

Fachhochschule Köln
Institut für Produktentwicklung
und Konstruktionstechnik

**Konstruktion eines gewichts- und
volumenoptimierten Kryostaten für ein
Doppelhorn Empfangssystem im
Radioteleskop Effelsberg**

**Construction of a weight and volume optimized
kryostat for a dual feed receiving system at
radiotelescop Effelsberg**

Diplomarbeit

von Martin Müller
aus Bergisch Gladbach
Matr. Nr. : 11051224

Referent
Prof. Dr. Ing. H. Hallmann

Korreferent
Prof. Dr. Ing. A. Boryczko

Betreuer
Dr. Ing. R. Keller

erstellt im Wintersemester 2008/2009
eingereicht am 20. Februar 2009

Eidesstattliche Erklärung

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

Bonn, den 17. Februar 2009

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Formelzeichen	9
1. Einleitung	12
2. Das Max Planck Institut für Radioastronomie (MPIfR)	13
2.1 Historie [16]	13
2.2 Das Radioteleskop Effelsberg [16].....	14
2.3 Aufbau und Funktionsweise des Radioteleskops Effelsberg	16
2.4 Empfangssystem	19
2.4.1 Der Primärfokus.....	19
2.4.2 Die Empfängerkabine	20
2.4.3 Der Sekundärfokus	21
3. Der Kryostat	22
4. Thermodynamischer Hintergrund	25
4.1 Thermodynamischer Vergleichsprozess	25
4.2 Wärmeübertragung [7].....	27
4.2.1 Wärmeleitung.....	27
4.2.2 Wärmestrahlung	28
4.2.3 Wärmeübertragung durch Konvektion.....	31
5. Vakuumtechnik [4].....	31
5.1 Grundlagen:.....	32
5.2 Einteilung der Vakuumarten bezüglich des Drucks und der Teilchenzahldichte	33
5.3 Konstruktion einer vakuumgeeigneten Anlage	33
5.3.1 Grundlegende Anforderungen.....	33
5.3.2 Desorption und Diffusion.....	33
5.3.3 Leckrate.....	34
5.4 Einteilung der Vakuumpumpen	34
6. Hilfsmittel für die Konstruktion	35
6.1 Das Konstruktionsprogramm Solid Works [11].....	35
6.1.1 Allgemein.....	35
6.1.2 Handhabung [12]	36
6.2 Die Simulationssoftware Cosmos Works [13]	40
6.2.1 Allgemein.....	40
6.2.2 Die Handhabung [10]	40
7. Werkzeug zur Abschätzung der Kühlleistung eines Doppelhorn Kryostaten	44
7.1 Aufbau und Funktion.....	45
7.2 Benutzung	45
7.3 Theoretischer Hintergrund	46

8. Festigkeitsnachweis laut AD – Merkblättern [8]	51
8.1 Geltungsbereich der AD – Merkblätter	51
8.2 Formelzeichen	51
8.3 Berechnung gegen elastisches Einbeulen	52
8.4 Berechnung gegen plastisches Verformen	53
8.5 Festigkeitsberechnung am Beispiel eines Hohlzylinders laut AD – Merkblätter	53
8.5.1 Berechnung gegen elastisches Einbeulen	54
8.5.2 Berechnung gegen plastisches Verformen	55
8.5.3 Darstellung der FEM - Berechnung	56
9. Die Konstruktionsmethodik [21]	58
9.1 Informationsphase	59
9.1.1 Ist - Zustandsanalyse	59
9.1.2 Soll - Zustandsanalyse	65
10. Konstruktion des Kryostaten	67
10.1 Auswahl der Werkstoffe	68
10.1.1 Anforderungen der Werkstoffe für den Vakuumbehälter	68
10.1.2 Mögliche Werkstoffe zum Bau des Druckbehälters	68
10.1.3 Diskussion der Werkstoffe und Auswahl	72
10.2 Anforderungen an den Werkstoff des Strahlungsschildes	73
10.2.1 Mögliche Werkstoffe zum Bau des Strahlungsschildes	74
10.2.2 Diskussion und Auswahl des Werkstoffes für das Strahlungsschild	77
10.3 Anforderungen an den Werkstoff zur mechanischen Abstützung der Bauteile ...	77
10.3.1 Mögliche Werkstoffe zum Bau der mechanischen Abstützung	78
10.3.2 Auswahl des Werkstoffes zum Bau der mechanischen Abstützung	78
10.4 Form und Gestalt des Druckbehälters	78
10.4.1 Der Würfel	79
10.4.2 Der Quader	80
10.4.3 Die Kugel	81
10.4.4 Der Hohlzylinder	83
10.5 Erstellung und Untersuchung möglicher Bauformen der Druckbehälter	86
10.5.1 Untersuchung der Quaderform	86
10.5.2 Untersuchung einer Quaderform in Verbindung mit zylinderförmigen Hülsen	91
10.5.3 Untersuchung einer Kombination dreier Zylinderformen	97
10.5.4 Entscheidung	102
10.6 Konkrete Ausarbeitung der Konstruktion	102
10.6.1 Optimierung der bisherigen Bauform	102
10.6.2 Berechnung der Durchbiegung w [21]	105
10.7 Befestigung des Kryostaten im Empfangssystem	111
10.7.1 Allgemein	111
10.7.2 Statische Berechnung der maximalen Auflagerkräfte [21]	112
10.7.3 Auswahl der Schrauben [14;15]	115
10.8 Betrachtungen und Berechnungen zur thermischen Belastung	116
10.8.1 Auslegung der thermischen Leiter	116
10.9 Resultierender Aufbau des Kryostaten	121

11. Zusammenfassung und Ausblick	122
Literatur	123
A. Anhang.....	125
A.1. Auszüge aus den AD-Merkblättern.....	125
A.2. Datenblätter zu den Werkstoffeigenschaften von Al 99,0	133
A.3. Konstruktionszeichnungen	137
A.4 Datenblätter	148

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Radioteleskop Effelsberg	14
Abbildung 2: Signaleingang am Teleskop.....	16
Abbildung 3: Elektromagnetische Wellenstrahlung	17
Abbildung 4: Der Primärfokus.....	19
Abbildung 5: Die Empfangskabine.....	20
Abbildung 6: Innenansicht der Empfangskabine	20
Abbildung 7: Der Sekundärfokus	21
Abbildung 8: Der Sekundärspiegel	22
Abbildung 9: Der Kryostat.....	22
Abbildung 10: Der Regrigerator GTI 350C.....	23
Abbildung 11: Die Zustandsänderungen [17].....	25
Abbildung 12: Veranschaulichung der Einstrahlzahl	30
Abbildung 13: Einteilung der Vakuumpumpen [4]	34
Abbildung 14: Benutzeroberfläche von Solid Works	36
Abbildung 15: Erstellung einer räumlichen Geometrie	37
Abbildung 16: Erstellung von Bohrungen.....	38
Abbildung 17: Erstellung von Zeichnungen.....	39
Abbildung 18: Die Benutzeroberfläche von Cosmos Works.....	40
Abbildung 19: Benutzeroberfläche zur Berechnung des maximalen Hornabstandes	44
Abbildung 20: Spannungsdarstellung in Cosmos Works.....	57
Abbildung 21: Die 5 Arbeitsphasen [21].....	58
Abbildung 22: Aufbau eines Single-Beam-Empfängers [16]	60
Abbildung 23: Der Thermo - Choke	62
Abbildung 24: Funktionenbaum	63
Abbildung 25: Aufbau des Empfängers	67
Abbildung 26: Schnittdarstellung eines Faserverbundwerkstoffes [3]	70
Abbildung 27: Richtungsabhängigkeit der Festigkeitswerte von Faserverbundwerkstoffen [3]	71
Abbildung 28: Reflexion, Transmission, Absorption [17].....	73
Abbildung 29: Wärmeleitfähigkeit von Aluminium [9]	74
Abbildung 30: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe [9]	75
Abbildung 31: Spannungsdarstellung laut von Mises.....	79
Abbildung 32: resultierende Verschiebungen	79
Abbildung 33: Spannungen laut von Mises.....	80
Abbildung 34: resultierende Verschiebungen	81
Abbildung 35: Spannungen laut von Mises.....	82
Abbildung 36: resultierende Verschiebungen	82
Abbildung 37: Spannungen laut von Mises.....	83
Abbildung 38: resultierende Verschiebungen	84
Abbildung 39: mögliche Bauform Quader	86
Abbildung 40: Spannungsanalyse Quaderbauform.....	88
Abbildung 41: Spannungsdarstellung mit ISO Clipping.....	88
Abbildung 42: Darstellung der resultierenden Verschiebungen am Quader	89
Abbildung 43: FOS - Darstellung am Quader	90
Abbildung 44: Quaderform mit zwei zylinderförmigen Hülsen	91
Abbildung 45: Spannungsdarstellung der Bauform Quader/zylinderförmige Hülsen	92
Abbildung 46: ISO Clipping der Spannungsanalyse	93
Abbildung 47: Resultierende Verschiebungen	94
Abbildung 48: Verschiebungen in X - Richtung.....	95

Abbildung 49: Faktor der Funktionssicherheit.....	96
Abbildung 50: Verbindung dreier zylinderförmiger Hülsen	97
Abbildung 51: Spannungsdarstellung	98
Abbildung 52: Darstellung der resultierenden Verschiebungen.....	98
Abbildung 53: Darstellung der Verschiebungen in X-Richtung.....	99
Abbildung 54: Faktor der Funktionssicherheit.....	99
Abbildung 55: Faktor der Funktionssicherheit (ISO Clipping).....	100
Abbildung 56: gewählte Bauform des Kryostaten	102
Abbildung 57: resultierende Bauform des Kryostaten	104
Abbildung 58: Verstärkungsrippen an der Stirnseite	105
Abbildung 59: Schnittdarstellung der Verstärkungsrippen.....	106
Abbildung 60: statisches Ersatzsystem	106
Abbildung 61: Spannungsdarstellung	109
Abbildung 62: Verschiebung in X-Richtung.....	109
Abbildung 63: Faktor der Funktionssicherheit.....	110
Abbildung 64: Befestigung des Kryostaten	111
Abbildung 65: Ersatzsystem bei Elevation 90°.....	112
Abbildung 66: Ersatzsystem bei Elevation 0°.....	113
Abbildung 67: Vereinfachte thermische Analyse.....	119
Abbildung 68: Temperaturverteilung.....	120
Abbildung 69: resultierender Aufbau des Kryostaten	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechnung des Totaldrucks	32
Tabelle 2: Einteilung der Vakuumarten [4].....	33
Tabelle 3: Anforderungsliste.....	66
Tabelle 4: Verbundarten [3].....	72
Tabelle 5: Emissionskoeffizienten [7].....	76
Tabelle 6: Gegenüberstellung möglicher Materialien	78
Tabelle 7: Gegenüberstellung verschiedener Bauformen	84
Tabelle 8: Gegenüberstellung verschiedener Bauformen	101

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Benennung
A	m ² , mm ²	Fläche
C ₁₂	W·m ⁻² ·K ⁻⁴	Strahlungsaustausch
c ₁	-	Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung
D	mm	Durchmesser
D _a	mm	Außendurchmesser
D _i	mm	Innendurchmesser
E	MPa, N·mm ⁻²	Elastizitätsmodul
Ė	W·m ⁻²	Bestrahlungsstärke
F	N	Kraft
H	mm	Höhe
I	mm ⁴	Flächenmoment 2. Grades
K	MPa, N·mm ⁻²	Festigkeitskennwert
L	mm	Länge
m	kg	Masse
n	-	Anzahl der Einbeulwellen, die beim Versagen auftreten können
p	bar, Pa, N·m ⁻²	Druck
p _{abs}	bar, Pa, N·m ⁻²	Absolutdruck
p _i	bar, Pa, N·m ⁻²	Partialdruck
Δp	bar, Pa, N·m ⁻²	Differenzdruck
Q _L	mbar·l·s ⁻¹	Leckrate
Q	W	Wärmestrom
r	mm	Radius
r _i	mm	Innenradius
r _a	mm	Außenradius
S	-	Sicherheit
SK	-	Sicherheit gegen elastisches Einbeulen
s	mm	Verschiebung
s _e	mm	Wandstärke
T	Kelvin	Temperatur
T _a	Kelvin	Außentemperatur
T _i	Kelvin	Innentemperatur
u	%	Unrundheit
w	mm	Durchbiegung

α	$^{\circ}$	Winkelabweichung
β	$^{\circ}$	Winkel senkrecht zur Strahlungsfläche
ε	-	Emissionskoeffizient, Dehnung
λ	$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Dichte
σ	MPa, $N \cdot mm^{-2}$	Spannung
φ_{12}	-	Einstrahlzahl

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 Dezember 2008 bis Februar 2009 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 und Herrn Dipl.-Ing. Frank Schäfer 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, welche mir 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.

Zudem bedanke ich mich bei meinen Kommilitonen Dipl.-Ing. Florian Sontheim, Dipl.-Ing. Matthias Nieratschker und Dipl.-Ing. Christian Hungenberg für die gemeinsamen Projektarbeiten und Lerneinheiten während meiner Studienzeit. Besonders freue ich mich, dass ich die genannten Kommilitonen als gute Freunde gewinnen konnte.

Zum Schluss gilt meine besondere und tiefe Dankbarkeit meinen Eltern Christa Heeger-Müller und Wolfgang Müller, meinem Bruder Roland Müller, sowie meinem besten Freund Marc Schulteis, die mich während meiner Studienzeit in jeglicher Art und Weise unterstützten.

Bonn, den 17. Februar 2008

1. Einleitung

Das Max Planck Institut für Radioastronomie in Bonn hat seine Hauptarbeitsgebiete im Bereich Radio- und Infrarotastronomie. Die technischen Entwicklungen beziehen sich damit auch auf die Erforschung neuer leistungsfähiger Empfangssysteme. In der Arbeitsgruppe Hochfrequenztechnik hatte ich die Aufgabe eine Konstruktion zum Bau eines neuen Kühlbehälters (Kryostat) für ein neues Empfangssystem welches im zweigrößten vollbeweglichen Radioteleskop der Welt in Effelsberg/Eifel eingesetzt werden soll.

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

Meine Diplomarbeit befasst sich mit der mechanischen und thermischen Auslegung eines neuen Doppelhorn – Empfangssystems, welches im Sekundärfokus des Radioteleskops in Effelsberg zum Einsatz kommen soll. Hierzu werden ausgehend von physikalischen Grundüberlegungen über vereinfachte Systeme auf eine konkrete Konstruktion geschlossen. Mit Hilfe eines 3D-CAD Programms und einer Berechnungssoftware auf Basis der Finiten Elemente Methode (FEM) werden Festigkeitsnachweise, eine Optimierung des Modells, sowie thermische Berechnungen durchgeführt.

2. Das Max Planck Institut für Radioastronomie (MPIfR)

Das Max-Planck-Institut für Radioastronomie gehört zu den 80 eigenständigen Forschungsinstituten der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. Als innovative Forschungseinrichtung mit zahlreichen Kooperationen im Ausland betreibt das Institut Grundlagenforschung im Bereich der Astronomie.

2.1 Historie [16]

Seit den 50er Jahren des 19. Jahrhunderts existiert an der Universität Bonn ein astronomisches Institut, welches in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts begann, sich mit der jungen Wissenschaft der Radioastronomie zu beschäftigen. Es betrieb ein eigenes Radioteleskop von 25 Metern Durchmesser, den „Astropeiler Stockert“ auf einem der Hügel um Bad Münstereifel. Das Institut wurde seit 1962 von Prof. Dr. Otto Hachenberg geleitet.

Mit Ausbauplänen wandte sich das Institut an die Volkswagen-Stiftung. Schwerpunkt des geplanten Ausbaus war der Bau und der Betrieb eines neuen, größeren Radioteleskops. Es war allerdings im Vorhinein klar, dass das Institut für Radioastronomie der Universität Bonn die Kosten für dieses Großprojekt nicht alleine hätte tragen können.

Es traf sich daher glücklich, dass die Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (MPG) die Gründung eines eigenen Instituts für Radioastronomie plante. Durch die Zusammenlegung der beiden Projekte (Ausbau des Instituts für Radioastronomie der Universität Bonn, Gründung eines eigenen MPG-Instituts) wurde eine rasche Verwirklichung der Pläne möglich. Im Jahre 1966 wurde schließlich das Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) gegründet. Erster Direktor des MPIfR wurde Prof. Dr. Otto Hachenberg, der gleichzeitig auch das radioastronomische Institut an der Universität Bonn bis zu seiner Emeritierung leitete.

Bis heute entstand eine Vielzahl an Forschungsgruppen, die in internationaler Zusammenarbeit auf der ganzen Welt ihren Beitrag zur Erforschung des Universums leisten. Hauptarbeitsgebiete sind die Radio- und Infrarot-Astronomie. Die technologischen Entwicklungen im Institut umspannen den gesamten Beobachtungsbereich. Ein weiteres Forschungsgebiet stellt die theoretische Astrophysik dar.

Die Erforschung der Physik von Sternen, Galaxien und des Universums beinhaltet als Schwerpunkte die Sternentstehung, junge stellare Objekte, Sterne in späten Entwicklungsstadien, Pulsare, das interstellare Medium der Milchstraße und externer Galaxien, das galaktische Zentrum und seine Umgebung, Magnetfelder im Universum, Radiogalaxien, Quasare und andere aktive Galaxien, Staub und Gas in kosmologischen Entfernungen, Galaxien in den Frühphasen des Universums, die Kosmische Strahlung, Hochenergie-Teilchenphysik und die Theorie der Sternentwicklung und aktiver galaktischer Kerne.

2.2 Das Radioteleskop Effelsberg [16]



Abbildung 1: Radioteleskop Effelsberg

Das Radioteleskop Effelsberg stellt das Hauptbeobachtungsinstrument des Max Planck Instituts für Radioastronomie dar. Mit einem Paraboloid - Reflektor von 100m Durchmesser und einer Höhe von ebenfalls 100 Metern gehört das Radioteleskop in Effelsberg zu den größten schwenkbaren Radioteleskopen der Welt.

Es wurde in den Jahren 1968 bis 1972 von den Firmen Krupp und MAN gebaut. Die feierliche Inbetriebnahme fand am 1. August 1972 statt. Die Reflektoroberfläche setzt sich aus 2352 Panelen zusammen und weist eine Gesamtoberfläche von 7859 m² auf. Die mittlere Abweichung der Oberfläche von der Idealform (RMS) beträgt dabei maximal 0.5mm. Das Gesamtgewicht des Teleskops beträgt 3200t.

In knapp 12 Minuten ist es möglich, das Radioteleskop auf einem Schienenkranz von 64m Durchmesser und angetrieben von 8 Elektromotoren um 360° zu drehen. Mit weiteren 4 Elektromotoren wird der Reflektor mit Hilfe eines Zahnkranzes mit einer Geschwindigkeit von 16%/s seiner angestrebten Position zugeführt. Die Justiergenauigkeit beträgt hierbei 0,3mm. Um diese Genauigkeit aufrecht zu erhalten, wird das Teleskop regelmäßig vermessen und gegebenenfalls überarbeitet.

Die Verformung der Geometrie und die damit auftretende Verschiebung des Brennpunktes, welche durch die nicht unerhebliche Gewichtskraft des Reflektors verursacht wird, wird einerseits passiv durch die spezielle Fachwerkkonstruktion des Reflektors minimiert und andererseits durch aktives Nachjustieren des Empfängers korrigiert.

Die Brennweite des Paraboloid – Reflektors beträgt 30m. In diesem Punkt werden die empfangenen Signale gebündelt und durch das Empfangssystem aufgenommen, aufbereitet und digitalisiert. Gemessen werden können Signale mit Wellenlängen im Bereich zwischen 90cm bis 3,5mm. Hierfür sind lediglich andere Empfänger von Nöten. Somit ist das Teleskop in der Lage bei jedem Wetter und zu jeder Jahreszeit Messungen durchzuführen. Beispielsweise ist für eine Messung kleiner Wellenlängen trockene Luft und wolkenloser Himmel erforderlich, da kleine Wellenlängen durch diese Umstände eine sehr große Dämpfung erfahren und somit vom Teleskop nicht mehr zu erfassen sind. Signale mit großer Wellenlänge sind im Gegensatz dazu relativ unempfindlich.

Seit der Fertigstellung des Radioteleskops in Effelsberg im Jahre 1972 wurde die Technik und Ausstattung stets überarbeitet und weiterentwickelt. Besonders zu erwähnen sind die teilweise Erneuerung der Oberfläche des Hauptreflektors, sowie die weiterentwickelten Empfängereinheiten, zur Messung einzelner oder mehrerer Frequenzbereiche. Als jüngste Neuerung gilt der überarbeitete Sekundärspiegel, der nun über eine vollvariable Oberflächengeometrie verfügt, um Verformungen des Hauptspiegels in Folge von Gewichtskräften durch eine dementsprechende Adaption des Subreflektors noch effektiver ausgleichen zu können.

2.3 Aufbau und Funktionsweise des Radioteleskops Effelsberg

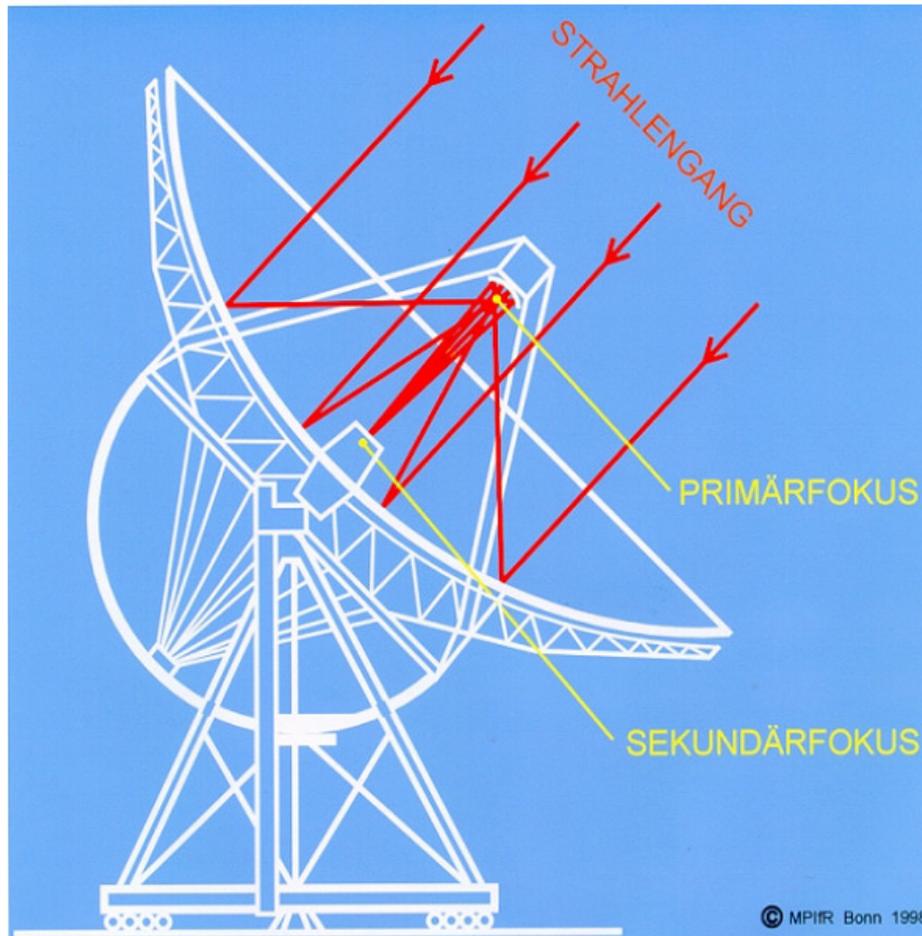


Abbildung 2: Signaleingang am Teleskop

Je nach Frequenz (Schwingungen pro Sekunde) kann elektromagnetische Strahlung in unterschiedlichen Erscheinungsformen beobachtet werden. Das elektromagnetische Spektrum erstreckt sich von den niederfrequenten Radiowellen über das sichtbare Licht bis zur hochfrequenten Gammastrahlung. Dabei ist die Energie der Strahlung proportional der Frequenz. Abbildung 3 zeigt eine Veranschaulichung der Elektromagnetischen Wellenstrahlung.

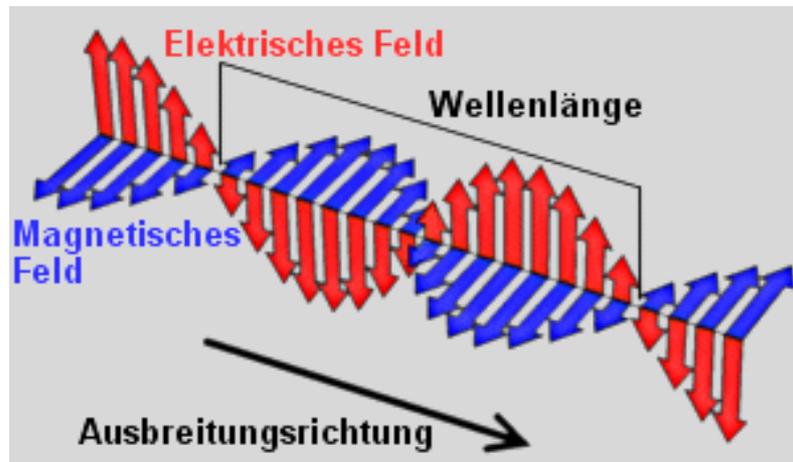


Abbildung 3: Elektromagnetische Wellenstrahlung

Zwischen Wellenlänge und Frequenz, sowie der Energie gelten die folgenden Beziehungen:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

$$E = h \cdot f \quad (3)$$

(Einstein'sche Regel)

Mit

E: Energie

h: Planck'sches Wirkungsquantum

f: Frequenz

c: Lichtgeschwindigkeit

Dabei ist c die konstante Lichtgeschwindigkeit von 299.792,458 km pro Sekunde. Das physikalische Konzept der elektrischen und magnetischen Feldlinien, sowie der gegenseitigen Induktion elektrischer und magnetischer Felder wurde 1831 von dem englischen Chemophysiker Michael Faraday aufgestellt und experimentell bewiesen. 1873 entwickelte der schottische Physiker James Clerk Maxwell aus diesen Beobachtungen die

nach ihm benannten Gleichungen. Die Maxwell'schen Gleichungen beschreiben Licht als oszillierendes elektromagnetisches Feld und erlaubten die theoretische Berechnung von dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit). Der deutsche Physiker Heinrich Hertz schließlich konnte 1888 die von Maxwell vorhergesagten Radiowellen künstlich erzeugen und nachweisen. Zu Ehren von Hertz, dessen Experimente die Grundlagen der drahtlosen Telegraphie und der Rundfunktechnik bildeten, erhielt die physikalische Einheit der Frequenz seinen Namen (1 Hertz = 1 Schwingung pro Sekunde). [1]

Die mit Hilfe der Einstein'schen Regel berechnete Energie E ist die Energie eines Strahlenquants abhängig von der Frequenz bzw. Wellenlänge. Als Quantisierung bezeichnet man die Teilung einer Größe (z.B. Energie) in „sehr kleine Pakete“. Bezogen auf die elektromagnetische Wellenstrahlung und deren Quantisierung, nennt man diese „sehr kleinen Pakete“ Photonen.

Nach Planck ist jede Strahlung (auch die Lichtstrahlung) aus Energiequanten zusammengesetzt. Die Strahlungsenergie ist also stets ein ganzzahliges Vielfaches der Energie eines Strahlenquants.

Die Intensität der aus dem Weltraum empfangenen Strahlung ist wie bereits beschrieben sehr gering. Aus diesem Grund wird ein möglichst großer Parabolspiegel angestrebt, um die Leistung des Eingangssignals zu vergrößern. Im Folgenden nun der physikalische Zusammenhang zwischen der Leistung P , der Intensität I (Leistung pro Fläche) und der Fläche A :

$$P = I \cdot A \quad (4)$$

Mit
P: Leistung
I: Intensität
A: Fläche

Aus Gleichung (4) geht hervor, dass die Fläche A proportional der Intensität I ist [2]. Aus diesem Grund wird eine möglichst große Fläche des Reflektors angestrebt. Allerdings ist der Bau eines Radioteleskops über einer Größe von ca. 100 Metern Durchmesser aus Statik- und Festigkeitsgründen nicht, oder nur mit sehr hohem Kostenaufwand möglich. Man geht aus diesem Grund dazu über, Teleskope und Forschungszentren international zu vernetzen. Somit stellt man aus mehreren kleineren Teleskopen ein großes Teleskop her. Hierbei wird die Lichtleitertechnik, sowie Elektronik zur Kompensation der Zeitverschiebung und des daraus resultierenden Phasenversatzes eingesetzt. Diese neuartige Forschungsmethode wird als Radiointerferometrie mit sehr großen Basislängen bezeichnet (VLBI). Es existiert sowohl ein europäisches VLBI-Netzwerk (EVN), aber auch die Möglichkeit das europäische VLBI-Netzwerk mit Teleskopen aus den USA zu koppeln.

2.4 Empfangssystem

Das 100m Radioteleskop Effelsberg hat die Möglichkeit zwei Brennpunkte zu benutzen, den Primär- und den Sekundärfokus. Die als ebene Wellen ankommenden Signale werden nun zunächst vom Primärspiegel in dessen Brennpunkt gebündelt. Hier befindet sich der Primärfokus.

2.4.1 Der Primärfokus



Abbildung 4: Der Primärfokus

30m vor dem Parabolspiegel befindet sich die Empfängerkabine des Primärfokus. Diese ist mit 4 Beinen am Primärspiegel befestigt, wovon eines begehbar ist. In der Empfängerkabine befinden sich mehrere Empfängerboxen, die jeweils einen Empfänger enthalten. Weiterhin findet man in der Empfängerkabine Einrichtungen vor, die Messungen direkt vor Ort möglich machen. In einer kreisrunden Öffnung im Boden der Empfängerkabine wird die Empfängerbox eingeschoben und im Brennpunkt des Primärspiegels fixiert. Da zur Messung verschiedener Wellenlängen auch verschiedene Empfänger benötigt werden, ist es möglich die Empfängerboxen zu wechseln. Seit neustem existieren auch Empfängerboxen, die mehrere Empfänger für unterschiedliche Wellenlängen enthalten. Somit können Ausfallzeiten bedingt durch Umbaumaßnahmen verringert werden. Allerdings können keine Messungen unterschiedlicher Wellenlängen gleichzeitig durchgeführt werden.

2.4.2 Die Empfängerkabine



Abbildung 5: Die Empfängerkabine

Wie bereits im Abschnitt „Primärfokus“ erläutert wurde, befinden sich neben den „Vor-Ort-Messsystemen“ mehrere Empfängerboxen in der Empfängerkabine. Diese Empfänger sind in sich geschlossene Systeme und funktionieren nach dem Trommelrevolver-Prinzip. Soll eine „Patrone“ gewechselt werden, muss die alte „Patrone“ dem „Lauf“ entnommen werden und anschließend die neue „Patrone“ dem „Lauf“ zugeführt werden, welche im vorliegenden Fall zusätzlich elektrisch mit dem Teleskop verbunden und eingestellt werden muss. Es sind allerdings keine weiteren Umbaumaßnahmen notwendig.



Abbildung 6: Innenansicht der Empfängerkabine

Die Empfängerboxen enthalten neben der Elektronik den Kryostaten, ein oder mehrere Empfangshörner, welche die „Antennen“ des Empfängers darstellen. Der Dewar oder Kryostat ist eine Kältemaschine, deren Funktionsprinzip im Folgenden näher betrachtet wird.

2.4.3 Der Sekundärfokus

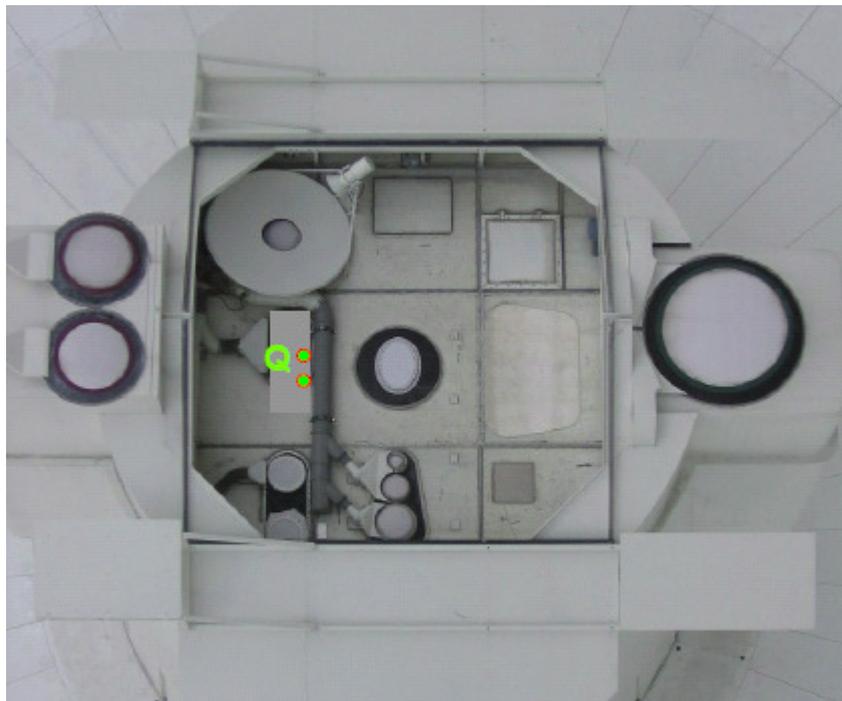


Abbildung 7: Der Sekundärfokus

Durch einen weiteren konkaven Spiegel im Primärfokus des Hauptspiegels wird die elektromagnetische Wellenstrahlung umgelenkt in den so genannten Sekundärfokus. Dieser befindet sich in der Mitte des Primärspiegels. Hier sind weitere Empfänger angeordnet, die nachdem die Empfänger aus dem Primärfokus und die Öffnung im Sekundärspiegel geschlossen wurde, in Betrieb genommen werden können. Ein gleichzeitiges Betreiben von Primär- und Sekundärfokus ist nicht möglich. Die im Brennpunkt des Primärspiegels gebündelten Signale werden hier durch den 6,5m großen, elliptischen Sekundärspiegel (Gregory-Spiegel) nochmals im Sekundärfokus gebündelt, wo weitere Empfängereinheiten in den Fokus gebracht werden können. Die neue vollvariable Oberfläche des Sekundärspiegels erlaubt eine noch genauere Bündelung der Signale und den Ausgleich von Unebenheiten im Primärspiegel, sowie Abweichungen bedingt durch Verformungen in Folge von Gewichtskräften.



Abbildung 8: Der Sekundärspiegel

Der Kryostat, welcher in dieser Arbeit zu konstruieren ist, befindet sich in einem Empfangssystem im Sekundärfokus. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, sind im Sekundärfokus mehrere Empfangssysteme fest verbaut. Anders als im Primärfokus müssen diese somit nicht gewechselt werden.

Insgesamt sind zurzeit 7 Empfangssysteme im Sekundärfokus verbaut, von denen 3 Systeme parallel betrieben werden können. Somit ist dieser in der Lage, Messungen in mehreren Wellenlängenbereichen durchzuführen. Die Empfänger können Wellenlängen von 1,3mm bis 21cm aufnehmen. Die dreistöckige und fast 10 Meter hohe Fokuskabine ist gleichzeitig der Zugang zum Hauptspiegel.

3. Der Kryostat



Abbildung 9: Der Kryostat

Das Wort Kryostat kann aus der griechischen Sprache abgeleitet werden. Das Wort „kryo“ bedeutet kalt. Somit kann ein Kryostat als Kühlmaschine bezeichnet werden, die sehr niedrige Temperaturen erzeugen und halten können (statisch).

Kryostaten funktionieren nach unterschiedlichen Verfahren. Man unterscheidet Bad-, Verdünnungs-, Verdampfer- und Refrigeratorcryostaten. Für dieses Projekt wird ein Refrigeratorcryostat verwendet, da dieser zu den Standardkühlsystemen des MPIfR gehört. Es wird hohen Wert auf die Kompatibilität gelegt, was Vorteile im Bezug auf Wartung, Montage, Ersatzteile und Anschlüsse bietet. Aus diesem Grund wird auch nur dieses Verfahren beschrieben und erläutert.



Abbildung 10: Der Refrigerator CTI 350C

Im Druckbehälter des Kryostaten werden mit Hilfe einer Vakuumpumpe Drücke bis zu 10^{-5} Pa erzeugt. Des Weiteren werden mit einem Refrigerator (Abbildung 10) in einem zweistufigen Kühlprozess Temperaturen bis unter 10K erzeugt. Durch dieses Vakuum wird erreicht, dass kein Wärmestrom bedingt durch Konvektion stattfinden kann, da das Volumen zwischen den zu kühlenden Bauteilen und der Außenwand des Kryostaten evakuiert ist. Somit existieren nahezu keine Gasmoleküle, die Wärmeenergie von der Außenwand zu den thermisch zu isolierenden Teilen übertragen können. Damit kann mit relativ kleiner Kühlleistung eine sehr niedrige Temperatur nur wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt erreicht werden. Das Ziel dieser extremen Abkühlung der Bauelemente ist die Unterdrückung des thermischen Eigenrauschens. [5]

Als Rauschen bezeichnet man allgemein das regellose und zufällige Abweichen einer physikalischen Größe um einen Mittelwert. Im vorliegenden Fall setzt sich das Rauschen aus folgenden Komponenten zusammen. Zum einen tritt das thermische Rauschen auf. Schaltkreise, die bei einer Umgebungstemperatur mit $T > 0K$ betrieben werden, weisen eine ungeordnete Bewegung der Ladungsträger infolge der thermischen Energie auf. Die Ladungsträger werden durch die Vibration der Metallgitter abgelenkt. Es entsteht eine

messbare, stochastische Spannung, die mit zunehmender thermischer Energie, also der Temperatur, steigt. Zum zweiten muss das Eigenrauschen der Halbleiter in den ersten Verstärkerstufen unterbunden werden. Dieses Eigenrauschen entsteht in den aktiven Zonen der Halbleiterbauteile auf Grund der physikalischen Randbedingungen der verwendeten Materialien. Diese Anteile von unerwünschter elektromagnetischer Energie kann durch Kühlung verringert werden. [6]

Als dritte Rauschquelle kann das Hintergrundrauschen anderer kosmischer Strahlenquellen sowie der Erdatmosphäre gewertet werden.

Ein weiterer unerwünschter Signalanteil entsteht durch elektromagnetische Felder, die von einem jeden Strom durchflossenen Leitern erzeugt werden und Spannungen in andere Komponenten der Schaltung induzieren.

Da die vom Radioteleskop empfangenen Signale einen extrem geringer Pegel aufweisen, werden die zu messenden Signale durch das oben beschriebene Rauschen überlagert und somit unbrauchbar. Als Folge dessen müssen die Empfangsstufen von jeglichen Rauschsignalen möglichst effektiv isoliert werden. Dies erreicht man im Fall der beschriebenen Rauschanteile der Bauteile durch Kühlung der Eingangsstufen, für die von außen kommenden Anteile durch Subtraktion der Signale zweier Empfangspfade. Dazu werden zwei im Abstand angeordnete Empfangsantennen verwendet, dessen erste auf die zu messende Quelle fokussiert wird wodurch die zweite zwangsläufig an der Quelle vorbei „schießt“. Geht man davon aus, dass beide Empfangssysteme dieselben Signale von Atmosphäre und Hintergrund erhalten, kann durch Subtraktion das gewünschte Astronomische Signal isoliert werden. Aus diesem Grund wurde der Kryostat in dieser Arbeit für zwei Empfangssysteme konstruiert.

Als erste Stufe des Kryostaten bezeichnet man das Volumen zwischen der Außenwand und dem Strahlungsschild. In dieser Stufe wird die Temperatur bis auf circa 70K gesenkt. Da durch das Hochvakuum eine Wärmeübertragung durch Konvektion nahezu ausgeschlossen wird, muss lediglich die Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung verhindert werden. Zu diesem Zweck wird die zweite Stufe von der ersten Stufe durch ein Strahlungsschild getrennt. Dieses hat die Aufgabe die von der Außenwand in den Innenraum abgestrahlte Energie bei einem geringen Emissionskoeffizienten möglichst effektiv zu reflektieren. Die thermodynamischen Hintergründe werden im Kapitel 4 näher belichtet. Somit gilt ein gesondertes Augenmerk auf die Wahl der Werkstoffe und Oberflächen. Die Oberfläche des Strahlungsschildes sollte poliert sein. Verschmutzungen, Legierungsbestandteile und Material- und Oberflächenfehler können zu einem erhöhten Emissionskoeffizienten führen und sind folglich zu minimieren. Zudem ist die Wärmeübertragung an Montage- und Kontaktstellen auszuschließen bzw. zu minimieren.

In der zweiten Stufe werden schließlich die thermisch zu isolierenden Objekte platziert. Diese werden mit Kupferbändern als thermische Leiter mechanisch mit der so genannten Kryopumpe verbunden. Somit kann gewährleistet werden, dass die zu kühlenden Empfangsverstärker des Radioteleskops eine maximale und effektive Kühlung erfahren.

4. Thermodynamischer Hintergrund

4.1 Thermodynamischer Vergleichsprozess

Das Funktionsprinzip des Kryostaten lässt sich mit einem thermodynamischen Kreisprozess (Abbildung 11) beschreiben. Als Kreisprozess bezeichnet man in der Thermodynamik eine Folge von Zustandsänderungen eines Arbeitsmediums (Flüssigkeit, Dampf, Gas, allgemein Fluid genannt) die periodisch abläuft, wobei immer wieder der Ausgangszustand, gekennzeichnet durch die Zustandsgrößen, wie u. a. Druck, Temperatur und Dichte, erreicht wird. Es sind technische Prozesse, meist zur Umwandlung von Wärme in Arbeit (z. B. in Verbrennungsmotoren) oder zum Heizen und Kühlen durch Aufwenden von Arbeit (Wärmepumpe, Kühlschrank). [7]

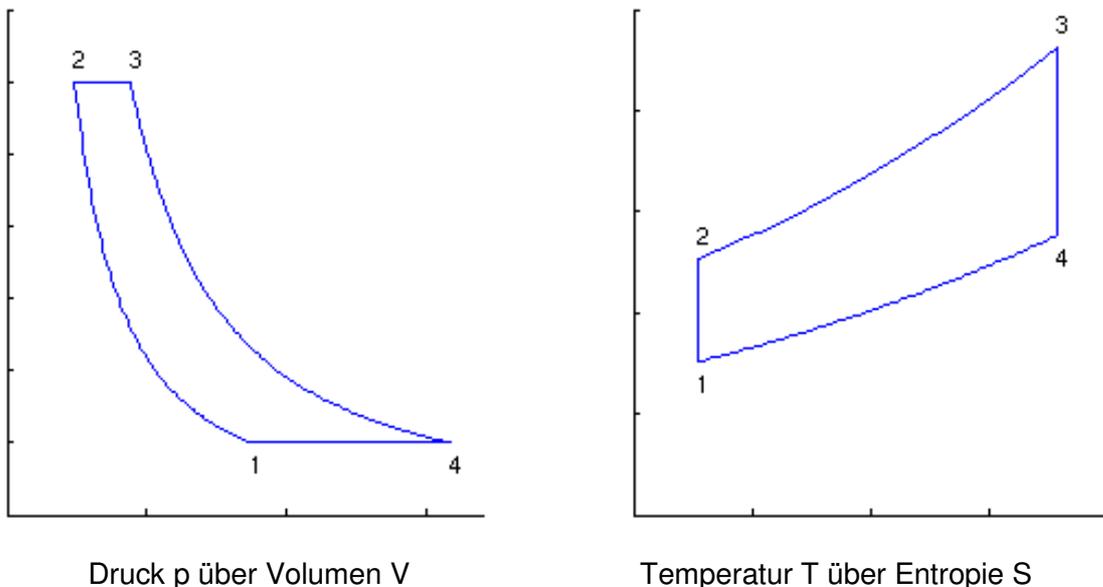


Abbildung 11: Die Zustandsänderungen [17]

Zustandsänderungen des thermodynamischen Vergleichsprozesses

Im Kühlkreislauf des Kryostaten laufen folgende Zustandsänderungen ab:

Zustandsänderung 1-2:

Zunächst wird das gasförmige Fluid durch einen Kompressor isentrop verdichtet, was bedeutet, dass der Verlauf dieser Zustandsänderung als reversibel und adiabat betrachtet werden kann. Durch die Verdichtung wurden Temperatur und Druck des Fluids gleichermaßen erhöht.

Zustandsänderung 2-3:

Anschließend wird das verdichtete Fluid in einem Wärmetauscher isobar abgekühlt. Hierzu ist ein Wärmestrom notwendig, der Wärme vom verdichteten Fluid an die Umgebungsluft abgibt. Gleichzeitig sinkt die Temperatur des Fluids.

Zustandsänderung 3-4:

Im dritten Schritt wird der Druck des Fluids mittels einer Drossel adiabat, also ohne Wärmeaufnahme, bzw. Abgabe gesenkt.

Zustandsänderung 4-1:

Im vierten und wichtigsten Schritt wird das Fluid im Kryokühler isobar entspannt. Um zu erreichen, dass der Druck bei vergrößertem Volumen konstant bleibt, muss das Fluid seiner Umgebung Wärme entziehen. Durch diesen Effekt wird der entsprechende Teil des Kryokühlers und somit der evakuierte Raum des Kryostaten gekühlt. Im Anschluss an die Entspannung wird das Fluid wieder dem Kompressor zugeführt und der beschriebene Ablauf beginnt erneut. Somit kann man von einem geschlossenen Kreisprozess sprechen. Der beschriebene Kühlkreislauf wird im vorliegenden Fall mit Helium betrieben.

4.2 Wärmeübertragung [7]

Wie schon zuvor erwähnt müssen die zu kühlenden Empfangsstufen thermisch isoliert werden. Hierzu dienen das Strahlungsschild, thermische Isolatoren, sowie das Hochvakuum. Im Folgenden soll zunächst betrachtet werden, welche Arten der Wärmeübertragung existieren und welche Größen auf diesen Prozess Einfluss haben:

4.2.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung vollzieht sich über ein Medium. Der Wärmestrom fließt stets vom höheren zum tieferen Temperaturniveau. Die Temperaturdifferenz ist somit die „treibende Kraft“. Die Wärmeleitung durch ein Medium mit konstanter Länge L und Fläche A kann mit Formel 5 ausgedrückt werden:

$$\dot{Q} = \frac{A}{L} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \lambda dT \quad (5)$$

Mit
Q: Wärmestrom
 λ : Wärmeleitfähigkeitskoeffizient
A: Fläche
L: Länge

Für einen Hohlzylinder, welche Geometrie einem Kryostaten sehr nahe kommt, kann Formel 6 verwendet werden:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{2\pi L}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \cdot (T_a - T_i) \quad (6)$$

Mit
Q: Wärmestrom
 λ : Wärmeleitfähigkeitskoeffizient
L: Länge
 T_a : Temperatur außen
 T_i : Temperatur innen
 r_a : Außenradius
 r_i : Innenradius

Durch diesen Zusammenhang lässt sich erkennen, dass der Wärmestrom unabhängig von der Ortskoordinate ist. Lediglich die Wärmestromdichte ändert sich mit zunehmender Fläche.

Aus diesen Betrachtungen lassen sich Anforderungen an den zu konstruierenden Kryostaten ableiten. So muss die Wärmeleitung vom Innenraum des Kryostaten zur Außenhülle minimiert werden. Dies kann durch die Verwendung eines Materials mit einem niedrigen Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten λ erreicht werden. Die Wärmeleitung tritt an Kontakt und Befestigungsstellen der einzelnen Bauteile auf. Somit muss darauf geachtet werden, dass wenig und flächenmäßig kleine Kontaktstellen, möglichst nur an thermisch isolierenden Materialien, vorgesehen werden. Eine gute Wärmeleitfähigkeit muss von den Empfangsstufen zur Kryopumpe geschaffen werden. Dies kann mit Hilfe von Kühlbändern unterstützt werden, welche zum Beispiel aus elektrolytisch hergestelltem, reinem Kupfer gefertigt werden. Dieses Material weist einen sehr günstigen Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten auf.

4.2.2 Wärmestrahlung

Die Wärmeübertragung durch Strahlung ist im Gegensatz zur Wärmeleitung nicht an ein Medium gebunden. Die Wärmestrahlung ist eine elektromagnetische Wellenstrahlung, welche durch Elektronenübergang und Gitterschwingungen von einem jeden Körper mit einer Temperatur $T > 0K$ freigesetzt wird. Da diese Art der Wärmeübertragung nicht an ein Medium gebunden ist, tritt diese trotz Vakuum uneingeschränkt auf. Besonderes Augenmerk wird auf die Wärmestrahlung zwischen der Außenhaut und dem Strahlungsschild gelegt, da hier die Temperaturdifferenz sehr groß ist (ca. 230K).

Ein jeder Körper mit der Temperatur $T > 0K$ gibt eine bestimmte Strahlungsleistung an seine Umgebung ab. Bezüglich dieser Strahlungsleistung kann folgender physikalischer Zusammenhang gefunden werden:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (7)$$

Mit

ε : Emissionskoeffizient

σ : Stefan – Boltzmann – Konstante

A : Fläche

T: Temperatur

Hierbei ist Epsilon der Emissionswert, welcher Aufschluss über die Wärmeabsorption-, bzw. Wärmeabstrahlung eines Objekts gibt. Es werden Werte von 0 bis 1,0 vergeben. Dabei ist einem ideal schwarzen Körper der Wert $\varepsilon = 1,0$, während einem idealen Reflektor der Wert $\varepsilon = 0$ zugeordnet wurde. Laut dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz ist der Absorptionsgrad Alpha gleich dem Emissionsgrad Epsilon. Somit kann festgestellt werden, dass ein ideal schwarzer Körper am meisten abstrahlt, allerdings auch am meisten emittiert.

Die Stefan – Boltzmann – Konstante σ ist ein Proportionalitätsfaktor der Strahlungsleistung mit dem Wert $\sigma = 5,670400 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

Gleichzeitig absorbiert der strahlende Körper eine Leistung aus der Umgebung. Mit der Annahme, dass einer strahlenden Fläche eine strahlende Fläche gleicher Größe, sowie parallel und mit gleichem Emissionskoeffizienten gegenüber steht, kann folgender Zusammenhang beschrieben werden:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (8)$$

Das Vorzeichen von P gibt Aufschluss über die Richtung der Strahlung. Die Richtung führt immer vom höheren zum niederen Wärmepotential. Sollten die zuvor genannten Bedingungen nicht erfüllt sein, ist der Emissionskoeffizient ε durch einen Faktor C zu ersetzen, welcher wie folgt berechnet wird.

$$C = \sigma_s \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{\varphi}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdot \varphi^2} \quad (9)$$

Mit

$$\varphi = \frac{1}{\pi A_1} \iint \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{s^2} dA_2 dA_1 \quad (10)$$

Mit

φ : Einstrahlzahl

Zur Veranschaulichung dient Abbildung 11.

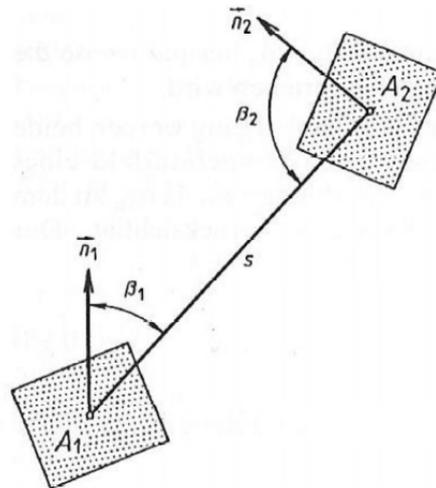


Abbildung 12: Veranschaulichung der Einstrahlzahl

In der vorliegenden Aufgabenstellung können sowohl die Einstrahlzahl $\varphi=1$, sowie die Emissionskoeffizienten als gleich angesehen werden. Hieraus ergibt sich abschließend Gleichung 11.

$$\dot{Q} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \cdot \sigma_s \cdot A \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (11)$$

4.2.3 Wärmeübertragung durch Konvektion

Die Wärmeübertragung durch Konvektion (Fluidströmung) benötigt ein strömendes Medium. Hier unterscheidet man zwischen natürlicher und erzwungener Konvektion. Die natürliche Konvektion wird durch Dichteunterschiede verursacht, welche aus lokaler Erwärmung beziehungsweise Abkühlung von Medien resultieren. Als Beispiel kann die Strömung der Raumluft durch einen Heizkörper genannt werden.

Im Gegensatz hierzu steht die erzwungene Konvektion. Diese wird dort eingesetzt, wo ein Fluid gezielt durch einen vorgegebenen Querschnitt gefördert werden soll. Als treibende Kraft werden verschiedene Druckpotentiale an den Enden der Leitungen angesetzt. Ein Beispiel sei die Wasserförderung durch eine Rohrleitung. Für das benötigte Druckpotential wird am einen Ende der Leitung eine Pumpe und am Ende der Leitung der Umgebungsdruck angesetzt.

Im Allgemeinen kann sich feststellen lassen, dass die Wärmeübertragung durch Konvektion von einer Vielzahl von strömungstechnischen, sowie stoffspezifischen Parametern beeinflusst wird. Hierzu zählen Kennzahlen, wie z.B. Reynolds, Prandtl oder Nusselt, aber auch die Wärmekapazität, die Dichte und die Viskosität.

Durch die Evakuierung des Kryostaten befindet sich annähernd kein Medium zwischen den Wänden der einzelnen Kühlstufen. Zudem hilft die Kühlung der Eingangsstufen auf 15 K durch den Kryo – Pump - Effekt den Gasdruck soweit zu senken, dass nahezu keine Wärmeübertragung durch Konvektion stattfindet, An den kalten Teilen werden alle Gase ausgefroren, deren Gefrierpunkt oberhalb dieser Temperatur ist. Praktisch bleibt dadurch nur Helium im gasförmigen Zustand erhalten was zur Folge hat, dass dieser Anteil vernachlässigbar klein ist und daher außer Acht gelassen werden kann. Aus diesem Grund wird auf eine genauere Erläuterung der konvektiven Wärmeübertragung verzichtet.

5. Vakuumtechnik [4]

Als Vakuum bezeichnet man den Zustand eines Gases, bei dem sein Druck oder die Dichte kleiner ist als bei der umgebenden Atmosphäre. Da der Atmosphärendruck über der Erdoberfläche nicht konstant ist (Berge, Täler), kann man bezüglich des Druckes keine konkrete Aussage treffen, ab wann ein Vakuum erreicht ist.

Um ein Vakuum zu erzeugen, muss ein Behälter evakuiert werden. Somit fällt der Druck im Behälter stark ab und ist folglich geringer als der Atmosphärendruck.

5.1 Grundlagen:

Ein beliebiges, in einem Volumen eingeschlossenes Gas verteilt sich immer gleichmäßig. Die einzelnen Gasteilchen bewegen sich in dem Volumen dauernd mit hohen Geschwindigkeiten umher. Sie üben, wenn sie auf die Behälterwand mit der Fläche A auftreffen, auf diese durch Impulsübertragung eine Kraft F aus. Der Druck p , der auf die Wand ausgeübt wird, ist definiert als:

$$P = \frac{F}{A} \quad (12)$$

Die Einheit des Drucks wird laut ISO-Norm in N/m^2 angegeben. Allerdings sind auch andere physikalische Einheiten in der Vakuumtechnik verbreitet.

1 Pa = 1 N / m²
 1 Torr \approx 133,33 Pa
 1 Atm \approx 101325 Pa
 1 Psi \approx 6895 Pa

Besteht das Gas aus verschiedenen Gasarten, so übt jedes Gas entsprechend seiner Konzentration einen partiellen Druck aus. Durch Aufaddieren aller Partialdrücke erhält man den Totaldruck.

$$P_{total} = \sum P_{part,i} \quad (13)$$

Mit
 P_{total} : Totaldruck
 P_{part} : Partialdruck

Beispiel Luft bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit

Gasart	Partialdruck p_{part} [mbar]
Stickstoff	781,8
Sauerstoff	209,7
Wasserdampf	12
Argon	9,34
Kohlendioxid	0,33
Neon	0,0182
Helium	$5,23 \times 10^{-3}$
Krypton	$1,15 \times 10^{-3}$
Wasserstoff	$4,94 \times 10^{-3}$
Xenon	$8,7 \times 10^{-5}$
Totaldruck	1.013

Tabelle 1: Berechnung des Totaldrucks

5.2 Einteilung der Vakuumarten bezüglich des Drucks und der Teilchenzahldichte

Druckbereich	Druck / mbar	Teilchenzahldichte / cm ⁻³
Großvakuum	$10^3 - 10^0$	$2,65 \cdot 10^{19} - 2,65 \cdot 10^{16}$
Feinvakuum	$10^0 - 10^{-3}$	$2,65 \cdot 10^{16} - 2,65 \cdot 10^{13}$
Hochvakuum	$10^{-3} - 10^{-7}$	$2,65 \cdot 10^{13} - 2,65 \cdot 10^9$
Ultrahochvakuum	$10^{-7} - 10^{-12}$	$2,65 \cdot 10^9 - 2,65 \cdot 10^4$

Tabelle 2: Einteilung der Vakuumarten [4]

5.3 Konstruktion einer vakuumgeeigneten Anlage

5.3.1 Grundlegende Anforderungen

Soll eine Anlage mit einem Vakuum betrieben werden, so sind einige Regeln und Maßnahmen zu beachten, damit ein Vakuum erzeugt und gehalten werden kann. Um bei der Evakuierung eines Behälters möglichst schnell den gewünschten Druck zu erhalten, muss dieser sauber sein. Typische Verunreinigungen sind Öle, Fette, Schmutz an Schrauben und Dichtungen, Reaktionsprodukte von Prozessen oder kondensierte Dämpfe, hier vor allem Wasser, welches an den Behälterwänden absorbiert wird. Bei der Evakuierung verdampft das Wasser und muss abgeschieden werden. Sogar Metalle wie Zinn und Magnesium können bei 100°C im Vakuum in großen Mengen verdampfen. Daher ist die Verwendung dieser Werkstoffe meist ausgeschlossen. Somit ist auf ein werkstoffgerechtes Konstruieren zu achten, sowie auf besondere Sauberkeit bei der Montage. Folglich müssen Schrauben und Dichtungen trocken eingesetzt werden. Soll ein Behälter für Hoch- oder Ultrahochvakuum vorliegen, sollten saubere Handschuhe getragen werden.

5.3.2 Desorption und Diffusion

Außer Wasser können auch weitere Stoffe wie zum Beispiel Öl von den Wänden und Bauteilen absorbiert werden. Weiterhin diffundieren bei diesen Drücken Stoffe aus Metallen (z.B. Wände) und Kunststoffen (z.B. Dichtungen) aus, welche im abgepumpten Gas in nicht vernachlässigbaren Mengen nachzuweisen sind. Somit muss auch beim werkstoffgerechten Konstruieren darauf geachtet werden, dass Werkstoffe durch diese Umstände ihre Materialeigenschaften nicht verlieren.

5.3.3 Leckrate

Je nach benötigtem Druck hat die Leckrate eine entscheidende Bedeutung. Lecks können durch zu große Toleranzen, schlechte Montage und Fertigung, Korrosion, Schmutz und Materialverschleiß entstehen. Auch durch die Verwendung ungeeigneter Materialien, die im Feinbereich porös sind wie z. B. gegossenes Aluminium, können Lecks eingetragen werden. Bei einem vorhandenen Leck stellt sich je nach Größe ein gewisser Volumenstrom ein. Sollte die Vakuumpumpe nicht kontinuierlich arbeiten, steigt der Druck mit der Zeit an, wodurch das Vakuum nach und nach verloren geht. Sollte die Vakuumpumpe kontinuierlich fördern, so sollte die Pumpe gewisse Leistungsmerkmale aufweisen, die hier nicht näher dargestellt werden und vom Hersteller empfohlen werden. Je nach Pumpenleistung stellt sich zwischen Leckvolumenstrom und abgeführtem Volumenstrom ein Gleichgewichtszustand ein.

Weiterhin muss auch der eingesetzte Werkstoff des Behälters möglichst dicht sein. Hier ist ein geeignetes Material mit entsprechender Wandstärke vorzusehen. Allgemein kann man feststellen: Je größer die Wandstärke, desto Dichter der Behälter. Die Leckrate wird definiert als

$$Q_L = \frac{\Delta p \cdot V}{\Delta t} \quad (14)$$

5.4 Einteilung der Vakuumpumpen

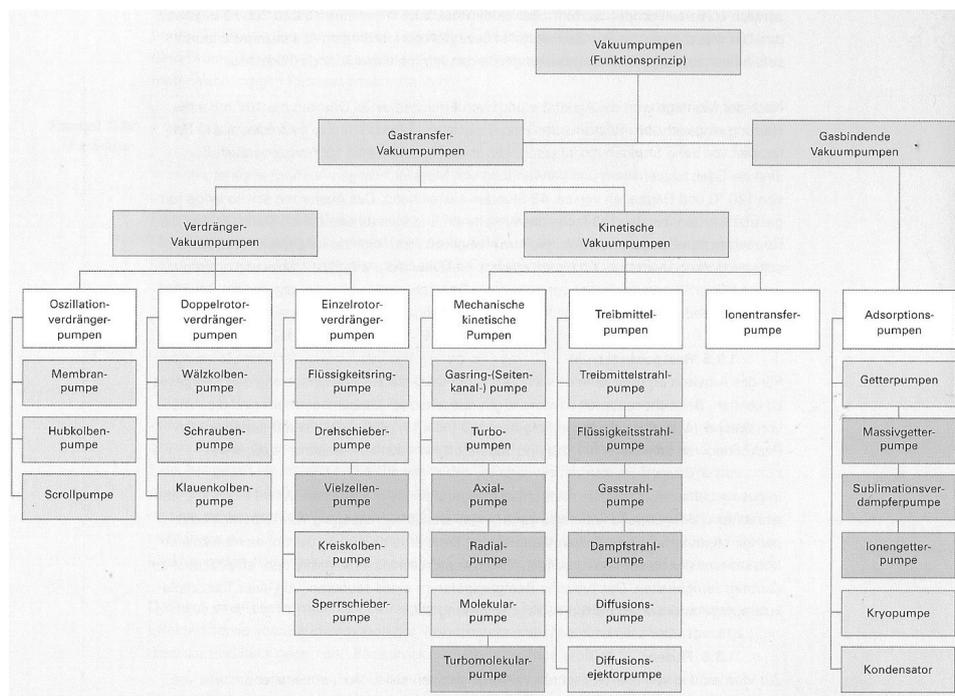


Abbildung 13: Einteilung der Vakuumpumpen [4]

Die Entlüftung des Druckkörpers wird durch den gemeinsamen Einsatz von einer Vorförder- und einer Turbomolekularpumpe erreicht. Zunächst wird mittels der Vorförderpumpe (z.B. Membran- oder Hubkolbenpumpe) der Druckkörper bis zu einem Druck von 100 bis 1500 Pa evakuiert. In diesem Bereich beginnt die sogenannte Molekularströmung. Der Druck, an dem die Molekularströmung beginnt, bezeichnet den Zustand, bei dem die mittlere freie Weglänge größer ist, als der Abstand der Schaufeln der Turbomolekularpumpe. Als mittlere freie Weglänge bezeichnet man wiederum die Weglänge, die ein Teilchen zwischen einem ersten und einem zweiten Zusammenstoß mit einem anderen Teilchen zurücklegt. Die Turbomolekularpumpe evakuiert nun den Druckkörper bis zu einem Druck von 10^{-7} Pa. Diese turbinenähnliche Pumpe arbeitet nach dem Prinzip des Impulssatzes, welcher folgendermaßen definiert ist:

$$F \cdot v = const. \quad (15)$$

mit
F: Kraft
v: Geschwindigkeit

Der magnetgelagerte Rotor der Turbomolekularpumpe arbeitet mit einer Drehzahl von ca. 90.000 1/min. Diese extrem hohe Geschwindigkeitsenergie wird nach dem Impulssatz auf die einzelnen Moleküle übertragen, wodurch die Moleküle mit der nun erhaltenen Geschwindigkeitsenergie den Druckkörper verlassen.

6. Hilfsmittel für die Konstruktion

6.1 Das Konstruktionsprogramm Solid Works [11]

6.1.1 Allgemein

Das Konstruktionsprogramm Solid Works wird vornehmlich im Maschinenbau angewandt und basiert auf einer Microsoft Windows Benutzeroberfläche. Es dient dazu ein Modell virtuell zu erzeugen, bevor ein erster Prototyp erstellt wird. Basierend auf Skizzen, können mit Hilfe von Features Volumenkörper erzeugt werden. Somit ist es möglich mit dem Modell zu experimentieren, sowie Varianten zu erstellen, ohne dass Kosten für eine Prototypenerstellung anfallen. Auch eine nachträgliche Veränderung des Modells ist durch eine Parametrisierung in einer Feature – Baumdarstellung, welche den Ablauf der Konstruktion beschreibt, möglich.

6.1.2 Handhabung [12]

Abbildung 14 zeigt zunächst die Benutzeroberfläche von Solid Works.

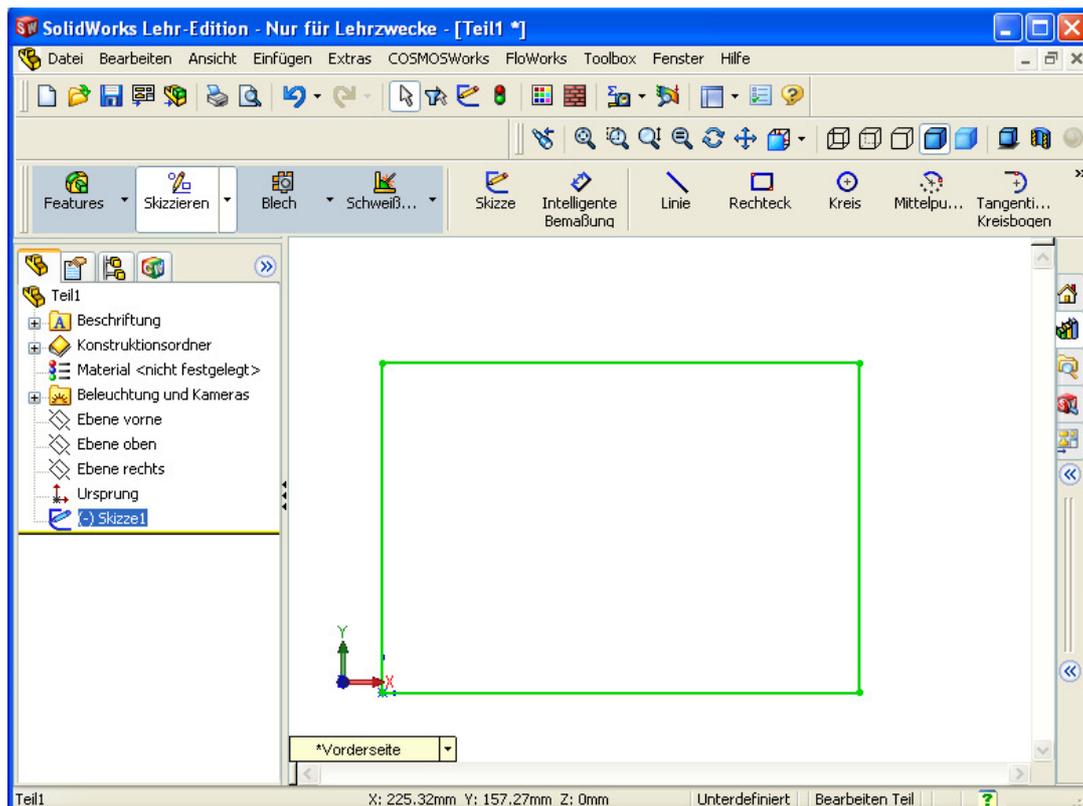


Abbildung 14: Benutzeroberfläche von Solid Works

Zu oberst befindet sich die Taskleiste, welche zur allgemeinen Verwaltung und Bearbeitung dient. Darunter findet man die 2-D und 3-D Features, sowie Ansichts- und Verknüpfungsoptionen, welche zur Generierung des Modells dienen. Auf der linken Seite schließt sich der Feature – Manager oder Feature – Baum an. Dieser gibt Auskunft über die chronologische Abfolge der Konstruktion, sowie über den Status der einzelnen Features und Skizzen. Das Feld rechts daneben zeigt die gegenwärtige Konstruktion an. Hier wurde als Beispiel eine Skizze in Form eines Rechtecks erstellt.

Jedes 3-D- Modell basiert auf einer 2-D Skizze, welche auf mehrere Arten in den Raum ausgetragen werden können (z.B. linear, rotierend, entlang einer Spline – Form). In Abbildung 15 ist eine lineare Austragung der schon vorgestellten 2-D-Skizze dargestellt.

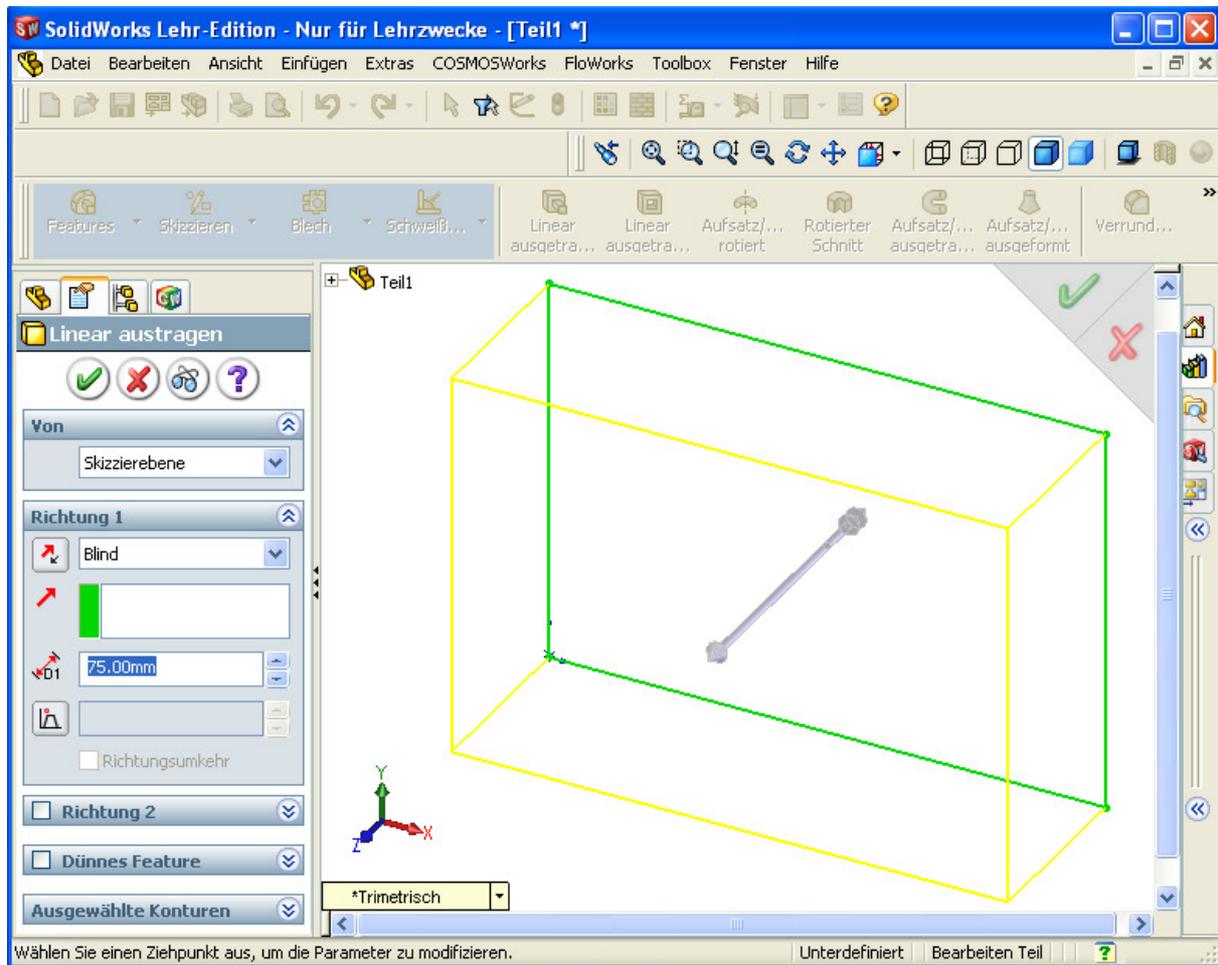


Abbildung 15: Erstellung einer räumlichen Geometrie

Auf diesen neu generierten Flächen können wiederum neue Skizzen erstellt werden, welche anschließend durch Features in den Raum ausgetragen können, wodurch nicht nur Volumen erzeugt (z.B. linear ausgetragener Aufsatz), sondern auch Volumen entfernt werden kann (z.B. linear ausgetragener Schnitt). Dies geschieht nach dem Prinzip eines Flächenbegrenzungsmodells, welches durch die Addition beziehungsweise Subtraktion zweier Volumina ein neues Volumen generiert.

Dies ist in Abbildung 16 an dem schon bekannten Beispiel durchgeführt worden. Nach der Erstellung zweier 2-D-Skizzen wurden diese als linear ausgetragener Schnitt ausgetragen. Mathematisch gesehen wurden die beiden kleineren Volumina vom großen rechteckigen Volumen subtrahiert.

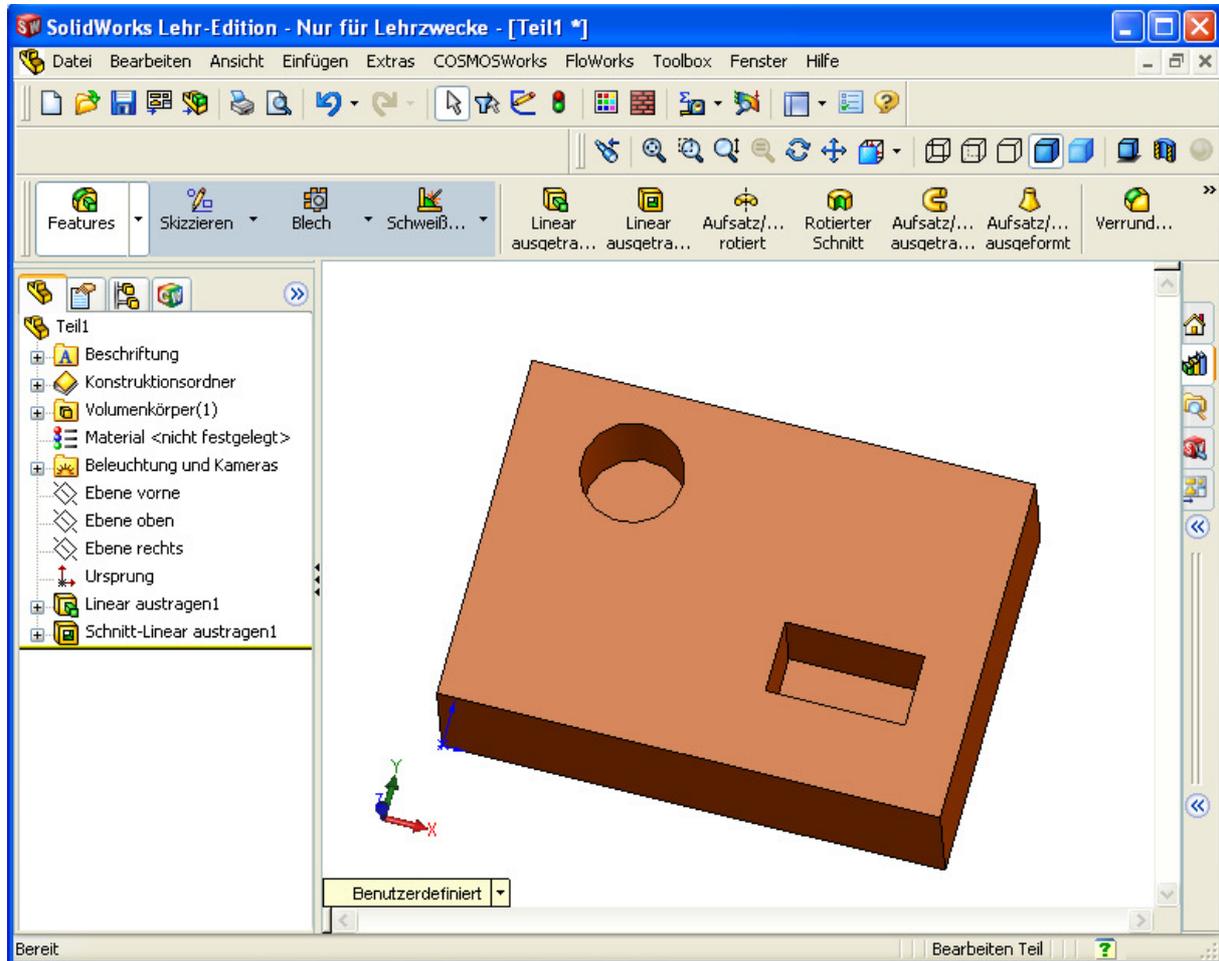


Abbildung 16: Erstellung von Bohrungen

Mit Hilfe von weiteren Features wie z.B. Fasen- und Verrundungsfeatures, dem Bohrungsassistenten usw. wird in einzelnen Schritten das gewünschte Teil erzeugt. Die benannten Features arbeiten ebenfalls nach dem Prinzip der Addition beziehungsweise Subtraktion von Volumina. Man könnte diese als Makros bezeichnen, welche vom Hersteller bereits eingerichtet wurden.

Sollte sich ein zu erstellendes Objekt aus mehreren Teilen zusammensetzen, werden mehrere Bauteile zu einer Baugruppe verknüpft. In dieser Baugruppe stehen alle Bauteile in einem geometrischen Zusammenhang. Als Beispiel dient ein Bolzen, welcher in einer Bohrung versenkt wird. Der Bolzen und die Bohrung stehen konzentrisch zueinander. Mit Hilfe dieser Verknüpfungen werden jedem Teil, welches zunächst sechs Freiheitsgrade besitzt (drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade), diese soweit entzogen, bis die erwünschte Position oder Lage zweier Bauteile zueinander erreicht ist.

Aus dem fertigen Teil oder der Baugruppe ist es nun möglich eine Zeichnungsableitung zu erstellen, wie in Abbildung 17 dargestellt ist, welche bereits sämtliche Parameter des Teils wie z.B. Bemaßungen, Symmetrien enthält. Weiterhin sind das Solid Works Modell, sowie die Zeichnungsableitung bidirektional assoziativ, was bedeutet, dass Parameterwerte, welche in der Zeichnung geändert werden, auch gleichzeitig im Solid Works Modell geändert werden. Dies ist in beide Richtungen möglich.

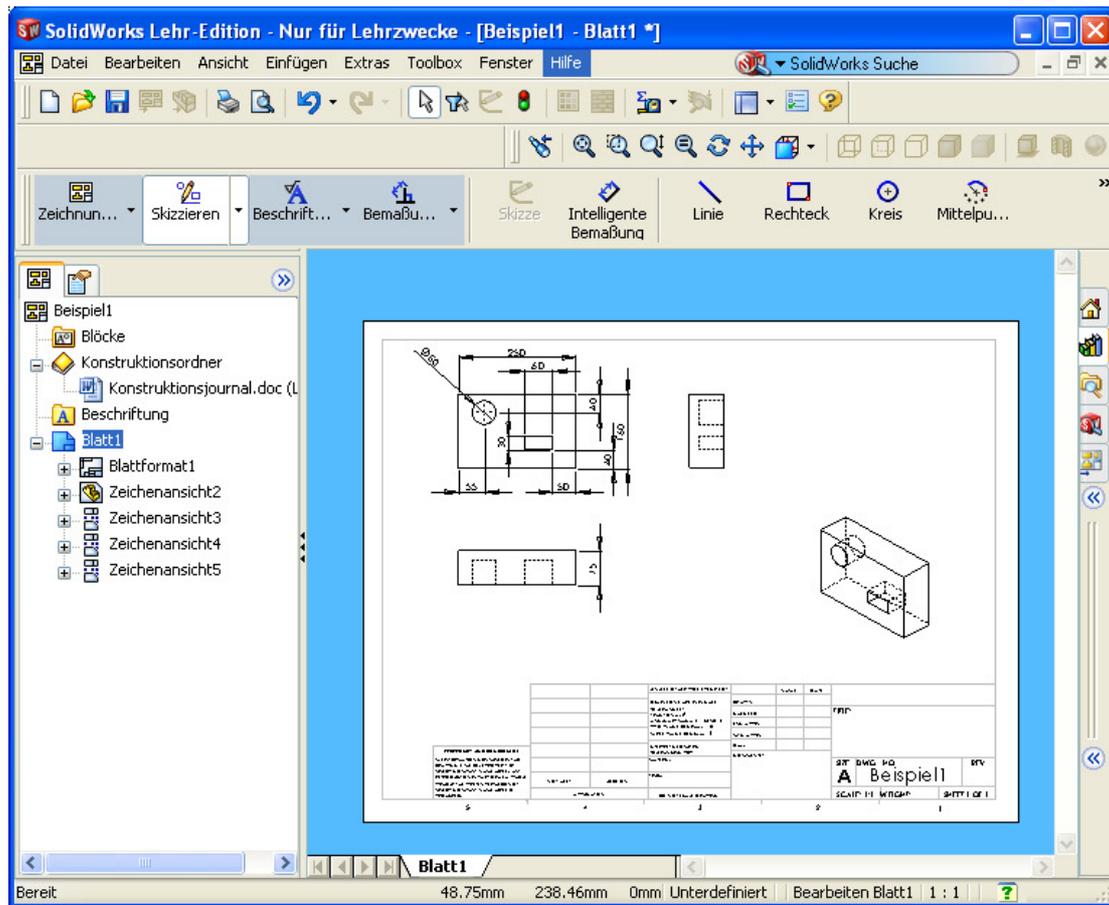


Abbildung 17: Erstellung von Zeichnungen

6.2 Die Simulationssoftware Cosmos Works [13]

6.2.1 Allgemein

Das Programm Cosmos Works ist als Zusatzanwendung im Konstruktionsprogramm Solid Works implementiert. Es dient zur Analyse eines Bauteils oder einer Baugruppe nach dem Prinzip der Finiten Elemente Methode (FEM). Angewandt wird die FEM zur Analyse von Bauteilspannungen, sowie der Knickung, aber auch zu Thermostatischen und –dynamischen Berechnung und Frequenzanalysen welche eine Bauteil- und Baugruppenoptimierung ermöglichen sollen. Auch Sonderfälle wie Fallprüfungen, Materialermüdung und dynamische Analysen sind mit dieser FEM - Software möglich.

Die Finite Elemente Methode basiert auf der Aufteilung eines Objekts in endlich große Elemente (finite Elemente) und ihrer Wirkung zueinander bei bestimmten Belastungen. Die Form der Elemente bzw. des Netzes kann unterschiedlich sein und muss von Bauteil zu Bauteil verändert werden. Mit der Form der Vernetzung ändern sich auch die späteren Ergebnisse, die es zu deuten und zu hinterfragen gilt. Im Zweifelsfall müssen verschiedene Netze bezüglich Form und Feinmaschigkeit angewandt werden.

6.2.2 Die Handhabung [10]

Abbildung 18 zeigt die Benutzeroberfläche.

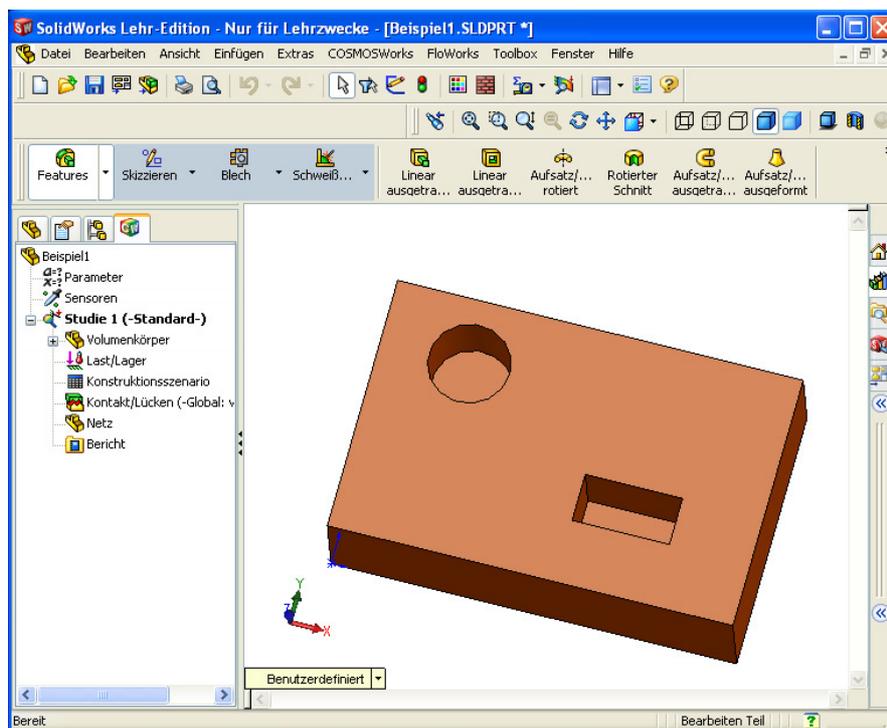


Abbildung 18: Die Benutzeroberfläche von Cosmos Works

Das FEM – Programm Cosmos Works weist eine analoge Benutzeroberfläche zum 3D- CAD – Programm Solid Works auf. Ebenso wie in Solid Works befindet sich auf der linken Seite eine Baumstruktur, welche nun Aufschluss über die vorliegenden Studien und deren Parameter wie z.B. Lager, Kräfte, Material, sowie deren Ergebnisse gibt. Es ist möglich mehrere Studien zu einem Bauteil oder einer Baugruppe anzulegen, um im Anschluss die Ergebnisse zu vergleichen und zu deuten.

Studien

Das Programm Cosmos Works ist in der Lage mehrere Arten von Studien durchzuführen. Hierzu gehören die im folgenden Abschnitt beschriebenen:

statische Studie

Statische Analysen liefern als Ergebnisse Spannungen, Dehnungen, Verschiebungen, sowie Sicherheitsfaktoren. Die Belastung erfolgt durch statische Kräfte und Momente. Mit Hilfe der gewonnenen Werte kann erkannt werden, ob das untersuchte Objekt ausreichend dimensioniert ist, oder sogar überdimensioniert ist. In diesem Fall ist eine Optimierung von Nöten. Durch diese Studie lassen sich sehr effektiv Kosten einsparen durch Materialeinsparungen, sowie den virtuellen Test ohne einen Prototypen. Erst nach der FEM – Studie wird der erste Prototyp erstellt, der mit größter Wahrscheinlichkeit nicht versagt.

Bei der Annahme einer linearen statischen Analyse wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Die erhaltene Reaktion ist direkt proportional zu den angewendeten Lasten. Wenn sich z. B. die Größe der Lasten verdoppelt, verdoppelt sich auch die Reaktion des Modells (Verschiebungen, Dehnungen und Spannungen). Die Annahme der Linearität kann getroffen werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:
- Die Maximalspannung ist im linearen Bereich der Spannungs-Dehnungskurve, die durch eine Gerade, beginnend am Ursprung, charakterisiert ist.
- Die berechnete maximale Verschiebung ist beachtlich kleiner als die charakteristischen Bemaßungen des Teils. Die maximale Verschiebung einer Platte z. B. muss bedeutend kleiner als die Plattenstärke sein und die maximale Verschiebung eines Balkens muss wesentlich kleiner als die kleinste Bemaßung des Balkenquerschnitts sein.
- Annahme der Elastizität, keine plastischen Verformungen
- Annahme der Statik: Belastungen werden sehr langsam eingebracht

Sollten diese Annahmen nicht erfüllt werden, muss von einer nicht linearen, bzw. dynamischen Analyse ausgegangen werden. In dieser Arbeit sind all diese Voraussetzungen immer erfüllt, sodass in allen Fällen eine statische Analyse ausreichend war.

Thermische Studie

Man unterscheidet zwei Arten von Wärmeübertragungsanalysen, sowie die thermische Spannungsanalyse.

Stationäre thermische Analyse

Bei diesem Analysetyp liegt der Schwerpunkt auf den thermischen Zuständen des Körpers, nachdem dieser ein thermisches Gleichgewicht erreicht hat. Die zum Erreichen eines thermischen Gleichgewichts notwendige Zeitspanne ist nicht von Interesse.

Transiente (instationäre) thermische Analyse

Bei diesem Analysetyp liegt der Schwerpunkt auf dem thermischen Status des Körpers, und zwar zu verschiedenen Zeitpunkten.

Thermische Spannungsanalyse

Temperaturänderungen können beachtliche Spannungen im Körper verursachen. Die thermische Spannungsanalyse berechnet Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen aufgrund thermischer Effekte.

In dieser Arbeit kann von stationären thermischen Verhältnissen ausgegangen werden, da nur in diesem Zustand die Temperaturverteilung im Kryostaten von Interesse ist. Aus diesem Grund beschränkt sich die thermische Analyse auf den stationären Fall.

Optimierungsanalyse

Mit der Optimierungsanalyse ist es möglich die Geometrie bezüglich der Ausnutzung des Materials und dessen Parameter zu verbessern. Dies geschieht im Programm automatisch. Der Nutzer ist lediglich für das Aufstellen von Randbedingungen verantwortlich, wie z.B. der Aufstellung einer Zielfunktion, Konstruktionsparameter und Zwangsbedingungen. Hieraus wird ersichtlich, dass trotz der computertechnischen Hilfsmittel der Konstrukteur fachgerechtes Hintergrundwissen und Verständnis benötigt, um eine sinnvolle Analyse durchzuführen.

Arbeitsschritte bei einer FEM – Analyse

Im Zuge meiner Diplomarbeit werden sowohl die thermisch als auch die statische Analyse durchgeführt. Aus diesem Grund wird die Vorgehensweise dieser beiden Analyse exemplarisch dargestellt.

Vorgehensweise bei einer statischen Analyse

- I. Generierung eines Modells in Solid Works
- II. Erstellung einer statischen Studie mit Volumenkörper- oder Schalenvernetzung
- III. Zuweisung von Materialeigenschaften wie z.B. E-Modul oder Streckgrenze
- IV. Zuweisung von Lagern und Belastungen an Flächen, Ecken und Punkten
- V. Vernetzung des Analyseobjekts mit eventueller Netzanpassung an relevanten Stellen
- VI. Berechnung der Studie
- VII. Deutung der gewonnenen Ergebnisse wie zum Beispiel Spannungen oder Verformungen
- VIII. Gegebenenfalls Netzanpassung und erneute Berechnung
- IX. Ausgabe der Ergebnisse durch beispielsweise Plots, Diagramme, Einfärbung von Flächen, Darstellung der Verformung.

Vorgehensweise bei einer statischen thermischen Analyse

Die thermische Analyse ist der statischen Analyse sehr ähnlich, da hier angenommen wird, dass sich ein thermisches Gleichgewicht eingestellt hat.

- I. Erstellung eines Modells in Solid Works
- II. Erstellung einer thermischen Studie mit Volumenkörpervernetzung
- III. Im Feature Manager: Einstellung auf statische Studie
- IV. Zuweisung von Werkstoffen und deren Parametern
- V. Zuweisung von thermischen Lasten an Flächen, Ecken und Punkten
- VI. Zuweisung von Wärmestrahlungsparametern im Kontextmenu
- VII. Vernetzung des Analyseobjekts
- VIII. Berechnung der Studie
- IX. Darstellung der Temperaturverteilung und Deutung der Ergebnisse
- X. Gegebenenfalls Optimierung des Objekts oder Netzanpassung

7. Werkzeug zur Abschätzung der Kühlleistung eines Doppelhorn Kryostaten

Um vor dem Neubau eines Empfangssystems Kosten und Aufwand besser abschätzen zu können, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit nach einer Lösung gesucht, mit Hilfe von geschätzten Bauteilgrößen eine grobe Einschätzung über das thermische Verhalten eines Kryostaten zu ermöglichen. Gleichzeitig soll es möglich sein, bei gegebener Kühlleistung und Abmessungen der Komponenten einen maximalen Hornabstand eines Doppelhornempfangssystems zu ermitteln.

Als Lösungsmöglichkeit wurde eine Berechnung im Programm Microsoft Excel erarbeitet, die im Folgenden erläutert wird.

Berechnung des maximalen Hornabstandes					
			Werte müssen durch den Benutzer eingegeben werden		
			Werte werden berechnet		
Bilanz der 70K Stufe		Bilanz der 15K Stufe			
max Kühlleistung laut Tabelle für CTI350C (50Hz)	$\max P_{\text{kühl}}$	25,000	max Kühlleistung laut Tabelle für CTI350C (50Hz)	$\max P_{\text{kühl}}$	4,000
Wärmeleistung el. Verbraucher	P_{Verbr}	0,000	Wärmeleistung el. Verbraucher	P_{Verbr}	0,100
Wärmeübertragung durch el. Leitungen	P_{Leit}	5,869	Wärmeübertragung durch el. Leitungen	P_{Leit}	1,378
Wärmeübertragung durch mech. Anbindung	P_{Anb}	0,253	Wärmeübertragung durch mech. Anbindung	P_{Anb}	0,059
Strahlungsleistung durch Blende 300K auf 70K	P_{Blende}	3,598			
max zul. Wärmeübertragung durch Strahlung	zul P_{Strahl}	15,281	max zul. Wärmeübertragung durch Strahlung	zul P_{Strahl}	2,463
Parameter		berechnete Wärmeleistungen durch Wärmeleitung			
max zulässige Temperatur auf 15K Stufe	T_{15} [K]	16,00	Wärmeleistung durch el. Leitung 1 (70K zu 15K)	$Q_{\text{el}1}$ [W]	0,09
max zulässige Temperatur auf 70K Stufe	T_{70} [K]	70,00	Wärmeleistung durch el. Leitung 1 (300K zu 70K)	$Q_{\text{el}1}$ [W]	0,40
Umgebungstemperatur	T_{amb} [K]	300,00	Wärmeleistung durch el. Leitung 2 (70K zu 15K)	$Q_{\text{el}2}$ [W]	0,10
Anzahl der el. Leitung 1	n_1	20	Wärmeleistung durch el. Leitung 2 (300K zu 70K)	$Q_{\text{el}2}$ [W]	0,41
Länge der elektr. Leitungen 1	L_1 [m]	0,80	Wärmeleistung durch el. Leitung 3 (70K zu 15K)	$Q_{\text{el}3}$ [W]	1,19
Querschnittsfläche der elektr. Leitungen 1	A_1 [m ²]	0,000000	Wärmeleistung durch el. Leitung 3 (300K zu 70K)	$Q_{\text{el}3}$ [W]	5,06
Wärmeübertragungskoeffizient der elektr. Leitung 1	λ_1 [J/(msK)]	550,00	Wärmeleistung durch el. Leitung 4 (70K zu 15K)	$Q_{\text{el}4}$ [W]	0,00
Sicherheitsfaktor 1	S_1	1,00	Wärmeleistung durch el. Leitung 4 (300K zu 70K)	$Q_{\text{el}4}$ [W]	0,00
Anzahl der el. Leitung 2	n_2	20	Wärmeleistung durch mech. Anbindung auf 70K	Q_{anb} [W]	0,25
Länge der elektr. Leitungen 2	L_2 [m]	1,00	Wärmeleistung durch mech. Anbindung auf 15K	Q_{anb} [W]	0,06
Querschnittsfläche der elektr. Leitungen 2	A_2 [m ²]	0,000000	berechnete Wärmestrahlung in das Empfangshorn		
Wärmeübertragungskoeffizient der elektr. Leitung 2	λ_2 [J/(msK)]	600,00	Kegelfläche Horn	A_{Horn} [m ²]	0,06220353
Sicherheitsfaktor 2	S_2	1,00	Fläche der Blende	A_{Blende} [m ²]	0,00785398
Anzahl der el. Leitung 3	n_3	20	Wärmeleistung durch Wärmeeinstrahlung ins Horn	Q_{Horn} [W]	3,80
Länge der elektr. Leitungen 3	L_3 [m]	1,00	erechnete maximale Abmessungen der 300K und 70K Stufe		
Querschnittsfläche der elektr. Leitungen 3	A_3 [m ²]	0,000002	max Fläche der 300K Stufe	A_{300K} [m ²]	2,08351901
Wärmeübertragungskoeffizient der elektr. Leitung 3	λ_3 [J/(msK)]	550,00	Fläche des 70K Schildes	A_{70K} [m ²]	1,87516711
Sicherheitsfaktor 3	S_3	1,00	maximale Länge des Strahlungsschildes	L_{70K} [m]	0,64266369
Anzahl der el. Leitung 4	n_4	0	berechnete Wärmeleistungen durch Wärmestrahlung		
Länge der elektr. Leitungen 4	L_4 [m]	1,00	Wärmeleistung durch Wärmestrahlung (300K zu 70K)	Q_{Str1} [W]	15,28
Querschnittsfläche der elektr. Leitungen 4	A_4 [m ²]	0,000020	Wärmeleistung durch Wärmestrahlung (70K zu 15K)	Q_{Str2} [W]	0,07
Wärmeübertragungskoeffizient der elektr. Leitung 1	λ_4 [J/(msK)]	300,00	maximaler Hornabstand		
Sicherheitsfaktor 4	S_4	1,00	maximaler Anstand der Empfangshörner	S_{Horn} [m]	0,5326637
Länge der mechanischen Anbindung	L_{Anb} [m]	0,20			
Querschnittsfläche der mechanischen Anbindung	A_{Anb} [m ²]	0,00			
Wärmeübertragungskoeffizient der mech. Anbindung	λ_{Anb} [J/(msK)]	1,00			
Sicherheitsfaktor mech. Anbindung	S_{mech}	1,10			
Emissionskoeffizient der 15K Stufe	ϵ_{15K}	0,03			
Emissionskoeffizient der 70K Stufe	ϵ_{70K}	0,03			
Emissionskoeffizient der 300K Stufe	ϵ_{300K}	0,03			
Emissionskoeffizient Blende/Horn	ϵ_{Blende}	1			
Stefan Boltzmann Konstante	σ_s [Wk ⁴ /m ²]	0,0000001			
Fläche der 15K Stufe	A_{15} [m ²]	0,20			
maximale Höhe der 300K Stufe	H_{max} [m]	0,7			
maximale Breite der 300K Stufe	B_{max} [m]	0,4			
max Durchmesser Horn	$\max D_{\text{Horn}}$ [m]	0,1			
min Durchmesser Horn	$\min D_{\text{Horn}}$ [m]	0,01			
Länge der Mantellinie des Horn	m [m]	0,36			

Abbildung 19: Benutzeroberfläche zur Berechnung des maximalen Hornabstandes

7.1 Aufbau und Funktion

Das Excel - Arbeitsblatt (Abbildung 19) lässt sich in vier Bereiche einteilen. Im oberen Teil befinden sich zwei Bereiche, welche als Bilanz der 70K – Stufe, sowie Bilanz der 15K – Stufe bezeichnet wurden. Im unteren linken Teil befindet sich der Bereich Parameter, während man den unteren rechten Abschnitt als Ergebnisbereich bezeichnen kann.

Die beiden Bilanzen zeigen die maximalen Kühlleistungen der beiden Kühlstufen, sowie ihre Belastungen auf. Unter dem Doppelstrich findet man diejenigen Kühlleistungen, welche zur Abfuhr der einfallenden Strahlungsleistung zur Verfügung steht und somit die Größe des Strahlungsschildes, sowie des Gehäuses bestimmt.

Im Bereich der Parameter befinden sich benutzerdefinierte Eingaben, welche durch diesen einzutragen, bzw. abzuschätzen sind, sowie Konstanten, welche durch den Hersteller eingetragen wurden.

Im Ergebnisbereich werden alle Werte zusammengestellt, welche durch das Programm Microsoft Excel errechnet wurden. Diese geben Aufschluss über die Zusammensetzung der Wärmeleistungen, welche auf das System wirken, sowie über das Endergebnis des maximalen Hornabstandes.

Felder, welche durch den Benutzer auszufüllen sind, sind in grüner Farbe gekennzeichnet. Im Gegensatz hierzu stehen die Felder, deren Werte vom Programm Microsoft Excel durch Formeln berechnet werden. Diese sind blau gekennzeichnet.

7.2 Benutzung

Als Ansatz werden Randbedingungen ermittelt, die durch den Benutzer im Excelarbeitsblatt einzutragen sind.

Zum einen müssen die maximalen Temperaturen, welche an den beiden Kühlstufen anliegen müssen, um die Funktion des Empfangssystems zu gewährleisten, abgeschätzt werden. Durch diese Informationen lassen sich aus den Datenblättern des Refrigerators CTI 350C (50Hz) die entsprechenden maximalen Kühlleistungen der ersten und zweiten Kühlstufe ermitteln. Diese maximalen Kühlleistungen sind in den obersten Feldern der beiden Bilanzbereiche einzutragen.

Im Anschluss sind weitere benutzerdefinierte Eingaben erforderlich. Im Parameterbereich werden Werte im Bezug auf die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung gefordert. Hierzu gehören zum Beispiel Emissions- und Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten. Des Weiteren sind einige geometrische Größen abzuschätzen, beziehungsweise auszumessen und einzutragen. Diejenigen Werte, welche vom Benutzer abzuschätzen sind, wurden mit einem Sicherheitsfaktor belegt, welcher ebenfalls durch den Benutzer einzutragen ist. Hier liegt es im Ermessen des Benutzers, wie sicher er die geforderten Parameter abschätzen kann.

7.3 Theoretischer Hintergrund

Das Programm Microsoft Excel berechnet nun die entsprechenden Wärmeleistungen, welche auf das System wirken. Folgende Formel wurde hierzu verwendet:

Wärmeleitung durch elektrische Leitungen und mechanische Anbindungen

Zunächst werden die Wärmeleistungen Q berechnet, welche durch Wärmeleitung auf das System wirken. Diese finden sich im Ergebnisbereich unter „berechnete Wärmeleistungen durch Wärmeleitung“ wieder.

$$\dot{Q} = A \cdot \lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (16)$$

Mit:

A: Querschnittsfläche

Λ : Wärmeleitkoeffizient

T2: Temperatur außen

T1: Temperatur innen

X2-x1: Länge des thermischen Leiters

Die errechneten Werte werden nun automatisch den Bilanzen der 15K - und 70K - Stufen zugeordnet und aufaddiert.

Wärmeeinstrahlung in das Empfangshorn

Für die Anwendung in einem radioastronomischen Empfangssystem ist es von Vorteil, wenn die Empfangshörner innerhalb des Druckbehälters angeordnet werden und somit die Möglichkeit besteht, diese ebenfalls auf einen Temperaturbereich von $T = 70\text{K}$ oder tiefer zu kühlen. Durch die Tatsache, dass die Empfangshörner direkt der Wärmestrahlung der Umgebung (300 K) ausgesetzt sind, entsteht eine hohe Wärmelast durch Wärmestrahlung auf die innere Fläche des kegelförmigen Empfangshorns. Aufgrund der rippenförmigen inneren Oberfläche des Empfangshorns und des hohen Transmissionsgrades der Mylan - Folie, welcher im Bereich $t \approx 1$ liegt, befinden sich somit auch die beiden Emissionskoeffizienten ε_1 und ε_2 im Bereich von $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2 \approx 1$. Dies bewirkt eine hohe Wärmelast, welche durch die 70K - Stufe abgeführt werden muss. Mit Hilfe von Gleichung 17 wird diese Strahlungsleistung berechnet.

$$\dot{Q} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{Horn}} + \frac{A_{Horn}}{A_{Folie}} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_{Folie}} - 1 \right)} \cdot \sigma_s \cdot A_{Folie} \cdot (T_{Folie}^4 - T_{Horn}^4) \quad (17)$$

Mit

$$A_{Folie} = \frac{\pi d_{Apertur}^2}{4} \quad (18)$$

mit

A_{Folie} : Fläche der Mylar – Folie

$d_{Apertur}$: Durchmesser der Apertur des Empfangshorns

Und

$$A_{Horn} = (R + r) \cdot \pi \cdot m \quad (19)$$

mit

R: maximaler Radius des Empfangshorns

r: minimaler Radius des Empfangshorns

m: Länge der Mantellinie

Maximal zulässige Strahlungsleistung

Aus den berechneten und abgeschätzten Werten, sowie der maximalen Kühlleistung der entsprechenden Kühlstufe wird nun die maximale Strahlungsleistung berechnet, welche auf das System wirken darf. Dieser Wert befindet sich unterhalb der Doppellinie im Bilanzbereich des Berechnungsfelds.

$$zulP_{Str} = \max P_{kühl} - P_{Verbr} - P_{Leit} - P_{Anb} \quad (20)$$

mit:

$\max P_{kühl}$: maximale Kühlleistung der Kühlstufe

P_{Verbr} : Elektrische Leistung der Verbraucher (z.B. Empfangsverstärker)

P_{Leit} : Wärmeleistung bedingt durch elektrische Leitungen

P_{Anb} : Wärmeleistung durch mechanische Anbindung

Aus der ermittelten maximalen Strahlungsleistung welche auf die 15K-Stufe wirken darf, lassen sich jetzt die maximalen Flächen des Strahlungsschildes, sowie der 300K-Stufe ermitteln. Die maximale Fläche des Strahlungsschildes wird wie folgt berechnet:

$$A_{\text{Schild}} = \frac{\dot{Q}}{2 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)} \pm \sqrt{\left[\frac{\dot{Q}}{2 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)} \right]^2 + \frac{\dot{Q} \cdot A_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)}} \quad (21)$$

Mit

- Q: maximale Strahlungsleistung
- A1: Fläche der 15K-Stufe
- ε_1 : Emissionskoeffizient der 15K-Stufe
- ε_2 : Emissionskoeffizient der 70K-Stufe
- σ : Stefan – Boltzmann – Konstante
- T₁: Temperatur der 15K-Stufe
- T₂: Temperatur der 70K-Stufe

Das erhaltene Ergebnis für A_{Schild} müsste nun überprüft werden. Sollte der Wert größer sein, als die maximale Fläche der 300K – Stufe, so ist die maximale Größe der 300K-Stufe zu verwenden und das Strahlungsschild um einen Faktor von 0,9 kleiner zu wählen.

Sollte allerdings die Fläche A_{Schild} kleiner sein, als die maximale Fläche des 300K – Schildes, so muss überprüft werden, ob die Strahlungsleistung der 300K – Stufe (maximale Fläche) auf das Strahlungsschild ebenfalls im zulässigen Bereich ist. Dieser Fall ist allerdings auszuschließen, da die Temperaturdifferenz in Gleichung (17) zur Berechnung der Strahlungsleistung auf die 15K – Stufe relativ gering ist. Die Strahlungsleistung bewegt sich im mW – Bereich. Weiterhin gehen die Temperaturen in Gleichung (17) jeweils zur vierten Potenz ein, was zur Folge hat, dass die Temperaturdifferenz zwischen 300K – und 70K – Stufe dominant ist. Günstig ist ebenfalls, dass die Kühlleistung der 15K – Stufe nicht vollständig ausgelastet wird, was eine Kühlung auf effektive Temperaturen von $T < 15\text{K}$ zur Folge hat.

Somit werden die Flächen des Strahlungsschildes, sowie der 300K – Stufe unter der Annahme berechnet, dass die Fläche des Strahlungsschildes 0,9fach so groß ist wie die Fläche der 300K – Stufe.

$$A_{300K} = \frac{\dot{Q}_{\max}}{\varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)} + \frac{0,9\dot{Q}_{\max} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}{\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)} \quad (22)$$

Mit

Q_{\max} : maximale Strahlungsleistung, welche von der 300K auf die 70K-Stufe wirkt

ε_1 : Emissionskoeffizient der 70K-Stufe

ε_2 : Emissionskoeffizient der 300K-Stufe

σ : Stefan – Boltzmann – Konstante

T_1 : Temperatur der 70K-Stufe

T_2 : Temperatur der 300K-Stufe

Folglich lässt sich die Fläche des Strahlungsschildes mit folgender Formel berechnen:

$$A_{Schild} = 0,9 \cdot A_{300K} \quad (23)$$

Mit der benutzerdefinierten Vorgabe von maximaler Höhe und Breite des Gesamtsystems kann nun die maximale Länge und somit der Hornabstand ermittelt werden.

$$L_{Schild} = \frac{(A_{Schild} - 2H_{Schild}B_{Schild})}{2(H_{Schild} + B_{Schild})} \quad (24)$$

mit

$\max L_{Schild}$: maximale Länge des Strahlungsschildes

A_{Schild} : maximale Fläche des Strahlungsschildes

H_{Schild} : Höhe des Strahlungsschildes

B_{Schild} : Breite des Strahlungsschildes

Der Maximale Hornabstand wird nun ermittelt. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Hörner nicht mit dem Strahlungsschild in Kontakt kommen. Ein Mindestabstand zwischen Hörner und Strahlungsschild ist den Erfahrungswerten zu entnehmen. Dieser maximale Abstand zwischen Hörnern und Strahlungsschild ist hier mit einem Faktor $F_{Abs}=1,1$ integriert, wie in Gleichung (25) beschrieben ist.

$$\max L_{Horn} = \max L_{Schild} - F_{Abs} \cdot D_{Horn} \quad (25)$$

Mit:

$\max L_{Horn}$: maximaler Hornabstand
 $\max L_{Schild}$: maximale Länge des Strahlungsschildes
 D_{Horn} : maximaler Horndurchmesser

Um eine gute Abschätzung zu erzielen sind Erfahrungswerte wünschenswert. Dies gilt besonders für die Abstände zwischen Strahlungsschild und 300K-Stufe, sowie für den Abstand des Strahlungsschildes zu den Hörnern. Hierzu existieren allerdings auch Richtwerte und Dokumentationen aus vorherigen Konstruktionen. Ein Mindestwert von 40 - 50 mm hat sich hier gut bewährt.

8. Festigkeitsnachweis laut AD – Merkblättern [8]

Bevor die Möglichkeit bestand, Bauteile mit Hilfe der Finiten Elemente Methode zu berechnen, wurden diese Berechnungen mit Hilfe von anderen Verfahren durchgeführt. Im Folgenden soll eine FEM – Berechnung, sowie eine Festigkeitsberechnung laut AD - Merkblättern durchgeführt werden mit anschließendem Vergleich der Ergebnisse.

8.1 Geltungsbereich der AD – Merkblätter

Die vorliegenden AD – Merkblätter gelten für glatte Zylinderschalen als Druckbehältermäntel, welche von einem von außen wirkenden Überdruck belastet werden, wobei der Außendruck gleichmäßig auf die gesamte Mantelfläche wirken muss. Das Verhältnis von Außendurchmesser zu Innendurchmesser des Druckkörpers muss in einem Bereich von $\frac{D_a}{D_i} \leq 1,2$ liegen.

Die Untersuchung wird an einem zylinderförmigen Rohr durchgeführt, welches in seiner Art einem der später verbauten Zylinder zur Aufnahme der Empfangshörner gleicht. Mit Hilfe der AD – Merkblätter können Werte im Bezug auf plastisches, sowie auf elastisches Verformen berechnet werden.

8.2 Formelzeichen

K	Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur
S	Sicherheitsbeiwert
D_a	Außendurchmesser der Zylinderschale
D_i	Innendurchmesser der Zylinderschale
s_e	Wandstärke
L	Länge des Rohres
C_1	Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung
C_2	Abnutzungszuschlag
p	Berechnungsdruck
ν	Querkontraktionszahl
E	Elastizitätsmodul
S_K	Sicherheitsfaktor gegen elastisches Einbeulen

8.3 Berechnung gegen elastisches Einbeulen

Die Berechnung folgt aus der Zahlenwertgleichung nach Abschnitt 7.2 des Kapitels B6 der AD – Merkblätter.

$$p_1 = \frac{E}{S_K} \cdot \left[\frac{20}{(n^2-1) \cdot \left[1 + \left(\frac{n}{Z} \right)^2 \right]^2} \cdot \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} + \frac{80}{12(1-\nu^2)} \cdot \left[n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - \nu}{1 + \left(\frac{n}{Z} \right)^2} \right] \cdot \left(\frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \right)^3 \right] \quad (26)$$

Dabei ergibt sich der Hilfwert Z aus Gleichung (27)

$$Z = 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot D_a}{l} \quad (27)$$

Und die Anzahl der eventuell auftretenden Einbeulwellen n kann näherungsweise aus Gleichung (28) ermittelt werden.

$$n = 1,63 \cdot \sqrt[4]{\frac{D_a^3}{l^2 \cdot (s_e - c_1 - c_2)}} \quad (28)$$

Weiterhin gelten folgende Bedingungen:

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

8.4 Berechnung gegen plastisches Verformen

Laut AD – Merkblättern der Kapitel B0 beziehungsweise B6 der Ausgabe Januar 1995 unter Abschnitt 7.3 gilt Gleichung 17 zur Berechnung gegen Verformungen unter der Beachtung von $\frac{D_a}{l} \leq 5$.

$$p_2 = \frac{20 \cdot K}{S} \cdot \frac{s_e - c_1 - c_2}{D_a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1,5u \cdot \left(1 - 0,2 \frac{D_a}{L}\right) \cdot D_a}{100 \cdot (s_e - c_1 - c_2)}} \quad (29)$$

Hierbei berechnet sich u nach Kapitel B6 aus Abschnitt 7.3.4 der AD – Merkblätter aus

$$u = 2 \cdot \frac{D_{i,\max} - D_{i,\min}}{D_{i,\max} + D_{i,\min}} \cdot 100 \quad (30)$$

8.5 Festigkeitsberechnung am Beispiel eines Hohlzylinders laut AD – Merkblätter

Der zu berechnende Hohlzylinder besitzt einen Außendurchmesser von $D_a = 150\text{mm}$, sowie eine Wandstärke von $t = 3\text{mm}$. Als Material wurde der Werkstoff AlMg3 gewählt. Dieser besitzt eine Streckgrenze $R_{p0,2} = 80\text{MPa}$ sowie einen Elastizitätsmodul von $E = 0,07\text{MPa}$.

8.5.1 Berechnung gegen elastisches Einbeulen

Der Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen beträgt $S_K = 3$, da $u \leq 1,5\%$. Die Querkontraktionszahl für Aluminium beträgt $\nu = 0,33$. Bei Nichteisenmetallen (NE – Metallen) ist $C_1 = C_2 = 0$. Zur Berechnung der Unrundheit wurde eine Durchmesser toleranz von $\pm 0,5$ mm vorgesehen.

$$Z = 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot 150\text{mm}}{400\text{mm}} = 0,589$$

$$n = 1,63 \cdot \sqrt[4]{\frac{(150\text{mm})^3}{(400\text{mm})^2 \cdot (3\text{mm} - 0 - 0)}} = 2,654$$

Gewählt werden $n = 3$ Einbeulwellen.

$$u = 2 \cdot \frac{144,5\text{mm} - 143,5\text{mm}}{144,5\text{mm} + 143,5\text{mm}} \cdot 100 = 0,694$$

$$p_1 = \frac{70.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{3} \cdot \left[\frac{20}{(3^2 - 1) \cdot \left[1 + \left(\frac{3}{0,589} \right)^2 \right]^2} \cdot \frac{3\text{mm} - 0 - 0}{150\text{mm}} + \frac{80}{12 \cdot (1 - 0,33^2)} \cdot \left[3^2 - 1 + \frac{2 \cdot 3^2 - 1 - 0,33}{1 + \left(\frac{3}{0,589} \right)^2} \right] \cdot \left[\frac{3\text{mm} - 0 - 0}{150\text{mm}} \right]^3 \right]$$

$$p_1 = 12,04 \text{ bar}$$

Deutung

Das Ergebnis zeigt, dass der Druckkörper einer Belastung von 12,04 bar standhalten würde, bevor dieser elastisch eingebeult wird. Bei einem Einsatz als Vakuumbehälter beträgt die maximale Belastung lediglich $p = 1\text{bar} = 1\text{MPa}$. Somit beträgt der vorhandene Sicherheitsfaktor $S \approx 12$.

8.5.2 Berechnung gegen plastisches Verformen

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

$$p_2 = \frac{20 \cdot 80 \frac{N}{mm^2} \cdot (3-0-0)mm}{1,6 \cdot 150mm} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1,5 \cdot 0,694 \cdot \left(1 - 0,2 \cdot \frac{150mm}{400mm}\right) \cdot 150mm}{100 \cdot (3-0-0)mm}}$$

$$p_2 = 19,999 \text{ bar}$$

Da der Druck p_2 größer ist als der Druck p_1 , ist dieses Ergebnis für eine Auslegung nicht von Bedeutung. Weiterhin sollte stets eine Auslegung im elastischen Bereich angestrebt werden. Plastische Verformungen sollten unbedingt vermieden werden. An dieser Stelle besteht ein Sicherheitsfaktor gegen eine plastische Verformung von $S \approx 20$.

8.5.3 Darstellung der FEM - Berechnung

Um einen genauen Vergleich mit den Werten einer FEM – Analyse zu erhalten, wird in der Gleichung 19 die Unrundheit und der Sicherheitsbeiwert außer Betracht gelassen.

Somit erhält man folgende Gleichung

$$p_2 = 20 \cdot K \cdot \frac{s_e}{D_a} \quad (31)$$

Stellt man Gleichung 31 nach K um, so erhält man

$$K = p_2 \cdot \frac{D_a}{20 \cdot s_e} = 1bar \cdot \frac{150mm}{20 \cdot 3mm} = 2,5 \frac{N}{mm^2}$$

Das Berechnungsverfahren der AD – Merkblätter liefert einen Wert, der nur gering von dem Werten der FEM – Analyse abweicht. Das Programm COSMOS Works errechnet bei den zu Grunde gelegten Randbedingungen eine Spannung von $\sigma = 2,40$ MPa, wie in Abbildung 20 zu sehen ist.

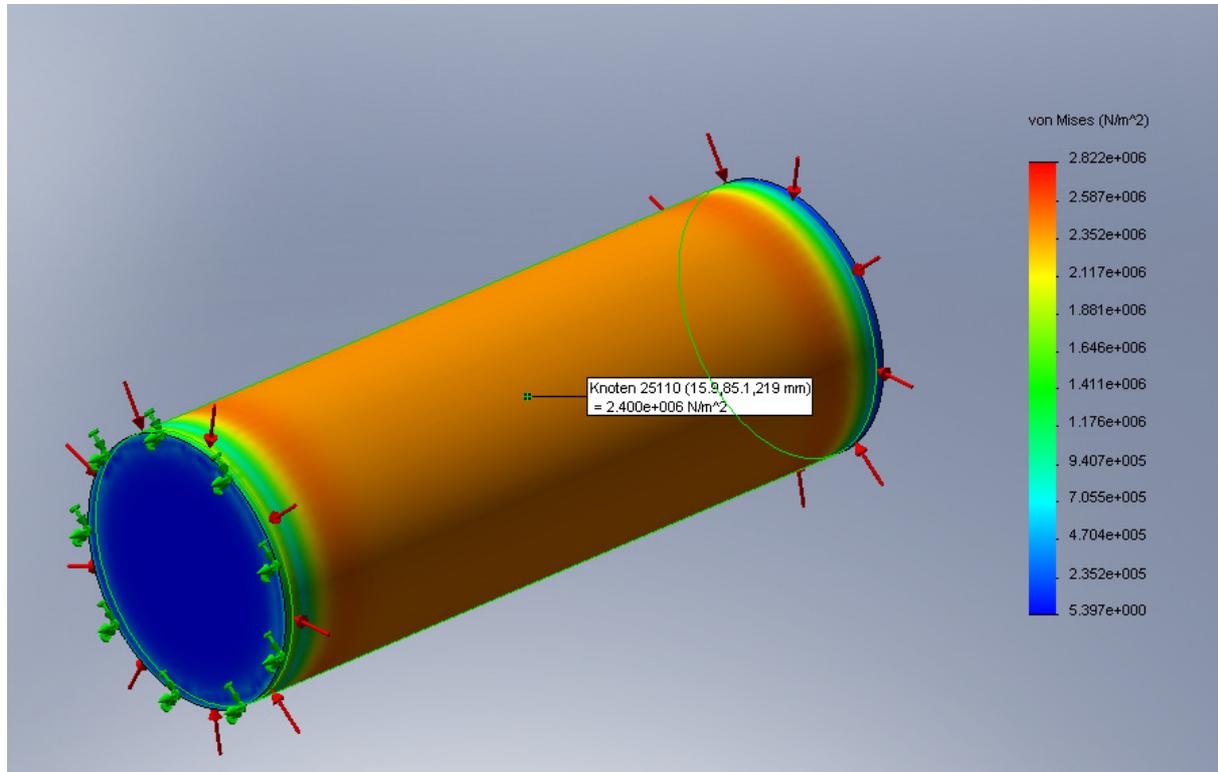


Abbildung 20: Spannungsdarstellung in Cosmos Works

Fazit

Für einfache Geometrien lässt sich die Variante der AD – Merkblätter gut anwenden. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die Werte der AD - und FEM – Methode nur geringfügig differieren. Sobald jedoch die Geometrien umfangreicher und komplizierter werden, werden die Berechnungen laut AD – Merkblättern ungenau, da jede Art von Geometrien auf Standardgeometrien vereinfacht werden müssten. Auch Schwachstellen von Bauteilen, wie z.B. Übergänge in Form von Kanten oder Radien, welche von einem FEM – Programm bei fachkundiger Anwendung erkannt werden würden, werden nicht berücksichtigt. FEM – Programme bieten hier sogar die Möglichkeit einer genaueren Untersuchung, mittels Vernetzungssteuerung beziehungsweise Netzverfeinerung.

9. Die Konstruktionsmethodik [21]

Die Anforderungen an den heutigen Konstrukteur steigen. Er muss im Stande sein immer komplexer werdende Aufgaben in immer kürzerer Zeit zu lösen. Zudem müssen die Kosten so gering wie möglich sein bei höchst möglicher Qualität. Weiterführend muss das Produkt dem Markt entsprechen und somit innovativ sein. Alles in allem kann man erkennen, dass die Lösung einer komplexen Aufgabenstellung unter den genannten Voraussetzungen kaum mehr möglich ist. Aus diesem Grund wird heute großen Wert auf die Konstruktionssystematik, sowie die Konstruktionsmethodik gelegt. Die Konstruktionssystematik und die Konstruktionsmethodik erlauben es dem Ingenieur ein nahezu unüberschaubares Problem mit Hilfe vieler erprobter Methoden systematisch abzuarbeiten. Diese Methoden sind sehr abstrakt formuliert, was zur Folge hat, dass diese auf nahezu alle Problemstellungen anzuwenden sind.

Im Konstruktionsprozess unterscheidet man zwischen algorithmisierbaren und nicht algorithmisierbaren Problemstellungen.

Die algorithmisierbaren Aufgaben gelten als Routinetätigkeiten der Konstruktion. Hierzu gehören zum Beispiel die Modellierung und Berechnung von Bauteilen, sowie die Erstellungen technischer Zeichnungen und Stücklisten. Der Weg zur Erstellung dieser Unterlagen ist bekannt und somit relativ überschaubar.

Im Gegensatz hierzu stehen die nicht algorithmisierbaren Problemstellungen. Hierbei wird ein Ziel festgelegt, allerdings ist nicht bekannt, wie man dieses Ziel erreichen kann. Folglich sind die Planungen des Produkts und der Konstruktion, sowie deren Machbarkeit nur sehr beschränkt einzusehen.

An dieser Stelle setzt sie Konstruktionsmethodik an. In der Vergangenheit hat sich besonders der Wertanalyse - Arbeitsplan laut DIN 69910 / VDI 2800 besonders bewährt. Dieser sieht eine Einteilung des Konstruktionsprozesses in fünf Phasen mit Iterationscharakter vor wie Abbildung 21 zeigt.

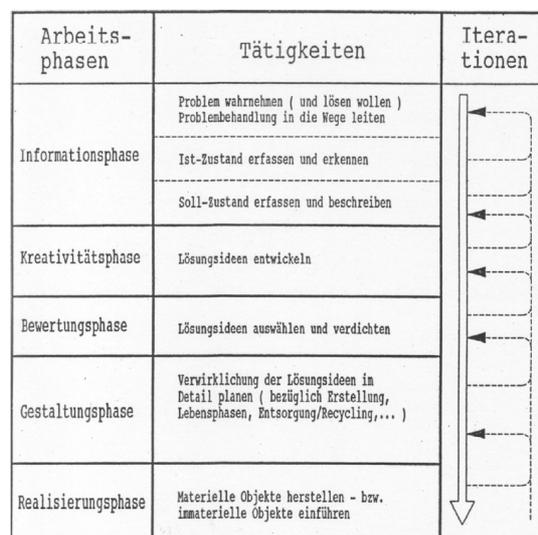


Abbildung 21: Die 5 Arbeitsphasen [21]

Ziel der Wertanalyse – Arbeitsplans ist es unter den genannten Voraussetzungen ein Produkt zu realisieren und vor allem die Qualität zu sichern, sowie Fehler zu vermeiden. Fehler, welche durch die Konstruktion verursacht wurden, wirken sich im Rahmen von Fehlerbehebungen, Rückrufaktionen oder sogar Unfällen oftmals dramatisch auf die Kosten und den Ruf des Unternehmens aus.

9.1 Informationsphase

Im Rahmen der Informationsphase muss zunächst die herrschende Problematik erkannt werden und eine Motivation geschaffen werden, dieses Problem zu lösen beziehungsweise ein gewisses Ziel zu erreichen. Zu diesem Zweck wird eine Ist- und Soll - Zustandsanalyse durchgeführt.

9.1.1 Ist - Zustandsanalyse

In der Ist – Zustandsanalyse wird die zum Zeitpunkt vorliegende Situation genau beschrieben. Dies ist besonders wichtig, wenn eine schon bestehende Konstruktion vorliegt und diese abgeändert oder weiterentwickelt werden soll. Aus dieser Analyse ergeben sich Frage- und Problemstellungen, die im Weiteren Verlauf auf eine Zielformulierung hinausläuft. Mit Hilfe eines Funktionenbaums können, falls bereits eine Konstruktion besteht, die Funktionen erfasst und strukturiert werden. Bei einer Neukonstruktion ist dies nicht möglich.

In der vorliegenden Aufgabenstellung ist eine Neukonstruktion vorgesehen, jedoch existieren bereits ähnliche Empfangssysteme im Radioteleskop Effelsberg. Somit kann auf Erfahrungswerte vergangener Empfangssysteme und deren Konstruktion zurückgegriffen werden. Zur Veranschaulichung wird eine Ist – Zustandsanalyse an einem bereits existierenden Kryostaten durchgeführt. Dieser ist ein sogenannter Single-Beam-Empfänger, was bedeutet, dass nur ein Empfangshorn in ihm verbaut ist. Zurzeit existieren Empfangssysteme mit bis zu sieben Empfangshörnern (Seven-Beam) pro Empfängereinheit.

Die folgende Abbildung 22 zeigt einen Single-Beam-Empfänger. Die charakteristischen Komponenten wurden benannt.

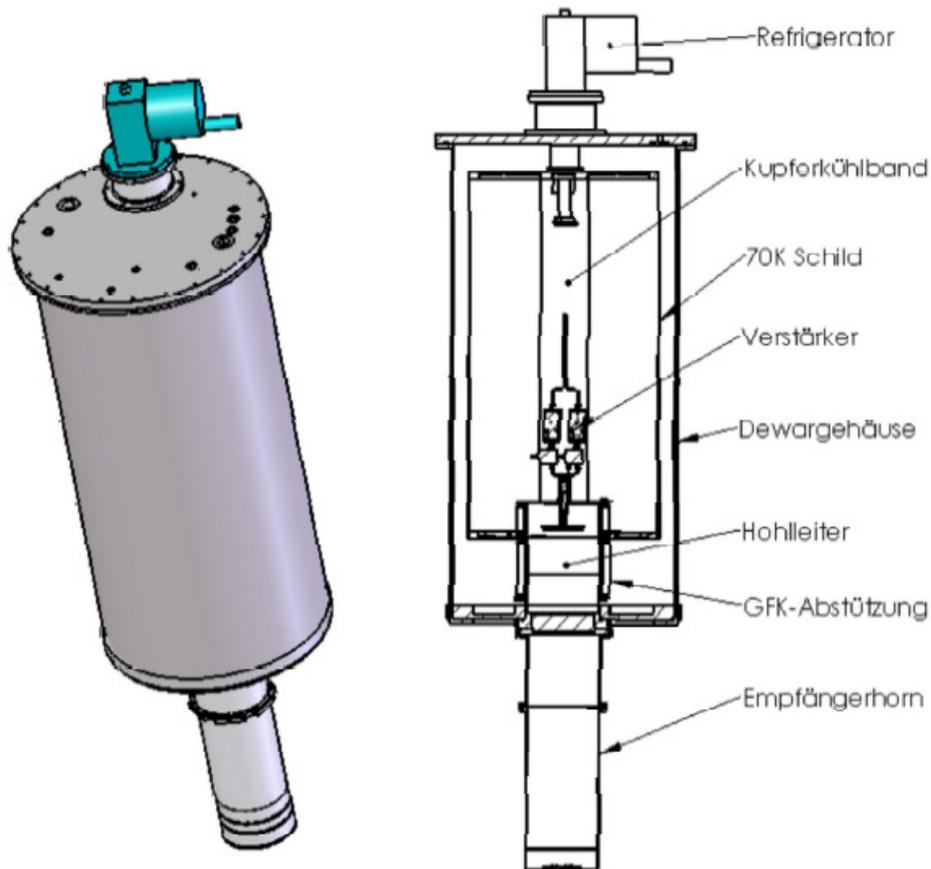


Abbildung 22: Aufbau eines Single-Beam-Empfängers [16]

Die bisherigen Empfänger unterscheiden sich durch die Anordnung und Form der Empfangshörner. Während in den Empfängersystemen des Primärfokus zylinderförmige Empfangshörner verwendet werden, findet man in den Empfängersystemen des Sekundärfokus kegelförmige Empfangshörner vor. Weiterhin werden die Empfänger des Sekundärfokus nicht gewechselt und bleiben daher im Fokus fest verbaut, während die Empfangssysteme des Primärfokus in regelmäßigen Zeitintervallen gewechselt werden müssen. Je nach Art der Messungen werden unterschiedliche Empfänger mit unterschiedlichen Empfangsbereichen verbaut.

Der Aufbau des Empfangssystems lässt sich in drei Stufen entsprechend ihrer Temperaturen einteilen.

Die 300K – Stufe

Der Druckbehälter besitzt Umgebungstemperatur und wird somit auch als 300K – Stufe bezeichnet. Weiterhin herrscht innerhalb des Gehäuses Hochvakuum mit einem Druck von bis zu 10^{-6} Pa. Um die Strahlungsemission des Gehäuses zu minimieren, sind die innen liegenden Wände galvanisch poliert, wodurch die abstrahlende Oberfläche verringert wird.

Die 70K – Stufe

Weiter innerhalb des Gehäuses befindet sich das Strahlungsschild, welches auch als 70K – Stufe bezeichnet wird. Wie der Name bereits verrät, wird das Strahlungsschild durch die erste Kühlstufe des Refrigerators auf eine Temperatur von ca. 70 Kelvin gekühlt. Auch das Strahlungsschild wird meist galvanisch poliert und ist oftmals mit einer Goldschicht bezogen. Diese Goldschicht weist einen geringen Emissions- und Transmissionsgrad, jedoch einen hohen Reflexionsgrad auf. Dies bewirkt, dass der zu kühlende Empfangsverstärker mit einer minimalen Strahlungslast beaufschlagt wird.

Die 15K – Stufe

Innerhalb des Strahlungsschildes befinden sich die beiden zu kühlenden Empfangsverstärker. Diese sind über flexible Kupferbänder mit der zweiten Stufe des Refrigerators verbunden. Hierdurch wird eine optimale Wärmeleitung zur Kühlmaschine gewährleistet.

Die Befestigung der einzelnen Bauteile wird durch mechanische Anbindungen an den Refrigerator, sowie durch Stützen aus Glasfaser Verstärkten Kunststoffen (GFK) erreicht. Diese besitzen einen sehr geringen Wärmeleitkoeffizienten (Isolatoren) und verhindern somit eine höhere Wärmebelastung der Kühlmaschine.

Wie bereits beschrieben, wird die mehrstufige Kühlung des Systems durch einen Refrigerator erzielt. Dieser wird am Gehäuse (300K – Stufe) mittels einer Schraubverbindung angeflanscht.

Zur Übertragung des vom Reflektor gebündelten Signals aus dem Freiraum zum ersten Verstärker wird die sogenannte Hohlleitertechnik eingesetzt. Zunächst wird das Signal durch das Empfängerhorn (Antenne) in einen Hohlleiter eingespeist. Das Empfängerhorn ist geometrisch derart geformt, dass am Ende des Empfängerhorns das empfangene Signal möglichst komplett und mit einer erwünschten Wellenlänge austritt. Dieses Signal wird über einen Hohlleiter der Polarisationsweiche und schließlich den beiden Empfangsverstärkern zugeführt. Im Anschluss wird eine elektronische Aufbereitung des Signals durchgeführt.

Um eine Trennung zweier Temperaturbereiche zu gewährleisten, wird ein sogenannter Thermo – Choke (Abbildung 23) eingesetzt. Dieser besteht aus zwei gegenüberstehenden Hohlleitern mit einem geringen Spaltmaß. Um eine mechanische Verbindung zwischen den beiden Hohlleitern unter Beibehaltung des Trennspaltes herzustellen, werden diese mit einem Rohr aus Glasfaser Verstärktem Kunststoff verbunden.

Die Trennung zwischen Vakuum und Umgebungsdruck wird mit der Abdichtung des Hohlleiters oder der Hornöffnung mittels einer speziellen Folie erreicht, welche möglichst gasdicht und gleichzeitig für die entsprechende Wellenlänge elektrisch durchsichtig sein muss.



Abbildung 23: Der Thermo - Choke

Die Entlüftung des Druckkörpers wird durch zwei Pumpen erreicht. Zunächst wird mittels einer Vorförderpumpe, in diesem Falle eine Hubkolbenpumpe, der Druckkörper bis zu einem Druck von 1500 Pa evakuiert. Nun wird eine Turbomolekularpumpe vorgeschaltet, welche den Druckkörper bis zu einem Druck von 10^{-7} Pa evakuiert.

Zur besseren Anschauung dient der Funktionenbaum (Abbildung 24), welcher das Gesamtsystem mit seinen Teilsystemen und Funktionen beschreibt.

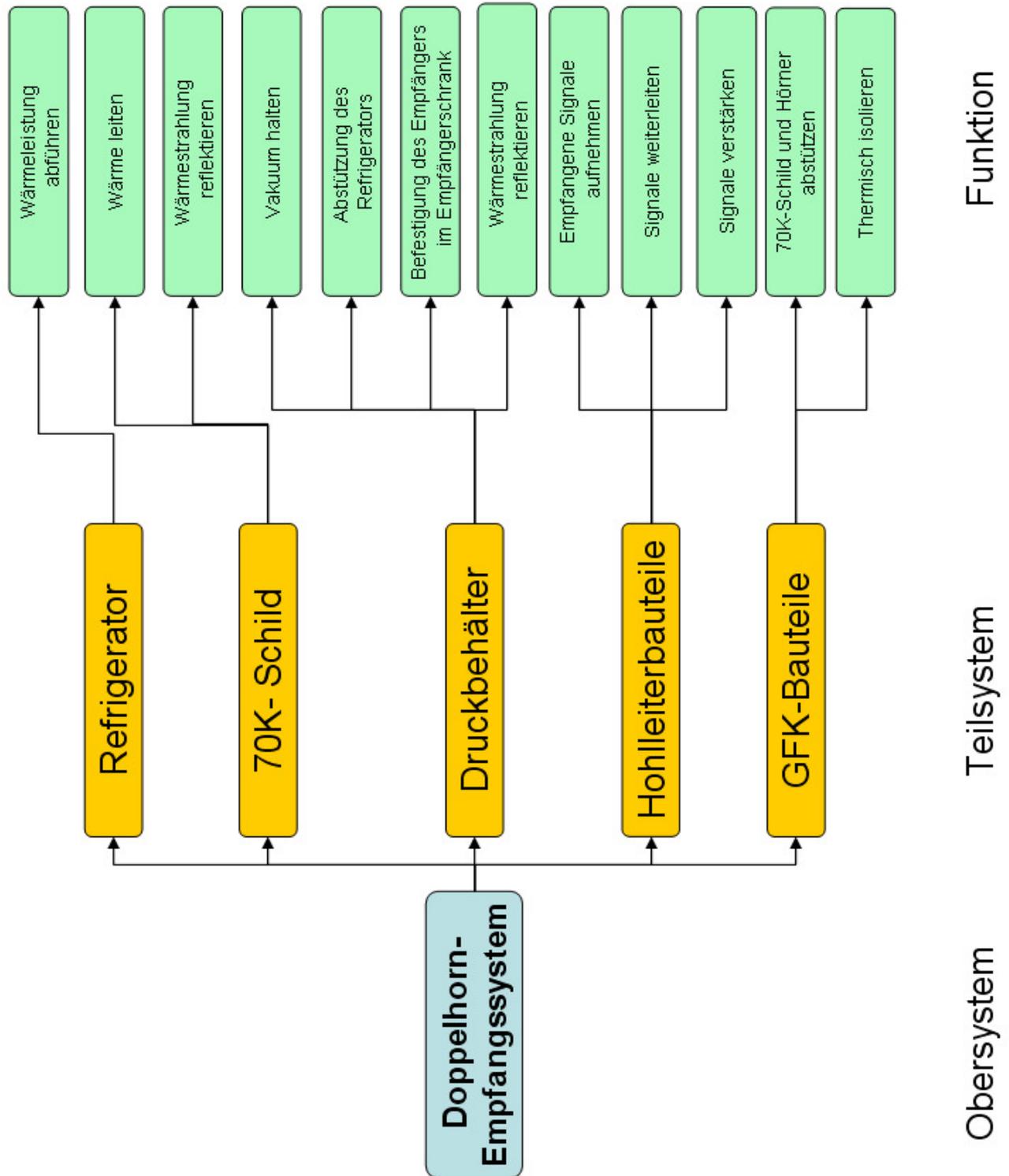


Abbildung 24: Funktionenbaum

Diskussion der bisherigen Konstruktion

Bisherige Empfangssysteme wurden meist mit einem Empfangshorn bestückt. Seit kürzerer Zeit geht man allerdings dazu über, mehrere Empfangshörner in einem Empfänger zu platzieren. Dies geschieht aus unterschiedlichen Gründen. Zum einen soll aus Gründen der Effektivität möglichst selten ein Wechsel des Empfangssystems vorgenommen werden müssen, da in dieser Zeit das Teleskop nicht für Messungen zur Verfügung steht. Hierbei ist allerdings auch darauf zu achten, dass eine maximale Masse von ca. 500 kg nicht überschritten wird, was besonders für die Empfänger des Primärfokus interessant ist. Durch den rasanten Fortschritt der Elektrotechnik, werden auch die Empfangssysteme mit zunehmend mehr elektronischen Bauteilen bestückt, wodurch die zulässige Masse des Empfangssystems schnell erreicht wird.

Aus diesem Grund muss ein besonderes Augenmerk auf die Gewichtsminimierung gelegt werden. Bei vergangenen Konstruktionen wurde oft nach dem Prinzip „viel hilft viel“ gearbeitet. Hier waren Materialkosten, sowie eine Minimierung der Masse noch nicht ausschlaggebend. Oftmals wurden die Bauteile überdimensioniert und schwere Materialien verwendet. Hier fehlten das Fachwissen, sowie die notwendige Computersoftware, um eine Optimierung der Konstruktion durchzuführen.

Des Weiteren wurden zuletzt zylinderförmige, sowie kubische Druckbehälter eingesetzt. Beide Formen sind für den Einsatz als Vakuumbehälter gut geeignet. Je nach Größe und Art des Empfängers werden diese beiden Formen verwendet. Während für kleinere Empfangssysteme eher kubische Druckbehälter eingesetzt wurden, wurden für größere Empfängereinheiten mit größerer Wellenlänge zylinderförmige Behälter verwendet. Die Vorteile dieser Formen lagen zum einen in der einfachen Fertigung, sowie dem günstigen Druckwiderstand, wobei allerdings ein zylinderförmiger Druckbehälter vorzuziehen ist.

Im Gegensatz hierzu ist eine Wartung der Empfänger sicherzustellen. Um Aufwand, Zeit und somit Kosten zu sparen, muss ein einfacher Zugang zu Verschleißteilen leicht möglich sein. Zu diesen Verschleißteilen gehören zum Beispiel die Kühlzylinder, sowie die Empfangsverstärker, welche auf Grund ihres filigranen Aufbaus und dem mechanischen Stress durch viele Kühlzyklen schnell Defekte aufweisen. Hier ist dem zylinderförmigen Druckbehälter ein kubischer Behälter vorzuziehen, da es bei dieser Form günstiger ist, abnehmbare Deckel am Druckbehälter anzubringen. Die Statik wird hierdurch nur geringfügig verändert. Im Gegensatz hierzu wird die Statik eines Zylinders extrem beeinflusst, sobald die Zylinderform verändert wird. Dies sind besondere Schwachstellen. Im Verlauf dieser Diplomarbeit wird dieses Thema weiter analysiert und diskutiert.

Weiterhin sind alle Empfangshörner der bisherigen Systeme ungekühlt. Die Kühlung der Empfangshörner verspricht allerdings einen besseren Empfang, ist aber auf Grund der beschränkten Kühlleistung nur beschränkt möglich. Auch der Druckbehälter vergrößert sich hierdurch, was wiederum zu einer Zunahme der Masse führt. Auch hier ist aus diesem Grund eine optimale Konstruktion wichtig.

Als Materialien wurden zuvor Stahl, sowie Aluminiumlegierungen für den Druckbehälter verwendet. Das Strahlungsschild wurde meist aus Stahlblech, Aluminium oder Kupfer gefertigt und bisweilen zusätzlich mit Gold beschichteten. Alle Oberflächen wurden mechanisch oder galvanisch poliert.

9.1.2 Soll - Zustandsanalyse

Die Sollzustandsanalyse geht zum großen Teil aus der Ist – Zustandsanalyse hervor. Hier werden konkrete Ziele formuliert, die es zu erreichen gilt. Im Rahmen der Zielformulierung differenziert man zwischen

- **Forderungen**, die es unbedingt zu erfüllen gilt und
- **Wünschen**, die es nach Möglichkeit zu berücksichtigen gilt um eine möglichst hohe Kundenzufriedenheit sicherzustellen.

Bei der Berücksichtigung der Forderungen und Wünsche ist es oftmals möglich, dass sich Forderungen und Wünsche überschneiden oder gar gegensätzlich sind. In dieser Situation ist eine Absprache mit dem Kunden zur Klärung der Unklarheiten unbedingt erforderlich. Hierdurch kann es ebenfalls zu der Situation kommen, dass nicht alle Forderungen und Wünsche erfüllt werden können, was aber eine erfolgreiche Konstruktion nicht ausschließt.

F/W	Anforderungen
	Geometrie
F	Abstand der Empfangshörner 500mm
F	Möglichkeit der Wartung, möglichst geringer Aufwand
F	Leichte Montage im Empfängerschrank
F	maximale Verformung an den Hörnern < 0,1mm
W	Abstrahlende Flächen der 300K und 70K Stufe minimieren
F	Volumen und somit Masse minimieren
W	Einfache Geometrie und somit geringer Fertigungsaufwand
F	Neigung der Hörner um ein bestimmtes Winkelmaß
	Kräfte, Statik:
F	Gewichtskraft/Masse minimieren
F	Druckbehälter muss dem Atmosphärendruck von 10^5 Pa standhalten
F	Keine plastischen Verformungen
F	Verformungen minimieren, Toleranzen der Hörner beachten
F	Auflager, Festigkeiten und Verformungen in mehreren Winkelstellungen beachten
	Material:
F	Material des Druckkörpers und deren Einbauten müssen vakuumgeeignet sein
F	Korrosionsfeste Werkstoffe verwenden, elektrochemische Korrosion beachten
F	Emissionsarme Materialien verwenden
F	Leichte Materialien verwenden
F	Materialien mit geringem Gasdurchlass verwenden
F	Wärmeausdehnungskoeffizienten beachten bzgl. Verformungen

Verbindungs- und Dichtungsart:	
W	möglichst wenige Dichtflächen
F	Dichtflächen für form- und stoffschlüssige Verbindungen vorsehen
Oberfläche:	
F	Oberflächen emissionsarm gestalten, ggfs. Beschichten, polieren
F	Dichtflächen: hohe Oberflächengüte
W	Optisches Design der sichtbaren Flächen sollten ansprechend sein
Energie:	
F	Gute Wärmeleitung der Bauteile der 70K und 15K - Stufen
F	Minimale Wärmeleitung vom Außengehäuse zur 70K - Stufe
F	Wärmetransport durch Konvektion ausschließen (Vakuum)
F	Wärmetransport durch Strahlung minimieren
F	max. Leistung der Kühlmaschine nicht überschreiten
F	Kühlung der Empfangshörner auf 70K
F	Temperatur der Empfangsverstärker maximal 15K
Ergonomie:	
F	Einfacher Zugriff auf die gekühlten Bauteile, sowie auf die Kühlmaschine zwecks Wartungsarbeiten
W	Strukturierter Aufbau und Überschaubarkeit gewährleisten
Sicherheit und Kontrolle:	
F	Richtlinien laut AD-Merkblättern beachten
F	Sicherheit des bedienenden Personals gewährleisten durch Einweisung, Anleitung
F	Druck- und Lecktest vor Einbau
Fertigung:	
F	Fertigungskosten gering halten
W	möglichst in der Werkstatt des Max Planck Instituts fertigen lassen
F	Oberflächengüte, Toleranzen so hoch wie nötig, aber so gering wie möglich
W	Bauteile einfach gestalten
Transport:	
F	Befestigungsmöglichkeit für den Kran ermöglichen
F	Transport zwischen MPI Bonn und Effelsberg durch LKW gewährleisten
Kosten:	
F	Minimale Konstruktions-, Fertigungs-, Material- und Wartungskosten; kein konkretes Budget
Termin:	
F	Fertigstellung der Konstruktion 20.02.2009; Fertigstellung des Empfängers und Inbetriebnahme bis 31.12.2009

Tabelle 3: Anforderungsliste

10. Konstruktion des Kryostaten

Eine der festgelegten Aufgabenstellungen dieser Diplomarbeit befasst sich mit der Konstruktion eines Kryostaten für ein Doppelhornempfangssystem für das Radioteleskop Effelsberg, welches im Sekundärfokus verbaut werden soll. Die besondere Schwierigkeit liegt darin, dass beide Empfangshörner auf möglichst tiefe Temperaturen gekühlt werden sollen.

Die Randbedingungen werden hierbei von den Astronomen und Elektrotechnikern vorgegeben. Hierzu zählen der Abstand der beiden Empfangshörner, sowie die Anordnung und Reihenfolge der Hohlleiterbauteile an deren Ende die Empfangsverstärker angeordnet sind. Diese Bauteile weisen eine festgelegte Geometrie auf, welche nicht veränderlich sind. Die folgende Abbildung veranschaulicht die verschiedenen Bauteile und deren Reihenfolge.

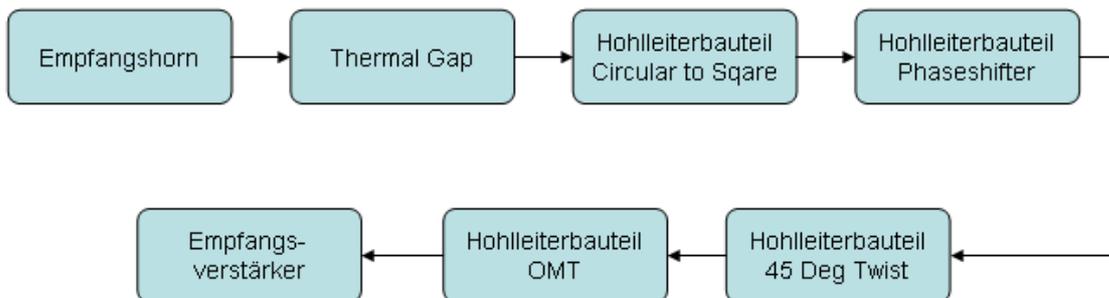


Abbildung 25: Aufbau des Empfängers

Fertigungszeichnungen der oben genannten Bauteile finden sich im Anhang A.3.

Wie zuvor beschrieben, sind mehrere Formen und Werkstoffe zur Konstruktion eines Kryostaten denkbar. Hier gilt es nun die optimale Paarung von Form und Werkstoffen zu ermitteln.

10.1 Auswahl der Werkstoffe

10.1.1 Anforderungen der Werkstoffe für den Vakuumbehälter

Bei der Auswahl der Werkstoffe sind mehrere wichtige Aspekte zu bedenken. Zum einen muss der Werkstoff mechanische Voraussetzungen erfüllen, hinzukommend muss er aber auch vakuumgeeignet sein. Diese beiden Anforderungen werden nun näher beleuchtet.

Mechanische Anforderungen

- Leicht
- Hohe Festigkeit
- Wärmeausdehnungsverhalten
- Resistenz gegen Gase und Dämpfe
- Korrosionsfest

Anforderung zum Betrieb im Vakuum

- Geringe Gasdurchlässigkeit
- Leichte Entgasbarkeit
- Saubere Oberflächen
- Geringe Desorptionsrate des Werkstoffs

Zunächst muss sichergestellt werden, dass das gewählte Material im Temperaturbereich zwischen 5K und 320K den Festigkeitsansprüchen genügt. Je nach Temperatur verändern sich die wesentlichen Merkmale des Werkstoffes wie z.B. Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Härte. Dementsprechend muss der Werkstoff über den gesamten Temperaturbereich beleuchtet werden. Diesen Effekt der unterschiedlichen Eigenschaften des Werkstoffs bei unterschiedlichen Temperaturen macht man sich beim Legieren zu Nutzen. Metalle verändern bei unterschiedlichen Temperaturen ihre Gitternetzstruktur. Durch Einbringen von Legierungsbestandteilen wie z.B. Stickstoff (Nitrieren) oder Aufkohlen lassen sich die Materialeigenschaften verändern.

10.1.2 Mögliche Werkstoffe zum Bau des Druckbehälters

Um mögliche Werkstoffe zum Bau eines Druckbehälters zu erhalten, kann man sich gut bei Herstellern von Druckkörpern informieren. Vakuumbehälter sind jedoch eher selten im Gegensatz zu Druckbehältern, welche im Überdruckbereich (Drücke von $p > p_{\text{amb}} = 10^5 \text{ Pa}$) betrieben werden. Allerdings ist wie bereits angesprochen darauf zu achten, dass die Werkstoffe auch im Hochvakuum betrieben werden können.

Durch eine Recherche bei diversen Herstellern konnte festgestellt werden, dass vornehmlich folgende Werkstoffe zum Bau von Druckkörpern verwendet werden. Hierzu gehören Edelstahl, Aluminium- und Kupferlegierungen, sowie Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV), welche auch als Faserverbundwerkstoffe bezeichnet werden.

Edelstahl

Der wohl am meisten verwendete Werkstoff zum Bau von Druckbehältern ist Edelstahl. Hier ist besonders der austenitische Stahl X5CrNi18-10 zu erwähnen. Dieser mit Chrom und Nickel legierte Stahl wird im Volksmund auch gerne als V₂A- Stahl (Versuchsstahl, 2. Versuchsreihe, austenitisches Gefüge) bezeichnet. Dieser ist nicht nur aufgrund seiner Werkstoffeigenschaften zum Bau von Druckbehältern geeignet, sondern ist auch durch seine oftmalige Verwendung in den unterschiedlichsten Bereichen (z.B. Herstellung von Besteck) relativ kostengünstig. Der besagte Stahl ist korrosionsbeständig und verfügt über hohe Festigkeitswerte. Zudem kann er mit hohen Temperaturen ausgeheizt werden, wodurch Restgase aus dem Material ausgetrieben werden. Somit kann eine erhöhte Desorption von Gasen aus der Behälterwand im Vakuum verhindert werden. Auch aus fertigungstechnischer Sicht ist Edelstahl ein beliebter Werkstoff im Behälterbau. Er ist gut schweißbar und kann elektrolytisch poliert werden, wodurch ein geringer Emissions- und Adsorptionsgrad erreicht wird. Bei Schweißnähten ist allerdings darauf zu achten, dass eine hohe Dichtheit erreicht wird und sich kein Leckstrom einstellt.

Ein großer Nachteil von Edelstahl ist allerdings die hohe Dichte und somit die hohe Masse, welche auf Grund der Aufgabenstellung minimiert werden soll. Auch Edelstähle mit Legierungsbestandteilen wie z.B. Chrom, Nickel, Molybdän und Titan sind gebräuchlich. Allerdings sind die Werkstoffkosten wesentlich höher. [18]

Aluminiumlegierungen [3]

Eine weitere Alternative zum Bau von Druckbehältern sind Aluminiumlegierungen. Diese unterscheiden sich allerdings in vielerlei Hinsicht zu Edelstählen. Somit ist Aluminium mit einer Dichte von $2,7 \frac{kg}{dm^3}$ um das dreifache leichter als Edelstahl mit einer Dichte von $7,9 \frac{kg}{dm^3}$.

Die Festigkeitswerte liegen allerdings deutlich unter denen von Edelstahl. Mit einer Zugfestigkeit $R_m=300MPa$ und einer Streckgrenze $R_{p0,2}=150MPa$ liegen diese Werte um ein Vielfaches unter den Werten von Edelstahl. Auch der Elastizitätsmodul, welcher Aufschluss über die Steifigkeit eines Werkstoffs gibt, sowie die Härte ist bei Aluminium und seinen Legierungen relativ gering.

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich bereits erkennen, dass sich beim Einsatz einer Aluminiumlegierung die Masse, jedoch nicht das Volumen minimieren lassen könnte.

Allerdings gilt ein gesondertes Augenmerk auch den Verformungen, welche aufgrund des geringen Elastizitätsmoduls sicherlich ausgeprägter sein werden, als dies bei Edelstahl anzunehmen ist. Aufgrund der geringen Härte müssen Oberflächen vorsichtig behandelt werden, damit eine glatte Oberfläche nicht durch Kratzer und andere Beschädigungen an Güte verliert.

Kupferlegierungen [3]

Kupferlegierungen kommen nur in Ausnahmefällen zum Einsatz. Sie bieten wenig Anreiz in Punkto Festigkeit, Gewichtersparnis oder aufgrund von fertigungstechnischen Aspekten. Legierungen mit Zink (Messing) sind im Vakuumbehälterbau nicht zugelassen, da Zink, ebenso wie größere Anteile an Magnesium oder Cadmium bei Hoch- und Höchstvakuum aus den Behälterwänden ausgasen und somit den Druck im Rezipienten anheben können.

Faser - Kunststoff – Verbunde (FKV) [3;19]

Faser-Kunststoff-Verbunde oder auch Faserverbundwerkstoffe finden immer häufiger Anwendung im Druckbehälterbau. Als Beispiel dient der Einsatz der Faserverbundwerkstoffe in der Sicherheitstechnik, zum Beispiel im Bau von Druckluftflaschen für Atemschutzgeräte der Feuerwehr. Hier wird ein Composite aus Aluminium, Kohlefaser- und Glasfaserverbundwerkstoffen verwendet. Die Festigkeitseigenschaften sind circa um den Faktor 25 höher als die Festigkeitswerte von Stahl. Hinzu kommt eine enorme Gewichtersparnis, welche dem Träger einer Atemschutzflasche eine wesentliche Erleichterung seiner Arbeit ermöglicht.

Günstig an Faserverbundwerkstoffen sind die variablen Eigenschaften des Materials. Je nach Zusammensetzung und Ausrichtung der Verbunde lassen sich die unterschiedlichsten Eigenschaften erzielen. Es muss hierbei darauf geachtet werden, dass die Belastungen stets in Faserrichtung erfolgt. Somit ist dieser Werkstoff anisotrop, was bedeutet, dass seine Festigkeitswerte wie Zugfestigkeit, Streckgrenze und Elastizitätsmodul richtungsabhängig sind. Die Abbildungen 26 und 27 zeigen die unterschiedliche Ausrichtung der Fasern, sowie die Richtungsabhängigkeit der Zugfestigkeit von Verbundwerkstoffen.

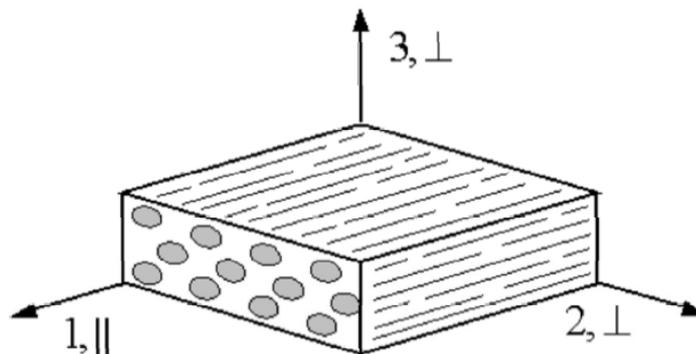


Abbildung 26: Schnittdarstellung eines Faserverbundwerkstoffes [3]

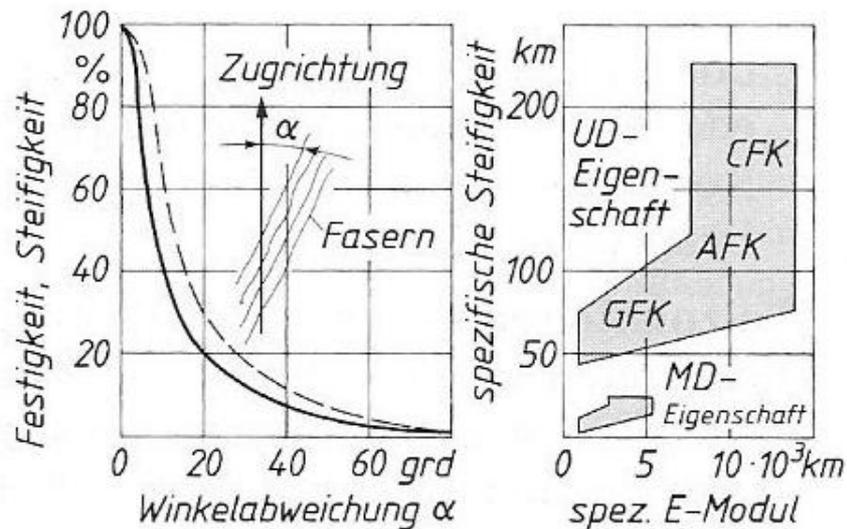


Abbildung 27: Richtungsabhängigkeit der Festigkeitswerte von Faserverbundwerkstoffen [3]

Grundsätzlich lassen sich Faserverbundwerkstoffe durch die Art der Materialfasern und deren Ausrichtung, sowie der Verbundstruktur einteilen.

Als Fasermaterial sind Glas und Kohlenstoff sehr gängig. Weiterhin werden Aluminium-Oxid, Silizium-Carbid (Keramik) oder Bor-Wolframfasern verwendet. Faserverbunde aus Aramid sind auch besser bekannt als Kevlar. Die genannten Trägermaterialien werden durch die Zugabe von Epoxid- oder Polyesterharzen verklebt. Die Haftkräfte auf molekularer Ebene, welche auch als Adhäsionskräfte bezeichnet werden, sind in dieser Kombination extrem stark. Die Preise variieren zwischen 2 und 100 Euro pro Kilogramm, wobei Glasfaserverbunde die niedrigsten Kosten aufweisen.

Die Ausrichtung der Fasern zueinander spielt wie bereits angedeutet ebenfalls eine sehr wichtige Rolle. Man unterscheidet zwischen uni-, bi- und multidirektionaler Ausrichtung. Im Fall der unidirektionalen Ausrichtung liegen alle Fasern möglichst parallel, was die Zugfestigkeit in Faserrichtung extrem erhöht, jedoch reagiert diese Anordnung sensibel auf Schubspannungen.

In Verbänden mit bidirektionaler Ausrichtung liegen die Fasern unter einem Winkel von 90° zueinander. Eine Mischung aus uni- und bidirektional ausgerichteten Fasern bezeichnet man als mulidirektionale Ausrichtung. Hier werden oftmals mehrere Schichten aus verschiedenen gerichteten Gewebelagen verwendet (Lamine). Aber auch Faserausrichtungen, welche man als chaotisch bezeichnen könnte (sogenannte Wirrfasern), gehören zu der Gruppe der multidirektionalen Ausrichtung. Durch diese Anordnung erfolgen eine Erhöhung der Steifigkeit und Zugfestigkeit in mehreren Richtungen, sowie eine bessere Belastungsfähigkeit durch Schubspannungen.

Die Verbundarten gliedern sich in Schicht-, Faser-, Teilchen-, sowie Durchdringungsverbunde. In diesem Rahmen sind allerdings nur die Faserverbunde interessant. Die verbleibenden Verbunde finden ihre Verwendung eher in anderen Industriezweigen, wie z.B. der Bau- oder Möbelindustrie. Zur Vervollständigung zeigt Tabelle 4 einen Überblick bezüglich der Verbundarten und deren Spezifikationen.

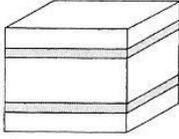
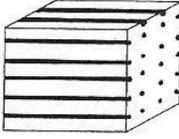
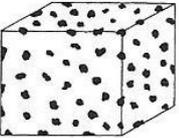
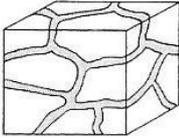
Verbundart	Struktur	Metallmatrix	Polymermatrix	Keramikmatrix
Schicht-Verbund: Verstärkungs- oder Funktionsphase als Deckschicht oder abwechselnd		Blech/Dämmschicht-Verbunde, Sandwich-Platten	Hartpapier, Hartgewebe und Kunstharzpressholz	
Faser-Verbund: Dünne Fasern (wenige µm dick), gerichtet oder regellos, in der Matrix		Al-Oxidfaserverstärkte Al-Kolben für Verbrennungsmotoren	Glas- oder kohlenstofffaserverstärkte EP- oder UP-Harze	Metallfaserverstärkte Hochtemperaturziegel für Ofenauskleidung
Teilchen-Verbund: Feinste, gleichmäßig verteilte Kristalle (bzw. amorphe Körper) in der Matrix		Carbidteilchen in Cobalt (Hartmetall) Al-Oxid-verstärktes Al (PM-Werkstoff)	Talkum-, Holzmehl- oder Glaskugeln gefüllte Duroplaste	TiC-Teilchenverstärktes ZrO ₂
Durchdringungs-Verbund: Raumnetzartige Durchdringung eines porösen Körpers mit der anderen Phase		Fett-infiltrierte Sinterbronze als Lagerwerkstoff, Cu-infiltriertes Wolfram für Schaltkontakte	mit Kunststoffgebundene Schleifscheiben	Si-infiltriertes SiC, harzimprägnierter Elektrographit für Wärmetauscher

Tabelle 4: Verbundarten [3]

Die Vorteile dieses Werkstoffs liegen eindeutig in seinem sehr geringen Gewicht und der hohen Festigkeit. Auch eine individuelle Formgebung ist möglich. Weiterhin gelten Faserverbundwerkstoffe als gasundurchlässig, was einen geringen Gasanfall bedingt durch Diffusion zur Folge hat.

Nachteilig wirken sich die Fertigungskosten als Einzelteil aus. Diese sind aufgrund des hohen Aufwands relativ hoch. Als potentieller Nachteil wirkt sich auch die Gefahr aus, dass Bestandteile des Verbundwerkstoffes bei Drücken im Bereich des Höchstvakuum aus den Wänden ausgasen können. Aus dem gleichen Grund sind nicht alle Metalllegierungen zum Bau von Vakuumbehältern geeignet.

10.1.3 Diskussion der Werkstoffe und Auswahl

Nach einer Absprache mit Herrn Dr. Keller entschieden wir uns für eine Aluminiumlegierung zum Bau des Druckbehälters. Die beschriebenen Stahllegierungen verfügen zwar über höhere Festigkeitswerte, jedoch auch über wesentlich höhere Dichten, wodurch die Forderung der Massenminimierung nicht erfüllt wird. Trotz der geringeren Festigkeitswerte, können mit Aluminiumlegierungen geringere Gesamtmassen erricht werden. Wie bereits beschrieben können auch Kupferlegierungen keine Alternative bieten. Die einzige weitere Möglichkeit könnte der Einsatz von Verbundfaserwerkstoffen sein. Jedoch wurde bis heute nicht genügend erforscht, ob diese oder zumindest einige dieser Werkstoffe geeignet sind im

Bereich des Höchstvakuum. Weiterhin nimmt der zu konstruierende 7mm – Doppelhornempfänger eine besonders wichtige Position in Hinsicht auf die zukünftigen Forschungsmessungen ein. Aus diesem Grund soll bei diesem Neubau auf neuartige Werkstoffe und die damit verbundenen Risiken verzichtet werden, auch wenn hierdurch eine weitere Massenreduzierung möglich wäre. Im Anschluss an diese Arbeit soll die experimentelle Erprobung von neuartigen Werkstoffen eine meiner Hauptaufgaben werden.

10.2.1 Anforderungen an den Werkstoff des Strahlungsschildes

Das Strahlungsschild, oder auch 70K-Schild genannt, wird über eine Schraubverbindung am Kühlzylinder befestigt. Seine Aufgabe ist es, die vom Gehäuse (300K-Stufe) abgegebene Wärmestrahlung möglichst vollständig zu reflektieren und hierdurch einen minimalen Wärmeeintrag auf die 15K-Stufe zu gewährleisten. In der Realität ist es allerdings nicht möglich, die gesamte Wärmestrahlung zu reflektieren. Ein Teil der Strahlung wird durch das Material hindurch geleitet (Transmissionsgrad) und ein weiterer Teil vom Strahlungsschild aufgenommen (Absorptionsgrad), wie Abbildung 28 veranschaulicht.

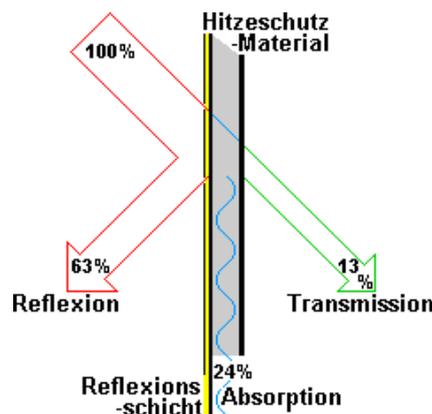


Abbildung 28: Reflexion, Transmission, Absorption [17]

Weiterhin werden die beiden Empfangshörner über thermische Leiter mit der 70K-Stufe verbunden, sodass auch diese auf einen Temperaturbereich von 70 Kelvin gekühlt werden. Diese aufgenommene Wärmeenergie muss über das Strahlungsschild dem Kühlzylinder zugeführt werden nach dem physikalischen Prinzip der Wärmeleitung. Zusammenfassend können folgende Aufgaben und Anforderungen an das Strahlungsschild formuliert werden.

- Hoher Reflexionsgrad
- Gute Wärmeleitung
- Geringer Transmissionsgrad
- Geringer Absorptionsgrad
- Hohe Oberflächengüte
- Genügende Festigkeit zum Tragen seines Eigengewichtes
- Geringes Eigengewicht

Um die genannten Aufgaben zu erfüllen stellen sich folgende Werkstoffe als besonders geeignet heraus. Allerdings ist zu beachten, dass die gängigen Material- und Wärmeleitwerte in der Regel für einen Temperaturbereich von circa 300 Kelvin gelten. Sollten die Betriebstemperaturen eines Systems wesentlich von der Normtemperatur abweichen, so sind diese Werte oft nicht mehr zutreffend, da sowohl Festigkeitswerte als auch Wärmeleitwerte abhängig der Temperatur sind, wie im Weiteren aufgezeigt wird.

10.2.2 Mögliche Werkstoffe zum Bau des Strahlungsschildes

Aluminium und mögliche Legierungen:

Bei einer Verwendung von Aluminium lässt sich auf verschiedene Legierungen, sowie reines Aluminium zurückgreifen. Aber sowohl reines, als auch legiertes Aluminium weisen sehr unterschiedliche Eigenschaften in Punkten Wärmeleitung, Dichte und Festigkeit auf.

Von allen möglichen Aluminiumwerkstoffen weist reines Aluminium (Al 99; Al 99,5; Al 99,8) die beste Wärmeleitfähigkeit auf. Während andere Aluminiumwerkstoffe mit abnehmender Temperatur an Wärmeleitfähigkeit verlieren, steigt diese bei reinem Aluminium bis zu einer Temperatur von 10 Kelvin an. Bei einer Raumtemperatur von 300 Kelvin beträgt die Wärmeleitfähigkeit von Al 99,0 $\lambda = 210 \frac{W}{m \cdot K}$. Bei Abkühlung des Materials auf eine

Temperatur von 70 Kelvin steigt die Wärmeleitfähigkeit auf $\lambda = 310 \frac{W}{m \cdot K}$. Bei Al 99,8 steigt

diese sogar auf $\lambda = 500 \frac{W}{m \cdot K}$. Nachteilig wirken sich allerdings die sehr geringe Festigkeit

von reinem Aluminium, sowie die hohen Material- und Fertigungskosten aus.

Im Gegensatz hierzu eignen sich Aluminiumlegierungen aus statischer Sicht besser für diese Verwendung. Sie weisen jedoch geringere Wärmeleitkoeffizienten auf.

In den folgenden Abbildungen 29 und 30 sind verschiedene Werkstoffe mit ihren Wärmeleitkoeffizienten dargestellt.

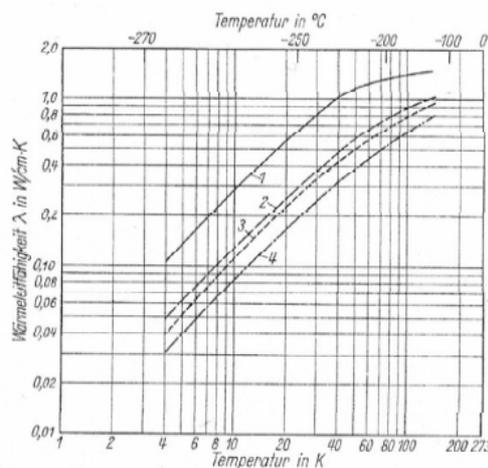


Abbildung 29: Wärmeleitfähigkeit von Aluminium [9]

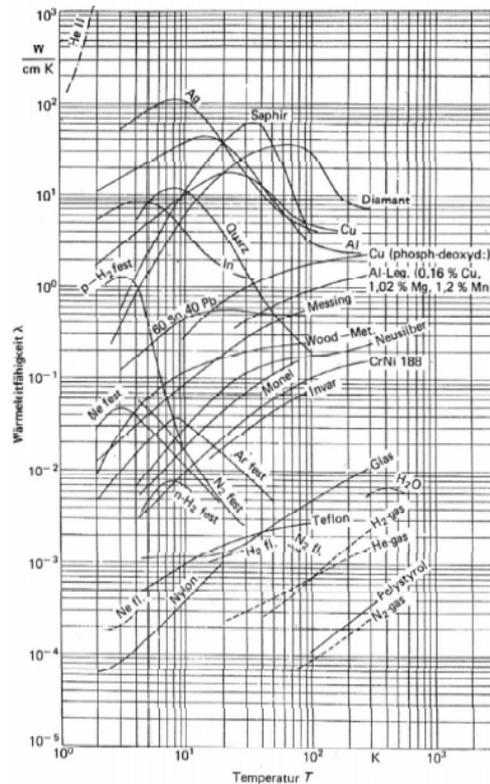


Abbildung 30: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe [9]

Der Emissions- und Reflexionskoeffizient sind ebenfalls sehr günstig, soweit die Oberfläche des Materials poliert ist. Eine Politur ist in der institutseigenen Galvanik-Werkstatt möglich, was den Wunsch der Soll - Zustandsanalyse erfüllt, die Bauteile in Eigenfertigung herzustellen.

Kupfer und mögliche Legierungen

Kupfer weist im Allgemeinen sehr gute Wärmeleiteigenschaften auf. Hochreines Kupfer besitzt bei Umgebungstemperatur eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 400 \frac{W}{m \cdot K}$. Bei sinkender

Temperatur steigen die Wärmeleitfähigkeit, sowie der Elastizitätsmodul stark an. Die genauen Werte sind der nachfolgenden Tabelle, sowie dem Schaubild zu entnehmen.

Bei einer Verwendung von Kupferlegierungen ist jedoch darauf zu achten, dass die Legierungsbestandteile vakuumgeeignet sind. Allerdings entsprechen alle gängigen Legierungen nicht der Forderung der Vakuum- oder mechanischen Festigkeit. Somit müsste auf reines Kupfer zurückgegriffen werden. Der Emissionskoeffizient liegt unter der Voraussetzung einer galvanisch polierten Oberfläche leicht über dem Wert von Aluminium.

Weitere mögliche Werkstoffe

Weitere mögliche Werkstoffe sind Silber, Indium oder Gold. Diese Werkstoffe besitzen einen sehr hohen Wärmeleitkoeffizienten. Silber ist in dieser Hinsicht der beste Werkstoff, da seine Wärmeleitfähigkeit bei einer Temperatur von 70 Kelvin $\lambda = 700 \frac{W}{m \cdot K}$ beträgt.

Die Strahlungskoeffizienten sind ebenfalls optimal und liegen noch unter den Werten von poliertem Aluminium. Allerdings sind die sehr hohen Materialkosten bereits ein Kriterium, weshalb diese Werkstoffe nicht als Möglichkeit betrachtet werden können. Eine Alternative ist eine dünne Beschichtung eines Trägermaterials wie Aluminium oder Kupfer mit einer Gold oder Silberschicht.

Tabelle 5 zeigt eine Gegenüberstellung verschiedener Werkstoffe und ihren Emissionskoeffizienten.

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	
Guß Eisen, 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 5: Emissionskoeffizienten [7]

10.2.3 Diskussion und Auswahl des Werkstoffs für das Strahlungsschild

Aus Tabelle 5 wird ersichtlich, dass eine galvanisch polierte Oberfläche aus Aluminium mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,018$ die physikalisch und finanziell günstigste Variante ist. Eine polierte Oberfläche aus Kupfer liegt ebenfalls mit einem Emissionskoeffizienten von $\varepsilon = 0,018$ in diesem Bereich. Auch die Möglichkeit der Eigenfertigung des Teils, sowie die galvanische Politur in der institutseigenen Galvanik - Werkstatt sprechen für diese Varianten. Jedoch ist aus vergangenen Konstruktionen bekannt, dass nach einer längeren Einsatzzeit die Oberflächengüte von poliertem Aluminium und Kupfer abnimmt und eine Nachbearbeitung nötig ist. Hierfür müsste die Empfangseinheit demontiert werden, was aber aufgrund des Arbeitsaufwandes und des Ausfalls des Empfängers für die Dauer der Wartung keinesfalls eine Alternative sein kann. Aus diesem Grund wird nach Absprache mit Herrn Dr. Keller das Strahlungsschild aus Kupfer gefertigt und mit einer Goldschicht bezogen. Die Dicke dieser Schicht beträgt ca. $25\mu\text{m}$ und wird ebenfalls galvanisch aufgebracht. Die neue Empfangseinheit gilt als sehr wichtig und gefragt, was dazu führt, dass in diesem Fall die Kosten eine untergeordnete Rolle spielen.

10.3.1 Anforderungen an den Werkstoff zur mechanischen Abstützung der Bauteile

Aus Gründen der Statik und Festigkeit müssen die Bauteile, welche im inneren des Druckbehälters verbaut sind, an der massiven Außenwand des Druckbehälters (300K – Stufe) abgestützt werden. Gleichzeitig muss allerdings auch darauf geachtet werden, dass nicht zu viel Wärmeenergie durch Wärmeleitung in das System eingebracht und somit die Kühlleistung des Refrigerators überschritten wird. Aus dem Kapitel „Thermodynamische Grundlagen“ geht hervor, dass ein Material mit geringem Wärmeleitkoeffizienten benötigt wird. Stoffe mit geringem Wärmeleitkoeffizienten werden auch als Isolatoren bezeichnet, die dem Ideal eines Stoffes, welcher einen Wärmeleitkoeffizienten von $\lambda=0 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ besitzt, sehr nahe kommt. Zu den Materialien, welche einen geringen Wärmeleitkoeffizienten besitzen gehören z.B. bestimmte Metalllegierungen, Kunststoffe, Keramiken, Holz und Verbundfaserwerkstoffe. Jedoch können Salze und Holz aufgrund ihrer geringen mechanischen Stabilität bzw. völlig unbekanntem Ausgasungsverhalten ausgeschlossen werden.

Zur Auswahl des Werkstoffes müssen die Materialien auch über eine möglichst hohe Festigkeit verfügen, da sie nicht nur die Gewichtskraft der Bauteile abstützen müssen, sondern auch über eine geringe Masse und vor allem über eine geringe Querschnittsfläche A verfügen müssen. Dies wird ebenfalls aus der oben genannten Formel zur Wärmeübertragung durch Wärmeleitung ersichtlich. Die Querschnittsfläche A ist dem Wärmestrom Q proportional.

10.3.2 Mögliche Werkstoffe zum Bau der mechanischen Abstützung

	Wärmeleitkoeffizient [W/(mK)]	Dichte [kg/m ³]	Kosten	Festigkeit	Verarbeitung
Holz	0,05	400 - 1200	gering	gering	ungünstig
Kunststoff	0,2	800 - 2200	mittel	mittel	befriedigend
GFK	0,18	2000	mittel	hoch	sehr gut
Metalllegierungen	15	7800	mittel	hoch	gut

Tabelle 6: Gegenüberstellung möglicher Materialien

Aus der tabellarischen Aufstellung (Tabelle 6) geht hervor, dass glasfaserverstärkte Verbundwerkstoffe (GFK) besonders in Frage kommen. Diese verfügen über einen sehr kleinen Wärmeleitkoeffizienten bei gleichzeitig sehr hoher Festigkeit. Diese Variante wurde auch bei früheren Konstruktionen verwendet und hat sich im langjährigen Einsatz bewährt. Metalllegierungen sind aufgrund ihrer hohen Dichte ungünstig. Holz muss ebenfalls ausgeschlossen werden, da Holz mit geringem Wärmeleitkoeffizienten über nur sehr geringe Festigkeitswerte verfügt. Hierzu zählen z.B. Spanplatten und vergleichbare Materialien. Massive Hölzer leiten Wärmeenergie besser und besitzen eine wesentlich höhere Dichte. Somit scheidet auch diese für eine Verwendung aus.

10.3.3 Auswahl des Werkstoffes zum Bau der mechanischen Abstützung

Aus den oben genannten Gründen wird die mechanische Abstützung der Bauteile innerhalb des Druckbehälters durch Stützen aus glasfaserverstärktem Kunststoff ausgeführt. Vorteil ist zudem, dass die benötigten Materialien im Werkstofflager der institutseigenen Werkstatt vorhanden sind.

10.4 Form und Gestalt des Druckbehälters

Einige Erfahrungswerte im Bezug auf die Form und Gestalt des Druckbehälters sind bereits am Max Planck Institut vorhanden. Wie aus der Ist-Zustandsanalyse bereits hervorgeht, wurden einfache Geometrien wie kubische oder rohrförmige Querschnitte verwendet. Um eine optimale Form des nun benötigten Druckbehälters zu erlangen und weitere Erfahrungen mit dem Programm Solid Works, sowie der Applikation COSMOS-Works zu sammeln, werden zunächst einfache Geometrien erstellt und miteinander verglichen mit besonderem Augenmerk auf Form, Spannungen und Verformungen. Jede Untersuchung wird mit gleichem Material, sowie mit gleicher Belastung und Größe berechnet, sodass am Ende eine Gegenüberstellung und eindeutige Auswahl erfolgen kann.

In jedem Modell wird die Wandstärke 10mm betragen. Das Volumen wird nicht konstant bleiben, da Länge, Breite und Höhe durch den vorgegebenen Abstand der Empfangshörner vorgegeben sind. Als Material wird der Edelstahl X5CrNi18-10 genommen. Dies ist allerdings an dieser Stelle noch nicht von Bedeutung, da es zunächst gilt, die günstigste Form des Druckkörpers zu ermitteln. Wichtig ist nur, dass bei allen Modellen der gleiche Werkstoff verwendet wird.

10.4.1 Der Würfel

Als erste und einfachste Form soll zunächst der Würfel untersucht werden. Dieser eignet sich besonders aufgrund der einfachen Geometrie und Herstellung. Weiterhin ist diese Form günstig, falls im Innenraum weitere Teile verbaut und befestigt werden sollen, da Ausrichtung und Verschraubung unkompliziert sind. Nun wurde der Quader mit dem Programm Solid Works modelliert und eine Finite Elemente Berechnung durchgeführt. Die nachfolgenden Schaubilder veranschaulichen die Ergebnisse durch ihre Farben und Formen.

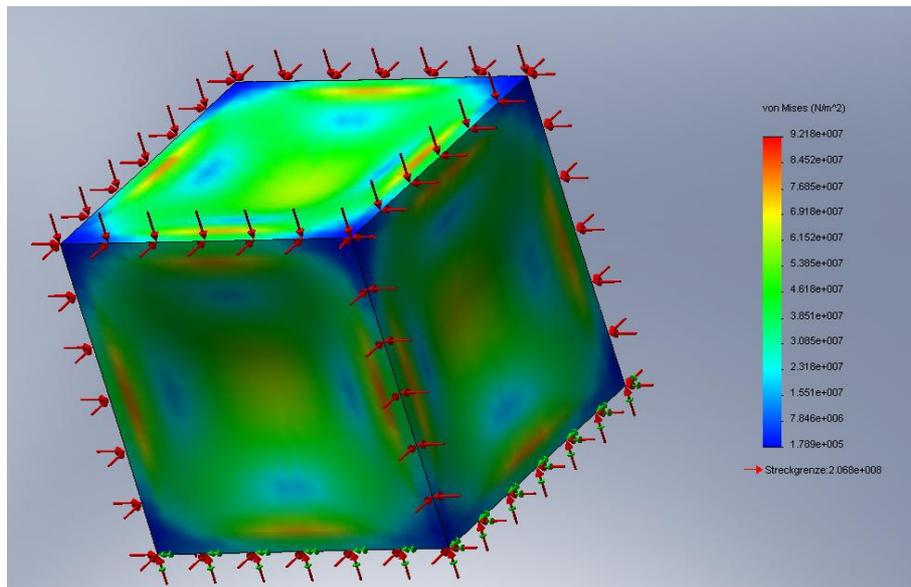


Abbildung 31: Spannungsdarstellung laut von Mises

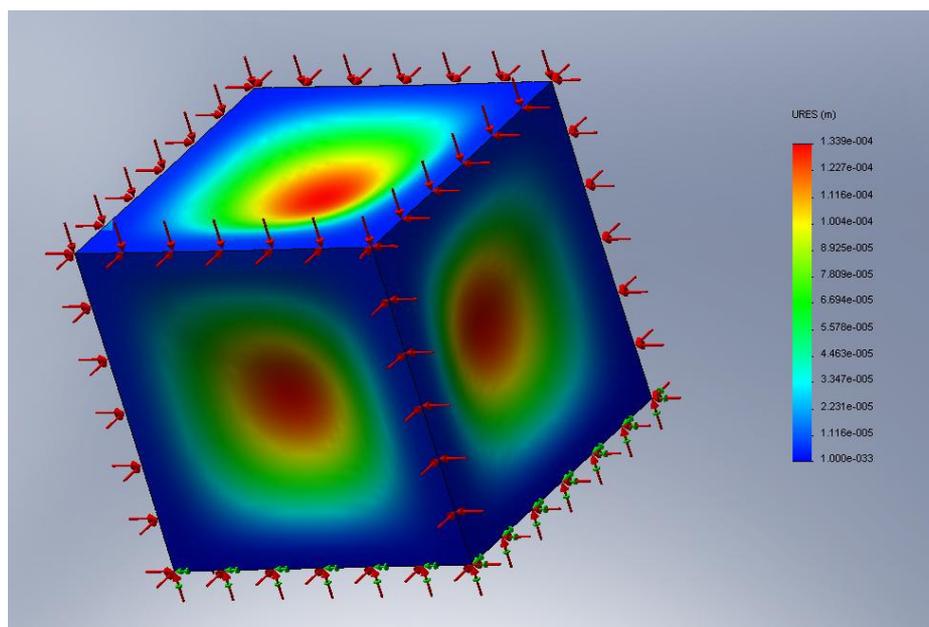


Abbildung 32: resultierende Verschiebungen

Aus den beiden Abbildungen 31 und 32 lassen sich nun die Spannungen und Verformungen ablesen. Die Verformungen werden zum einen aus der verformten Geometrie, sowie durch die Einfärbungen betragsmäßig ersichtlich.

In diesem Fall sind die Spannungen und Verformungen in der Mitte der einzelnen Flächen, sowie an den Kanten am größten. Dies resultiert aus der Tatsache, dass die Druckkraft, welche durch den Umgebungsdruck hervorgerufen wird, gleichmäßig und in normaler Richtung auf die Flächen wirkt. Der Hebelarm ist in der Mitte des Modells am größten, sodass auch an dieser Stelle das Biegemoment sein Maximum erreicht. Die Kanten sind ebenfalls stark belastet, da auch hier keine Verrundungen des Modells vorgenommen wurden. Dies führt dazu, dass sich laut dem Kraftlinienmodell an diesen Stellen die Kraftlinien konzentrieren und enger verlaufen, was zu höheren Spannungen führt.

Aufgrund der gleichmäßigen Wandstärke und dem isotropen Werkstoff sind an den Mittelpunkten der Flächen auch die größten Verformungen zu erwarten, was durch Abbildung 32 klar belegt wird.

10.4.2 Der Quader

Der Quader unterscheidet sich zum Würfel durch die Eigenschaft, dass nicht alle Flächen gleich groß sein müssen. Somit ist der Würfel eine spezielle Form des allgemeinen Quaders. Auch diese Geometrie wurde modelliert und mit der Finite Elemente Software COSMOS Works berechnet.

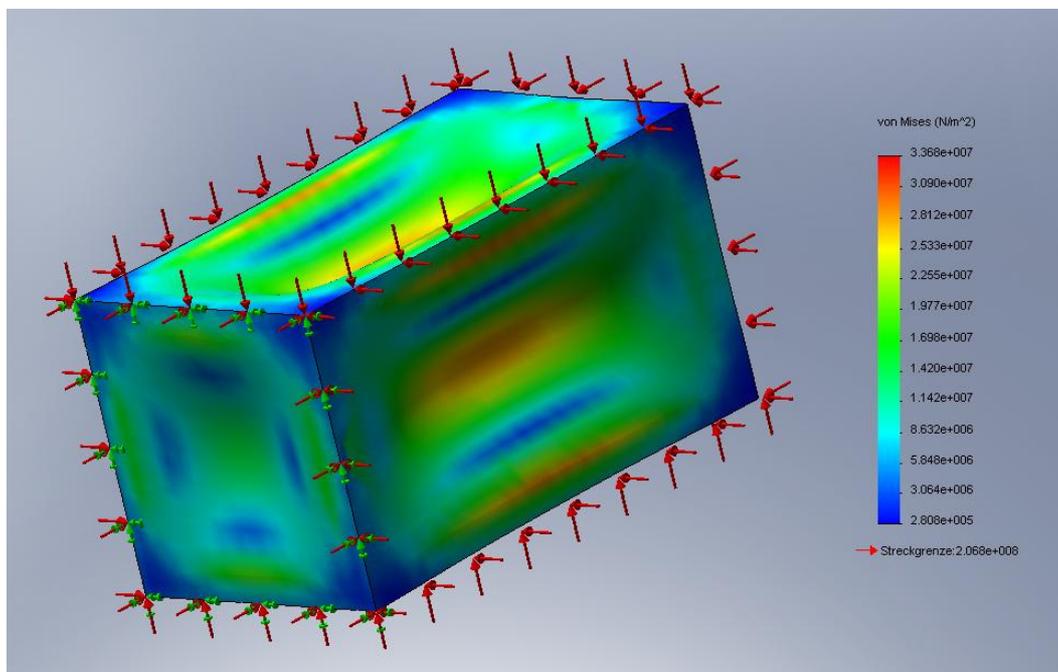


Abbildung 33: Spannungen laut von Mises

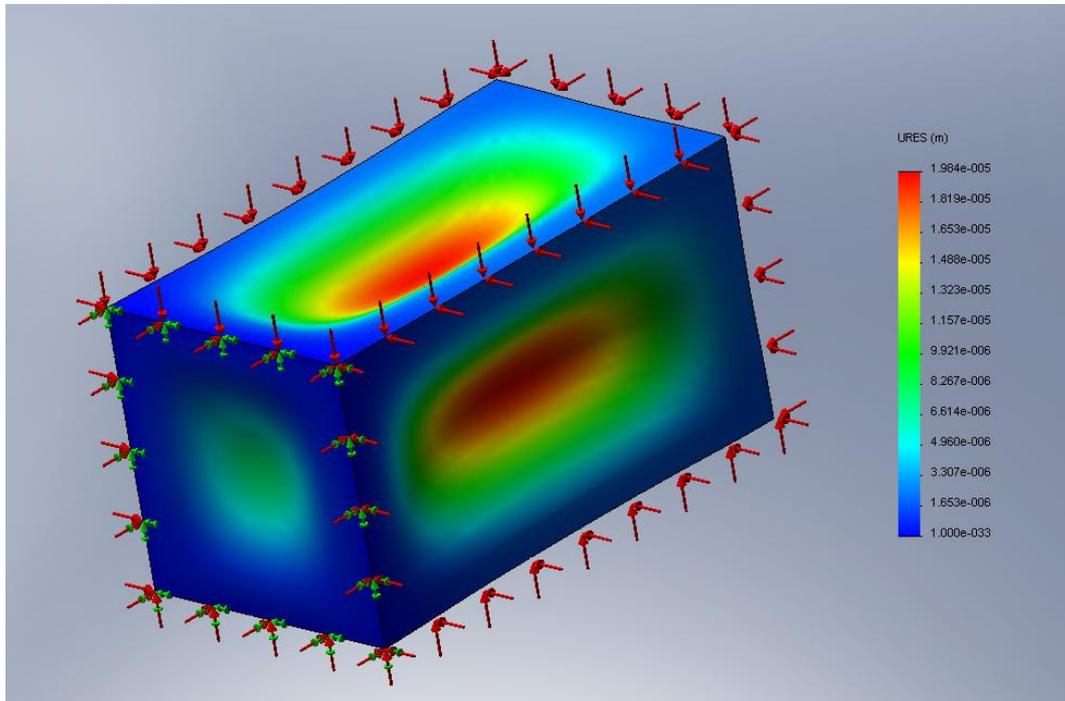


Abbildung 34: resultierende Verschiebungen

Aus Abbildung 33 und Abbildung 34 lassen sich ähnliche Schlüsse ziehen, wie bereits am Modell des Würfels erkannt wurde. Die größten Spannungen treten auch hier am Mittelpunkt der sechs Flächen auf. Die erhöhten Spannungen an den Kanten treten hier etwas in den Hintergrund. Dies ist mit den längeren Hebelarmen aufgrund der größeren Flächen zu erklären. Die Verformungen der rechteckförmigen Flächen sollten minimal gehalten werden, da die später auf diesen Flächen montierten Empfangshörner ebenfalls eine Verschiebung erfahren würden, wodurch ein schlechteres Empfangssignal resultieren würde. Dies wird aber im Laufe dieser Arbeit noch genauer erläutert.

Aus diesen Darstellungen geht ebenfalls hervor, dass die farblichen Darstellungen der Verformungs- und Spannungswerte durch ein Vergleichen mit der Farbskalierung auf der rechten Seite durchzuführen ist. Bei jeder Berechnung werden die Farben neu skaliert, wodurch ein Schluss auf kritische Spannungen und Verformungen auf Grund der Farbdarstellung nicht möglich ist. Auch bei Modellen mit kleinen Spannungen, welche nicht annähernd kritisch sind, wird eine Skalierung von blau nach rot automatisch durchgeführt. Jedoch ist es möglich, eine Skalierung des Farbenbalkens durch den Benutzer zu definieren.

10.4.3 Die Kugel

Als weitere Form kommt ein kugelförmiger Körper in Betracht. Diese Form ist allgemein bekannt als die optimale Lösung für druckfeste Körper. Jedoch ist bereits im Vorhinein ersichtlich, dass Kugeln sehr ungünstig im Bezug auf Raumverteilung, Einbau von Bauteilen und deren Befestigung sind. Trotzdem wurde auch diese Form modelliert und mit dem Programm COSMOS Works berechnet.

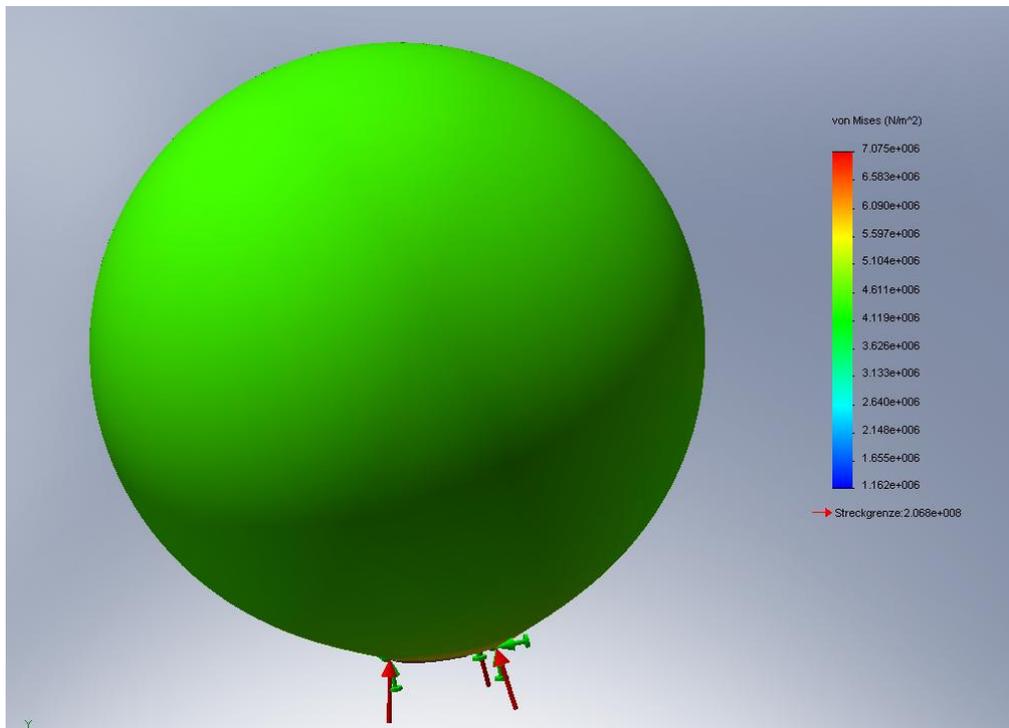


Abbildung 35: Spannungen laut von Mises

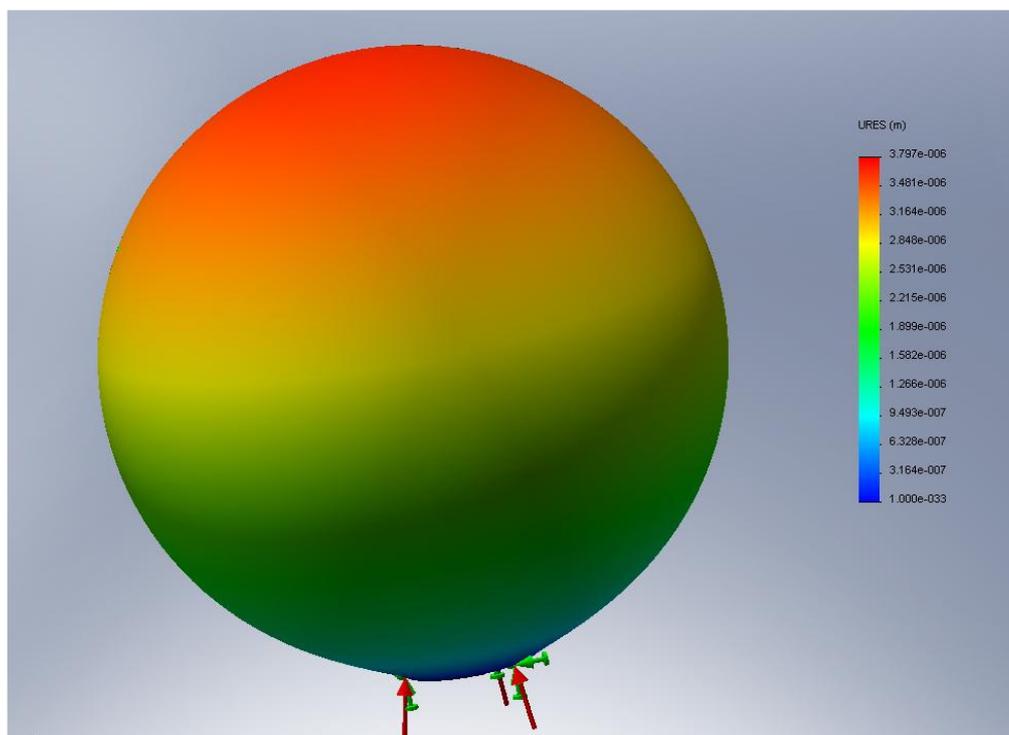


Abbildung 36: resultierende Verschiebungen

Die bereits angekündigte optimale Form der Kugel in Hinsicht auf ihre Druckfestigkeit sticht in Abbildung 35 klar heraus. Die Verteilung der Spannungen ist absolut homogen, was durch die komplette Einfärbung der Kugel in grüner Farbe ersichtlich wird.

Abweichend zu den Spannungen sind die Verschiebungen nicht gleich verteilt. Die Verteilung verläuft in Richtung der z-Achse, was allerdings durch die Wahl der Lager beeinflusst wurde. Eine feste Einspannung an einem kleinen Fuß, welcher leicht von der Kugelform abweicht, wurde hinzugefügt. Dennoch liegen die Maximalwerte der Verschiebung in einer optimalen Größenordnung. Sie bewegen sich im Mikrometer – Bereich (10^{-6}m).

10.4.4 Der Hohlzylinder

Eine Kombination aus einer Kugel sowie einem Quader stellt der Hohlzylinder dar. Durch die Beobachtungen im Alltag wird ersichtlich, dass diese ein beliebter und oftmals als Standard verwendeter Querschnitt ist. Die meisten Druckgasflaschen, Kessel und andere Druckbehälter weisen einen Hohlzylinderquerschnitt auf. Meist sind deren Enden mit flachen oder leicht gewölbten Deckeln über eine Flansch- oder Schweißverbindung verschlossen. Somit sollte auch diese Form unbedingt in eine Suche nach einer optimalen Form eingehen und wurde aus diesem Grund ebenfalls modelliert und berechnet.

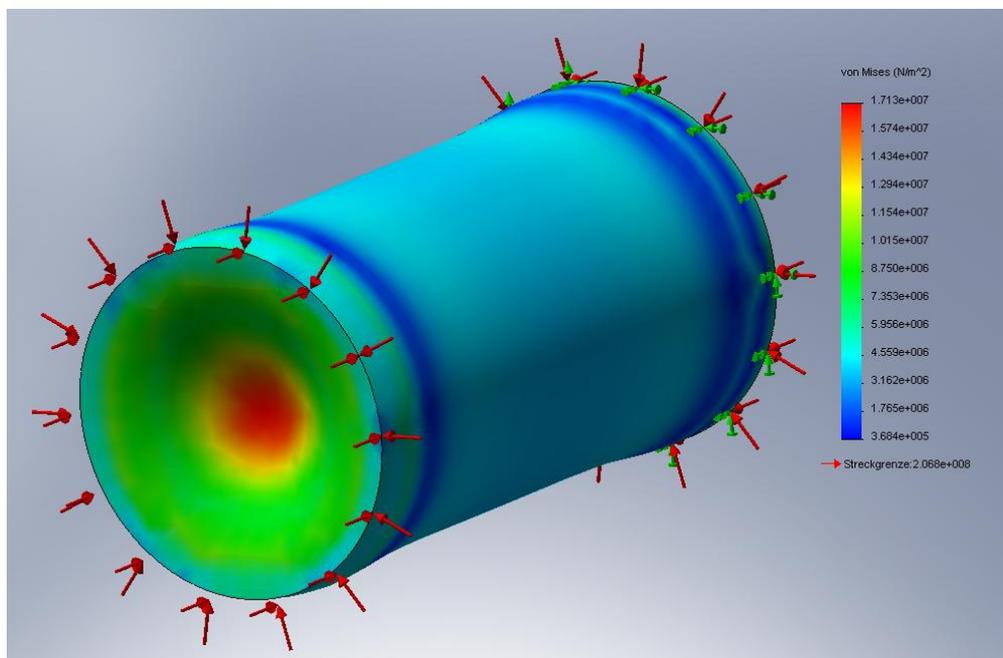


Abbildung 37: Spannungen laut von Mises

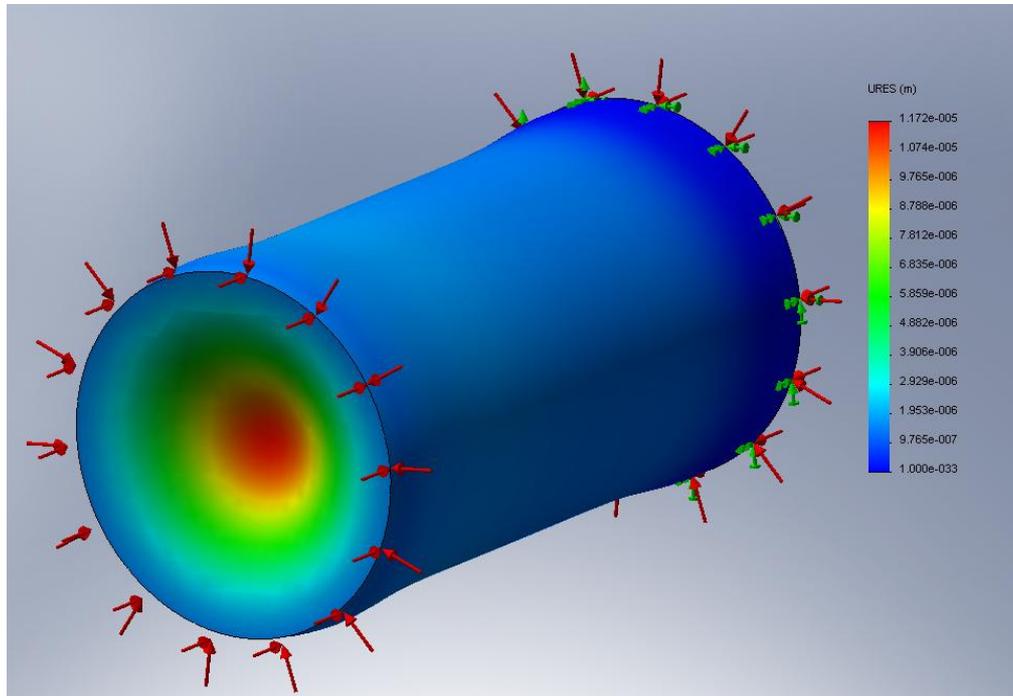


Abbildung 38: resultierende Verschiebungen

Die Erwartungen wurden auch beim Hohlleiterquerschnitt erfüllt. Die zylinderförmige Hülse wird sowohl im Hinblick auf Spannungen als auch auf Verschiebungen nur gering belastet. Im Gegensatz hierzu stehen die beiden Deckel, welche den Druckkörper verschließen. Diese werden zwar nicht überlastet, jedoch sind die Werte von Spannungen und Verformungen um den Faktor 100 höher. Somit sollte bei der Wahl eines solchen Querschnittes darauf geachtet werden, dass die seitlichen Deckel entsprechend zu überprüfen sind, ob diese den Anforderungen genügen. Gegebenenfalls müssen diese durch höhere Wandstärken oder geometrische Versteifungen den Umständen angepasst werden.

Diskussion und Entschluss über die Form des Druckbehälters

Um über die gewonnenen Ergebnisse einen besseren Überblick zu erhalten, werden die maximalen Verformungen und Spannungen in Tabelle 7 zusammengefasst und gegenübergestellt.

Bauform	Maße [mm]	Spannungen σ_{res} [MPa]	Verformungen u_{res} [mm]
Würfel	220 x 220 x 220	92,2	0,14
Quader	220 x 120 x 120	33,6	$1,98 \times 10^{-2}$
Kugel	$\varnothing 200$	4,51	$3,8 \times 10^{-3}$
Hohlzylinder	$\varnothing 120 \times 220$	17,1	$1,2 \times 10^{-2}$

Tabelle 7: Gegenüberstellung verschiedener Bauformen

Aus den ermittelten Ergebnissen lassen sich nun die Vorteile und Nachteile der einzelnen Formen einsehen.

Als optimale Form kann eindeutig die Kugelform erkannt werden. Die Verformungen und Spannungen sind mit Werten von $U_{\text{res}} = 3,8 \mu\text{m}$ und $\sigma_{\text{res}} = 4,51 \text{ MPa}$ minimal. Als Nachteil spricht die ungünstige Form und Platzverteilung einer Kugel stark gegen den Einsatz als Druckbehälter. Aufgrund des vorgegebenen Abstands der Empfangshörner müsste die Kugel einen Durchmesser von mindestens $d = 700\text{mm}$ aufweisen, was durch den geringen Platz, welcher zur Verfügung steht und die konstruktive Vorgabe der Volumenminimierung eindeutig gegen eine Verwendung spricht.

Die Formen Quader und Würfel weisen die schlechtesten Werte im Bezug auf Spannungen und Verformungen auf. Mit Werten von $U_{\text{res}} = 19,8\mu\text{m}$ und $\sigma_{\text{res}} = 33,6 \text{ MPa}$ liegen diese deutlich über den Werten der anderen Geometrien. Als sehr großer Vorteil erweist sich allerdings die günstige Platzverteilung und die Einfachheit im Bezug auf die Befestigung der Bauteile. Der Würfel als Sonderform des Quaders nähme allerdings wie bei der Kugel zu viel Platz in Anspruch. Alle Kantenlängen müssen mindestens eine Kantenlänge von $l = 700\text{mm}$ betragen. Dieses Kriterium bewirkt den Schluss, dass die Form des Quaders der Kugelform überlegen ist, auch wenn die Werte von Spannungen und Verformungen ungünstiger sind, als bei der Kugelform.

Als Kompromiss zwischen Kugel und Quader kann die Hohlzylinderform angesehen werden. Die simulierten Werte der Spannungen von $\sigma_{\text{res}} = 17,1 \text{ MPa}$ und Verformungen von $U_{\text{res}} = 12 \mu\text{m}$ liegen zwischen denen der zuvor betrachteten Geometrien. Der Platzbedarf und die Möglichkeit der Befestigung der Bauteile sind bei dieser Geometrie günstiger als bei einer Kugel, jedoch etwas schwieriger als bei einem Quader oder Würfel.

Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass die Formen, welche am günstigsten erscheinen, genauer betrachtet werden sollen. Hierzu zählen der Hohlzylinder, sowie der Quader. Für beide Möglichkeiten werden im folgenden Modelle erstellt und miteinander verglichen. Die Wandstärken werden auch hier zunächst gleich gehalten, sodass ein besserer Vergleich möglich ist. Sobald weitere Fakten darüber vorliegen, welche Geometrie verwirklicht wird, wird eine weitere Optimierung vorgenommen.

10.5 Erstellung und Untersuchung möglicher Bauformen der Druckbehälter

10.5.1 Untersuchung der Quaderform

Zunächst soll die einfachste Geometrie geprüft werden. Aus diesem Grund wird der Druckbehälter aus einem großen Quader bestehen, da diese Geometrie relativ einfach und günstig zu fertigen ist. Das erste Modell wird allerdings zunächst nur grob modelliert. Eine mögliche Bauform als Quader zeigt Abbildung 39.

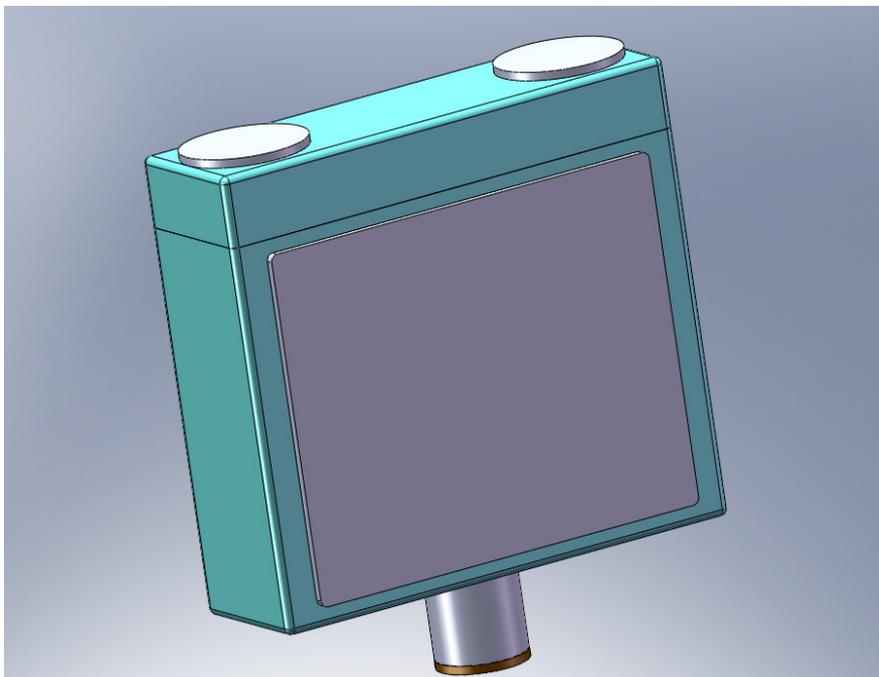


Abbildung 39: mögliche Bauform Quader

Die Baugruppe besteht aus einem quaderförmigen Druckbehälter und einem Deckel, welcher diesen verschließt. Die Empfangshörner werden innerhalb des Druckbehälters platziert, sodass diese vom Refrigerator gekühlt werden können und eine Wärmeübertragung durch Konvektion ausgeschlossen werden kann. Um eine Montage und Wartung der innen liegenden Bauteile zu ermöglichen, werden seitlich zwei Deckel angeordnet, welche auch im montierten Zustand des Empfängers eine Reparatur und einen gegebenenfalls nötigen Austausch eines Bauteils ermöglichen. Am Boden des Druckbehälters wird der Kühlzylinder eingesetzt. Aufgrund der festgelegten Länge des Kühlzylinders kann zur gewünschten Platzierung des Zylinders eine Hülse verwendet werden.

Je nach Anordnung der Bauteile im Druckbehälter wird die Länge der Hülse, oder sogar der Verzicht auf eine Hülse gewählt. Weiterhin befinden sich im Deckel des Druckbehälters zwei Fenster, sodass die von den Spiegeln gebündelte Strahlung ohne größere Verluste in die Hörner eingeleitet werden kann. Dennoch muss der Druckbehälter verschlossen werden, damit das benötigte Vakuum aufgebaut und gehalten werden kann. In diesem ersten Modell wird dies durch Glasscheiben realisiert. Im realen Modell wird der Druckkörper durch eine spezielle hochfeste Folie verschlossen, worauf in einem konkreten Modell im Verlauf dieser Arbeit weiter eingegangen wird. Zur Verbindung der einzelnen Bauteile sollen Schraub- und Flanschverbindungen vorgesehen werden. Diese sind ebenfalls einfach zu realisieren und zudem kostengünstig. Zudem gehören Schraubverbindungen zu der Gruppe der lösbaren Verbindungen. Bei dieser Verbindungsart sind alle verbauten Teile mehrfach verwendbar, im Gegensatz zu nicht lösbaren Verbindungen. Hierzu gehören z.B. Schweiß- und Klebverbindungen.

Um dieses erste Modell genauer auf seine Verwendbarkeit zu untersuchen, wird eine Simulation mit dem Programm COSMOS Works durchgeführt. Als Randbedingungen sind Belastungen und Lager zu definieren. Als Lager wird in diesem Modell der Boden des Druckbehälters angenommen. Weiterhin wird das Lager als „fixiertes“ Lager definiert, was bedeutet, dass der Auflagerfläche alle sechs Freiheitsgrade entzogen werden. Als Belastungen werden zum einen die Schwerkraft und zum zweiten der Umgebungsdruck

angesetzt. Die Richtung der Schwerkraft mit einer Erdbeschleunigung von $g=9,81 \frac{m}{s^2}$ ist mit

Hilfe einer Referenzkante festzulegen. Der Atmosphärendruck von $p_{amb}= 10^5$ Pa soll normal auf alle Flächen wirken. Im Innenraum des Druckbehälters wird kein Druck definiert, wodurch automatisch vom Programm COSMOS Works ein Druck von $p_{innen} = 0$ Pa angesetzt wird. Als Material wird wie zuvor die Aluminium-Magnesium-Legierung AlMg4,5Mn angenommen mit einer Streckgrenze $R_{p0,2} = 190$ MPa, einer Zugfestigkeit $R_m = 300$ MPa und einem Elastizitätsmodul von $E=0,21$ MPa. Die Berührungsflächen werden als ideal angenommen. Im Anschluss wird eine gleichmäßige Vernetzung mit einer Elementgröße von 22,412 mm durchgeführt und anschließender Berechnung. Die erlangten Ergebnisse geben einen weiteren Aufschluss über Stärken und Schwächen dieser Geometrie. Zunächst werden die Spannungen σ_{res} als Ergebnisdiagramm dargestellt, wie in Abbildung 40 einzusehen ist.

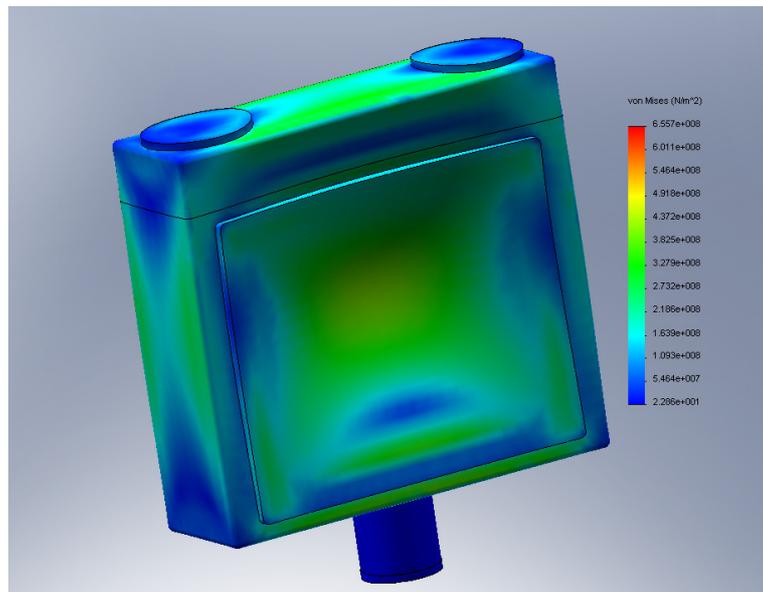


Abbildung 40: Spannungsanalyse Quaderbauform

Die in Abbildung 40 aufgezeigten Von- Mises- Spannungen betragen bis zu $\sigma_{\text{res}} = 350 \text{ MPa}$, welche sich in der Mitte der seitlichen Deckeln befinden. Jedoch werden im Farbbalken auf der rechten Seite der Abbildung Spannungen von $\sigma_{\text{res}} = 655 \text{ MPa}$ angezeigt, welche allerdings in der vorliegenden Ansicht nicht sichtbar sind. Aus diesem Grund wird eine weitere Darstellung vom Typ Isoclippping erstellt. Durch diese Option werden lediglich Spannungen farblich dargestellt, welche über beziehungsweise unter einem bestimmten Wert liegen. Die nicht betroffenen Teile der Geometrie werden als Drahtmodell dargestellt, um eine bessere Übersichtlichkeit zu wahren. In Abbildung 41 ist eine solche Darstellung vom Typ Isoclippping zu sehen. Angezeigt werden Spannungen ab einem Wert von $\sigma_{\text{res}} = 350 \text{ MPa}$, was zudem durch den Pfeil am Farbbalken ersichtlich ist.

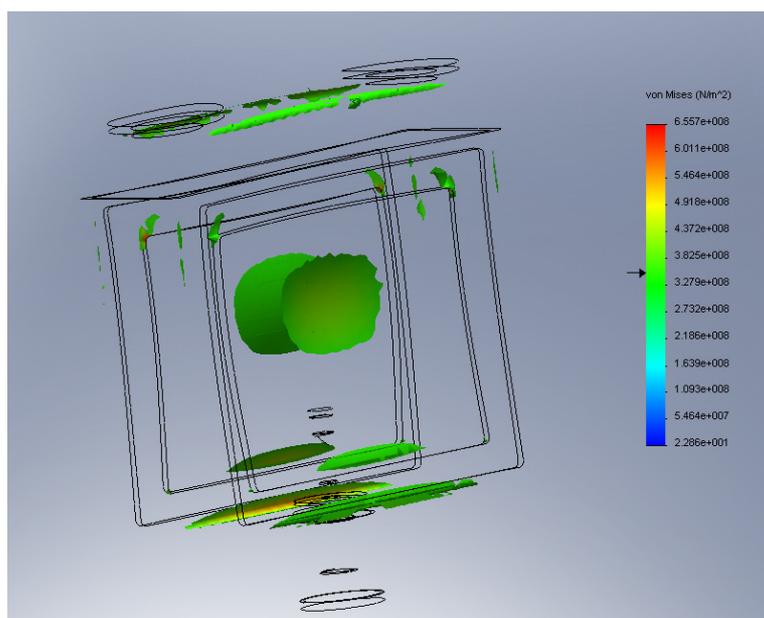


Abbildung 41: Spannungsdarstellung mit ISO Clipping

Nun sind auch die höchsten Spannungen von $\sigma_{\text{res}} = 655 \text{ MPa}$ zu sehen. Generell eignet sich diese Darstellungsform zum Auffinden von Schwachstellen oder Bereichen, welche genauer untersucht werden sollte. Gegebenenfalls sollte eine Netzverfeinerung mit Hilfe der Vernetzungssteuerungsfunktion durchgeführt werden, wodurch die Anzahl der Elemente in einem bestimmten Bereich erhöht und der Fehler, welcher durch das Berechnungsverfahren der Finiten Elemente Methode entsteht, verkleinert wird. Eine globale Verfeinerung der Netzstruktur ist nicht zu empfehlen, da dies zu einem erhöhten Berechnungs- und Zeitaufwand führt.

Abbildung 42 zeigt die Höhe der Verschiebungen auf, die aufgrund der Druckkraft der Atmosphäre entstehen.

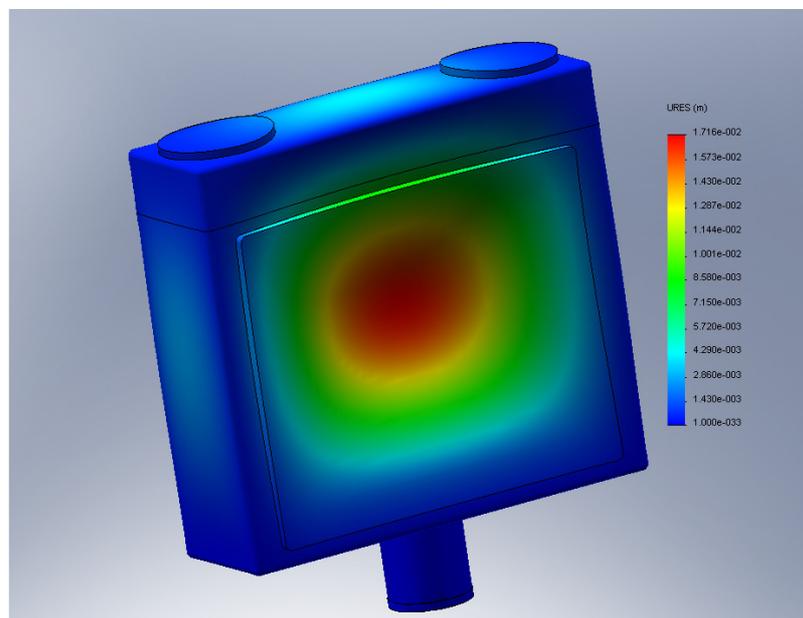


Abbildung 42: Darstellung der resultierenden Verschiebungen am Quader

Die maximalen Verschiebungen treten in der Mitte der seitlichen Deckel auf, was durchaus zu erwarten ist. Hier greift die Druckkraft mit einem maximalen Hebelarm an. Auch die Deutung von Abbildung 41 weist aufgrund der Spannungsverteilung darauf hin. Die maximalen Verschiebungen belaufen sich auf $u_{\text{res}} = 17,2 \text{ mm}$, was zunächst sehr unplausibel zu sein scheint. Allerdings zeigt Abbildung 40, dass der Druckbehälter dem Atmosphärendruck nicht standhalten könnte. Spannungen von bis zu 655 MPa übersteigt die Zugfestigkeit des Materials fast um den Faktor zwei. Jedoch werden die Verschiebungen dennoch vom Programm COSMOS Works für den Fall berechnet, falls das Material nicht versagen würde. Mit Hilfe von Abbildung 43 lässt sich eindeutig erkennen, dass die Belastungen das zulässige Maximum übersteigt.

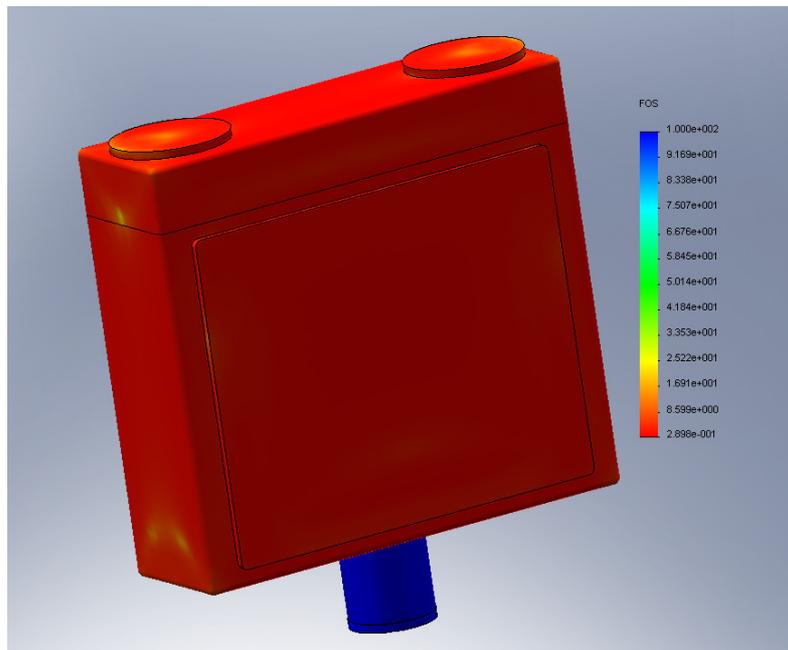


Abbildung 43: FOS - Darstellung am Quader

In dieser Abbildung wird der Faktor des Sicherheitsverlaufs (FOS) über der gesamten Geometrie dargestellt. Damit vorausgesetzt werden kann, dass die Baugruppe nicht versagen wird, muss der Faktor des Sicherheitsverlaufs $FOS = 1$ oder darüber betragen. Doch Abbildung 43 zeigt nahezu über der gesamten Geometrie einen Sicherheitsfaktor, welcher kleiner 1 ist, was darauf schließen lässt, dass die Bauteile unterdimensioniert sind. Der Faktor des Sicherheitsverlaufs kann sich wahlweise auf die Streckgrenze R_e beziehungsweise $R_{p0,2}$ beziehen, oder auf die Zugfestigkeit R_m . Weiterhin wird meist die von COSMOS Works berechnete resultierende Spannung (Vergleichsspannung) σ_{res} für die Berechnung zu Grunde gelegt. Möglich ist jedoch auch die Berechnung mit Hilfe der maximalen Schubspannung, der maximalen Normalspannung oder der Vergleichsspannung nach Mohr - Coulomb.

Verallgemeinert wird der Faktor des Sicherheitsverlaufs für Spannungen wie folgt berechnet.

$$FOS = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{zul}} \quad (32)$$

Fazit:

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass diese Bauform nicht unbedingt günstig zu sein scheint. Zur Sicherstellung der Festigkeit müssten sehr hohe Wandstärken eingesetzt werden, was zu einer hohen Gewichtskraft führen würde. Auch um größere Verschiebungen, welche die Ausrichtung der Empfangshörner verändern würden, zu vermeiden, müssten ebenfalls höhere Wandstärken und gegebenenfalls geometrische Versteifungen vorgesehen werden. Auch die große Innenfläche des Druckbehälters, welche thermodynamisch als abstrahlende Fläche gilt würde zu einer erhöhten Belastung der Kühlmaschine durch Wärmestrahlung führen. Aus diesen Gründen werden zunächst weitere Bauformen untersucht.

10.5.2 Untersuchung einer Quaderform in Verbindung mit zylinderförmigen Hülsen

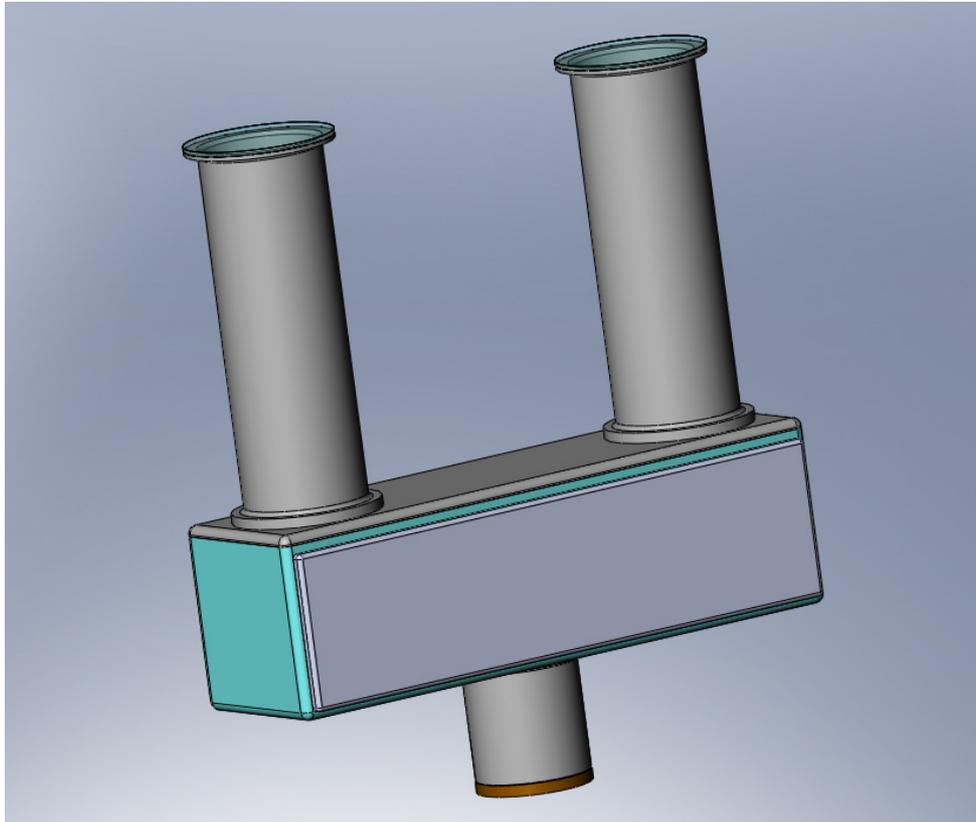


Abbildung 44: Quaderform mit zwei zylinderförmigen Hülsen

In Abbildung 44 ist eine mögliche Kombination aus einer Quaderform und mehreren Zylinderformen dargestellt. Im quaderförmigen Kasten sollen sämtliche Hohlleiter- und elektronischen Bauteile angeordnet werden, sowie das 70K – Strahlungsschild. Im Inneren der beiden Zylinder befinden sich die Empfangshörner, welche mit Hilfe von Isolatoren (Choke) am 300K – Gehäuse befestigt werden sollen. Auch hier sind zunächst Glasscheiben zum Abschluss des Vakuumbehälters vorgesehen. In einem realen Modell werden auch hier hochfeste Mylar - Folien eingesetzt. An den Seiten des quaderförmigen Behälters werden ebenfalls demontierbare Platten vorgesehen, damit Zugänge zur Montage und Wartung im Eingebauten Zustand des Empfangssystems geschaffen werden können. Zur Verbindung der einzelnen Bauteile bieten sich auch in diesem Fall Schraubverbindungen mit Dichtungsringen an.

Nach der Modellierung der Baugruppe wird wiederum eine Untersuchung im Programm COSMOS Works bezüglich Spannungen, Verformungen und der Konstruktionssicherheit durchgeführt. Als Lager wird auch hier die Bodenplatte des quaderförmigen Behälters gewählt. Als Belastungen werden wie im vorigen Modell die Schwerkraft, sowie der Atmosphärendruck angesetzt. Nach einer gleichmäßigen Vernetzung mit einer Elementlänge von 25,83mm wird die Berechnung durchgeführt.

Abbildung 45 zeigt den Verlauf der resultierenden Spannungen σ_{res} laut von Mises auf.

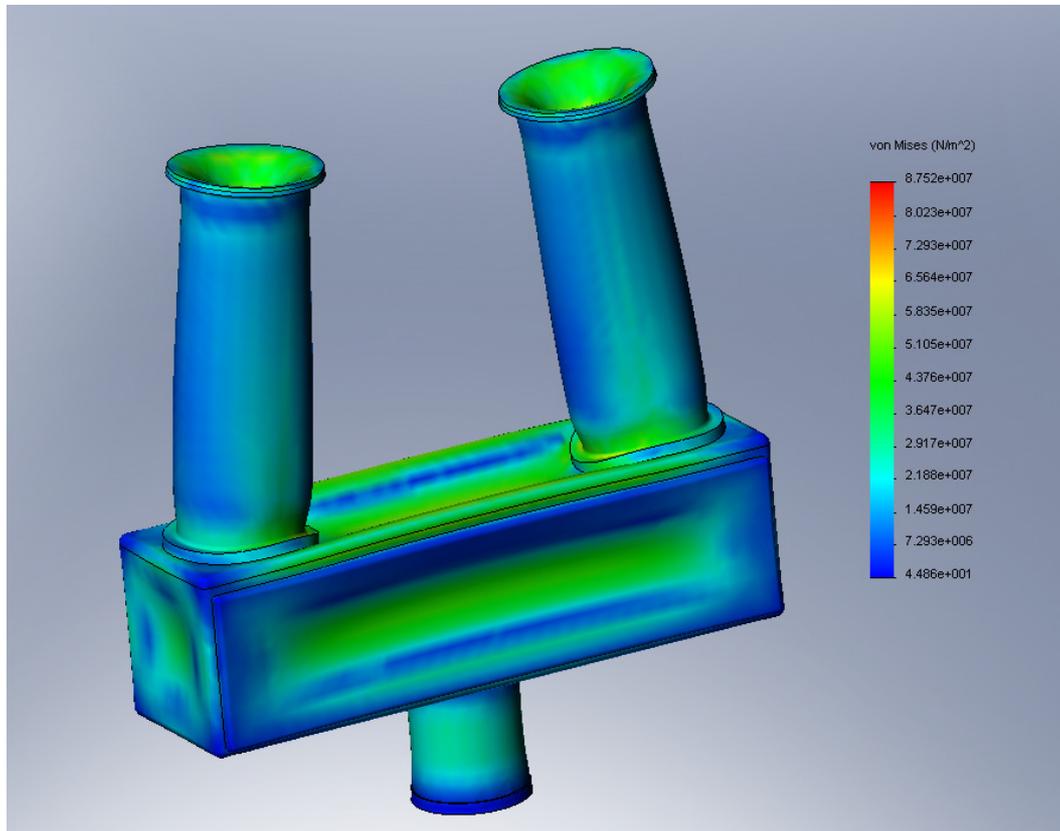


Abbildung 45: Spannungsdarstellung der Bauform Quader/zylinderförmige Hülsen

Die größeren Spannungen liegen zum größten Teil im Bereich von $\sigma_{\text{res}} = 5 \text{ MPa}$ und befinden sich in der Mitte der rechteckigen Flächen. Die maximalen Spannungen betragen $\sigma_{\text{res}} = 8,75 \text{ MPa}$ und sind auch in dieser Darstellung nicht erkennbar. Aus diesem Grund wird zur besseren Veranschaulichung, sowie zur Erkennung von Schwachstellen wiederum die Isoclippping – Darstellung gewählt. Abbildung 46 zeigt die Spannungen auf, welche über einem Wert von 40 MPa liegen.

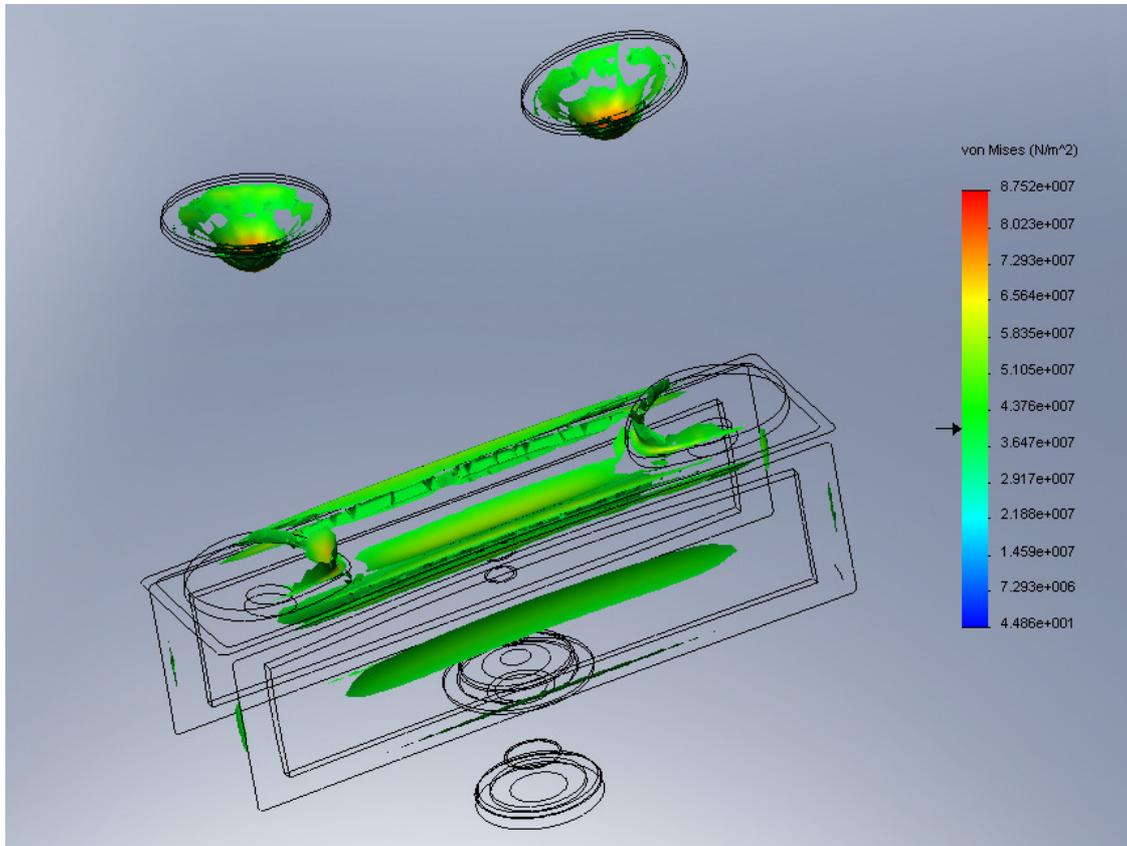


Abbildung 46: ISO Clipping der Spannungsanalyse

Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass die maximalen Spannungen im Bereich der Fenster liegen. Aber auch der obere Deckel des quaderförmigen Behälters, sowie die Verbindungsstellen zwischen dem quaderförmigen Behälter und den Zylindern sollte in einer Konkretisierung des Modells genauer untersucht und gegebenenfalls verstärkt werden.

Aus den vorigen Spannungsdarstellungen geht ebenfalls die qualitative Art der Verformung hervor. Zur Ergänzung dient Abbildung 47, welche auch einen quantitativen Aufschluss über die Verformungen gibt.

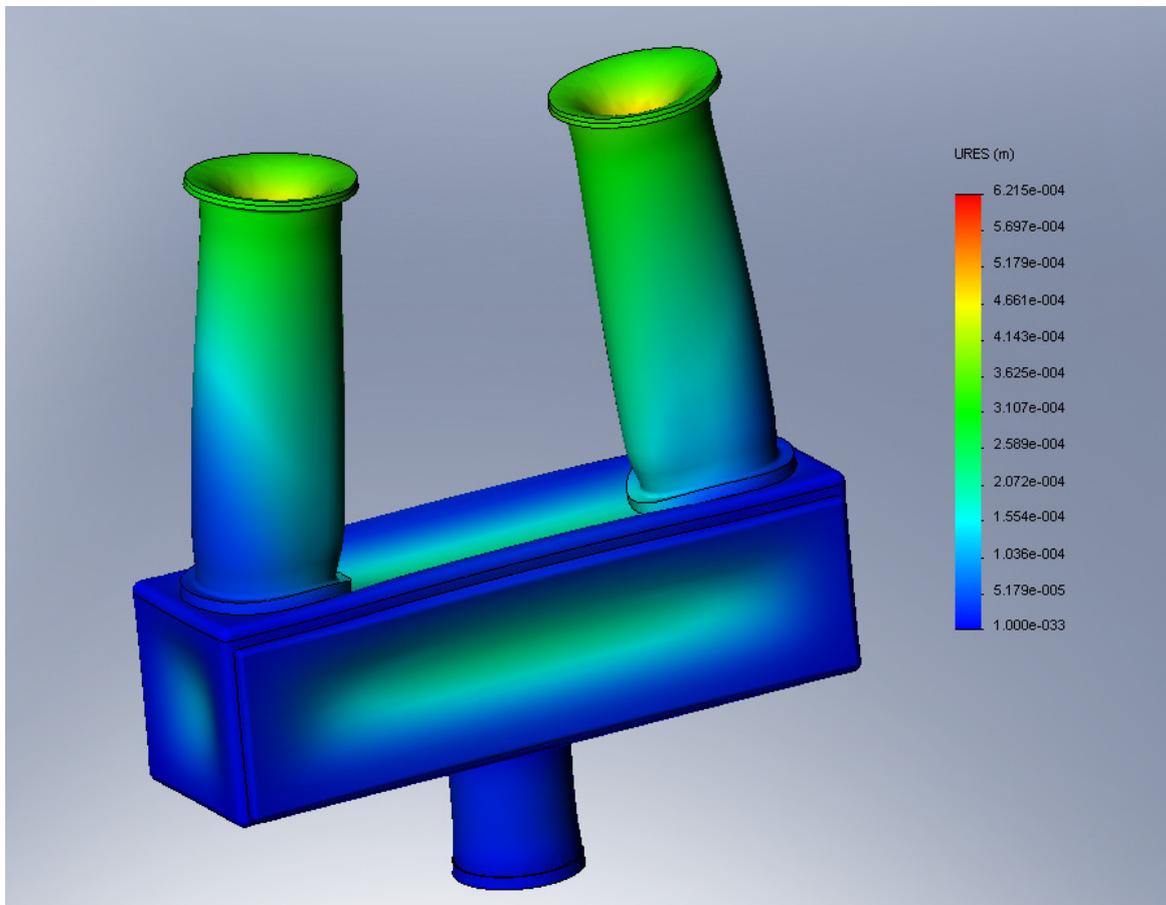


Abbildung 47: Resultierende Verschiebungen

Auffällig ist die Verformung des oberen Deckels des quaderförmigen Behälters. Diese Verformung ist zwar relativ gering, wirkt sich allerdings über die Länge der Zylinder, welche hier als Hebelarm anzusehen ist, erheblich auf die Verschiebungen der oberen Bereiche der Zylinder aus. Hierdurch neigen sich die beiden Zylinder und somit auch die sich darin befindlichen Empfangshörner zueinander. Diese Fehlstellung der Empfangshörner muss für die Realisierung unbedingt ausgeschlossen beziehungsweise minimal gehalten werden, da die Winkelstellung der beiden Empfangshörner zueinander und bezüglich ihrer Ausrichtung zum Sekundärreflektor des Radioteleskops eindeutig definiert sind und zur Qualität der empfangenen Signale maßgeblich beitragen. In Abbildung 47 wird die resultierende Verschiebung der Bauteile aufgezeigt, was bedeutet, dass die einzelnen Verschiebungskomponenten in X-, Y-, und Z-Richtung geometrisch (vektoriell) addiert wurden. Aufgrund von Symmetriebedingungen und der gleichmäßigen Druckbelastungsverteilung tritt keine Verdrehung der Zylinder um die X-Achse, also der Längsachse des quaderförmigen Druckkörpers, auf. Daher wird ein besonderes Augenmerk auf die Verschiebung in Richtung der X-Achse gelegt und in Abbildung 48 dargestellt.

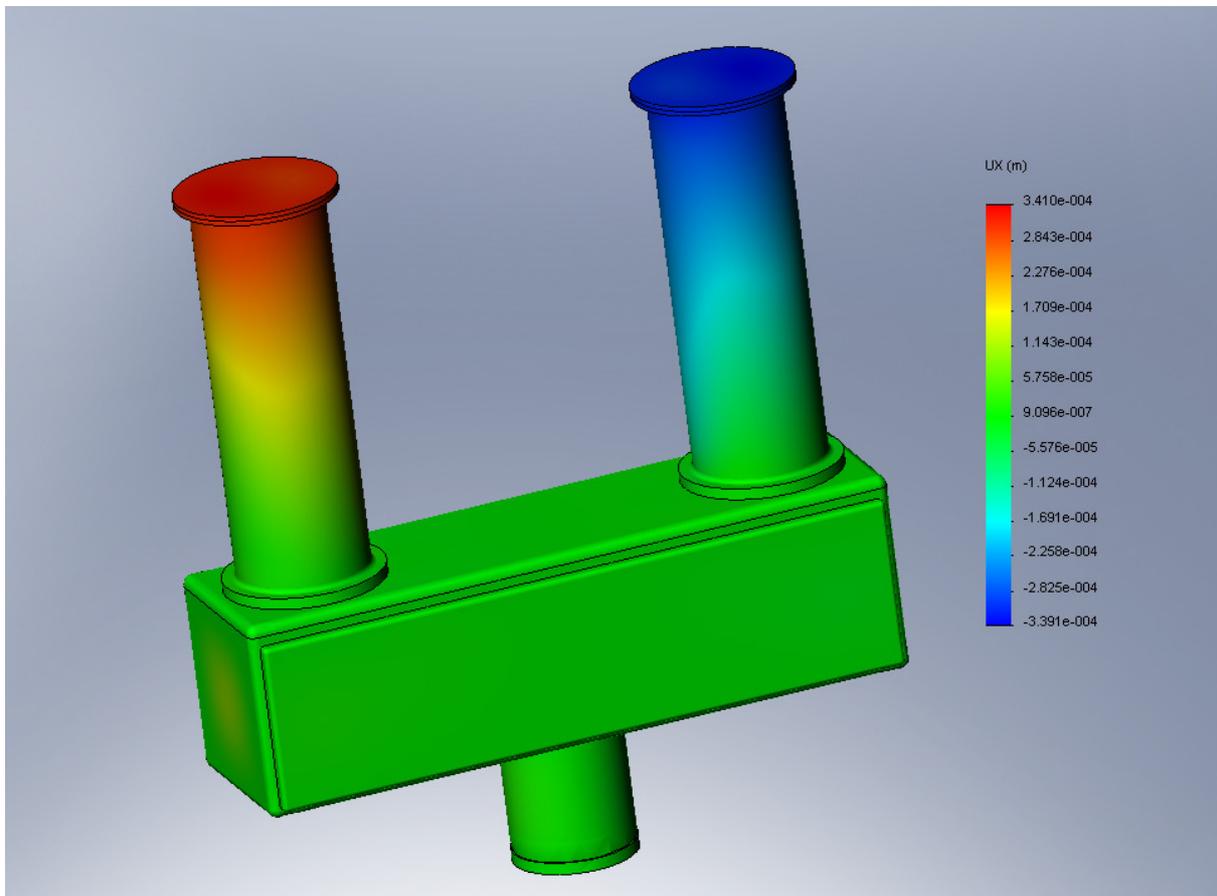


Abbildung 48: Verschiebungen in X - Richtung

Aus dieser Abbildung wird ersichtlich, dass sich die beiden Zylinder jeweils um einen Betrag von 0,34mm verschieben. Eine Verformung der restlichen Bauteile tritt nahezu gar nicht ein. Es ergibt sich also eine resultierende Fehlstellung von 0,64mm in X-Richtung an den Fenstern der Zylinder. Die zulässige Fehlstellung soll sich jedoch in einem Bereich von $< 10 \mu\text{m}$ befinden, was durch geometrische Versteifungen und höhere Wandstärken zu realisieren wäre.

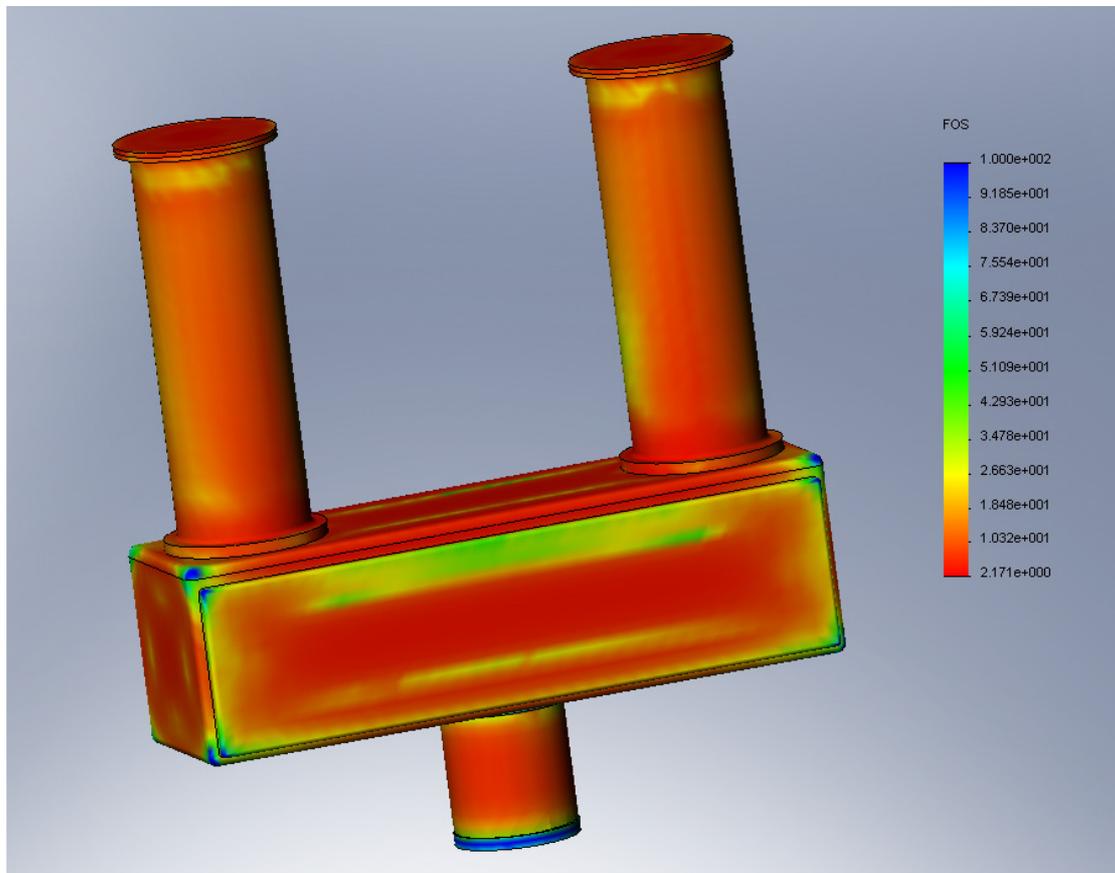


Abbildung 49:Faktor der Funktionssicherheit

Im Hinblick auf die Konstruktionssicherheit lässt sich aus Abbildung 49 erkennen, dass diese Geometrie den Belastungen wesentlich besser standhält, als die zuvor untersuchte Bauform. Trotz der gleichen Wandstärke von 12mm ergibt sich ein minimaler Sicherheitsfaktor von $FOS = 2,17$.

Fazit

Zusammenfassend kann erkannt werden, dass sich diese Geometrie besser zur Realisierung des zu konstruierenden Doppelhorn – Empfangssystems eignet. Sowohl im Bezug auf das Bauvolumen, als auch im Hinblick auf die Festigkeitswerte kann die reine Quaderform im Vergleich nicht überzeugen. Zudem ist die abstrahlende Fläche geringer als im vorangegangenen Modell, was zu einem geringeren Wärmeeintrag in das System führt. Als weiterer Vorteil kann die dennoch sehr einfache Bauform und somit günstige Fertigung erkannt werden.

10.5.3 Untersuchung einer Kombination dreier Zylinderformen

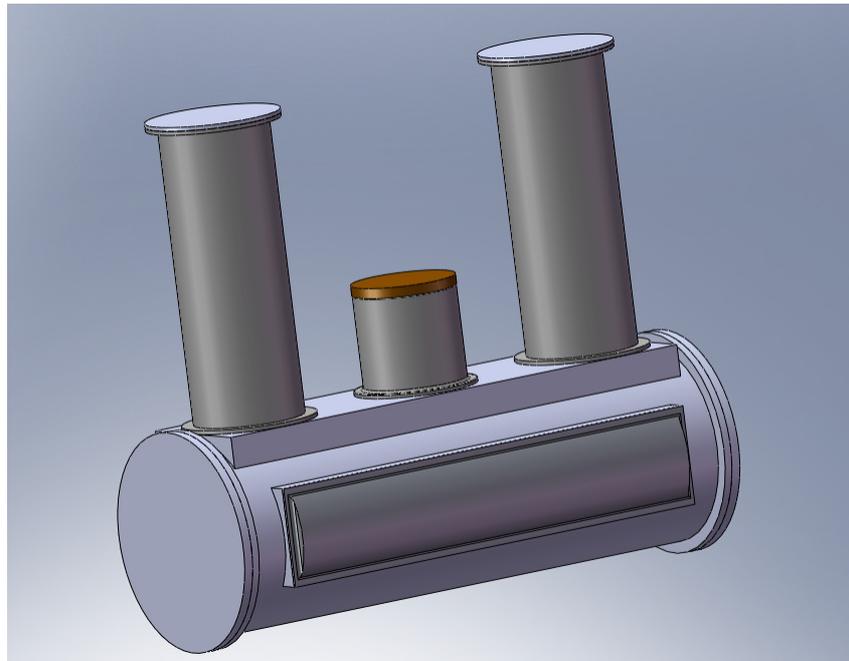


Abbildung 50: Verbindung dreier zylinderförmiger Hülsen

Aus den vorangegangenen Betrachtungen bezüglich der verschiedenen einfachen Geometrien, haben die Kugel, sowie die Zylinderform am besten überzeugt. Aus diesem Grund soll nun eine Kombination einer Zylinderform, in welcher die elektronischen Bauteile, sowie die Hohlleitertechnik verbaut werden soll, sowie zwei weitere Zylinder, in denen wie im zuvor betrachteten Modell die Empfangshörner befestigt und untergebracht werden sollen. Aus den Untersuchungen aus dem vorigen Abschnitt kann angenommen werden, dass diese Geometrie die günstigste in Punkto Volumen und Masse werden sollte.

Auch in diesem Modell werden seitliche Zugänge angeordnet. Weitere Zugänge werden durch die stirnseitigen Deckel gewährleistet. Um weiteres Bauvolumen zu sparen, wird der Refrigeratorzylinder zwischen den beiden Zylindern angeordnet.

Im Anschluss an die Modellierung wird auch hier eine FEM – Berechnung zur Ermittlung von Spannungen, Verschiebungen und der Konstruktionssicherheit durchgeführt.

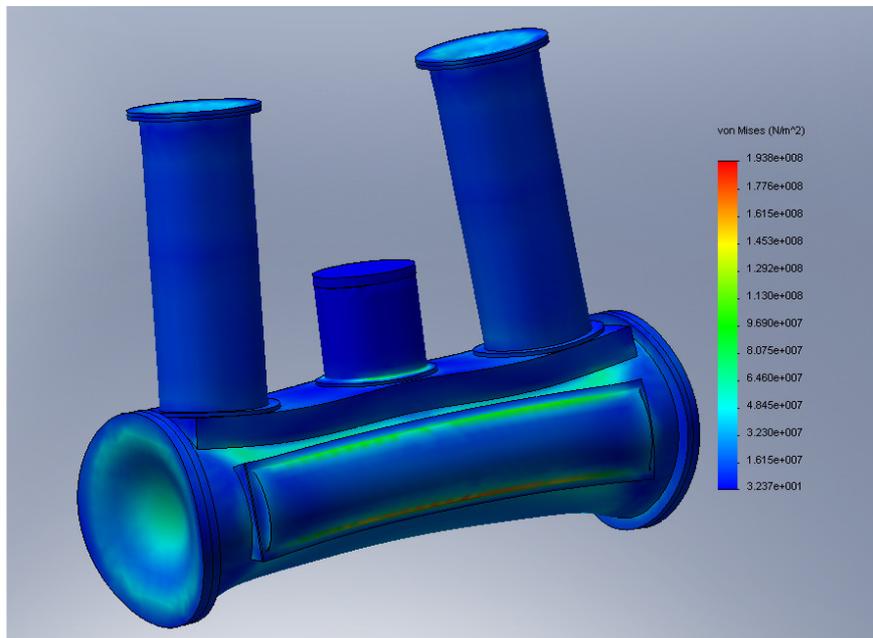


Abbildung 51: Spannungsdarstellung

Die Spannungsanalyse zeigt auf, dass dort, wo die runde Form des Zylinders durch das Einbringen von Zugängen verlassen wird, Schwachstellen auftreten. Die maximalen Spannungen von $\sigma_{\text{res}} = 193 \text{ MPa}$ treten an den seitlichen Deckeln und erhöhte Spannungen von $\sigma_{\text{res}} = 64 \text{ MPa}$ in deren unmittelbaren Umgebung auf. Dennoch ist der überwiegende Teil der Geometrie nur gering belastet.

Die Verschiebungen verhalten sich ähnlich den Verschiebungen der Kombination aus Quader- und Zylinderform. Auch hier neigen sich die Empfangshörner zueinander. Genauere Verschiebungswerte liefert Abbildung 52.

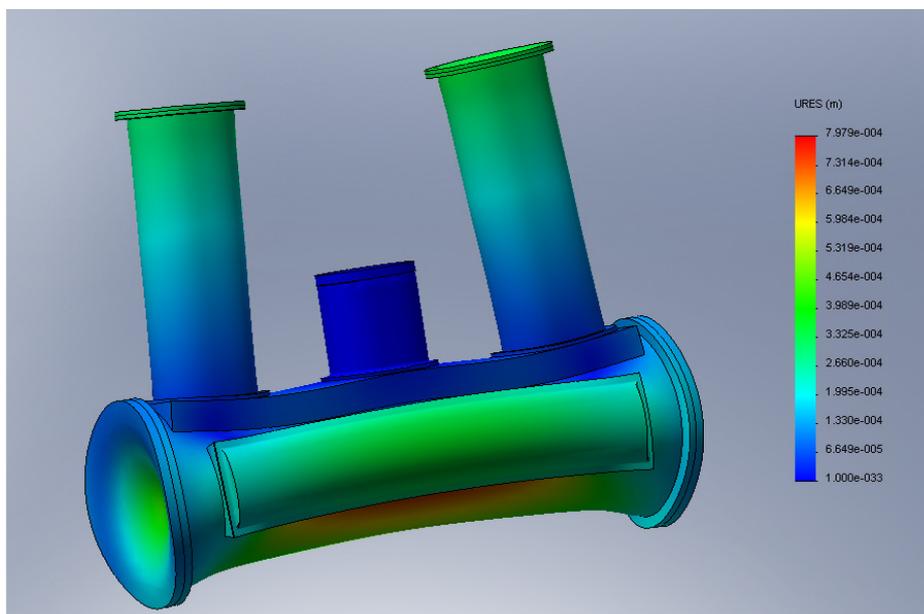


Abbildung 52: Darstellung der resultierenden Verschiebungen

Die maximalen Verschiebungen liegen im Bereich von $u_{res} = 0,8\text{mm}$ und finden sich am Anschluss der seitlichen Deckel, wo die Kontur des Zylinders verlassen wird. Um Spannungen und Verformungen zu verringern, können an diesen Stellen Übergangsradien eingebracht werden, welche die Geometrie weiter versteifen. Auch hier müssen die Verformungen in Z – Richtung insbesondere im oberen Bereich der Zylinder genauer untersucht werden, was in Abbildung 53 genauer dargestellt wird.

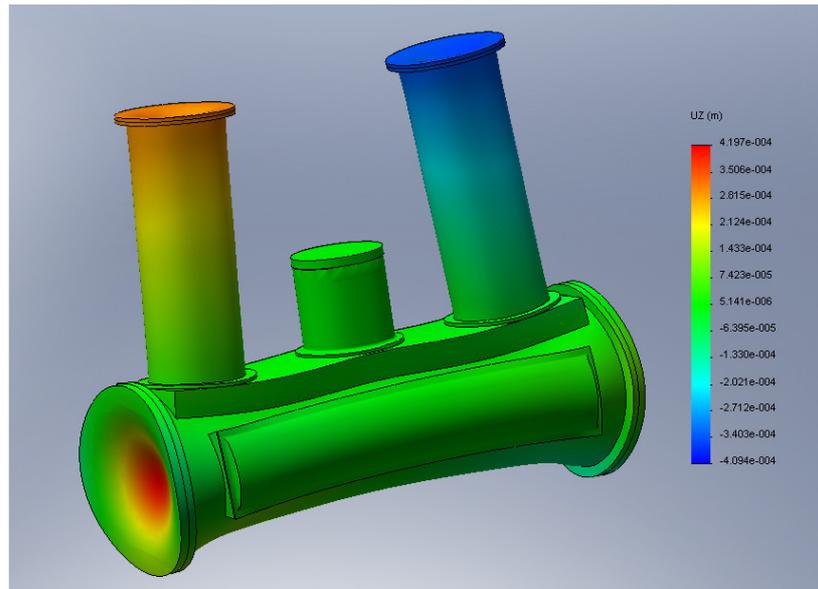


Abbildung 53: Darstellung der Verschiebungen in X-Richtung

Die Verschiebungen belaufen sich jeweils auf $u_z = 0,42\text{mm}$, was eine Gesamtverschiebung in Z – Richtung von $u_{z,ges} = 0,84\text{ mm}$ ergibt. Somit liegt die resultierende Verschiebung in Z – Richtung um ca. 0,2mm höher, als beim vorangegangenen Modell. Maßnahmen zur Versteifung der Geometrie sind auch hier nötig, um die Verformungen zu minimieren.

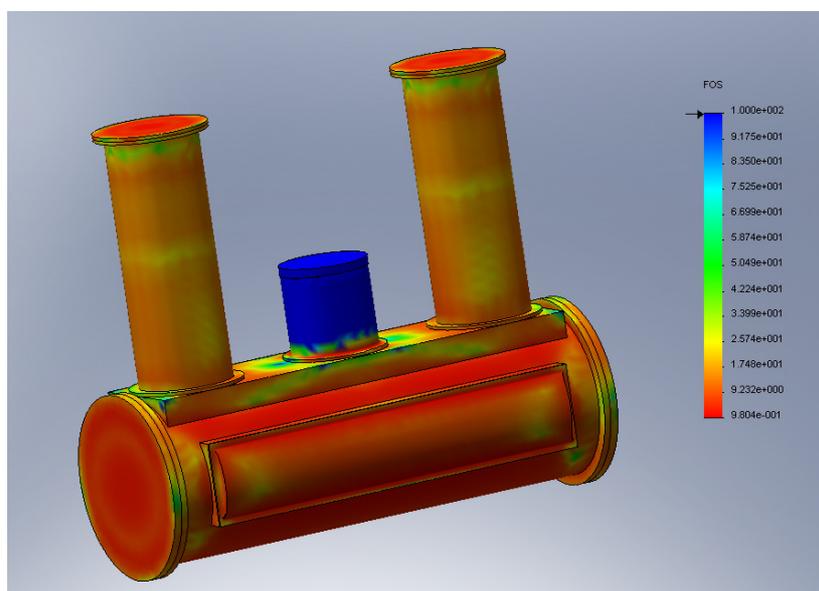


Abbildung 54: Faktor der Funktionssicherheit

Der minimale Sicherheitsfaktor dieser Geometrie liegt bei $FOS = 0,98$. Zunächst scheint es, als bewege sich der Sicherheitsfaktor der Baugruppe zum größten Teil im Bereich von $FOS = 1$, was bedeutet, dass die Auslegung zwar theoretisch ausreicht und somit über genügend Festigkeit verfügt, allerdings werden aus Gründen der Sicherheit stets Sicherheitsfaktoren mit $FOS > 1$ gefordert. Grund hierfür sind oftmals Unsicherheiten beim Ansatz von Belastungen, Materialfehler, idealisierte Modellbildung oder die Folgen eines eventuellen Versagens des Systems. So werden z.B. im Luftfahrzeugbau teilweise Sicherheitsfaktoren von $FOS > 5$ vorausgesetzt. Ein solcher Sicherheitsfaktor wäre in dieser Konstruktion sicherlich überhöht, jedoch sollte ein Sicherheitsfaktor von 1,5 mindestens erreicht werden.

Die Einteilung des Farbbalkens in Abbildung 54 ist hierfür zu grob skaliert. Eine Möglichkeit zur Behebung ist die Veränderung der Skala durch den Benutzer, was mit einem Doppelklick auf den Farbbalken durchzuführen ist. Eine weitere Möglichkeit ist auch hier die Isoclippping – Darstellung, welche sich in Abbildung 55 findet.

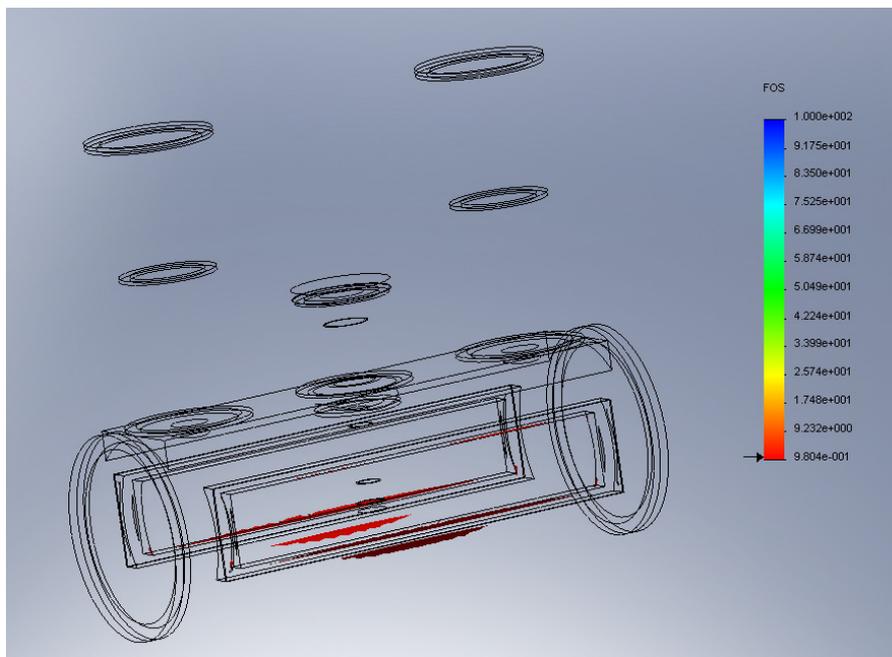


Abbildung 55: Faktor der Funktionssicherheit (ISO Clipping)

In Abbildung 55 sind alle Bereiche farbig dargestellt, welche über einen Sicherheitsfaktor von $FOS < 2$ verfügen. Anders als in Abbildung 52 zunächst ersichtlich, liegen kritische Spannungen nur in der unmittelbaren Umgebung der seitlichen Zugänge vor. Durch Verrundungen in diesem Bereich sollte auch hier der Sicherheitsfaktor in den zulässigen Bereich verändert werden.

In Tabelle 8 sind die wichtigsten Kriterien zur Auswahl der Bauform zusammengestellt. Wichtig sind nicht nur das Volumen, sowie Festigkeits- und Verschiebungswerte der einzelnen Bauform, sondern auch die Möglichkeit zur Optimierung der zunächst sehr grob konstruierten Modellvarianten. Weiterhin ist auch der Fertigungsaufwand nicht außer Acht zu lassen, da dieser sehr stark Einfluss auf die Kosten nimmt.

Alle drei Modelle sind im Bezug auf die äußeren Abmaße relativ ähnlich. Das Volumen der reinen Quaderform ist jedoch sehr groß im Verhältnis zu den beiden anderen Varianten. Die Festigkeits- und Verformungswerte sind ebenfalls sehr ungünstig. Daraus ist zu schließen, dass auch die Möglichkeit zur Optimierung im Hinblick auf Volumen und Masse gering ist. Eine reine Quaderbauform würde sich mit größter Wahrscheinlichkeit sogar noch verschlechtern, da höhere Wandstärken, gepaart mit geometrischen Versteifungen eine hohe Masse zur Folge hätten. Aus diesen Gründen wird die Idee der reinen Quaderform verworfen.

Bauform	Maße L x B x H [mm]	max Spannungen [MPa]	max Verschiebung [mm]	Aufwand	Potential zur Optimierung
Quaderform	700 x 200 x 650	656	17,2	gering	gering
Quader mit zwei Zylinderhülsen	700 x 220 x 640	67,5	0,622	mittel	hoch
Kombination von drei Zylinderformen	740 x 280 x 700	194	0,798	hoch	hoch

Tabelle 8: Gegenüberstellung verschiedener Bauformen

Die gezeigte Kombination aus einer Quaderform und zwei zylinderförmigen Hülsen erscheint als wesentlich günstiger. Das geringere Bauvolumen und die somit geringer Masse verschaffen dieser Variante einen großen Vorteil. Auch die Kombination zweier einfacher Geometrien wie Quader und Zylinder machen dieses Modell aus fertigungstechnischer Sicht zu einer einfachen und günstigen Möglichkeit. Weiterhin sind Festigkeits- und Verformungswerte bereits in der groben Modellierung in einem beinahe zufrieden stellenden Bereich. Durch einfache geometrische Versteifungen und teilweise leicht erhöhten Wandstärken, sollten die Toleranzkriterien leicht zu erfüllen sein.

Auch die Kombination aus drei Zylinderformen erscheint aus Gründen der Festigkeit und Verformungen als gut. Auch die vier gleichzeitigen Zugangsmöglichkeiten machen dieses Modell attraktiv. Die zunächst noch bestehenden Festigkeitsprobleme an einigen wenigen Stellen sollten durch Radien leicht zu beseitigen sein. Ein großes Problem stellt allerdings die Fertigung dar. Die recht komplizierte Geometrie des Druckbehälters würde zu hohen Fertigungskosten führen. Jedoch besitzt die Kombination der drei Zylinderformen die geringste Masse und bietet ein gutes Potential zur Optimierung.

10.5.4 Entscheidung

Nach einer Beratung mit Herrn Dr. Keller entschieden wir uns für die Kombination eines Quaders mit zwei zylinderförmigen Hülsen zur Aufnahme der Empfangshörner. Neben dem geringen Fertigungsaufwand und der Möglichkeit der Eigenfertigung in der institutseigenen Werkstatt, spricht auch die Einfachheit der Geometrie eindeutig für diese Entscheidung. Die Forderungen der geringen Masse, der guten Montage- und Wartungsmöglichkeiten werden ebenfalls erfüllt.

Diese Variante wird nun zu einem konkreten und endgültigen Modell ausgearbeitet. Zur Konkretisierung zählen neben geometrischen Versteifungen auch eine Optimierungsanalyse, sowie Schraubverbindungen, Dichtungen, Montagemöglichkeiten und Kabeldurchführungen. Am fertigen Modell wird anschließend eine endgültige Finite Elemente Berechnung im Bezug auf Festigkeit und Temperaturverteilung durchgeführt.

10.6 Konkrete Ausarbeitung der Konstruktion

10.6.1 Optimierung der bisherigen Bauform

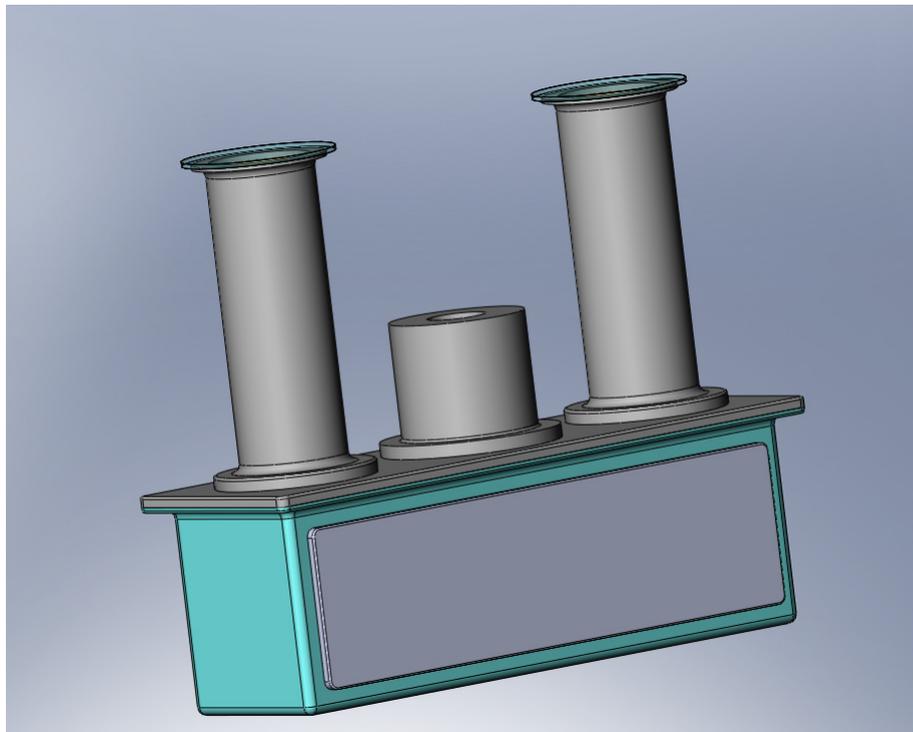


Abbildung 56: gewählte Bauform des Kryostaten

Abbildung 56 zeigt eine weiterentwickelte Version der Quaderform mit zylinderförmigen Hülsen zur Aufnahme der Empfangshörner. Weiterhin ist auffällig, dass die Positionierung des Refrigerators in den Deckel des Druckbehälters verlagert wurde. Dies begründet sich durch die Platzersparnis und die bessere Möglichkeit der Montage. Unterhalb des Dewars sollen eine Vielzahl elektronischer Geräte verbaut werden, sodass auch hier viel Raum benötigt wird. Zudem erhöht die zylinderförmige Aufnahme des Refrigerators die Festigkeit und Steifigkeit des Deckels, sodass die beiden Empfangshörner nur eine minimale Fehlstellung infolge der Verformungen des Deckels erfahren.

Alle Bauteilverbindungen sollen durch Innensechskantschrauben erfolgen. Vorteil der Schraubverbindungen mittels Innensechskantschrauben ist nicht nur die kostengünstige Herstellung, sondern auch die Möglichkeit zur Versenkung der Schraubköpfe im Gehäuse, was zu einer anschaulicheren Optik führt, welche als Wunschforderung in der Anforderungsliste aufgeführt ist. Die kurzen Abstände der einzelnen Schrauben bewirken eine bessere Dichtigkeit des Systems.

Durch Verformungen der Geometrie infolge des Höchstvakuum könnten kleine Leckagen an den besagten Dichtflächen auftreten, was unbedingt auszuschließen beziehungsweise zu minimieren ist. Bei einer erhöhten Leckrate verkürzt sich die Einsatzzeit des Empfangssystems erheblich. Gefordert ist eine Einsatzzeit von circa 12 Monaten ohne weitere Entlüftung des Vakuumbehälters.

An den Innenseiten der drei Deckel des Druckbehälters wurden zudem quaderförmige Aufsätze vorgesehen. Diese dienen zur Versteifung und somit zur Verminderung der Verformungen. Zudem wird die Montage, besonders der seitlichen Deckelplatten erleichtert. Zur Vermeidung von Beschädigungen beim Montagevorgang wurden Phasen an den Kanten des Aufsatzes vorgesehen.

Durch die Erweiterung der Abdeckplatten erhöht sich folglich auch die Masse des Gesamtsystems, welche bedingt durch die Aufgabenstellung jedoch zu minimieren ist. Zunächst wird eine konstante Wandstärke von $s = 15\text{mm}$ vorgesehen. Um Material nur an den notwendigen Stellen zu verbauen, werden Massereduktionen durch Ausfräsungen in den Deckplatten, sowie den Stirn- und Bodenplatten eingebracht. Um an diesen Stellen eine angemessene Wandstärke zu erhalten, wird zunächst am Ausgangsmodell mit einer Wandstärke von $s = 15\text{mm}$ eine Simulation mit der Finiten Elemente Methode bezüglich der Festigkeit und den Verformungen durchgeführt.

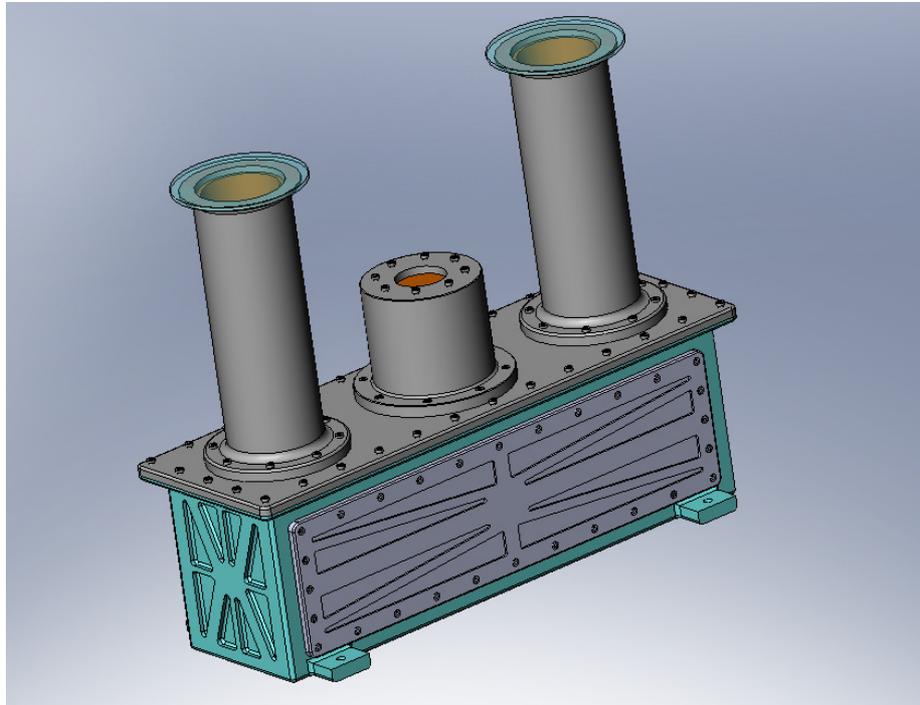


Abbildung 57: resultierende Bauform des Kryostaten

Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse wird nun eine Optimierungsanalyse am besagten Modell durchgeführt. Hierzu sind folgende Parameter zu definieren:

- Zielvorgabe
- Konstruktionsvariablen
- Zwangsbedingungen

Die Zielvorgabe definiert die physikalische Größe, welche es zu optimieren gilt. Hierzu zählen zum Beispiel Volumen- und Massentoptimierung, aber auch Optimierungen im Bezug auf das Knick- und Schwingungsverhalten. In der vorliegenden Aufgabenstellung wurde die Massenminimierung gewählt.

Als Konstruktionsvariablen werden Bauteilmaße definiert, welche zur Veränderung für die Berechnung freigegeben werden. Diesbezüglich werden zu jeder Konstruktionsvariablen Intervalle festgelegt. Zwischen den definierten Grenzen führt das System eine Iteration durch. Somit werden nicht alle Maße verändert, was zum Beispiel zur Erhaltung äußerer Abmessungen dient, falls Bauteilmaße durch den Forderungskatalog vorgegeben wurden. In der durchgeführten Optimierungsanalyse wurden die Tiefen der Ausfräsungen an Gehäuse und Abdeckplatten, sowie die inneren Gehäuseabmaße angegeben.

Zuletzt werden Zwangsbedingungen festgelegt. Zuvor muss eine erste entsprechende FEM – Analyse durchgeführt werden. Auf die Ergebnisse dieser ersten Analyse bezieht sich die erste Iteration der Optimierungsanalyse. Im vorliegenden Fall wird als Zwangsbedingung die Spannung laut von Mises angegeben, welche sich auf die Streckgrenze $R_{P0,2}$ bezieht. Eine maximale Spannung von 120 MPa wird als Grenze festgelegt. Somit ist eine Konstruktionssicherheit bezüglich der Streckgrenze $R_{P0,2}$ von $S = 1,5$ beinhaltet.

Die ursprünglichen Wandstärken sollen nur geringfügig reduziert werden. Dies begründet sich durch die bessere mechanische Steifigkeit, welche durch Versteifungsrippen mit größerer Höhe erreicht wird.

10.6.2 Berechnung der Durchbiegung w [21]

Als Grundlage zur Berechnung der Verformungen dient Gleichung (31), welche zur Ermittlung der Durchbiegung dient.

$$w(x) = w_a + w'_a \cdot x - \frac{M_{b,A}}{2EI} \cdot x^2 - \frac{F_{q,A}}{6EI} \cdot x^3 + \tilde{w}(\bar{x}) \quad (31)$$

An Gleichung (31) lässt sich erkennen, dass das Produkt von Elastizitätsmodul E und dem Flächemoment zweiten Grades I_x jeweils im Nenner der Summanden stehen. Somit müssen diese Parameter vergrößert werden, um eine geringere Durchbiegung zu erzielen. Mathematisch beschrieben ist das Produkt aus Elastizitätsmodul und Flächenmoment zweiten Grades der Durchbiegung antiproportional.

Um dieses zu verdeutlichen, wird die Durchbiegung einer Versteifungsrippe des Modells berechnet. Als Ersatzsystem wird diese als Balken auf zwei Stützen betrachtet. Als Druck, welcher durch den wirkenden Atmosphärendruck auf den Behälter ausgeübt wird, wird eine konstante Streckenkraft angesetzt. Zur Verdeutlichung dienen die Abbildungen 58, sowie die Schnittdarstellung in Abbildung 59.

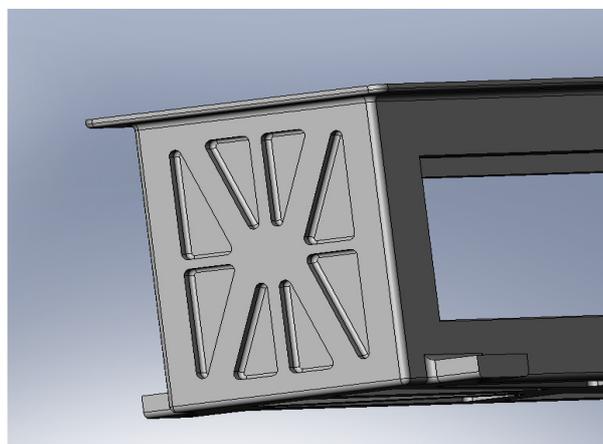


Abbildung 58: Versteifungsrippen an der Stirnseite

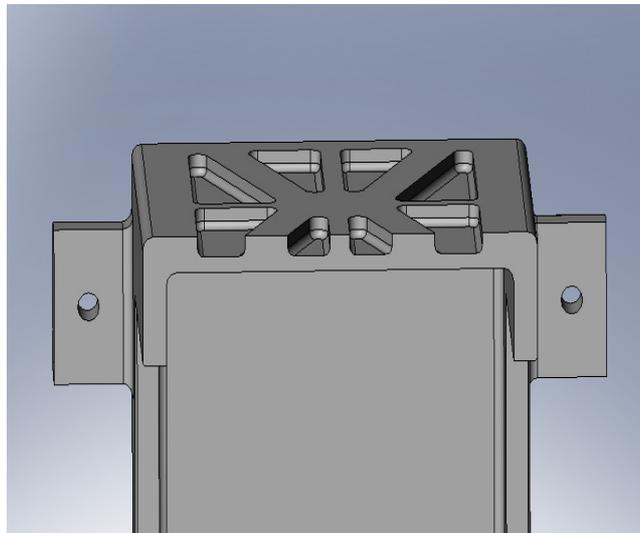


Abbildung 59: Schnittdarstellung der Verstärkungsrippen

In der folgenden Beispielrechnung soll die mittlere Verstärkungsrippe betrachtet werden. Die Berechnung wird mit folgenden Maßen durchgeführt:

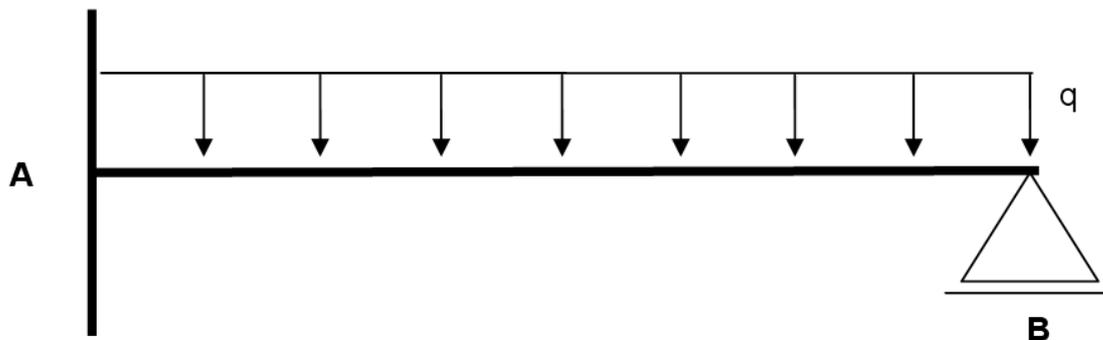


Abbildung 60: statisches Ersatzsystem

In Abbildung 60 ist das Lager A als feste Einspannung zu betrachten, während das Lager B ein Loslager darstellt.

Länge des Balkens:	$L = 190\text{mm}$
Breite des Balkens:	$B = 10\text{mm}$
Höhe des Balkens:	$H = 14\text{mm}$
E – Modul:	$E = 71 \times 10^3\text{MPa}$
Flächenkraft:	$q = 1 \text{ N/mm}$ (Wert wurde frei gewählt)

Berechnung des Flächenmomentes 2. Grades:

Für quadratische Querschnitte gilt:

$$I_y = \frac{a \cdot b^3}{12} = \frac{(10\text{mm})^4}{12} = \underline{\underline{2286,67\text{mm}^4}} \quad (32)$$

Berechnung des Produkts aus E – Modul und Flächenmoment 2. Grades

$$EI = 70.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 2286,61\text{mm}^4 = 160,07 \cdot 10^6 \text{mm}^2$$

Berechnung der Querkraft im Punkt A

Aufgrund der Symmetrie gilt:

$$F_{q,A} = q \cdot L = 10 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot 190\text{mm} = \underline{\underline{1900\text{N}}} \quad (33)$$

Berechnung des Biegemomentes im Punkt A

Aufgrund der Symmetrie gilt:

$$M_{b,A} = F \cdot \frac{L}{2} = \frac{q \cdot L^2}{2} = \frac{10 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot (190\text{mm})^2}{2} = 180,5\text{Nmm} \quad (34)$$

Berechnung der maximalen Durchbiegung w_{\max}

Durch die Anschauung folgt, dass sich die maximale Durchbiegung in der Mitte des Balkens befindet. Somit gilt:

$$\begin{aligned}
 w\left(x = \frac{190\text{mm}}{2}\right) = & w_a + w'_a \cdot \left(\frac{190\text{mm}}{2}\right) - \frac{-180,5\text{Nmm}}{2 \cdot 160,07 \cdot 10^6 \text{mm}^2} \cdot \left(\frac{190\text{mm}}{2}\right)^2 - \frac{-1900\text{N}}{6 \cdot 160,07 \cdot 10^6 \text{mm}^2} \cdot \left(\frac{190\text{mm}}{2}\right)^3 \\
 & + \frac{10 \frac{\text{N}}{\text{mm}}}{24 \cdot 160,07 \cdot 10^6 \text{mm}^2} \cdot \left(\frac{190\text{mm}}{2}\right)^4
 \end{aligned}$$

mit $w_a = 0$ und $w'_a = 0$ erhält man:

$$w\left(x = \frac{190\text{mm}}{2}\right) = \underline{\underline{1,06\text{mm}}}$$

Vergrößert man nun die Verstärkungsrippe um 1mm und berechnet die Durchbiegung erneut, so erhält man:

$$w\left(x = \frac{190\text{mm}}{2}\right) = \underline{\underline{0,87\text{mm}}}$$

Betrachtet man nun die Verhältnisse, so wurde die Höhe der Verstärkungsrippe um den Faktor 1,07 vergrößert, woraufhin die Durchbiegung um den Faktor 1,22 sank.

Aus Gleichung 32 und der Beispielrechnung wird ersichtlich, dass zur Berechnung des Flächenmomentes zweiten Grades die Höhe des Biegebalkens zur dritten Potenz, während die Breite lediglich zur ersten Potenz eingeht. Daraus lässt sich folgern, dass es bezüglich der Massenminimierung sinnvoller ist, hohe Versteifungsrippen mit geringer Breite einzubringen. Die sternförmige Anordnung wird mit der gleichmäßig auf die Fläche wirkende Druckverteilung begründet. Das maximale Biegemoment befindet sich im Mittelpunkt der Flächendiagonalen. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf Ausfräsungen verzichtet.

Durch die Optimierungsanalyse wurden die Wandstärken des Gehäuses, sowie die Tiefe der Ausfräsungen um maximal $\Delta s = 8\text{mm}$ verändert. Die Reduktion der Wandstärken durch Ausfräsungen hat dabei zu einer Gewichtsreduktion 3,4 kg geführt. Die Gesamtmasse des Kryostaten inklusive der Hohlleiterbauteile ergibt sich damit zu 55,4 kg, Resultierend ergibt sich das in Abbildung 56 dargestellte Modell für den zu konstruierenden Kryostaten. Abbildung 60 zeigt die auftretenden Spannungen nach Mises, Abbildung 61 die maximale Verschiebung und Bild 62 den Faktor der Konstruktionssicherheit FOS. Alle dargestellten Werte liegen in einem akzeptablen Bereich. Die minimale Konstruktionssicherheit beträgt $\text{FOS} = 2,1$, sodass der Kryostat so gefertigt werden kann.

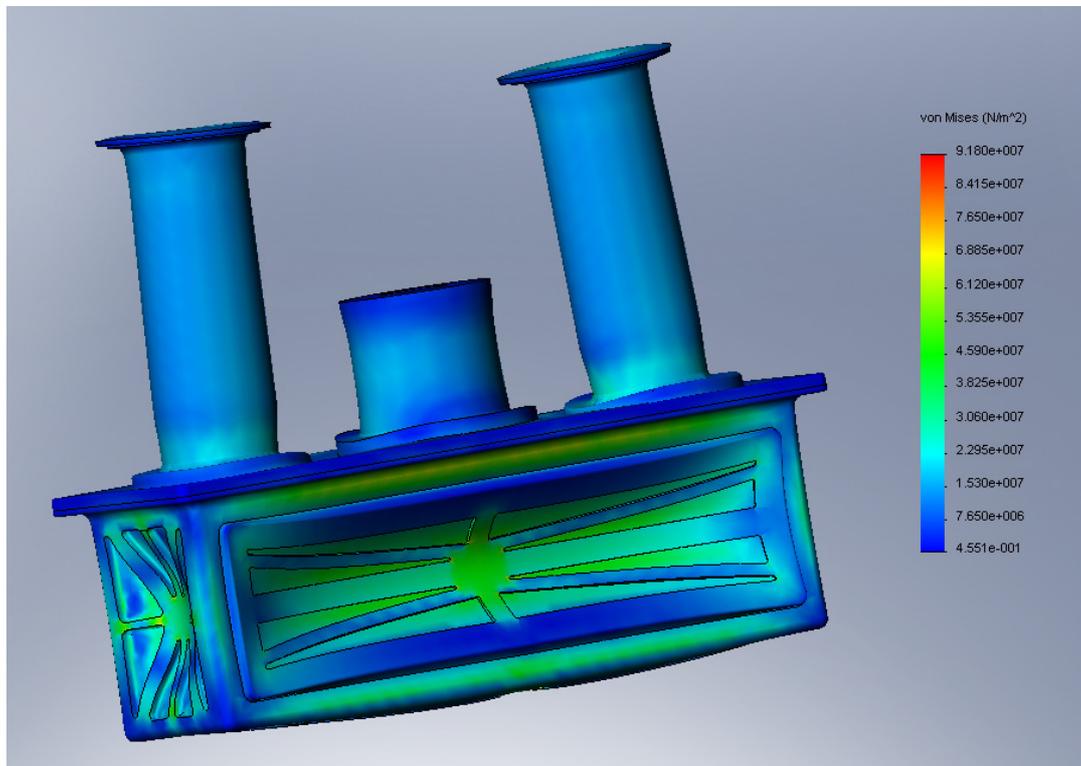


Abbildung 61: Spannungsdarstellung

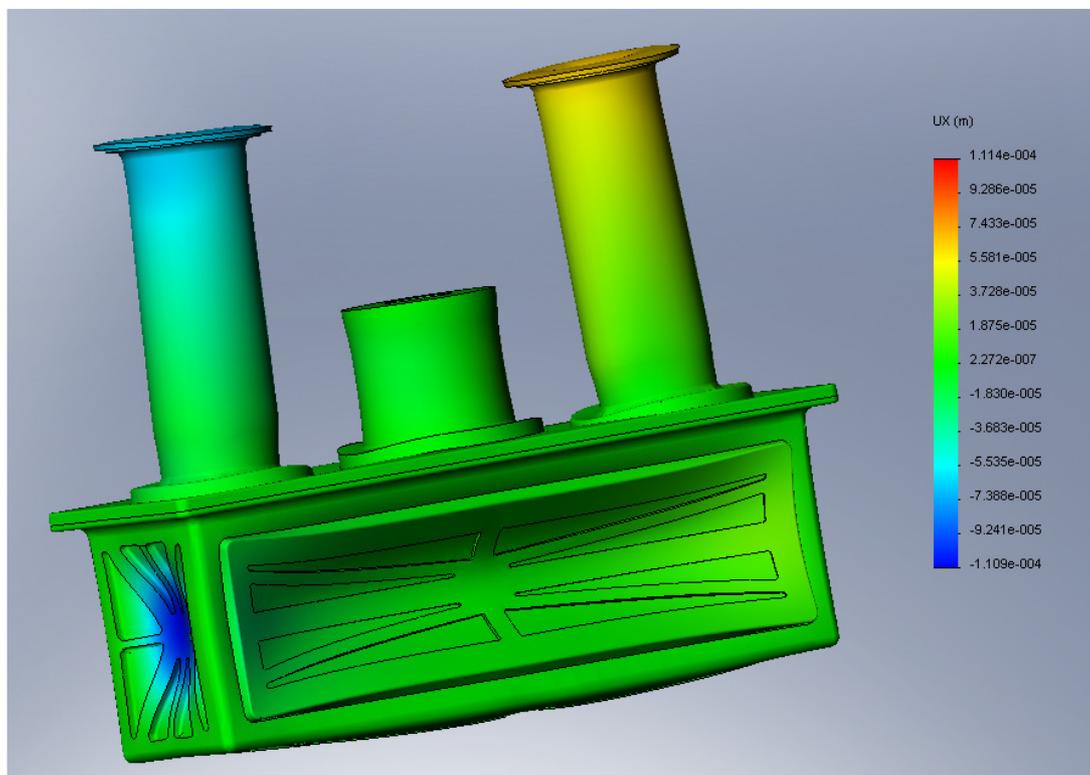


Abbildung 62: Verschiebung in X-Richtung

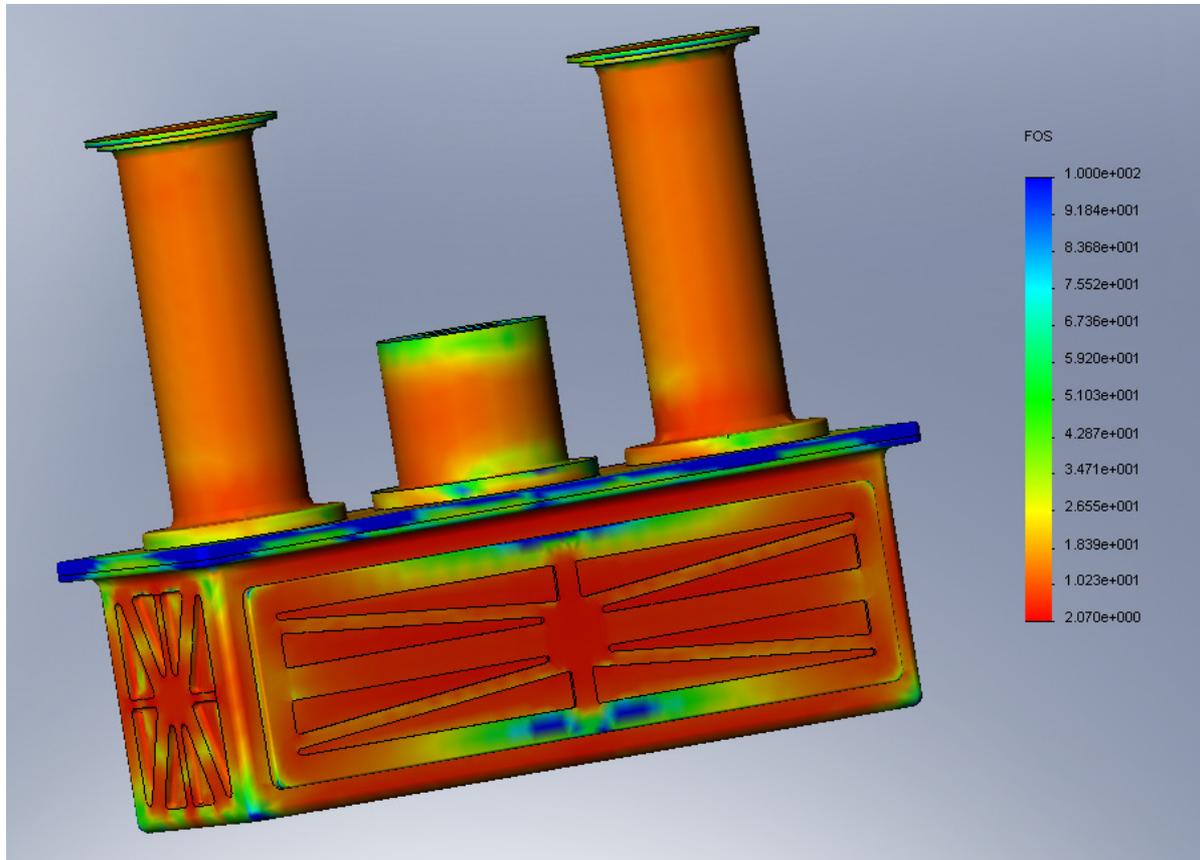


Abbildung 63: Faktor der Funktionssicherheit

10.7 Befestigung des Kryostaten im Empfangssystem

10.7.1 Allgemein

Um den Kryostaten im Empfangssystem zu befestigen, wird eine weitere Schraubverbindung vorgesehen. Zu diesem Zweck werden am Körper des Druckbehälters Aufsätze mit entsprechenden Durchgangsbohrungen angebracht. Eine detaillierte Ansicht zeigt Abbildung 64, sowie als Gesamtansicht in Abbildung 57.

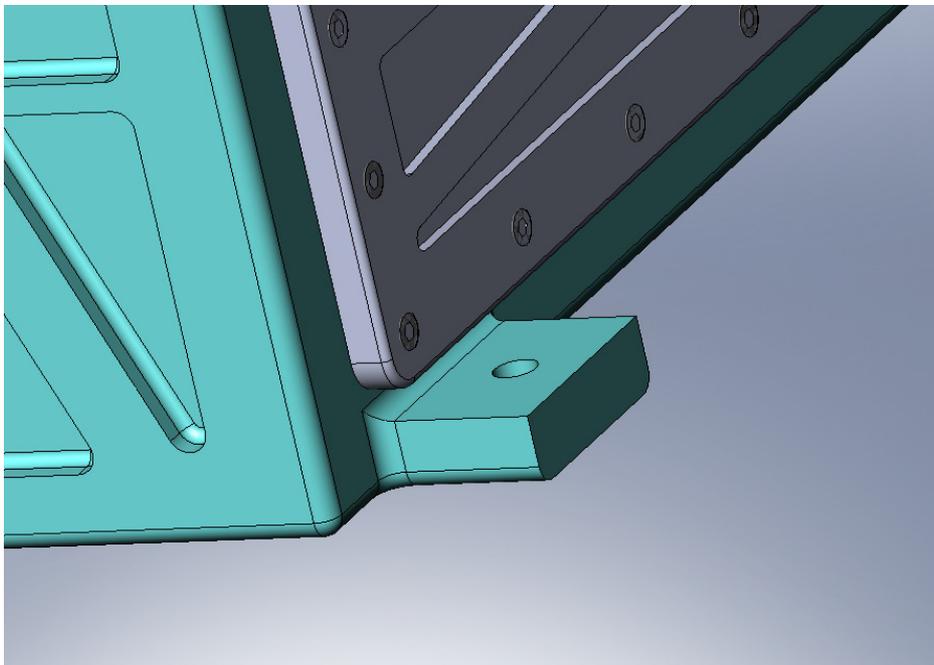


Abbildung 64: Befestigung des Kryostaten

Um die Befestigung angemessen auszulegen, muss zunächst die Statik des Systems berechnet werden. Aus diesem Grund wird eine statische Berechnung durchgeführt. Wie bereits in der Einleitung beschrieben wurde, ist das System zwar dynamisch, jedoch ist die Geschwindigkeit derart gering, sodass eine dynamische Betrachtung vermieden werden kann. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass sich die Lage des Kryostaten ändert und sich somit die Richtung der angreifenden Gewichtskraft ändert. Die Auflager werden gleichmäßig nach Maßgabe der höchsten Belastung ausgelegt, wie in der folgenden Berechnung dokumentiert wird.

10.7.2 Statische Berechnung der maximalen Auflagerkräfte [21]

Um die maximale Auflagerkraft zu ermitteln, wird die Statik des Systems in zwei verschiedenen Winkelstellungen des Radioteleskops betrachtet. Es werden die Auflagerkräfte bei einer Elevation von 90° , sowie bei einer Elevation von 7° berechnet. Hier wird das System vereinfacht und mit einer Elevation von 0° gerechnet. Aufgrund der Symmetriebedingungen werden nur zwei der vier Auflager betrachtet.

Auflagerkräfte bei einer Elevation von 90°

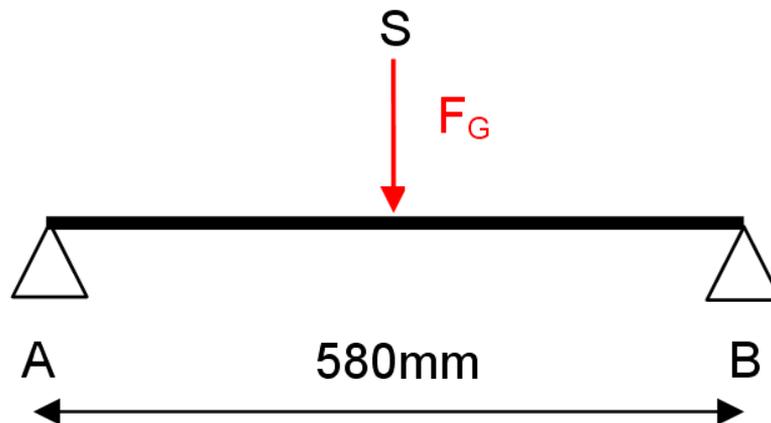


Abbildung 65: Ersatzsystem bei Elevation 90°

Wie die Abbildung 65 zeigt, werden die beiden Auflager A und B lediglich durch die Gewichtskraft F_G belastet, welche am Schwerpunkt des Systems angreift. Das räumliche System ist über zwei Achsen symmetrisch. Somit gelten folgende Bedingungen.

$$F_a = F_B = F_C = F_D = \frac{F_G}{4}$$

Gesamtmasse:

Masse des Kryostaten $m_{\text{Kryol}} = 35\text{kg}$
Masse der Einbauten $m_{\text{Teile}} = 15\text{kg}$
Gesamtmasse: $m_{\text{ges}} = 50\text{kg}$

somit gilt für die Gewichtskraft:

$$F_G = m_{\text{ges}} \cdot g \quad (35)$$

mit $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$$F_G = 50\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 784,8\text{N}$$

$$F_A = F_B = \frac{1}{4} F_G = 196,2\text{N}$$

Auflagerkräfte bei einer Elevation von 0°

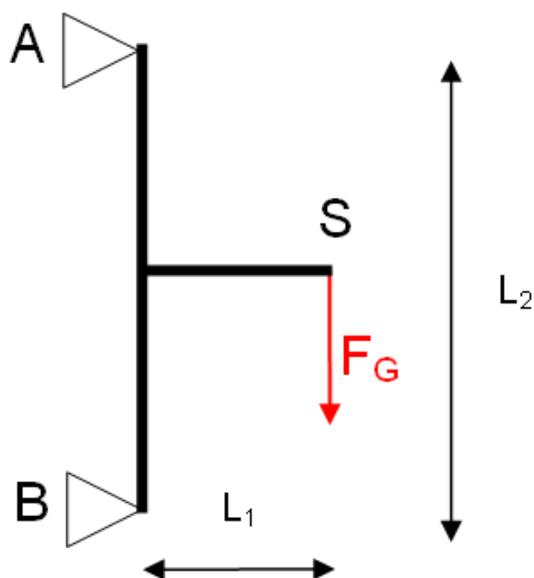


Abbildung 66: Ersatzsystem bei Elevation 0°

Wie in Abbildung 66 zu sehen ist, greift die Gewichtskraft bei einer Teleskopstellung von 0° an einem Hebelarm an. Das Lager A soll als Festlager dienen und somit die gesamten Kräfte in senkrechter Richtung (Z-Richtung) aufnehmen. Somit ist das räumliche System statisch nicht mehr über zwei Achsen symmetrisch. Es gelten weiterhin folgende Symmetriebedingungen:

$$F_A = F_C$$

$$F_B = F_D$$

Als Ansatz gelten die Gleichgewichtsbedingungen der Statik:

$$\sum F_{i,x} = F_{A,x} + F_{B,x} = 0$$

$$\sum F_{i,z} = F_{A,z} + F_G = 0$$

$$\sum M_i(A) = F_G \cdot L_1 - F_{B,x} \cdot L_2 = 0$$

mit

$$L_1 = 0,315\text{m}$$

$$L_2 = 0,58\text{ m}$$

$$F_{B,x} = \frac{F_G \cdot L_1}{L_2} = \frac{392,4\text{N} \cdot 0,315\text{m}}{0,58\text{m}} = \underline{\underline{213,1\text{N}}}$$

$$F_{A,x} = -F_{B,x} = \underline{\underline{-213,1\text{N}}}$$

$$F_{A,z} = -F_G = \underline{\underline{-392,4\text{N}}}$$

Aus den statischen Berechnungen wird ersichtlich, dass die Belastungen von Lager A am größten sind. Hier gilt es nun die beiden Kräftekomponenten zu einer resultierenden Auflagerkraft zusammenzufassen. Zu diesem Zweck werden beide Komponenten geometrisch (vektoriell) addiert. Die Richtungen, welche durch das Vorzeichen beschrieben werden, können außer Acht gelassen werden.

$$F_{A,res} = \sqrt{F_{A,x}^2 + F_{A,z}^2} = \sqrt{(213,1\text{N})^2 + (392,4\text{N})^2} = \underline{\underline{446,53\text{N}}}$$

10.7.3 Auswahl der Schrauben [14;15]

Zu den gewonnenen Ergebnissen der statischen Berechnungen müssen nun geeignete Schrauben ausgewählt werden. Hierzu wird zunächst die Mindestklemmkraft gewählt. Diese beschreibt, wie hoch die Klemmkraft ohne Belastungen der Auflager sein muss. In diesem Fall wird gewählt:

$$F_{kl} = 250N$$

Somit ergibt sich eine maximale Schraubenkraft von

$$F_{\max} = F_{A, \text{res}} + F_{Fl} = 446,53N + 250N = 496,53N \approx \underline{\underline{700N}} \quad (36)$$

Vorauswahl laut dem Tabellenbuch von Roloff/Matek, Tabelle 8-13

Belastungsart: Gesamte Kraft wird als Querkraft (statisch) angenommen.

Nenndurchmesser: $d_{\text{nenn}} = 10\text{mm}$

Schraubenart: M10 – Schaftschraube

Festigkeitsklasse: 6.8

Einschraublänge

laut Tabellenbuch von Roloff/Matek, Tabelle 8-15

$$L_e = 1,2 \cdot d_{\text{nenn}} = 1,2 \cdot 10\text{mm} = \underline{\underline{12\text{mm}}} \quad (37)$$

Länge der Schraube

$$L_{\text{Sch}} = L_e + L_{\text{Bohr}} = 12\text{mm} + 20\text{mm} = \underline{\underline{32\text{mm}}} \quad (38)$$

Es wird eine Schraubenlänge von $L_{\text{Sch}} = 35\text{mm}$ laut DIN EN ISO 4762 gewählt.

Auf eine weitere Berechnung der Schraubverbindung wird an dieser Stelle verzichtet. Aufgrund der geringen Belastungen und der Überdimensionierung, welche durch die Vorauswahl der Schraubendimensionen laut dem Tabellenbuch von Roloff/Matek geschah, kann ein eventuelles Versagen der Schraubverbindung durch Überbelastung ausgeschlossen werden.

10.8 Betrachtungen und Berechnungen zur thermischen Belastung

10.8.1 Auslegung der thermischen Leiter

Die auf das System wirkenden thermischen Belastungen müssen zunächst der Kühlmaschine zugeführt werden. Hierzu werden thermische Leiter in Form von Vierkant – Profilen verwendet. Um Verspannungen von Bauteilen aufgrund von thermischen Ausdehnungen zu verhindern, werden die thermischen Leiter über flexible Kupferbänder an den Bauteilen angeschlossen. Um die anfallende thermische Belastung vollständig der Kühlmaschine zuführen zu können, bedarf es eines hohen Wärmeleitkoeffizienten, sowie einem genügend bemessenen Querschnitt. Als Material des thermischen Leiters wird Aluminium verwendet. Dieses Material hat wie bereits beschrieben bei tiefen Temperaturen einen Wärmeleitkoeffizienten von $\lambda = 600 \frac{W}{m \cdot K}$.

Als anfallende Last wird die maximale Kühlleistung angenommen. Diese beträgt bei Temperaturen von $T_1 = 70K$ und $T_2 = 15K$ auf den beiden Kühlstufen $Q_1 = 20W$ und $Q_2 = 4W$. Mit der Annahme, dass die Leistung Q_2 an den beiden Empfangsverstärkern auftritt, werden die thermischen Leiter wie folgt ausgelegt.

Die folgende Gleichung beschreibt zunächst die Gesetzmäßigkeit der Wärmeleitung

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{l}$$

Stellt man nun diese Gleichung äquivalent nach der Fläche A um, so ergibt dies

$$A_{erf} = \frac{\dot{Q} \cdot l}{\lambda \cdot \Delta T} \quad (39)$$

Mit $\lambda = 600 \frac{W}{m \cdot K}$, $l = 0,25m$, $Q = 2W$ (je Horn) und $\Delta T = 3K$ ergibt dies

$$A_{erf} = \frac{2W \cdot 0,25m}{600 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 3K} = 2,78 \cdot 10^{-4} m^2 = 278 mm^2$$

Unter der Annahme, dass die Breite des thermischen Leiters $B = 80\text{mm}$ beträgt erhält man für die Höhe H

$$H = \frac{A}{B} = \frac{278\text{mm}^2}{80\text{mm}} \approx 3,5\text{mm} \quad (40)$$

Die gleiche Berechnung wird nun für das Strahlungsschild durchgeführt. Das Strahlungsschild hat in dieser Konstruktion zusätzlich die Aufgabe, die gesamte Wärmeleistung, welche von der Blende eingestrahlt, sowie über die GFK – Halterung in das Horn eingeleitet wird, der Kühlmaschine zuzuführen. Somit ist der Teil, welches an der 70K Stufe des Kühlzylinders befestigt wird, entsprechend auszulegen.

$$A_{\text{erf}} = \frac{\dot{Q} \cdot l}{\lambda \cdot \Delta T}$$

Mit $Q = 20\text{W}$, $l = 0,25\text{m}$, $\lambda = 550 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ (Kupfer) und $\Delta T = 5\text{K}$ erhält man

$$A_{\text{erf}} = \frac{10\text{W} \cdot 0,25\text{m}}{550 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 5\text{K}} = 9,09 \cdot 10^{-4} \text{m}^2 = 909\text{mm}^2$$

Aus dem Programm Solid Works kann ausgemessen werden, dass die Breite des Strahlungsschildes $B = 170\text{mm}$ beträgt. Somit ergibt dies für die Höhe H

$$H = \frac{A}{B} = \frac{909\text{mm}^2}{170\text{mm}} \approx 5,34\text{mm}$$

Es wird eine Wandstärke von $H = 5,5\text{mm}$ gewählt. Dieses Maß gilt allerdings nur für die Deckplatte des Strahlungsschildes, welche am Kühlzylinder befestigt ist.

Abschließend wird zur genauen Betrachtung der Temperaturverteilung im System eine thermische Simulation durchgeführt. Auch dies geschieht mit Hilfe des Programms Cosmos Works. Gefordert sind Temperaturen am Empfangshorn von circa $T = 80\text{K}$, sowie an den Empfangsverstärkern von circa $T = 18\text{K}$. Mit Hilfe dieser Simulation soll erkannt werden, ob die geforderten Temperaturen erreicht werden.

Auch hier sind wieder einige Eingaben durch den Benutzer zu machen. Im Allgemeinen kann man erkennen, dass alle Simulationen im Programm Cosmos Works nach einem ähnlichen Prinzip ablaufen, was die Benutzereingaben betrifft. Bei jeder Simulation sind Randbedingungen wie Lager, Belastungen und Materialkennwerte zu definieren. In diesem Fall werden folgende Belastungen und Randbedingungen gesetzt.

- Temperaturen (zu betrachten als „Lager“)
- Wärmestrahlung (Belastung)
- Wärmeleistung durch elektronische Bauteile (Belastung)
- Wärmeleitung durch elektrische Kabel und mechanische Anbindung (Belastung)

In diesem Fall wird eine stationäre thermische Analyse durchgeführt. Bei den genannten Bedingungen kann man voraussetzen, dass sich das System im Gleichgewicht befindet.

Als Temperaturen werden definiert:

- 1. Kühlstufe: $T = 70\text{K}$
- 2. Kühlstufe: $T = 15\text{K}$
- Gehäuseaußenwand: $T = 300\text{K}$

Bezüglich der Wärmestrahlung wird definiert:

- Emissionskoeffizienten der polierten Oberflächen $\epsilon = 0,03$
- Emissionskoeffizienten der Blende, sowie der Horninnenfläche $\epsilon = 1$
- Einstrahlkoeffizient für senkrechtetes Auftreffen der Strahlung $K = 1$

Als Wärmeleistungen werden definiert:

- Pro Empfangsverstärker $P = 0,05\text{W}$
- Vereinfacht liegt am Ende des thermischen Leiters der 15K – Stufe im vereinfachten System jeweils eine Wärmeleistung von $P = 0,1\text{W}$ an.

Des Weiteren ist es möglich, das zu berechnende Modell zu vereinfachen. Hierdurch wird eine geringere Berechnungszeit erreicht. Besonders eine Berechnung mit Wärmestrahlung ist im Bezug auf die Rechnerkapazität sehr aufwendig und zeitintensiv. Hierzu wird das Modell aufgrund seiner Symmetrie über zwei Ebenen geschnitten. Der Schnitt erfolgt allerdings nur über eine Ebene, damit eine bessere Veranschaulichung der Ergebnisse möglich ist.

Abbildung 67 zeigt die Vereinfachung des Systems durch ein Schneiden der Bauteile. Weiterhin ist zu sehen, dass die Hohlleiterbauteile, die Kupferbänder, sowie die mechanische Anbindung des Horns an die 300K – Stufe durch einfache Geometrien ersetzt wurden. Wären die originalen Bauteile verwendet worden, hätte die Vernetzung wesentlich feiner ausgeführt werden müssen. Die Ersatzbauteile sind bezüglich des Materials und der Querschnittsfläche redundant dem Originalteil.

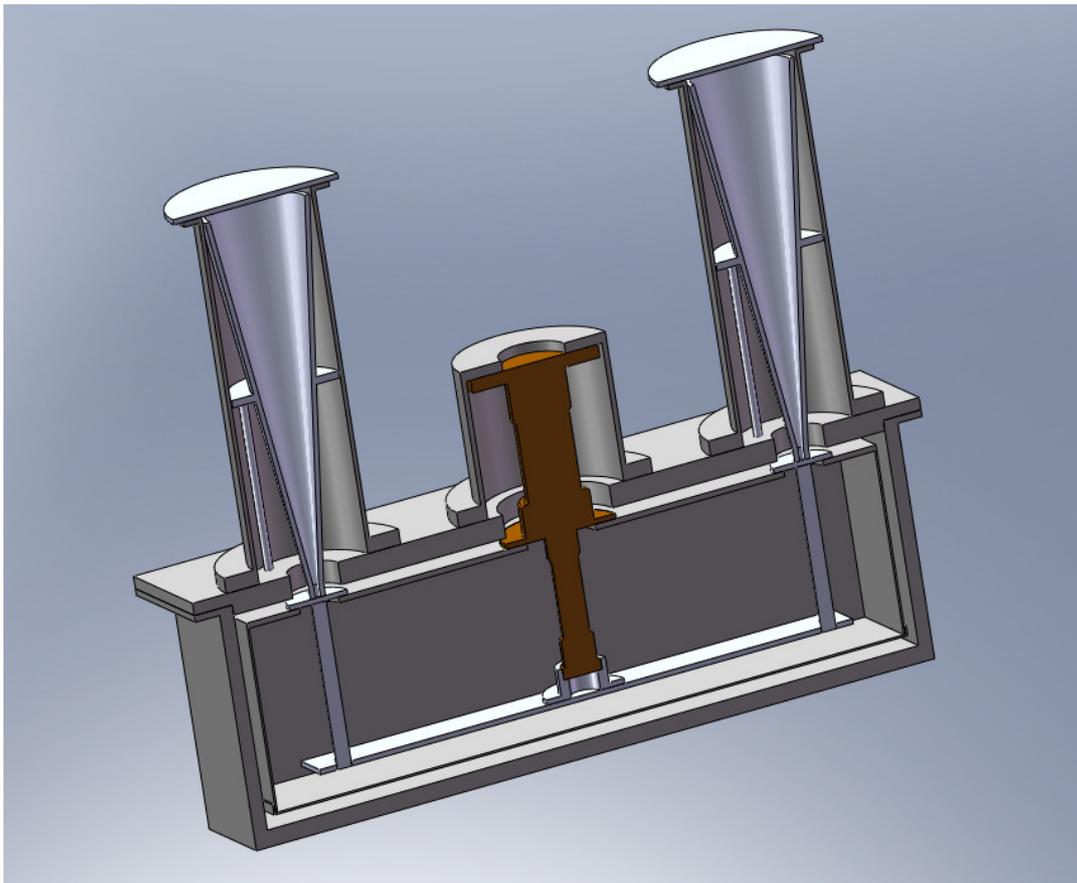


Abbildung 67: Vereinfachte thermische Analyse

Durch die beschriebene Vereinfachung des Modells verkürzt sich die Berechnungszeit um circa 22 Stunden. Auf derartige Vereinfachungen und Ersatzmodelle ist gerade in der heutigen Zeit ein größeres Augenmerk zu legen, da lange Berechnungszeiten sehr kostenaufwendig sind. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen Abbildung 68.

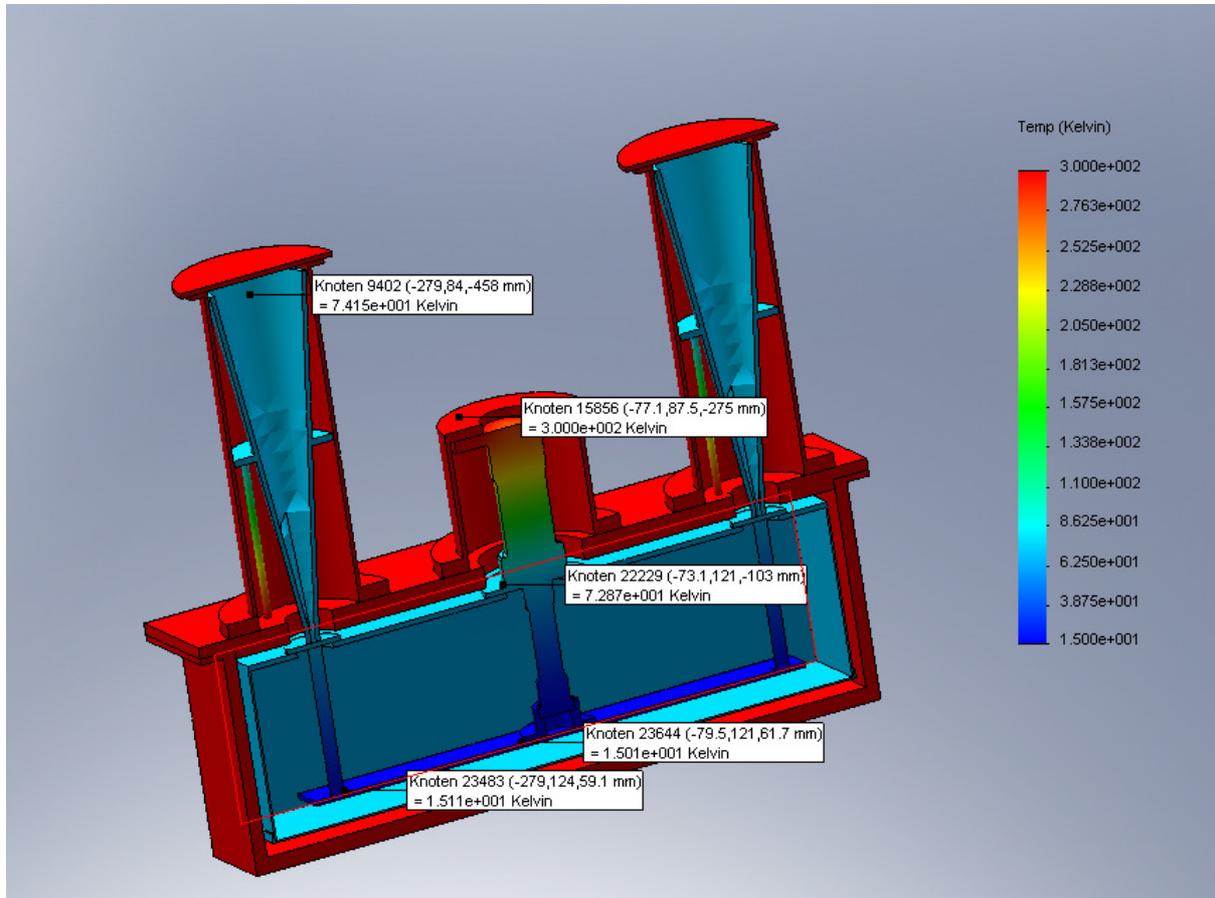


Abbildung 68: Temperaturverteilung

Es wird ersichtlich, dass die geforderten Temperaturen erreicht werden. Durch das Sondierungswerkzeug werden in Abbildung 68 charakteristische Temperaturwerte angezeigt. An den Empfangsverstärkern wird eine Temperatur von $T = 15,11\text{K}$ erreicht. Die geforderte Temperatur von $T = 18\text{K}$ wird somit noch unterschritten. Das gleiche gilt für die beiden Empfangshörner. Im oberen Teil des Empfangshorn stellt sich eine Temperatur von $T = 74,15\text{K}$ ein. Die geforderte Temperatur von $T = 80\text{K}$ wird um fast 6K unterschritten. Hieraus kann gefolgert werden, dass die Bemessung der thermischen Leiter ausreicht.

10.9 Resultierender Aufbau des Kryostaten

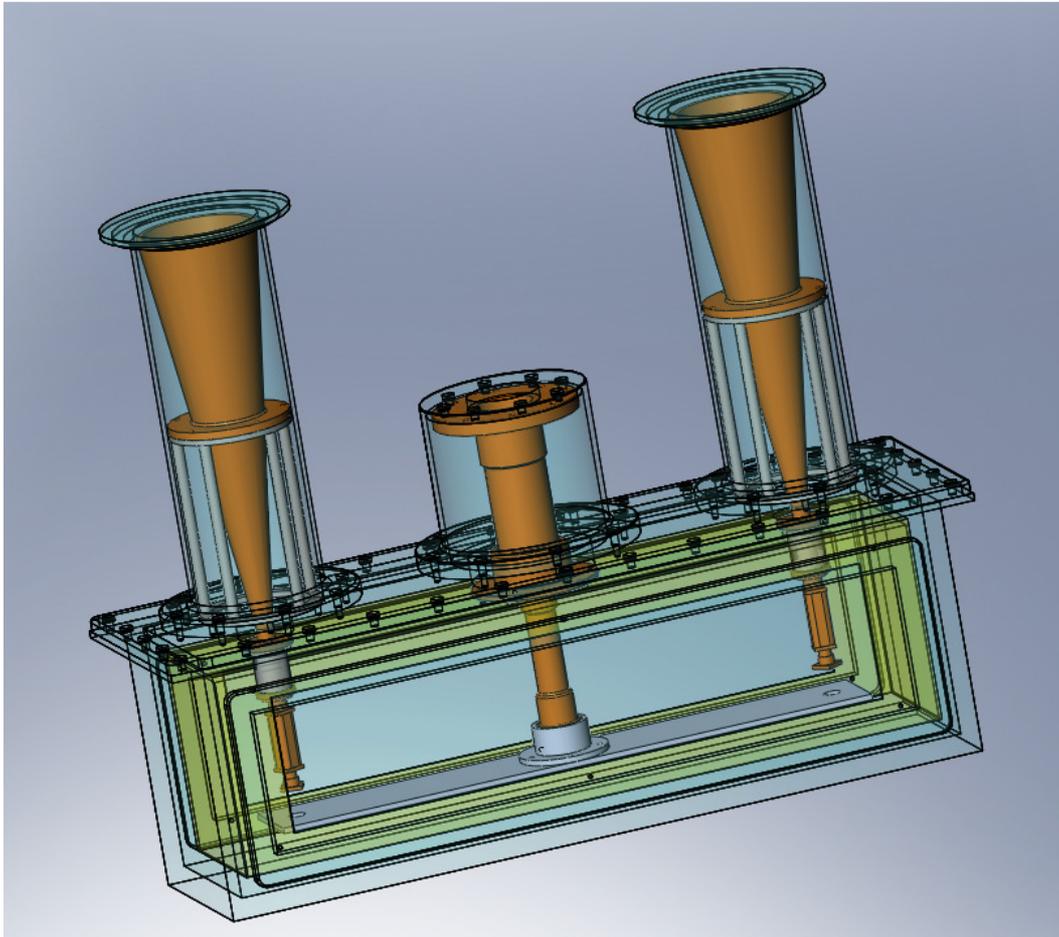


Abbildung 69: resultierender Aufbau des Kryostaten

Zusammenfassend zeigt Abbildung 69 den resultierenden Aufbau des Kryostaten. Um eine bessere Veranschaulichung zu ermöglichen, wurden das Gehäuse, sowie das Strahlungsschild vereinfacht und transparent dargestellt.

11. Zusammenfassung und Ausblick

Inhalt dieser Diplomarbeit war die Konstruktion eines gewichts- und volumenoptimierten Kryostaten für ein neues Doppelhorn – Empfangssystem im Radioteleskop Effelsberg. Als weitere Neuerung sollten zum ersten Mal die beiden Empfangshörner auf circa $T = 80\text{K}$ gekühlt werden.

Mit Hilfe der CAD – Software Solid Works wurden 3-D Modelle erstellt und anschließend mit der Finiten Elemente Software Cosmos Works bezüglich Gewicht und Form optimiert. Hierbei war darauf zu achten, dass der Sicherheitswert gegen plastisches Verformen nicht überschritten wird. Des Weiteren wurden Bauteile für die erste Kühlstufe (70K – Schild) unter der Beachtung der Wärmestrahlungs- und Wärmeleitungseigenschaften über das Material und dessen Gewicht ausgelegt. Am Kryostaten wurden Zugangsmöglichkeiten in Form von Verschlussplatten vorgesehen, die eine Wartung im montierten Zustand des Kryostaten und dessen Einbauten gewährleisten. Die Befestigung des Kryostaten, sowie seiner Verschlussplatten wurden über zuvor berechnete Schraubverbindungen realisiert.

Mit Hilfe der Optimierungsstudien der FE – Software Cosmos Works wurde eine Gewichtsreduktion von 3,4kg erzielt. Ohne diese Modellierungs- und Berechnungssoftware wäre es nicht möglich gewesen, eine derartige Konstruktion in so kurzer Zeit zu erstellen. Auch Schwachstellen konnten schnell erkannt und beseitigt werden.

Auch die thermischen Berechnungsergebnisse sind voll zufriedenstellend. Mit Hilfe der FEM – Berechnungen konnte ein Temperaturverlauf für die gesamte Konstruktion erstellt werden. Auf diesen Ergebnissen lässt sich ebenfalls weiter aufbauen und zeigen, an welchen Stellen Weiterentwicklungen und Möglichkeiten der Optimierung bestehen.

Im Sinne der Ideenfindungsmethoden der Konstruktionssystematik wurden bereits weitere Ansätze der Optimierung gefunden. Nach der Fertigung und Inbetriebnahme des Gesamtsystems soll durch eine umfassende Studie die Einsatzmöglichkeiten von Verbundfaserwerkstoffen im Vakuumbehälterbau untersucht werden.

Für mich persönlich war diese Diplomarbeit eine wichtige Erfahrung und sehr lehrreich im Bezug auf meine Ausbildung zum diplomierten Ingenieur. Kenntnisse, welche ich im Studiengang Maschinenbau an der Fachhochschule Köln erworben hatte, galt es nun in der Praxis umzusetzen. Weiterhin war die Zusammenarbeit mit verschiedenen Abteilungen, sowie der Projektleitung essentiell zum Gelingen dieser Arbeit.

Schlussendlich konnte ich feststellen, dass sich Methoden und Werkzeuge des Konstruktionsingenieurs über die Zeit verändern, jedoch Neuerungen wie zum Beispiel CAD-Software nicht das Fachwissen ersetzen. Sie tragen lediglich dazu bei, die Entwicklungskosten zu senken und Konstruktionen effektiver und sicherer auszulegen.

Literatur

- [1] Tipler/Mosca: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure
2. Auflage
Elsevier Verlag
- [2] Kuchling: Taschenbuch der Physik
17. Auflage
Fachbuchverlag Leipzig
- [3] Weißbach, W.: Werkstoffkunde und werkstoffprüfung
15.Auflage
Vieweg Verlag
- [4] Pfeiffer: The Vacuum Technology Book
Volume 1
Firma Pfeiffer Vacuum Technology
- [5] Wutz,M./ Adam, H./ Walcher, W. : Theorie und Praxis der Vakuumtechnik
3.Auflage
Vieweg Verlag 1986
- [6] Haefer, R.A.: Kryo – Vakuumtechnik
Berlin/Heidelberg/New York 1981
- [7] Langeheinecke, K./ Jany, P./ Sapper, E.: Thermodynamik für Ingenieure
4.Auflage
Vieweg Verlage 2003
- [8] AD-Merkblätter-Taschenbuchausgabe 1999
Verband der technischen Überwachungsvereine e.V. (TÜV), Essen
Carl Heymanns Verlage
- [9] Frey, H./Haefer, R.A.: Tieftemperaturtechnologie
VDI Verlag GmbH 1981
- [10] Hallmann, H.: Begleittext zur Vorlesung „Finite Elemente Methoden (FEM)“
Fachhochschule Köln, Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Auflage 2006
- [11] Hallmann, H.: Begleittext zur Vorlesung „Computer Aided Design (CAD)“
Fachhochschule Köln, Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Auflage 2006
- [12] Solid Works 2008
Hilfdatei / Onlinelehrbuch
- [13] Cosmos Works 2008
Hilfdatei / Onlinelehrbuch

- [14] Tabellenbuch Metall
39. Auflage
Verlag Europa Lehrmittel

- [15] Roloff / Matek: Maschinenelemente Lehr- und Tabellenbuch
15. Auflage
Vieweg Verlag

- [16] Hammen, H.: Diplomarbeit

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

- [17] www.wikipedia.de

- [18] www.metallstore.de

- [19] www.fibretec.de

- [20] Hahn, W.: Begleittext zur Vorlesung Konstruktionssystematik
Fachhochschule Köln, Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Ausgabe 2007

- [21] Overrath, H.J.: Begleittext zu den Vorlesungen der technischen und höheren
Mechanik
Fachhochschule Köln, Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Ausgabe 2005 - 2008

A. Anhang

A.1. Auszüge aus den AD-Merkblättern

DK 621.642-98.001.24		Ausgabe Januar 1995																					
Berechnung von Druckbehältern	Berechnung von Druckbehältern	AD-Merkblatt B 0																					
<p>Die AD-Merkblätter werden von den in der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ (AD) zusammenarbeitenden, nachstehend genannten sieben Verbänden aufgestellt. Aufbau und Anwendung des AD-Regelwerkes sowie die Verfahrensrichtlinien regelt das AD-Merkblatt G 1. Die AD-Merkblätter enthalten sicherheitstechnische Anforderungen, die für normale Betriebsverhältnisse zu stellen sind. Sind über das normale Maß hinausgehende Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter zu erwarten, so ist diesen durch Erfüllung besonderer Anforderungen Rechnung zu tragen.</p> <p>Wird von den Festlegungen dieses AD-Merkblattes abgewichen, muß nachweisbar sein, daß der sicherheitstechnische Maßstab dieses Regelwerkes auf andere Weise eingehalten ist, z. B. durch Werkstoffprüfungen, Versuche, Spannungsanalyse, Betriebserfahrungen.</p> <p>Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e. V. (FDBR), Düsseldorf Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e. V., Sankt Augustin Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI), Frankfurt/Main Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), Fachgemeinschaft Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate, Frankfurt/Main Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), Düsseldorf VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e. V., Essen Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e. V. (VdTÜV), Essen</p> <p>Die AD-Merkblätter werden durch die Verbände laufend dem Fortschritt der Technik angepaßt. Anregungen hierzu sind zu richten an den Herausgeber:</p> <p>Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e. V., Postfach 10 38 34, 45038 Essen.</p>																							
Inhalt																							
1 Geltungsbereich	6 Festigkeitskennwert																						
2 Allgemeines	7 Sicherheitsbeiwert																						
3 Formelzeichen und Einheiten	8 Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen																						
4 Berechnungsdruck	9 Zuschläge																						
5 Berechnungstemperatur	10 Kleinste Wanddicke																						
<p>1 Geltungsbereich</p> <p>1.1 Die AD-Merkblätter der Reihen B und S behandeln Berechnungsregeln für drucktragende Teile von Druckbehältern. Ihre Anwendung setzt voraus, daß bei der Wahl der Werkstoffe und deren Verarbeitung die AD-Merkblätter der Reihen W und HP sowie die allgemein anerkannten Regeln der Technik beachtet werden. Auf AD-Merkblatt G 1 wird verwiesen.</p> <p>1.2 Die AD-Merkblätter der Reihen B und S3 gelten für überwiegend statische Beanspruchung. Bei wechselnder Beanspruchung gelten zusätzlich die AD-Merkblätter S 1 und S2.</p> <p>2 Allgemeines</p> <p>2.1 Dieses AD-Merkblatt enthält gemeinsame Grundregeln der AD-Merkblätter der Reihen B und S. Die übrigen AD-Merkblätter der Reihen B und S können daher nur in Verbindung mit diesem AD-Merkblatt benutzt werden.</p> <p>2.2 Sofern in den AD-Merkblättern für die Bemessung drucktragender Teile nichts festgelegt ist, muß im Einzelfall durch Anwendung anderer anerkannter Regeln der Technik oder durch andere Berechnungsverfahren, durch Dehnungsmessungen, durch einschlägige Betriebserfahrungen oder dergleichen belegt werden, daß die Bauteile je nach Werkstoff und Verwendungszweck nicht unzulässig beansprucht werden.</p> <p>2.3 Die AD-Merkblätter enthalten sicherheitstechnische Anforderungen, die für normale Betriebsverhältnisse zu stellen sind. Sind über das normale Maß hinausgehende Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter zu erwarten, so ist diesen durch Erfüllung besonderer Anforderungen Rechnung zu tragen.</p> <p>2.4 Wird von den Festlegungen der AD-Merkblätter abgewichen, muß nachweisbar sein, daß der sicherheitstechnische Maßstab dieses Regelwerkes auf andere Weise eingehalten ist, z. B. durch Werkstoffprüfungen, Versuche, Spannungsanalyse, Betriebserfahrungen.</p> <p>3 Formelzeichen und Einheiten</p> <table border="0"> <tr> <td>a</td> <td>Hebelarm</td> <td>in mm</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>Breite</td> <td>in mm</td> </tr> <tr> <td>c₁</td> <td>Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung</td> <td>in mm</td> </tr> <tr> <td>c₂</td> <td>Abnutzungszuschlag</td> <td>in mm</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>Durchmesser eines Ausschnitts, eines Flansches, einer Schraube usw.</td> <td>in mm</td> </tr> <tr> <td>d_a</td> <td>Außendurchmesser eines Rohres, Stutzens, Flansches</td> <td>in mm</td> </tr> <tr> <td>d_i</td> <td>Innendurchmesser eines Rohres, Stutzens, Flansches</td> <td>in mm</td> </tr> </table>			a	Hebelarm	in mm	b	Breite	in mm	c ₁	Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung	in mm	c ₂	Abnutzungszuschlag	in mm	d	Durchmesser eines Ausschnitts, eines Flansches, einer Schraube usw.	in mm	d _a	Außendurchmesser eines Rohres, Stutzens, Flansches	in mm	d _i	Innendurchmesser eines Rohres, Stutzens, Flansches	in mm
a	Hebelarm	in mm																					
b	Breite	in mm																					
c ₁	Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung	in mm																					
c ₂	Abnutzungszuschlag	in mm																					
d	Durchmesser eines Ausschnitts, eines Flansches, einer Schraube usw.	in mm																					
d _a	Außendurchmesser eines Rohres, Stutzens, Flansches	in mm																					
d _i	Innendurchmesser eines Rohres, Stutzens, Flansches	in mm																					
Ersatz für Ausgabe März 1990: = Änderungen gegenüber der vorangehenden Ausgabe																							

Seite 2 AD Merkblatt B 0, Ausg. 1.95

d_1	Teilkreisdurchmesser	in mm
d_D	mittlerer Dichtungsdurchmesser	in mm
e	breite Seite einer rechteckigen oder elliptischen Platte	in mm
f	schmale Seite einer rechteckigen oder elliptischen Platte	in mm
g	Schweißnahtdicke	in mm
h	Höhe	in mm
k_0	Dichtungskennwert für die Vorverformung	in mm
k_1	Dichtungskennwert für den Betriebszustand	in mm
l	Länge	in mm
n	Anzahl	-
p	Berechnungsdruck	in bar
p'	Prüfdruck	in bar
r	Radius allgemein, z. B. Übergangsradius	in mm
s	erforderliche Wanddicke einschl. Zuschlägen	in mm
s_e	ausgeführte Wanddicke	in mm
v	Faktor zur Berücksichtigung der Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen oder Faktor zur Berücksichtigung von Verschwächungen	-
x	Abklinglänge	in mm
A	Fläche	in mm ²
C, β	Berechnungsbeiwerte	-
D	Durchmesser des Grundkörpers	in mm
D_a	Außendurchmesser, z. B. einer Zylinderschale	in mm
D_i	Innendurchmesser, z. B. einer Zylinderschale	in mm
E	Elastizitätsmodul bei Berechnungstemperatur	in N/mm ²
F	Kraft	in N
J	Flächenträgheitsmoment	in mm ⁴
K	Festigkeitskennwert bei Berechnungstemperatur	in N/mm ²
K_D	Formänderungswiderstand des Dichtungswerkstoffes bei Raumtemperatur	in N/mm ²
K_{20}	Festigkeitskennwert bei 20°C	in N/mm ²
M	Moment	in N mm
R	Radius einer Wölbung	in mm
S	Sicherheitsbeiwert beim Berechnungsdruck	-
S'	Sicherheitsbeiwert beim Prüfdruck	-
S_D	Sicherheitsbeiwert gegen Undichtheit	-
S_K	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen beim Berechnungsdruck	-
$S_{K'}$	Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen beim Prüfdruck	-
S_L	Lastspielsicherheit	-
W	Widerstandsmoment	in mm ³
Z	Hilfswert	-
ν	Querkontraktionszahl	-
σ	Spannung	in N/mm ²
ϑ, T	Temperatur	in°C

4 Berechnungsdruck

4.1 Die Berechnung ist im allgemeinen mit dem zulässigen Betriebsüberdruck durchzuführen. Die durch die Füllung sowohl während des Betriebes als auch während der Prüfung hervorgerufenen statischen Drücke brauchen nur berücksichtigt zu werden, soweit sie die Beanspruchung der Wandung um mehr als 5% erhöhen¹⁾.

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

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

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

4.5 Statische Zusatzkräfte sind in der Zeichnung anzugeben, wenn dadurch die Beanspruchung der Behälterwand um mehr als 5% erhöht wird (z. B. Auflagerkräfte, Wind- und Schneelast, Ausmauerung²⁾). Eine statische Berechnung ist vorzulegen, wenn die Zusatzkräfte die Auslegung des Druckbehälters wesentlich beeinflussen. Spannungserhöhungen durch Zusatzkräfte sind erfahrungsgemäß zu erwarten, wenn die Kriterien in den AD-Merkblättern der Reihe S 3 zutreffen.

5 Berechnungstemperatur

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

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

6 Festigkeitskennwert

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

¹⁾ Beispiel: zulässiger Betriebsüberdruck 2 bar
Bauteile = 5 m
Beschickung: Wasser
 $p = 2 + 0,5 - 0,05 \cdot 2 = 2,4$ bar

²⁾ Vgl. DIN 28060

Tafel 1. Berechnungstemperaturen

Beheizungsart	Berechnungstemperatur
durch Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten	die höchste Temperatur des Heizmittels
Feuer-, Abgas- oder elektrische Beheizung ³⁾	bei abgedeckter Wand die höchste Temperatur des Beschickungsgutes zuzüglich 20 °C
	bei unmittelbar berührter Wand die höchste Temperatur des Beschickungsgutes zuzüglich 50 °C

6.2 Im Bereich zeitabhängiger Festigkeitskennwerte ist zu prüfen, ob der Mittelwert für die Zeitstandfestigkeit für 100 000 h⁴⁾ niedriger liegt als der gewährleistete Mindestwert für die Streckgrenze bzw. 0,2-%-Dehngrenze⁵⁾ oder – falls zutreffend – für die 1-%-Dehngrenze. Der niedrigere der beiden Werte ist in die Berechnung einzusetzen.

6.3 Bei Werkstoffen ohne gewährleistete Streckgrenze oder Dehngrenze ist als Festigkeitskennwert die gewährleistete Mindestzugfestigkeit entsprechend der Berechnungstemperatur einzusetzen. In diesem Fall sind die Sicherheitsbeiwerte der Tafel 3 anzuwenden.

6.4 Bei nicht angleich geschweißten Verbindungen sind die Festigkeitskennwerte des Schweißgutes dann der Berechnung zugrunde zu legen, wenn sie niedriger sind als die des Grundwerkstoffes.

6.5 Vollbeanspruchte Schweißnähte in Bauteilen, die mit Hilfe der Zeitstandfestigkeit bemessen werden, sind mit dem um 20% herabgesetzten Festigkeitskennwert des Grundwerkstoffes zu berechnen, es sei denn, Zeitstandwerte der Schweißverbindung liegen vor⁶⁾.

6.6 Durch Kaltverfestigung erzielte höhere Festigkeitskennwerte können nur dann in die Berechnung eingesetzt werden, wenn sie nachgewiesen und am fertigen Bauteil vorhanden sind.

7 Sicherheitsbeiwert

Die Sicherheitsbeiwerte sind den Tafeln 2 und 3 zu entnehmen, sofern in den einzelnen AD-Merkblättern keine abweichenden oder zusätzlichen Angaben gemacht werden.

8 Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen

8.1 Die Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in der Schweißnaht wird in der Berechnung durch den Faktor v berücksichtigt. Dieser ergibt sich durch Division der in der Übersichtstafel 1 des AD-Merkblattes HP 0 genannten

³⁾ Gilt nicht bei mittelbarer elektrischer Beheizung (z. B. über Ölbad)

⁴⁾ In begründeten Fällen können anstelle der 100 000 h-Zeitstandfestigkeitswerte auch solche für andere Zeitgrenzen angewendet werden.

⁵⁾ Ist die Streckgrenze nicht ausgeprägt, so ist die nach DIN 50 145 ermittelte 0,2-%-Dehngrenze einzusetzen.

⁶⁾ Der 20-%-Abzug vom Zeitstand-Festigkeitskennwert des Grundwerkstoffes ist vorzunehmen, wenn nicht Zeitstandwerte sowohl für den Schweißzusatzwerkstoff als auch für die Wärmeleitzone des Grundwerkstoffes (ermittelt an der querschnittsprüfung der Schweißverbindung) vorliegen. Liegen diese Werte vor, sind die jeweils niedrigsten Werte (Grundwerkstoff bzw. WEZ bzw. Schweißzusatzwerkstoff) einzusetzen. Zeitstandfestigkeitswerte des Grundwerkstoffes siehe DIN-Normen bzw. VdTÜV-Werkstoffblätter, Zeitstandfestigkeitswerte der WEZ siehe VdTÜV-Werkstoffblätter, Zeitstandfestigkeitswerte der Schweißzusatzwerkstoffe siehe z. B. VdTÜV-Kennblätter.

Tafel 2. Sicherheitsbeiwerte gegen Streck-, Dehngrenze oder Zeitstandfestigkeit

Werkstoff und Ausführung	Sicherheitsbeiwert S für den Werkstoff bei Berechnungstemperatur	Sicherheitsbeiwert S' beim Prüfdruck
1. Walz- und Schmiedestähle	1,5	1,1
2. Stahlguß	2,0	1,5
3. Gußeisen mit Kugelgraphit nach DIN 1693		
3.1 GGG – 70		
GGG – 60	5,0	2,5
3.2 GGG – 50	4,0	2,0
3.3 GGG – 40	3,5	1,7
3.4 GGG – 40.3		
GGG – 35.3	2,4	1,2
4. Aluminium und Aluminiumlegierungen – Knetwerkstoffe	1,5	1,1

Tafel 3. Sicherheitsbeiwerte gegen Zugfestigkeit

Werkstoff und Ausführung	Sicherheitsbeiwert S für den Werkstoff bei Berechnungstemperatur	Sicherheitsbeiwert S' beim Prüfdruck
1. Grauguß nach DIN 1691		3,5
1.1 ungeglüht	9,0	
1.2 geglüht oder emailliert	7,0	
2. Kupfer und -legierungen einschließlich Walz- und Gußbronze		2,5
2.1 bei nahtlosen und geschweißten Behältern	3,5	
2.2 bei gelöteten Behältern	4,0	

Werte für die Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung mit 100. Sofern für die nicht genannten Werkstoffe in der nach AD-Merkblatt HP 0 Abschnitt 1.2 erforderlichen Vereinbarung keine anderen Werte festgelegt sind, ist $v = 1,0$ einzusetzen.

8.2 Für hartgelötete Verbindungen kann mit $v = 0,8$ gerechnet werden, falls nicht in der Verfahrensprüfung ein niedrigerer Wert festgelegt wird.

8.3 Weichgelötete Längsnähte sind nicht zulässig. Überlappt/weichgelötete Rundnähte an Kupfer sind bei einer Überlappungsbreite von mindestens $10 s_n$ bis zu einer Wanddicke von 6 mm und bis zu $D_n \cdot p \leq 2500$ mm bar zulässig. In diesem Fall ist für die Rundnaht $v = 0,8$ einzusetzen.

8.4 Bei weichgelöteten Verbindungen an Kupferblechen mit durchlaufender Lasche bei einer Laschenbreite $\geq 12 s_n$ auf beiden Seiten des Stoßes, einer Wanddicke $s_n \leq 4$ mm und einem zulässigen Betriebsüberdruck ≤ 2 bar kann ebenfalls $v = 0,8$ eingesetzt werden.

Seite 4 AD-Merkblatt B 0, Ausg. 1.95

9 Zuschläge

9.1 Zuschlag zur Berücksichtigung der Wanddickenunterschreitung

9.1.1 Bei ferritischen Stählen ist als Betrag des Zuschlages c_1 die nach den einschlägigen Maßnormen zulässige Minustoleranz in die Berechnung einzusetzen, sofern diese am fertigen Bauteil auftreten kann.

9.1.2 Bei austenitischen Stählen und Nichteisenmetallen bleiben Minustoleranzen unberücksichtigt. Für austenitische Bleche in Verbindung mit DIN EN 10029 als Maßnorm gilt dies nur für die Minustoleranzen bis zu Werten des unteren Abmaßes nach Klasse A, d. h. bei Verwendung von Blechen mit größeren Minustoleranzen ist nur der Differenzbetrag zur Klasse A zu berücksichtigen.

9.1.3 Bedingt der Herstellungsgang Wanddickenminderungen (z. B. bei gegossenen oder tiefgezogenen Bauteilen), so ist die mit $c_1 = 0$ errechnete erforderliche Wanddicke in der Zeichnung zu vermerken und als solche zu kennzeichnen.

9.2 Abnutzungszuschlag

9.2.1 Bei ferritischen Stählen beträgt der Abnutzungszuschlag $c_2 = 1$ mm. Er entfällt, wenn $s_p \geq 30$ mm beträgt. Er entfällt außerdem, wenn die Stähle ausreichend gegen Einflüsse der Beschickungsmittel geschützt sind, z. B. durch Verbleiung, Plattierung, Gummierung, Kunststoffüberzüge, nicht jedoch durch galvanische Überzüge. Bei Kunststoffüberzügen muß in jedem Fall die Eignung des Kunststoffes nachgewiesen sein.

9.2.2 Abweichend von Abschnitt 9.2.1 ist zwischen Hersteller und Betreiber ein höherer Zuschlag c_2 zu vereinbaren,

wenn die Beschickungsmittel stark korrodierend wirken oder die Behälter im späteren Betrieb im Innern nicht besichtigt werden können. Die Höhe des Zuschlages c_2 ist in diesen Fällen in der Zeichnung zu vermerken.

Bei bestimmten Korrosionseinflüssen kann es notwendig sein, neben der Verwendung geeigneter Werkstoffe und zweckentsprechender Konstruktionen die Höhe der Beanspruchung der mit den Medien in Berührung stehenden, auf Zug beanspruchten Druckbehälterwandungen zu verringern, um dadurch z. B. ein Aufreißen von Schutzschichten oder eine Spannungsrißkorrosion zu vermeiden.

9.2.3 Bei austenitischen Stählen und bei Nichteisenmetallen beträgt der Abnutzungszuschlag im allgemeinen $c_2 = 0$, es sei denn, daß zwischen dem Hersteller und dem Betreiber ein höherer Abnutzungszuschlag vereinbart wird. In diesem Falle muß er in der Zeichnung vermerkt sein.

10 Kleinste Wanddicke

10.1 Die in den AD-Merkblättern der Reihe B festgelegten kleinsten Wanddicken sind Nennwanddicken und müssen am fertigen Bauteil als Nennmaß vorhanden sein.

10.2 Abweichend von Abschnitt 10.1 dürfen die kleinsten Wanddicken unterschritten werden, wenn

- verfahrenstechnische Gründe es erfordern oder die Verwendung des Druckbehälters es zweckdienlich erscheinen läßt sowie
- die Formbeständigkeit nicht gefährdet ist und
- die Fertigung es ermöglicht.

DK 621.642-98.001.24:62-213.6-434.1

Ausgabe Januar 1995

Berechnung von Druckbehältern	Zylinderschalen unter äußerem Überdruck	AD-Merkblatt B 6																								
<p>Die AD-Merkblätter werden von den in der „Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter“ (AD) zusammenarbeitenden, nachstehend genannten sieben Verbänden aufgestellt. Aufbau und Anwendung des AD-Regelwerkes sowie die Verfahrensrichtlinien regelt das AD-Merkblatt G 1. Die AD-Merkblätter enthalten sicherheitstechnische Anforderungen, die für normale Betriebsverhältnisse zu stellen sind. Sind über das normale Maß hinausgehende Beanspruchungen beim Betrieb der Druckbehälter zu erwarten, so ist dieses durch Erfüllung besonderer Anforderungen Rechnung zu tragen.</p> <p>Wird von den Festlegungen dieses AD-Merkblattes abgewichen, muß nachweisbar sein, daß der sicherheitstechnische Maßstab dieses Regelwerkes auf andere Weise eingehalten ist, z. B. durch Werkstoffprüfungen, Versuche, Spannungsanalyse, Betriebserfahrungen.</p> <p>Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau e. V. (FDDB), Düsseldorf Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e. V., Sankt Augustin Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI), Frankfurt/Main Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), Fachgemeinschaft Verfahrenstechnische Maschinen und Apparate, Frankfurt/Main Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), Düsseldorf VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e. V., Essen Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e. V. (VdTÜV), Essen</p> <p>Die AD-Merkblätter werden durch die Verbände laufend dem Fortschritt der Technik angepaßt. Anregungen hierzu sind zu richten an den Herausgeber:</p> <p>Verband der Technischen Überwachungs-Vereine e. V., Postfach 10 38 34, 45038 Essen.</p>																										
<p>Inhalt</p>																										
<p>1 Geltungsbereich</p> <p>2 Allgemeines</p> <p>3 Formelzeichen und Einheiten</p> <p>4 Sicherheitsbeiwert</p> <p>5 Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen</p>	<p>6 Verschwächungen</p> <p>7 Berechnung</p> <p>8 Kleinste Wanddicke</p> <p>9 Schrifttum</p> <p>Anhang 1: Erläuterungen</p>																									
<p>1 Geltungsbereich</p> <p>Die nachstehenden Berechnungsregeln gelten für glatte Zylinderschalen als Druckbehältermäntel und für Rohre unter äußerem Überdruck, bei denen das Verhältnis $D_3/D_1 \leq 1,2$ beträgt. Bei Rohren mit $D_3 \leq 200$ mm gelten sie darüber hinausgehend bis zu einem Verhältnis $D_3/D_1 = 1,7$. Die Zylinderschalen können ohne oder mit Versteifungen ausgeführt sein.</p> <p>Der Druck muß auf den gesamten Umfang wirken. Größere als vom äußeren Überdruck herrührende Axialbelastungen müssen zusätzlich z. B. nach [10] berücksichtigt werden.</p> <p>2 Allgemeines</p> <p>2.1 Dieses AD-Merkblatt ist nur im Zusammenhang mit dem AD-Merkblatt B 0 anzuwenden.</p> <p>Bei Wärmeaustauscherröhren ist der Abnutzungszuschlag $\alpha_2 = 0$, falls nicht besondere Vereinbarungen zwischen Hersteller und Betreiber getroffen sind.</p> <p>2.2 Bei Druckbehältern aus Grauguß ist eine Berechnung auf Innendruck unter Verwendung der Sicherheitsbeiwerte nach Tafel 1 ausreichend, wobei für den Innendruck der äußere Überdruck einzusetzen ist.</p>	<p>3 Formelzeichen und Einheiten</p> <p>Über die Festlegungen des AD-Merkblattes B 0 hinaus gilt:</p> <table border="0"> <tr> <td>b_m</td> <td>zweifache Abklinglänge</td> <td>in mm</td> </tr> <tr> <td>l</td> <td>Zylinderlänge zwischen wirksamen Versteifungen</td> <td>in mm</td> </tr> <tr> <td>l_m</td> <td>mittragende Schalenlänge</td> <td>in mm</td> </tr> <tr> <td>p_e</td> <td>elastischer Beuldruck der Versteifung</td> <td>in bar</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>hier: Ablachung</td> <td>in mm</td> </tr> <tr> <td>r</td> <td>Unrundheit</td> <td>in ‰</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>Berechnungshilfsgröße</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>Berechnungshilfsgröße</td> <td>-</td> </tr> </table> <p>4 Sicherheitsbeiwert</p> <p>4.1 Die Sicherheitsbeiwerte gegen plastisches Verformen sind der Tafel 1 zu entnehmen. Der Sicherheitsbeiwert S^* bei Prüfdruck ist AD-Merkblatt B 0 zu entnehmen.</p> <p>4.2 Der Sicherheitsbeiwert gegen elastisches Einbeulen trägt unabhängig vom Werkstoff $S_K = 3,0$ und gilt für $r \leq 1,5 ‰$, wobei r nach Abschnitt 7.3.4 zu ermitteln ist.</p>	b_m	zweifache Abklinglänge	in mm	l	Zylinderlänge zwischen wirksamen Versteifungen	in mm	l_m	mittragende Schalenlänge	in mm	p_e	elastischer Beuldruck der Versteifung	in bar	q	hier: Ablachung	in mm	r	Unrundheit	in ‰	G	Berechnungshilfsgröße	-	H	Berechnungshilfsgröße	-	
b_m	zweifache Abklinglänge	in mm																								
l	Zylinderlänge zwischen wirksamen Versteifungen	in mm																								
l_m	mittragende Schalenlänge	in mm																								
p_e	elastischer Beuldruck der Versteifung	in bar																								
q	hier: Ablachung	in mm																								
r	Unrundheit	in ‰																								
G	Berechnungshilfsgröße	-																								
H	Berechnungshilfsgröße	-																								
<p>Ersatz für Ausgabe November 1992: = Änderungen gegenüber der vorangehenden Ausgabe</p>																										

Seite 2 AD-Merkblatt B 6, Aug. 195

Tafel 1. Sicherheitsbeiwerte (siehe Abschnitt 4.1)

Werkstoff	Sicherheitsbeiwert gegen Streck-, Dehngrenze oder Zeitstandfestigkeit
1. Walz- und Schmiedestähle	1,6
2. Stahiguß	2,0
3. Gußeisen mit Kugelgraphit nach DIN 1693	
3.1 GGG-70	5,0
3.2 GGG-50	4,0
3.3 GGG-40	3,5
3.4 GGG-40.3 GGG-35.3	2,4
4. Aluminium und dessen Legierungen – Knetwerkstoffe	1,6
	Sicherheitsbeiwert gegen Zugfestigkeit
5. Grauguß nach DIN 1691	6,0
6. Kupfer und dessen Legierungen einschließlich Walz- und Gußbronze	4,0

Bei $u > 1,5\%$ ist $S_K = 2,25 + 0,5 u$. Wird ein höherer Prüfdruck als $1,3 p$ gefordert, so muß S_K' mindestens $2,2 S_K/3$ betragen.

5 Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen

Unabhängig von dem Prüfumfang nach AD-Merkblatt HP 0 Übersichtstafel 1 bleibt die Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in Fügeverbindungen bei Berechnung auf Außendruck unberücksichtigt.

6 Verschwächungen

Ausschnitte sind nach AD-Merkblatt B 9 mit p als Innendruck zu berechnen. Ausschnitte in Doppelmänteln, die durch Stützen gegenseitig versteift sind, können bei der Berechnung der Wanddicke unberücksichtigt bleiben.

7 Berechnung

7.1 Allgemeines

7.1.1 Die Berechnung ist gegen elastisches Einbeulen nach Abschnitt 7.2 und gegen plastisches Verformen nach Abschnitt 7.3 durchzuführen. Der errechnete kleinste Wert von p_1 und p_2 ist maßgebend für die Bestimmung des zulässigen äußeren Überdruckes.

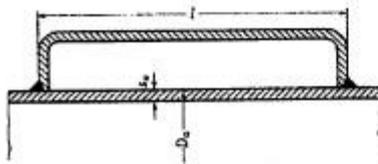


Bild 1. Doppelmantel

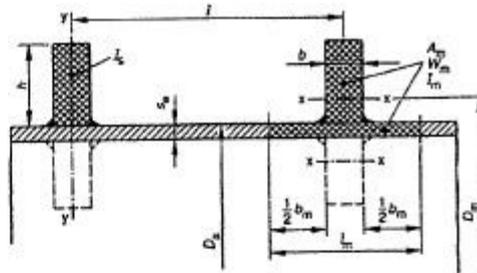


Bild 2. Ringe mit Rechteckquerschnitt als Versteifung

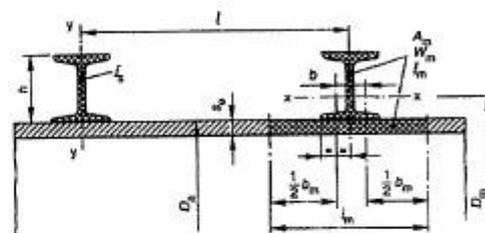


Bild 3. Profilinge als Versteifung

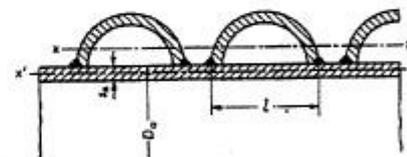


Bild 4. Halbrunde Heizkanäle als Versteifung

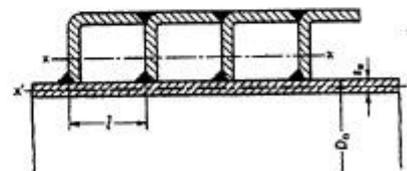


Bild 5. Eckige Heizkanäle als Versteifung

7.1.2 Die Beullänge l ist die Länge des Doppelmantels (siehe Bild 1) oder die Entfernung zwischen zwei wirksamen Versteifungen (siehe Bilder 2 bis 5). Bei Behältern mit gewölbten Böden beginnt die Beullänge am Übergang vom zylindrischen Bord zur Krümpe.

$$p_1 = \frac{E}{S_K} \left\{ \frac{20}{(n^2-1) \left[1 + \left(\frac{n}{Z} \right)^2 \right]^2} \cdot \frac{s_0 - c_1 - c_2}{D_0} + \frac{80}{12(1-\nu^2)} \cdot \left[n^2 - 1 + \frac{2n^2 - 1 - \nu}{1 + \left(\frac{n}{Z} \right)^2} \right] \cdot \left[\frac{s_0 - c_1 - c_2}{D_0} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

Rohrbögen gelten nicht als wirksame Verstärkungen [9]. Desgleichen gelten Kompensatoren in der Regel nicht als wirksame Verstärkungen. Wegen der fehlenden Stützung an dieser Seite der Zylinderschale gelten die Formeln (1), (4), (5) bzw. (6) nicht. Die Berechnung solcher Zylinderschalen kann konservativ nach Formel (3) erfolgen.

7.2 Berechnung gegen elastisches Einbeulen

7.2.1 Die Berechnung erfolgt nach Formel (1), wobei $Z = 0,5 \cdot \frac{\pi \cdot D_0}{l}$ und

- a) n ganzzahlig
- b) $n \geq 2$
- c) $n > Z$

so zu wählen sind, daß p_1 zum kleinsten Wert wird. n bedeutet die Anzahl der Einbeulwellen, die beim Versagen auf dem Umfang auftreten können. Die Anzahl der Einbeulwellen kann nach folgender Näherungsgleichung abgeschätzt werden [5]:

$$n = 1,63 \cdot \sqrt[4]{\frac{D_0^3}{l^2 (s_0 - c_1 - c_2)}} \quad (2)$$

7.2.2 Die erforderliche Wanddicke s kann auch nach Bild 6 für gebräuchliche Abmessungen bestimmt werden. Dieses Bild gilt für eine Querkontraktionszahl $\nu = 0,3$. Bei wesentlich anderen Querkontraktionszahlen ist nach Formel (1) zu rechnen.

7.2.3 Für Rohre kann die Berechnung auch nach Formel (3) erfolgen.

$$p_1 = \frac{E}{S_K} \cdot \frac{20}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{s_0 - c_1 - c_2}{D_0} \right)^3 \quad (3)$$

7.3 Berechnung gegen plastisches Verformen

7.3.1 Bei $\frac{D_0}{l} \leq 5$ gilt Formel (4)

$$p_2 = \frac{20 \cdot K}{S} \cdot \frac{s_0 - c_1 - c_2}{D_0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1,5 \nu \cdot \left(1 - 0,2 \frac{D_0}{l} \right) \cdot D_0}{100 (s_0 - c_1 - c_2)}} \quad (4)$$

7.3.2 Die erforderliche Wanddicke s kann nach Bild 7 für gebräuchliche Abmessungen und mit einer Unrundheit $\nu = 1,5\%$ unmittelbar bestimmt werden.

Für Rohre mit größeren Unrundheiten kann die erforderliche Wanddicke s vereinfachend auch nach Bild 8 bestimmt werden.

7.3.3 Bei $\frac{D_0}{l} > 5$ ist der größere der nach den Formeln (5) und (6) ermittelte Druck für die Festlegung des zulässigen äußeren Überdruckes maßgebend.

$$p_2 = \frac{20 \cdot K}{S} \cdot \frac{s_0 - c_1 - c_2}{D_0} \quad (5)$$

$$p_2 = \frac{30 \cdot K}{S} \cdot \left(\frac{s_0 - c_1 - c_2}{l} \right)^2 \quad (6)$$

Formel (6) ist vor allem bei kleinen Stützweiten (z. B. bei Heizkanälen nach den Bildern 4 und 5) maßgebend.

7.3.4 Für die Unrundheit ν in % gelten bei Ovalität

$$\nu = 2 \cdot \frac{D_{1, \max} - D_{1, \min}}{D_{1, \max} + D_{1, \min}} \cdot 100 \quad (7)$$

bei Abflachung (siehe Bild 9)

$$\nu = \frac{4}{D_0} \cdot q \cdot 100 \quad (8)$$

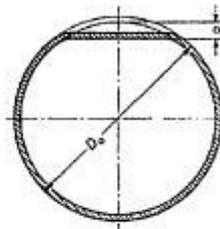


Bild 9. Abflachung q

Die maximalen und minimalen Durchmesser $D_{1, \max}$ bzw. $D_{1, \min}$ ergeben sich aus den Herstellungsbedingungen (zulässige Unrundheiten siehe AD-Merkblatt HP 1).

Bei Rohren kann die Unrundheit nach Formel (7) mit dem maximalen und minimalen Außendurchmesser ermittelt werden. Die Durchmesser ergeben sich aus den in den Normen festgelegten Technischen Lieferbedingungen.

7.4 Verstärkungen

7.4.1 Als wirksame Verstärkungen können Abschlußböden wie z. B. nach außen gewölbte Böden oder Wärmeaustauscherböden, die durch die Rohre und den Mantel gegenseitig verankert sind, angesehen werden. Das gilt auch für die Ausführungen nach den Bildern 2 und 3, wenn die Bedingungen der Formeln (9) und (10) in Verbindung mit den Formeln (11) und (12) eingehalten sind.

Für die Ermittlung der geometrischen Größen A_m , W_m und I_m (siehe Bilder 2 und 3) ist zunächst die mittragende Schalenbreite l_m nach Formel (12) zu bestimmen. Das Flächenträgheitsmoment I_m und das Widerstandsmoment W_m sind auf die zur Mantelachse parallele Schwerpunktschwerachse des Querschnittes zu beziehen (siehe Achse $x-x_1$ in den Bildern 2 und 3), der sich aus dem Querschnitt der Verstärkung und dem mittragenden Teil der Schale mit der Länge l_m zusammensetzt. \bar{D}_m ist der dazugehörige Schwerpunktdurchmesser.

$$p \cdot S_K < p_0 \quad (9)$$

$$\frac{p \cdot I_m \cdot D_0}{20 \cdot A_m} + \frac{p \cdot l \cdot D_0^2}{8000 \cdot W_m} \cdot \frac{\nu}{1 - S_K \cdot p / p_0} \leq \frac{K}{S} \quad (10)$$

$$\text{mit } p_0 = \frac{240 \cdot E \cdot I_m}{(1 - \nu^2) \cdot (D_0 - s_0 + c_1 + c_2) \cdot D_m^2 \cdot l} \quad (11)$$

$$\text{und } l_m = b_m + b = 1,1 \cdot \sqrt{D_0 \cdot (s_0 - c_1 - c_2)} + b \quad (12)$$

Seite 4 AD-Merkblatt B 6, Ausg. 1.95

wobei für die mittragende Länge l_m nicht mehr als die Länge l eingesetzt werden darf. Für K ist der Festigkeitskennwert des Versteifungsringes einzusetzen.

Schmale, hohe Versteifungen gemäß Bild 2 können ausknicken; deshalb sollte die Höhe der Versteifung die achtfache Breite nicht überschreiten. Bei Profilen nach Bild 3 ist das erforderliche, auf die Schwerpunktschwerachse $y - y$ bezogene Flächenträgheitsmoment abhängig von der Profilhöhe h und

$$\text{beträgt } I_3 \geq \frac{h^4}{3000}$$

7.4.2 Die versteifende Wirkung von Heizkanälen (siehe Bilder 4 und 5) kann bei der Berechnung des ganzen Mantels berücksichtigt werden. In Formel (1) wird dann der zulässige Druck im Verhältnis der Flächenträgheitsmomente mit und ohne Heizkanäle (bezogen auf die jeweilige Schwerpunktschwerachse $x - x$ bzw. $x' - x'$) und in Formel (4) im Verhältnis der Querschnittsflächen des Behälters mit und ohne Heizkanäle größer.

7.4.3 Werden Versteifungen durch unterbrochene Schweißnähte mit dem Mantel verbunden, müssen die Kehlnähte auf jeder Seite mindestens ein Drittel des Mantelumfanges erfassen. Die Teilung der Kehlnähte in Umfangsrichtung darf 300 mm, die Anzahl der Schweißnahtunterbrechungen darf $2n$ nicht unterschreiten. Die Anzahl n der Einbeulwellen ergibt sich aus Abschnitt 7.2.1.

8 Kleinste Wanddicke

8.1 Die kleinste Wanddicke nahtloser, geschweißter oder hartgelöteter Zylinderschalen wird mit 3 mm festgelegt.

8.2 Abweichend von Abschnitt 8.1 gilt für die kleinste Wanddicke bei Zylinderschalen aus Aluminium und dessen Legierungen 5 mm.

8.3 Ausnahmen siehe AD-Merkblatt B 0 Abschnitt 10.

8.4 Bei Wärmeaustauscherröhren darf die kleinste Wanddicke gemäß Abschnitt 8.1 und 8.2 unterschritten werden.

9 Schrifttum

- [1] Hütte I., 28. Auflage, S. 953. Verlag Ernst und Sohn, Berlin.
- [2] Meincke, H.: Berechnung und Konstruktion zylindrischer Behälter unter Außendruck. Konstruktion 11 (1959) Nr. 4, S. 131/38.
- [3] v. Mises, R.: Der kritische Außendruck zylindrischer Rohre. VDI-Z 58 (1914) Nr. 19, S. 750/55.
- [4] Schwaigerer, S., u. A. Konjurg: Die Festigkeitsberechnung von Flammrohren. Konstruktion 2 (1950) Nr. 1, S. 17/23.
- [5] v. Reith, Th.: Unmittelbare Berechnung der Beulwellen in Gleichung (1) des AD-Merkblattes B 6. TÜ 12 (1971) Nr. 12, S. 362.
- [6] BS 5500 - Specification for unfired fusion welded pressure vessels, 1982; herausg. v. British Standards Institution.
- [7] Link, H.: Berechnung ringversteifter Bohrschachtverrohrungen aus Stahl in den USA. Der Stahlbau 9 (1981), S. 284/287.
- [8] Ebner, H.: Festigkeitsprobleme von U-Booten. Schiffstechnik, Forschungshefte für Schiffsbau und Schiffsmaschinenbau 14 (1967) H. 74, S. 95/113.
- [9] Meincke, H.: Rohre in Apparaten unter Außendruck. Chem.-Ing.-Technik 3 (1978), S. 215/17.
- [10] Deutscher Ausschuss für Stahlbau: Beulsicherheitsnachweise für Schalen, DAST-Richtlinie 013, Juli 1980.
- [11] Feder, G.: Zur Stabilität ringversteifter Rohre unter Außendruckbelastung. Schweizerische Bauzeitung, 89. Jahrgang, Heft 42 (21. 10. 1971), S. 1043/1051.

A.2. Datenblätter zu den Werkstoffeigenschaften von Al 99,0

	TECHNOTE	Hifi no.: SRON-U/TN/2000-001 Inst.no.: Issue: 1 Date: 14-04-2000 Page: 1 of 160
---	-----------------	---

Title: Engineering data of Metals used for space experiments under Cryogenic conditions

Prepared by: H.M. Jacobs



date: 20-04-2000

Distribution:

SRON-U: C. van Baren Z.N. van der Meij
P. Schreinemakers R. Schuurhof
H.Goulooze A. van der Horst
T. Bartels H.M. Jacobs

SRON-G: D. Beintema M. Eggens
J. Evers W. Luinge
G. Lange N. Whyborn
G.R. Ploeger K. Wildeman

Hogeschool Utrecht: M. Pallada

C.A. Brak

	TECHNOTE	Hifi no.: SRON-U/TN/2000-001 Inst.no.: Issue: 1 Date: 14-04-2000 Page: 21 of 160
---	-----------------	--

4.3 Aluminium 1100

4.3.1 General material data

4.3.1.1 Specifications

Country	Plate ; Sheet ; Strip	Rod ; tube ; Bar
USA	QQ-A-250/1 ASTM-B209 AMS-4001 ; AMS-4003	QQ-A-225/1 (Wire, rod, bar) ASTM-B211 AMS-4062
Germany	DIN 1712 Werkstof nr: 3.0205	DIN 1712 Werkstof nr: 3.0205
France	NF A 50-451	NF A 50-411

4.3.1.2 Typical composition

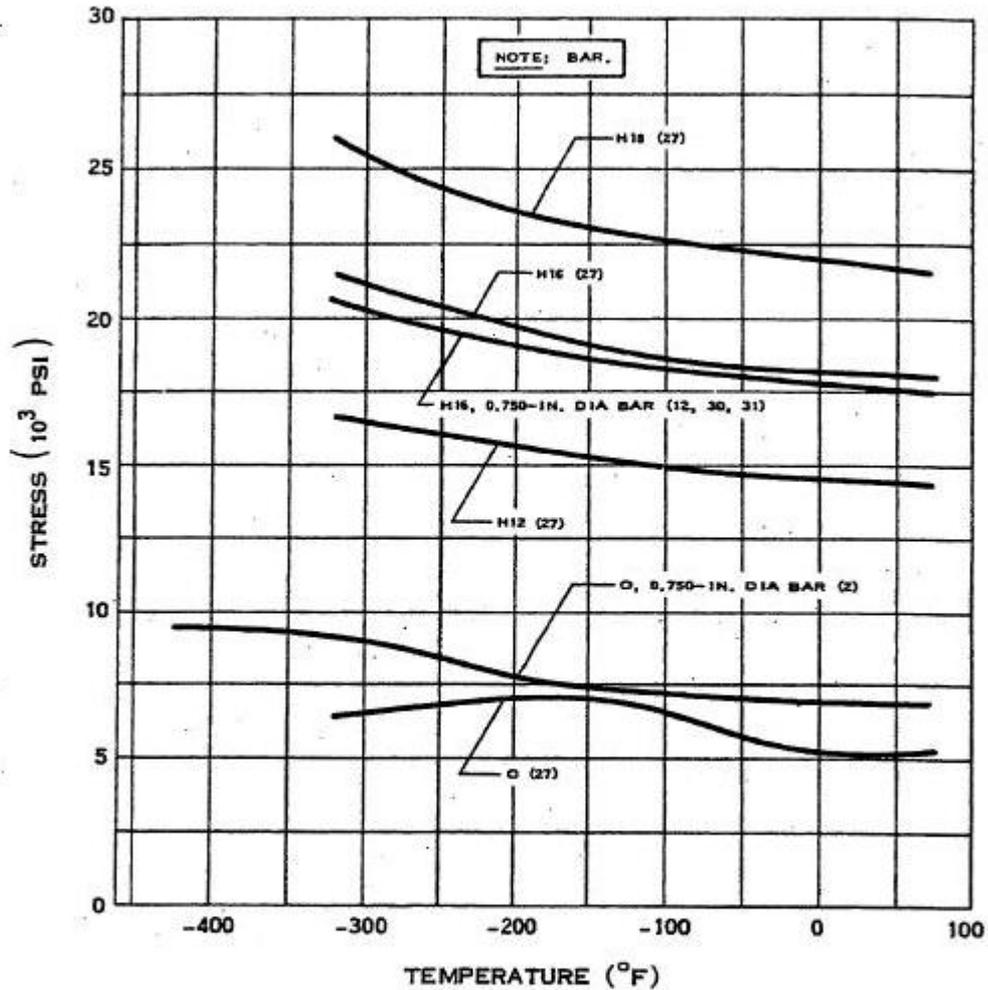
Material composition:	Al	>99.00%
	Fe	<0.95%
	Cu	0.05 - 0.20%
	Mn	0.05%
	Zn	0.10%

4.3.1.3 Corrosion

Corrosion: Material is rated to class "B" which requires a protective coating.
Reference: MSFC-HDBK-527

Stress corrosion: All conditions have a high resistance to stress corrosion cracking.
Reference: ESA-ECSS-Q-70-36A

	<p>TECHNOTE</p>	<p>HiFi no.: SRON-U/TN/2000-001 Inst.no.: Issue: 1 Date: 14-04-2000 Page: 23 of 160</p>
---	------------------------	---



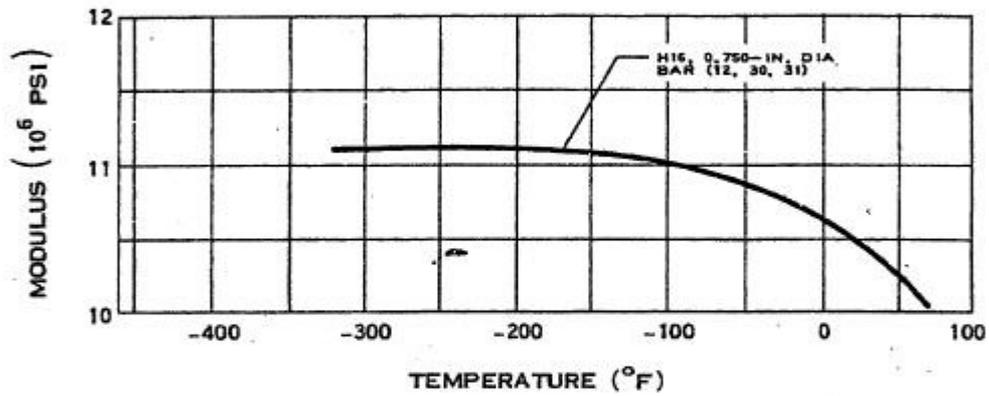
YIELD STRENGTH OF 1100 ALUMINUM

Unit conversion:

From:	To:	
10 ³ psi	MPa	Multiply by: 6.895
°F	K	$F + 459.67$ 1.8

	<p>TECHNOTE</p>	<p>Hifi no.: SRON-U/TN/2000-001 Inst.no.: Issue: 1 Date: 14-04-2000 Page: 25 of 160</p>
---	------------------------	---

4.3.2.2 E-modulus

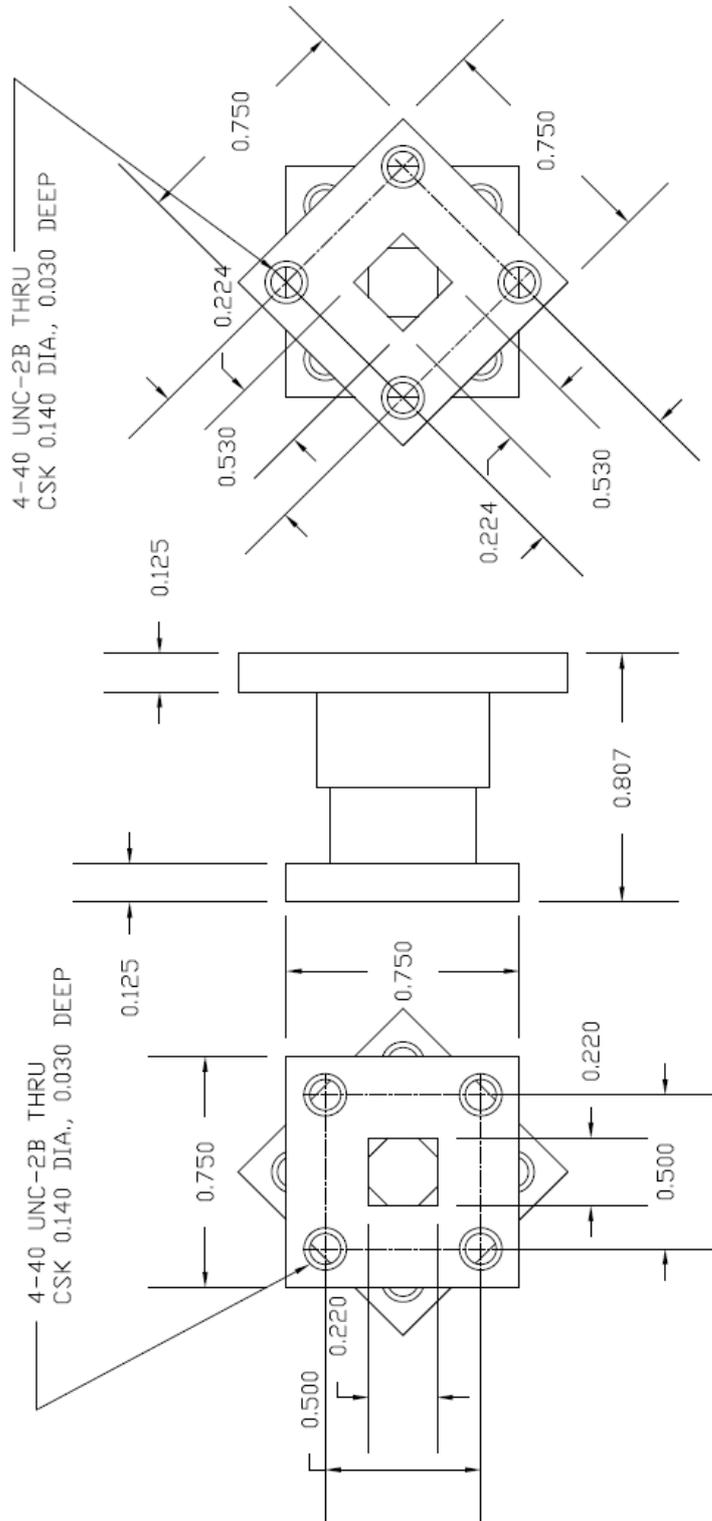


MODULUS OF ELASTICITY OF 1100 ALUMINUM

Unit conversion:

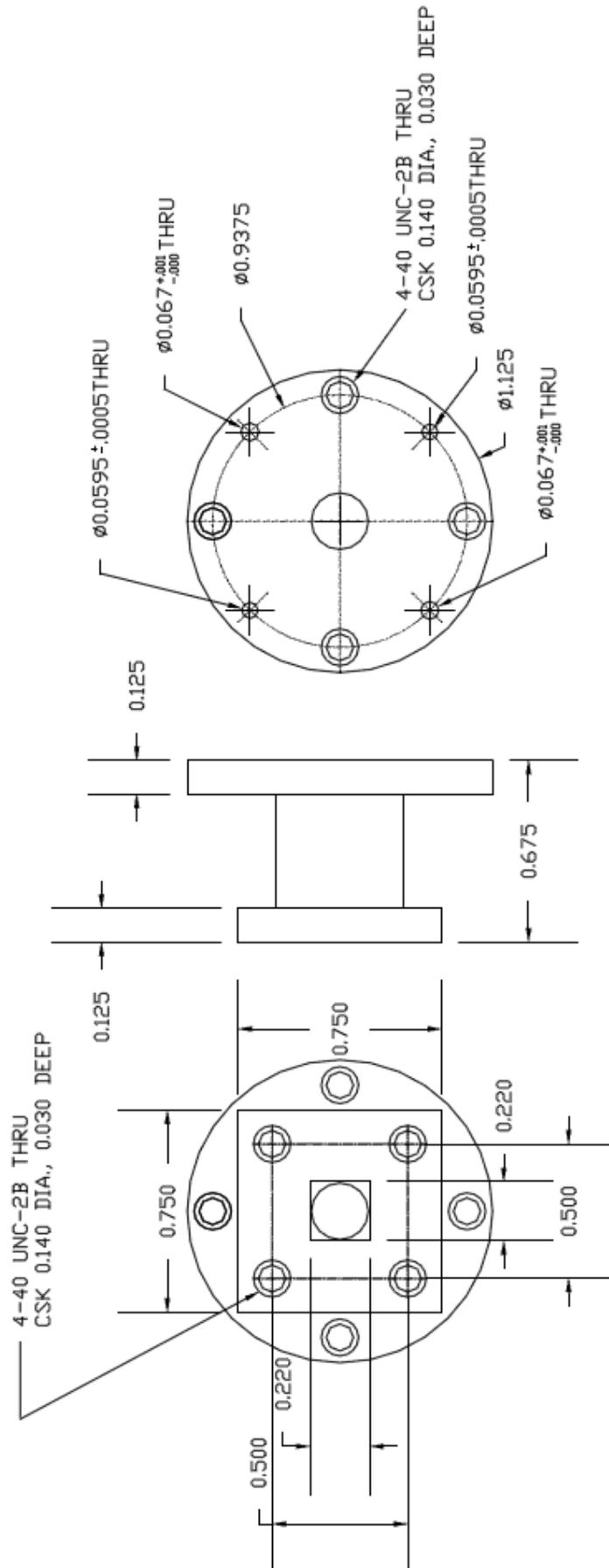
From:	To:	
10 ⁵ psi	MPa	Multiply by: 6895
°F	K	$\frac{F+459.67}{1.8}$

A.3. Konstruktionszeichnungen



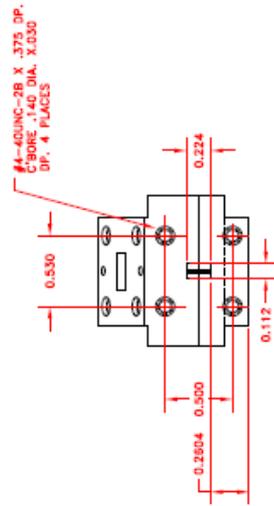
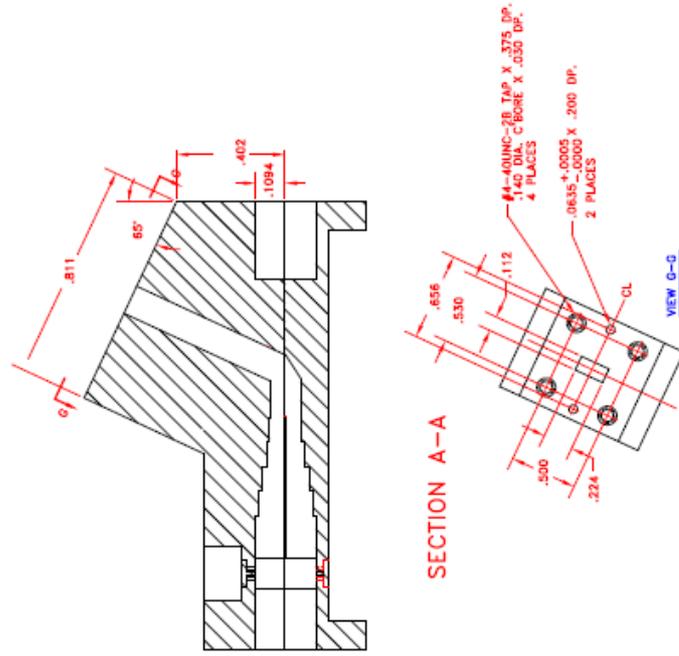
Q-BAND 45 DEG. TWIST

S. SRIKANTH, NRAD
DECEMBER 2008

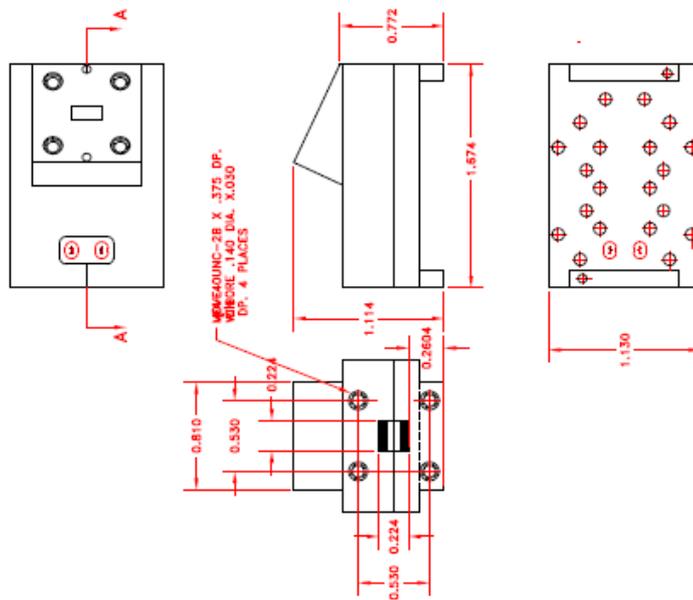


Q-BAND CIRCULAR/SQUARE TRANSITION

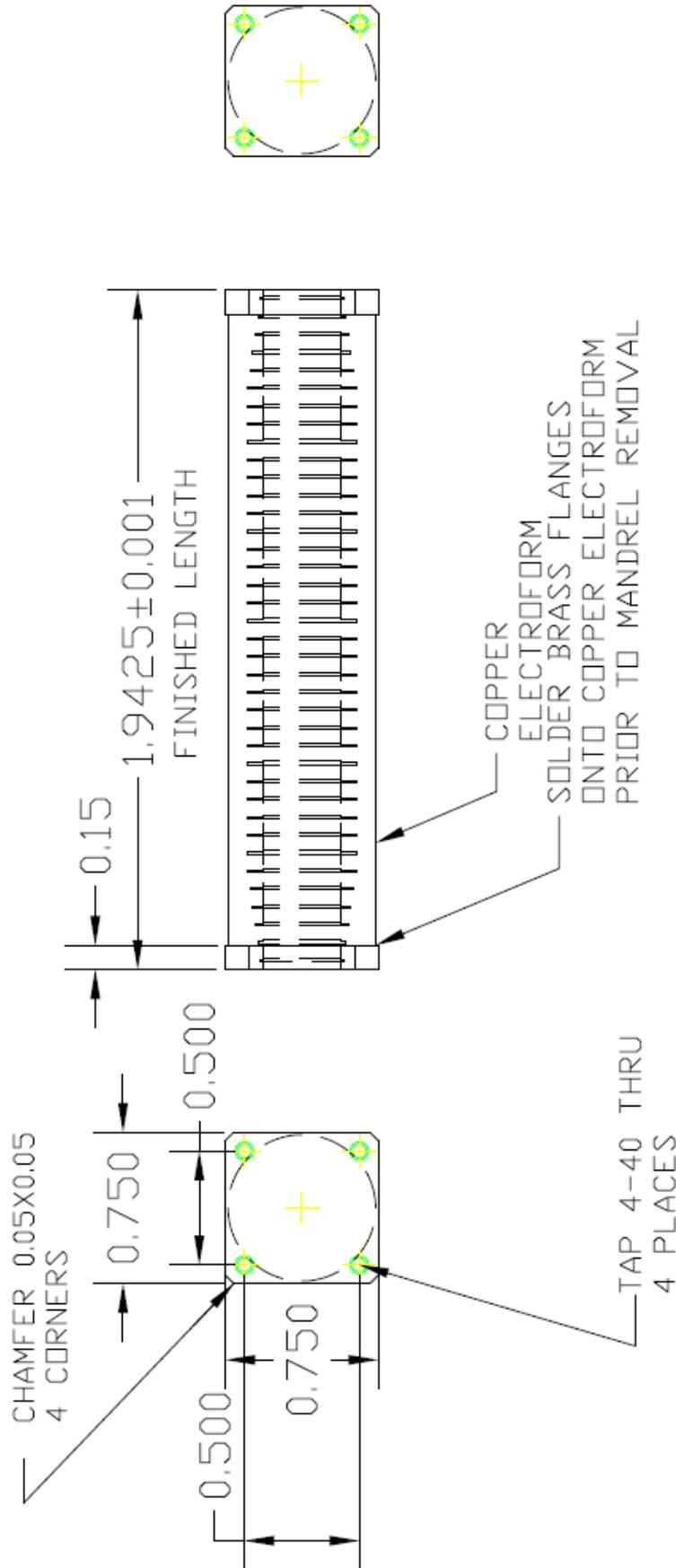
S. SRIKANTH, NRAD
DECEMBER 2008



ALL DIMENSIONS IN INCHES



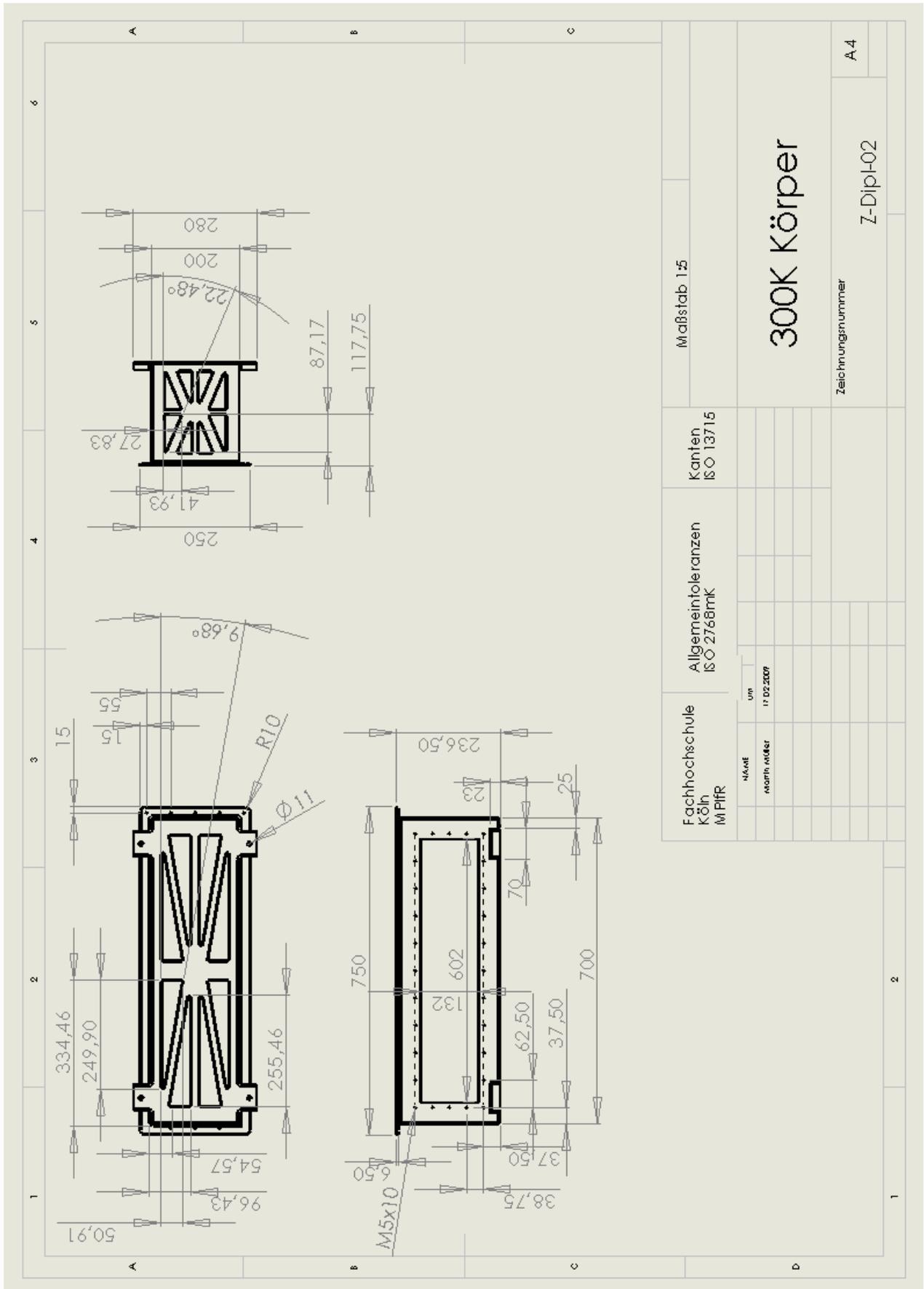
Q-BAND OMT
S. SRIKANTH, NRAO
DECEMBER 2008.

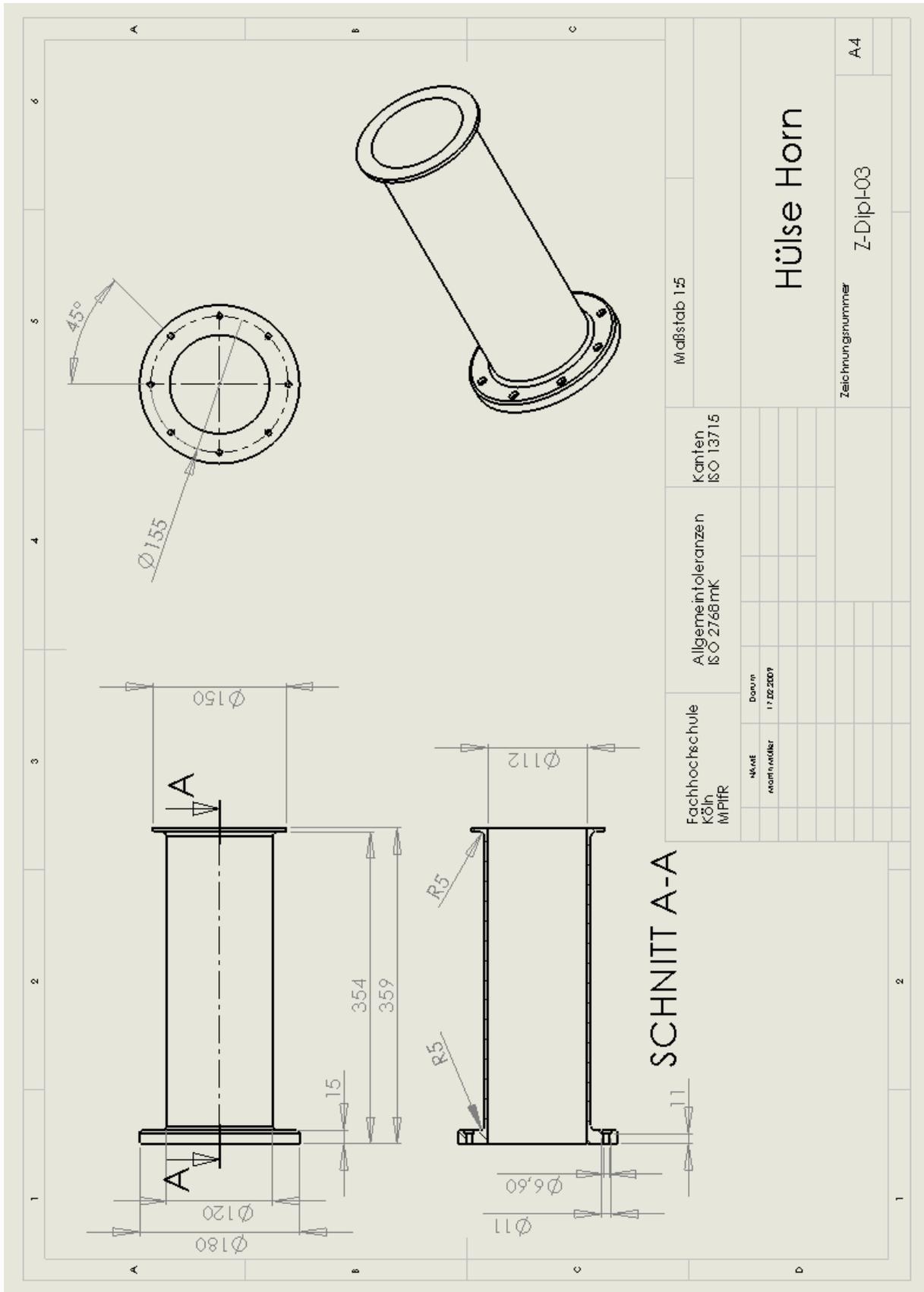


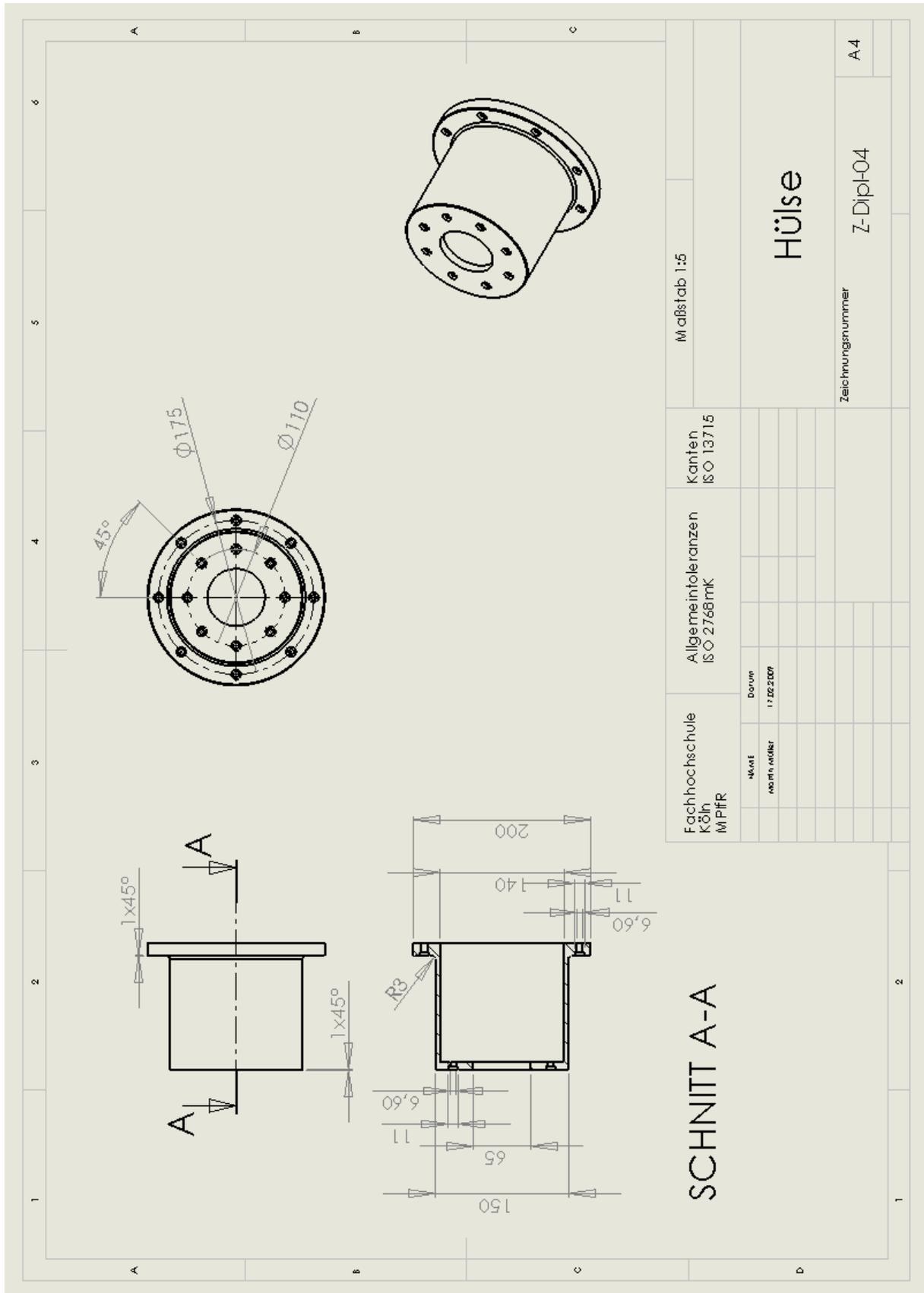
Q-BAND PHASE SHIFTER

S. SRIKANTH, NRAD
DECEMBER 2008

ALL DIMENSIONS IN INCHES

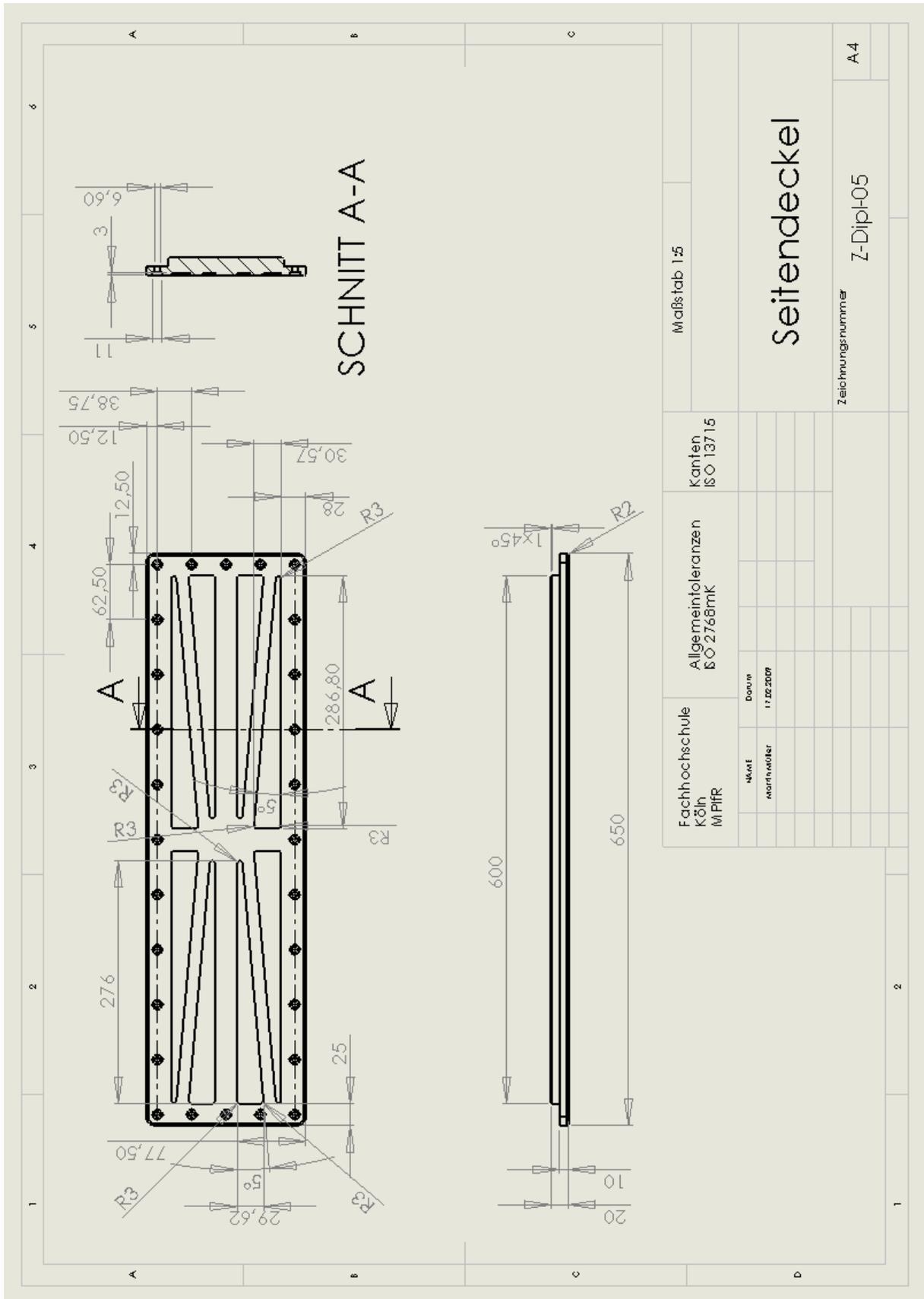


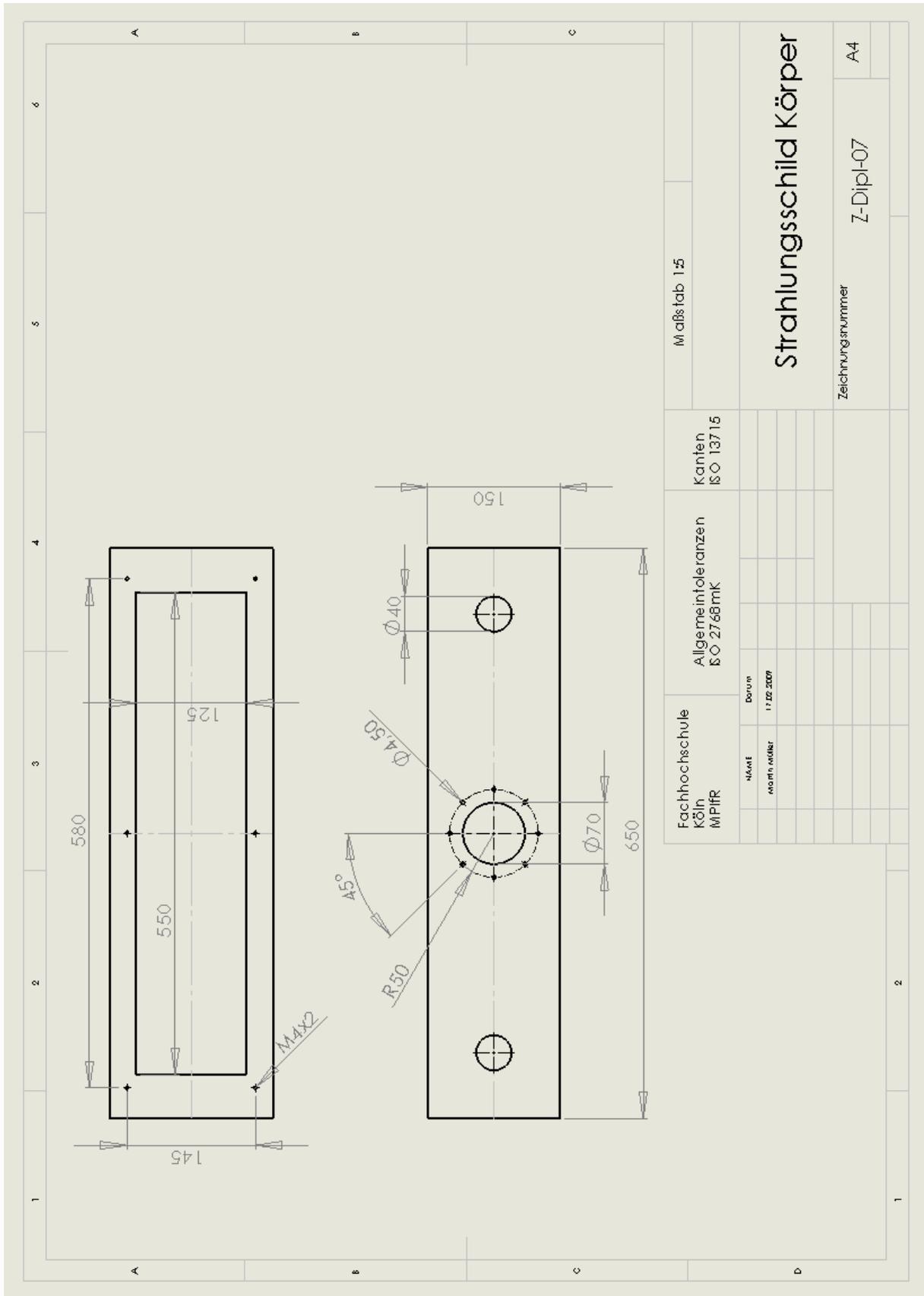


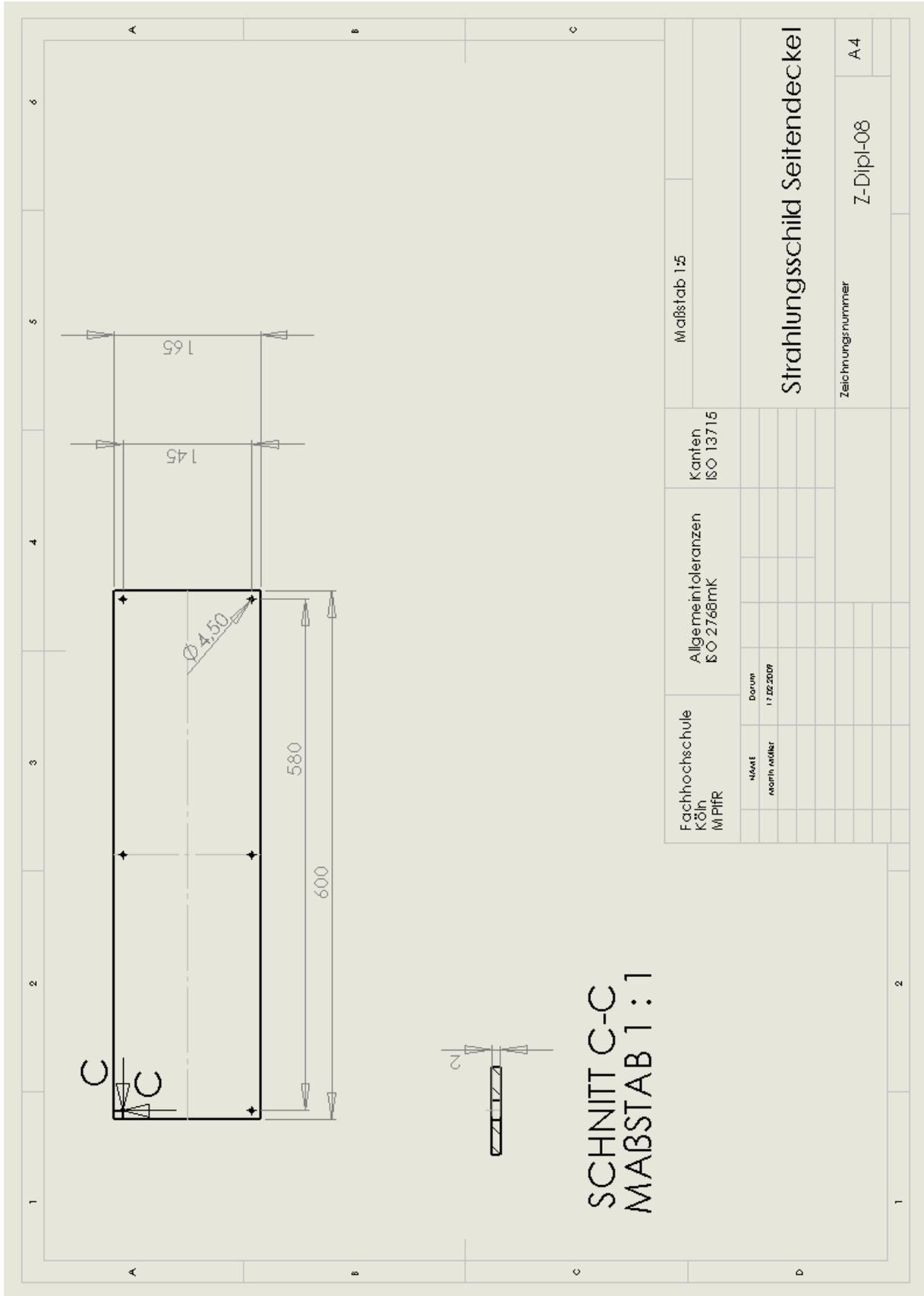


Fachhochschule Köln MPFR	Kanten ISO 13715	Maßstab 1:5
	Allgemeine Toleranzen ISO 2768 mK	Hülse
Max. E. 16.07.2007	Datum 17.02.2007	Zeichnungsnummer Z-Dip-I04
		A4

SCHNITT A-A







Fachhochschule Köln M PFR	Allgemeintoleranzen ISO 2768mK	Kanten ISO 13715	Maßstab 1:5
MAATE warth, reißer	Datum 17.02.2009		
Strahlungsschild Seitendeckel		Zeichnungsnummer	A4
		Z-Dipl-08	

A.4 Datenblätter

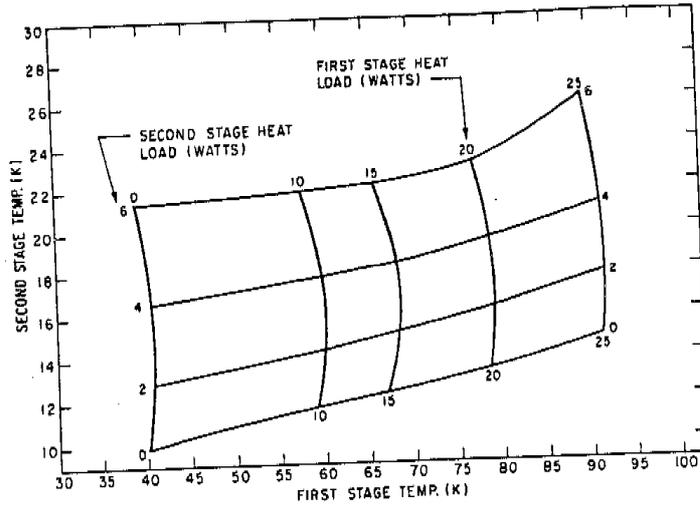


FIGURE 1-7. TYPICAL REFRIGERATION CAPACITY OF THE MODEL 350C CRYODYNE CRYOCOOLER (60 HZ)

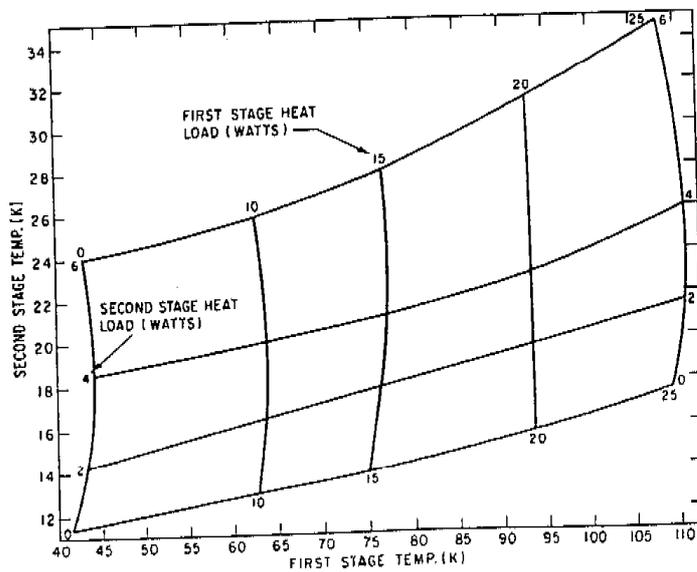


FIGURE 1-8. TYPICAL REFRIGERATION CAPACITY OF THE MODEL 350C CRYODYNE CRYOCOOLER (50 HZ)

EN AW-5083 (AlMg4,5Mn)

Legierungsangaben

Bezeichnung numerisch	EN AW-5083
Chemisches Symbol	EN AW-AlMg4,5Mn0,7
Werkstoff Nr. DIN	3.3547

Chemische Zusammensetzung nach EN573-3:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	übrige einz.	Ti	Rest
0.40	0.40	0.10	0.40-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	-	0.25	0.05	0.15	Al

Mechanische Eigenschaften

Zugfestigkeit	Rm	N/mm ²	275-350
Dehngrenze	Rp0,2	N/mm ²	125-190
Bruchdehnung	A5/A50	%	-/15
Brinellhärte	HB		75

Physikalische Eigenschaften

Zustand (in Wort/EN-Code)	weich	H111
Spezifisches Gewicht	g/cm ³	2.66
Elastizitätsmodul	kN/mm ²	71
Lin. Wärmeausdehnungskoeffizient (20-100°C)	10 ⁻⁶	23.8
Wärmeleitfähigkeit		105-120
Spezifische elektrische Leitfähigkeit (20°C)		15-17
Spezifischer elektrischer Widerstand (20°C)	nΩ x m	67-59
Schmelzintervall	°C	580-640

Spezifische Eigenschaften

Planheit der Ausgangsformate	2	mm/m nach EN-485-3/4
Formstabilität		gut
Bearbeitbarkeit		gut
Schweißbarkeit		sehr gut
Korrosionsbeständigkeit		sehr gut
Eignung für anodische Oxidation		sehr gut
Eignung für dekorative anodische Oxidation		bedingt geeignet
Eignung für Hartanodisierung		geeignet
Eignung für Hartmetallierung		gut
Verfügbare Dicken	6-500	mm

Verfügbarkeit

Formate mm	Verfügbare Dicken in mm																			
	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80	90	100	110
1020 x 2020	•															•				
1270 x 3020		•	•	•	•	•	•	•								•	•	•		
1520 x 3020	•					•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	120	130	140	150	160	180	200	220	230	240	250	260	280	300	325	350	380	400	450	480
1520 x 3020	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Anmerkung	Abmessungen ab 40 mm Dicke bei Lagermaterial nur mit Plus-toleranzen																			
Legende	• verfügbar ab Lager Häuselmann ◦ verfügbar Intern weniger Tage																			

Typische Anwendungen

- Maschinenbau / Seiten- und Grundplatten
- Gehäusekasten mit extremer Bearbeitung
- Schäumformen
- Schweisskonstruktionen
- Modellbau, Prototypenbau (wegen den erhältlichen Dicken bis 500 mm auch für Grossformen)

Besondere Hinweise / Vorteile

- AlMg4,5Mn ist im Zustand W28 (H111) spannungsarm und eignet sich besonders dort, wo extrem bearbeitet wrd und eine mittlere Festigkeit genügt
- Für Dauertemperatur- Anwendungen von > 70° C ist AlMg4,5Mn nicht geeignet.