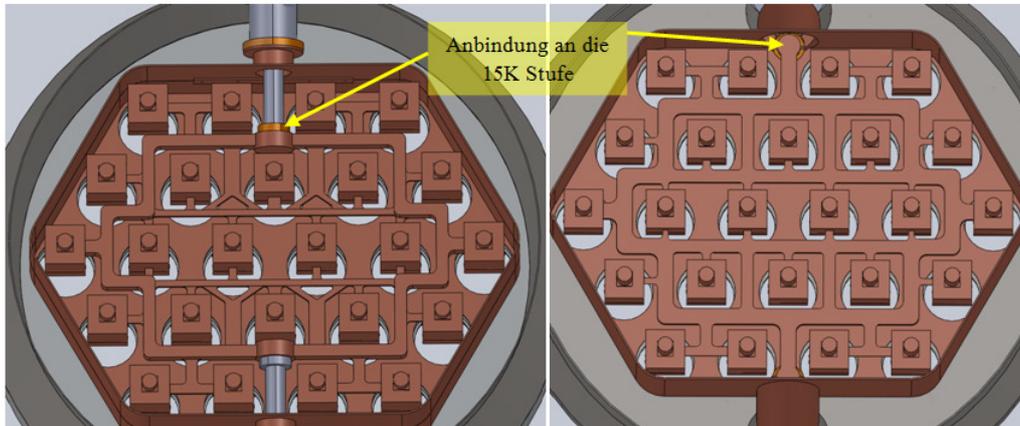


Abbildung 43 Vergleich der Anbindung der Refrigeratoren des zweiten (links) und ersten (rechts) Entwurfs

7 Überprüfung und Optimierung der Konstruktion

Die Überprüfung und Optimierung der Konstruktion wird mit Hilfe einer Optimierungsstudie von "Solid Works Simulation" durchgeführt. In dieser Diplomarbeit wird eine Optimierungsstudie basierend auf einer statischen Studie für den unteren Deckel durchgeführt.

Um die Optimierung bzw. die statische Studie des Deckels zu rationalisieren, ist es aufgrund des symmetrischen Aufbaus des Deckels möglich, lediglich eine Hälfte des Deckels zu simulieren. In diesem Fall muss lediglich an der Symmetrieffläche die zusätzliche Einspannung "Symmetrie" definiert werden. Des Weiteren wurden im CAD die M4-Gewindebohrungen im Deckel unterdrückt, um auch bei der sonst aufwendigeren Vernetzung mit Gewindebohrungen Zeit zu sparen. Da der äußere Bereich des Deckels auf dem Vakuumbehälter aufliegt, wurde im CAD eine Trennlinie auf der Unterseite des Deckels eingefügt, um eine definierte Fläche für die Druckkraft und für die Auflagefläche des Deckels auf dem Vakuumbehälter zu erhalten (siehe Abbildung 44). Mit der "Rollen-/Gleitvorrichtung-Einspannung" wird die Auflage des Deckels auf dem Vakuumbehälter simuliert. Die Verschraubung des Deckels mit dem Vakuumbehälter wird durch die "Fixierte Geometrie-Einspannung" an den Verschraubungspunkten simuliert.

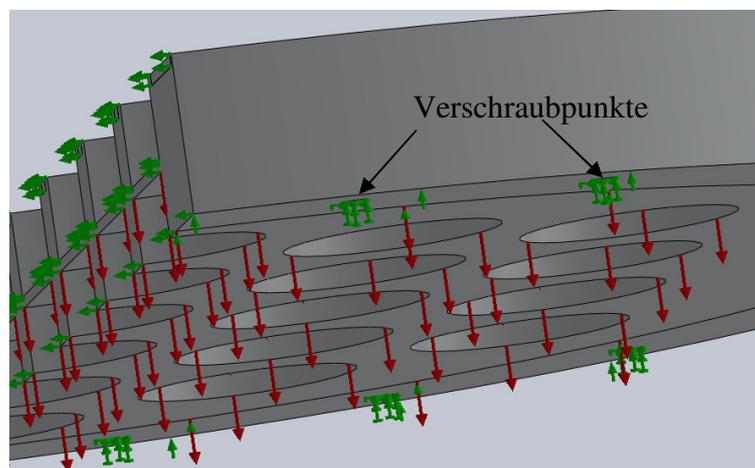


Abbildung 44 Unterer Deckel mit eingezeichneten Einspannungen und Kräften für die FEM

Die Druckkraft wird an der Unterseite des Deckels definiert und entspricht dem atmosphärischen Druck von einem bar bzw. $0,1 \text{ N/mm}^2$. Um eine realistische Druckkraft auf die untere Flächen zu erhalten werden die Montageöffnungen über Austragungsfeatures geschlossen, sodass dort eine Druckkraft definiert werden kann. Dabei wird nur die innere Fläche mit der Druckkraft belastet.

Das Material des Deckels besteht aus einer Aluminiumlegierung mit folgenden Eigenschaften:

$$E = 71000 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{p0,2} = 145 \text{ N/mm}^2$$

Nach der Ausführung der statischen Studie wird die Optimierungsstudie erstellt. Ziel der Optimierung ist es, die Masse zu minimieren, was durch die drei Parameter:

- Höhe des Deckels
- Dicke der Rippen zwischen dem Ober- und Unterblech und
- Ringdicke der einzelnen Montageöffnungen

erreicht werden kann.

Dabei sind die beiden letzten Punkte hauptsächlich bei der Gewichtsreduzierung relevant, da sie einen stärkeren Einfluss auf das Gewicht als auf das Flächenträgheitsmoment haben. So kann die Optimierung die kleinstmöglichen Dicken ermitteln, die für die Erfüllung der Zwangsbedingung nötig sind. Die Höhe des Deckels hat hingegen einen großen Einfluss auf das Flächenträgheitsmoment und damit auf die Verformung, die laut Zwangsbedingung maximal 0,2mm aufweisen soll.

Die Resultate der Optimierung sind in Abbildung 45 und Abbildung 46 zu sehen.

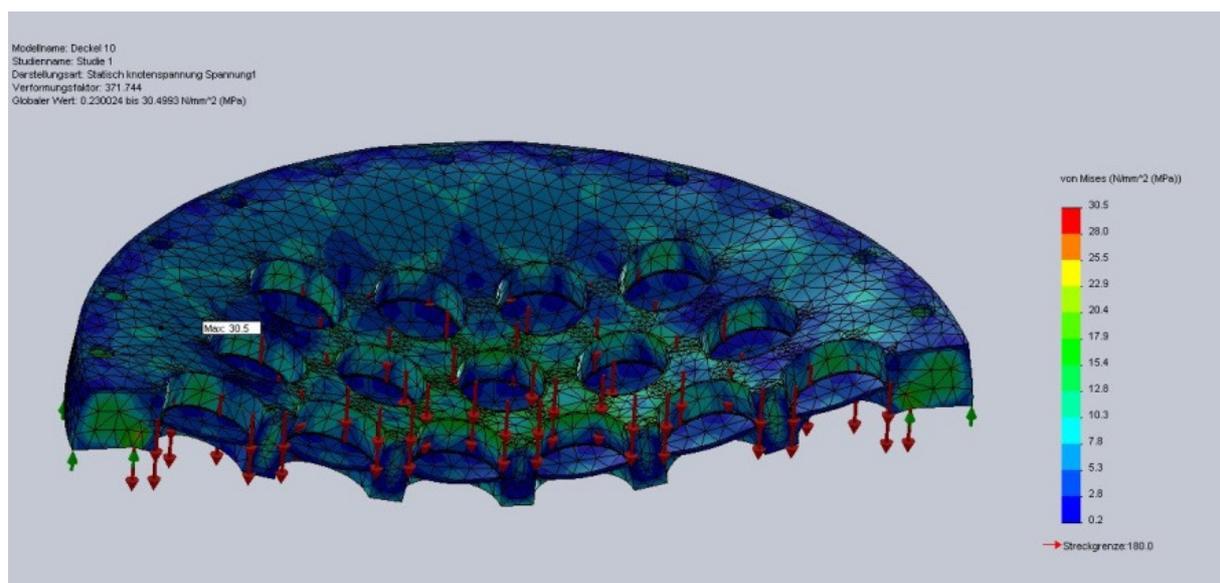


Abbildung 45 FEM-Darstellung der Spannungen im Deckel

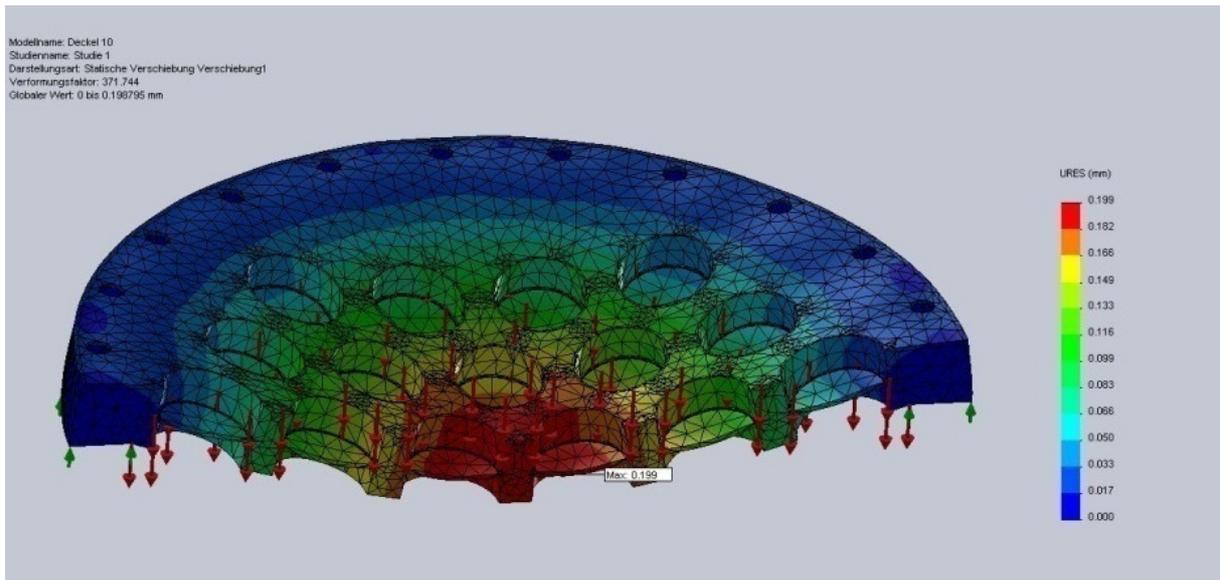


Abbildung 46 FEM-Darstellung der Verschiebung des Deckels

In Abbildung 47 ist ein Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Deckelhöhe und der Verschiebung erkennbar. Der Zusammenhang liegt darin, dass bei niedriger Deckenhöhe die Verschiebung hoch ist und umgekehrt. Bei den anderen Diagrammen sind keinerlei Zusammenhänge zu erkennen. Hier kann lediglich der Veränderungsverlauf der Variablen und des Gewichts aufgezeigt werden.

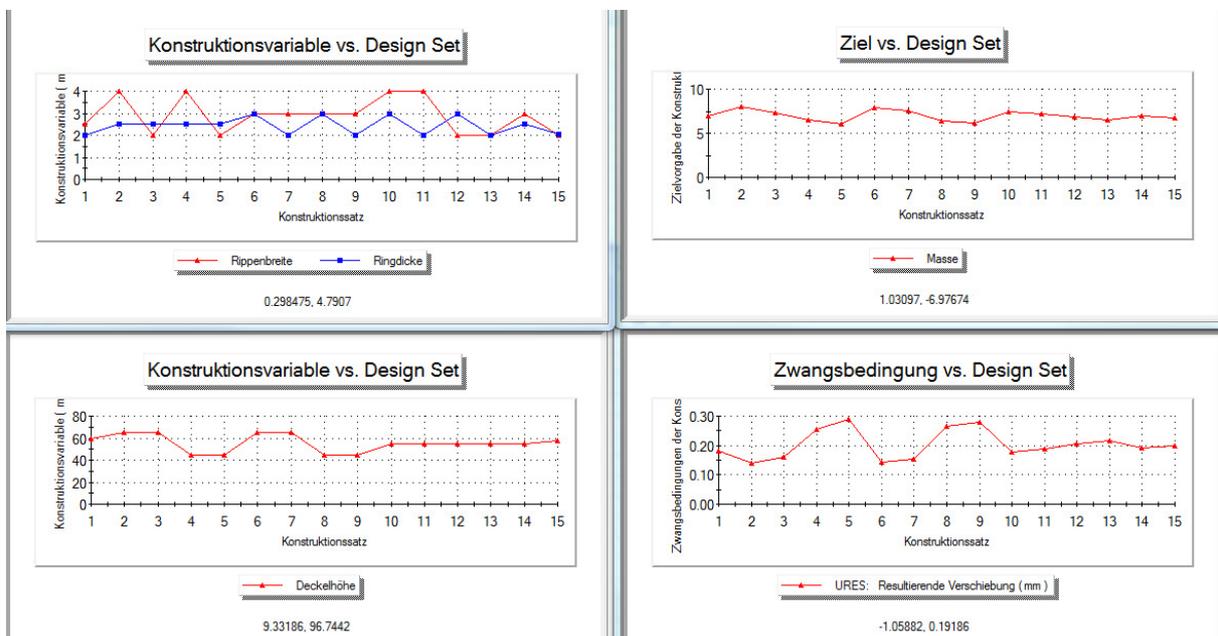


Abbildung 47 Variablenveränderung, Zielvorgabenänderung und Zwangsbedingungsänderung über die durchgeführten Studien (Konstruktionssätze)

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Aufgabe der vorliegenden Diplomarbeit lag darin, einen Kryostaten für ein Multihorn-Empfangssystem zu konstruieren.

Dabei galt es zunächst herauszufinden, ob es überhaupt möglich ist, ein Empfangssystem mit 24 Hörnern mit der zur Verfügung stehenden Kühlleistung zu betreiben. Zusätzlich sollte analysiert werden, welche speziellen Probleme bei einem Empfänger mit vielen Hörnern auftreten.

Als erstens wurden im theoretischen Teil relevante Grundlagen zur Funktion und zum Aufbau von Radioteleskopen, zu elektromagnetischen Wellen, zur Wärmeübertragung, zur Vakuumtechnik und zur Wärmeausdehnung vermittelt. Außerdem wurden einige CA-Hilfsmittel, die bei der Konstruktion genutzt wurden, sowie die Vorgehensweise beim methodischen Konstruieren dargestellt.

Im darauffolgenden Kapitel 3 wurde die Aufgabenstellung der Diplomarbeit erläutert und präzisiert, indem zunächst eine Anforderungsliste erstellt wurde. Um strukturiert Lösungen erarbeiten zu können, wurde der Kryostat anschließend in einzelne Funktionen zerlegt. Zu diesen Funktionen wurden unter Beachtung der ermittelten Anforderungen in Kapitel 4 Lösungsvarianten entwickelt. Bei den Lösungsvarianten handelt es sich teils um Lösungsvarianten, die bereits im MPIfR existieren und teils um neu, eigenständig entwickelte Lösungsvarianten.

Aus den erarbeiteten Lösungsvarianten der einzelnen Funktionen wurde in Kapitel 5 unter Berücksichtigung der Anforderungen die jeweils optimale Lösung ausgewählt und so das Lösungskonzept ermittelt.

Um die Lösungsvarianten der einzelnen Funktion zu vergleichen, wurden in Kapitel 5.1 die Wärmeströme mit teils angenommenen Werten berechnet. Dabei wurde der größte Wärmestrom zwischen Vakuumfenster und Horn ermittelt, wo ohne den Dämmschaum ein Kühlen auf die geforderte Temperatur nicht möglich wäre. Dabei müssen für eine höhere Anzahl an Hörnern andere Lösungen für die Wärmeübertragung am Vakuumfenster gefunden werden, wie z.B. durch metallisierte Folien, welche nur für die Wellenlänge ausgelegt sein müssen. Ein weiteres Lösungskonzept stach in der Berechnung des Wärmestroms heraus, nämlich der Hohlleiter aus glasfaserversträtktem Kunststoff mit einer dünnen Kupferschicht.

Auf Grundlage des im vorherigen Kapitel erarbeiteten Lösungskonzepts wurde in Kapitel 6 ein erster CAD-Entwurf präsentiert, der hinsichtlich der Montierbarkeit des Refrigerators eine Schwachstelle aufwies. Daher wurde der Entwurf modifiziert, woraus sich ein zusätzlicher Vorteil in der Wärmeübertragung ergab: durch das Verlegen des Refrigerators an die Seiten des Vakuumbehälters reicht die zweite Kühlstufe des Refrigerators weiter in den Kryostaten hinein und kommt somit näher an die Empfangseinheiten heran.

Schließlich fand in Kapitel 7 eine Überprüfung und Optimierung der Konstruktion statt, indem mit Hilfe des Programms „Solid Works Simulation“ eine Optimierungsstudie durchgeführt wurde.

Die Neuheit des in der vorliegenden Diplomarbeit konstruierten Kryostaten gegenüber den bestehenden Kryostaten liegt neben der Anzahl der Hörner im Längenausgleich.

Aufgrund des begrenzten Umfangs der Diplomarbeit ist es nicht möglich, alle Punkte bezüglich der Konstruktion des Kryostaten für das Multihorn-Empfangssystem zu behandeln. Als Ausblick in die Zukunft lässt sich daher zunächst festhalten, dass noch einige Punkte bearbeitet werden müssen, wie z.B. der Hornbereich, bei dem unter anderem das Vakuumfenster mit Dämmschaum und die Halterungen des Hornpakets fehlen.

Der in der Diplomarbeit entwickelte Längenausgleich wird im Anschluss an die Abgabe der Arbeit mit einem bereits gefertigten Test-Längenausgleich an einem Test-Dewar hinsichtlich der Leckrate und der Einfachheit der Verschiebung der Hohlleiterdurchführungen geprüft.

Um zukünftig Empfangssysteme mit mehr als 50 Hörnern betreiben zu können, müssen entweder leistungstärkere Refrigeratoren eingesetzt oder verbesserte Konzepte zur Minimierung der Wärmeeindringung am Vakuumfenster entwickelt werden.

Eine Empfehlung des Verfassers dieser Diplomarbeit ist, die Entwicklung von Hohlleitern, die als Stützkonstruktion einen glasfaserverstärkten Kunststoff besitzen.

9 Literaturverzeichnis

1. **Siegel, Robert, Howell, John R. und Lohrengel, Joachim.** *Wärmeübertragung durch Strahlung.* s.l. : Springer-Verlag.
2. **A.Boryczko.** *Virtuelle Produktentwicklung.* Fachhochschule Köln, Institut für Produktionsentwicklung und Konstruktionstechnik : s.n., 2007.
3. **Kerspe, Jobst H.** *Vakuumentchnik in der industriellen Praxis 3.Auflage.* Renningen : Expert Verlag, 2003.
4. **Stephan Schaber, Stephan Mayinger.** *Thermodynamik Band 1.* s.l. : Springer Verlag, 17.Auflage.
5. **CH.Kittel und H.Krömer.** *Physik der Wärme 2.Auflage.* München : Oldenbourg Verlag, 1984.
6. **A.Tipler, Paul.** *Physik 1.Auflage.* Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 1994.
7. **Roloff/Matek.** *Maschinenelemente 17.Auflage.* Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2005.
8. **Haefer, R.H.** *Kryo-Vakuumentchnik.* Heidelberg : Springer Verlag, 1981.
9. **W.G.Fastowski, J.W.Petrowski und A.E.Rowinski.** *Kryo-Technik.* Berlin : Akademie-Verlag, 1970.
10. **Roth, K.** *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen Band1.* berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2. Auflage.
11. **2009, Solid Works Simulation.** *Hilfe/ Onlinelehruch.*
12. **H.Hallmann.** *Begleittext zur Vorlesung"Computer Aided Design (CAD)".* Fachhochschule Köln, Institut für Produktionsentwicklung und Konstruktionstechnik : s.n., 2008.
13. **H.J.Overrath.** *Begleittext zu den Vorlesungen der technischen und höheren Mechanik.* Fachhochschule Köln, Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik : s.n., 2006-2008.
14. **P.Naefe.** *Begleittext "Konstruktionssystematik".* Fachhochschule Köln, Institut für Produktionsentwicklung und Konstruktionstechnik : s.n., 2009.
15. **www.wikipedia.de.**
16. **www.mpifr-bonn.mpg.de.**
17. **2009, Solid Works.** *Hilfe/Onlinelehrbuch.*
18. **J.Detlefsen und U.Siart.** *Grundlagen der Hochfrequenztechnik 2.Auflage.* München : Oldenbourg Verlag, 2006.
19. **H.Hallmann.** *Begleittext zur Vorlesung „Finite Elemente Methoden (FEM).* Fachhochschule Köln, Institut für Produktentwicklung und Konstruktion : s.n., 2009.