

Entwicklung eines Kryostaten für LHe-Temperatur zum  
Einbau eines supraleitenden Strahltransformators mit  
SQUID.

Diplomarbeit

im  
Fachbereich Physikalische Technik

der  
Fachhochschule Wiesbaden

Angefertigt bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung  
in Darmstadt

von

Claus Hermann Schroeder

Referent: Dr. U. Wolfangel  
Korreferent: Dipl.-Phys. A. Peters

Rüsselsheim, Januar 1993

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	4
1. Einleitung	9
2. Grundlagen	12
2.1. Methoden der Kälteerzeugung	12
2.1.1. Kältemittel	12
2.1.2. Regenerativer Kälteprozeß nach Gifford-McMahon	16
2.2. Kryostatentechnik	20
2.3. Wärmetransportvorgänge	21
2.3.1. Konvektion	21
2.3.2. Wärmeleitung	22
2.3.3. Wärmestrahlung	27
3. Konstruktionstechnische Anforderungen	29
3.1. Das Detektorsystem mit SQUID	29
3.2. Vakuumtechnische und konstruktive Voraussetzungen	33
3.3. Anforderungsliste	34
4. Lösungsvarianten	36
4.1. Abgasgekühlter Strahlungsschirm	36
4.2. Refrigeratorgekühlter Strahlungsschirm	38
4.3. Auswahl	38
5. Dimensionierung	40
5.1. Wärmeleitung	40
5.1.1. Wärmeleitung durch die Aufhängung	40
5.1.2. Wärmeleitung durch die Durchführungen	44
5.1.3. Wärmeleitung durch die Meßleitungen	45
5.2. Wärmestrahlung	45
5.2.1. Wärmestrahlung durch den freien Durchgang auf den Strahlungsschirm	45

5.2.2.	Wärmestrahlung vom Strahlungsschirm auf den LHe-Bereich	49
5.2.3.	Wärmestrahlung von 300 K auf den LHe-Bereich	49
5.3.	Gesamtbelastung des LHe-Bades und LHe-Verbrauch	55
5.4.	Gesamtbelastung auf den Schirm, zu erwartende Schirmtemperatur und die Abkühlzeit	55
5.5.	Abkühlung des LHe-Bereiches	56
5.6.	Zugbelastung der Aufhängestäbe	56
6.	Beschreibung der Konstruktion	57
6.1.	Konstruktionsmerkmale	57
6.2.	Werkstoffe und Fertigungsverfahren	63
6.3.	Der Refrigerator	66
7.	Ein- und Anbauteile	69
8.	Ausblick	71
	Literaturverzeichnis	72
	Dank	74
Anhang A:		
	Konstruktionszeichnungen des Kryostaten	A1
Anhang B:		
	Konstruktionszeichnungen des Isolierrohrs	A2
Anhang C:		
	Zusammenbauzeichnung des Meßsystems	A3
Anhang D:		
	Bezugsquellenübersicht	A4
Anhang E:		
	Tabellen und Grafiken zu kryotechnischen Materialien	A5

### Zusammenfassung:

Die vorliegende Diplomarbeit beschreibt die Dimensionierung und die Konstruktion eines Kryostaten zum Einbau eines Strahlstrom-Transformators mit SQUID.

Der Einbau des Meßsystems ist in die Hochenergietransportstrecken der GSI geplant. Die Anforderungen, die eine solch hochauflösende Meßapparatur und die Vakuumanlagen der GSI an einen Kryostaten stellen, machten die Entwicklung einer speziellen Kryoapparatur notwendig.

Der entwickelte Badkryostat zeichnet sich vor allem durch einen freien Ionenstrahldurchgang (warmes Loch) mit einem Durchmesser von 100 mm aus. Die Standzeit von 4 Tagen ( bei 20 l LHe-Vorratsvolumen) wurde durch Anwendung aller bekannten konstruktiven Maßnahmen zur Verringerung von Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Konvektion, Kondensation und Kryosorption erreicht. Besondere Bedeutung kommt hierbei dem Strahlungsschirm zu, der mittels Kryo-Refrigerator auf einer Temperatur von etwa 50 K gehalten wird, und teilweise noch zusätzlich mit kaltem Heliumabgas gekühlt wird (Ausnutzung der Enthalpie).

Da die Kryoapparatur zunächst für Testzwecke verwendet werden soll -das Meßsystem befindet sich ebenfalls in der Entwicklung- wurde auf die vollständige Demontierbarkeit der Apparatur großer Wert gelegt.

Der Kryostat hat eine Länge von 1400 mm, eine Höhe von 1500 mm und ein Gesamtgewicht von etwa 250 kg. Die Heliumkammer hat ein Gesamtvolumen von etwa 30 l. Sie ist durch den Einsatz eines Isolators aus Al-Oxid-Keramik elektrisch unterbrochen, um Rückströme auf dem Strahlrohr zu verhindern ermöglichen (diese würden das Meßsystem beeinflussen). Die Al-Oxid-Keramik und die entsprechenden Oxid-Metall-Übergänge sind bei einem Betriebsdruck von etwa  $10^{-7}$  mbar und einer Temperatur von 4.2 K heliumdicht.

Der verwendete Kryo-Refrigerator besitzt eine Kälteleistung von 100 Watt bei 80 K und wird in einer vibrationsgedämpften Ausführung geliefert, um Infrarotstrahlungen zu minimieren.

Im Rahmen der Diplomarbeit waren erste Tests mit dem entwickelten und im Bau befindlichen Kryostaten nicht mehr möglich.

### Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

$A_i$	Fläche
$A_{mR}$	Fläche mit gemitteltem Radius
$a$	Temperaturleitfähigkeit
$a_K$	Beschleunigung des Kalkopfes
$b$	y-Achsenabschnitt
$C$	Gesamtwärmekapazität
$c_i$	Wärmekapazität des Körpers i
$c_K$	spezifische Wärmekapazität
$d$	Durchmesser
$dQ$	übertragene Wärmemenge
$E_F$	Fermienergie
$e$	Elektronenladung
$e(T_W, T_C)$	Faktor aus den Gasgesetzen, abhängig von $T_W$ und $T_C$
$F$	Kraft
$f$	Frequenz
$g$	Erdbeschleunigung
$h$	Planksches Wirkungsquant
$I$	Strom
$k$	Boltzmann-Konstante
$l$	Länge
$l_{el}$	mittlere freie Weglänge der Elektronen
$l_{ph}$	mittlere freie Weglänge der Phononen

$m$	Masse
$m_e$	Masse des Elektrons
$m_k$	kalte Masse
$N$	Windungszahl
$n$	Anzahl Phononen
$n_S$	Anzahl Strahlungsschilde
$n_i$	Flächennormale der Fläche $i$
$p$	Druck
$p_c$	Druck am kritischen Punkt
$p_m$	zeitlich gemittelter Druck
$p_n$	Druck auf der Niederdruckseite
$Q_c$	thermische Energie
$Q_0$	Wärmemenge, die an die Umgebung abgeführt wird
$q_{cond}$	thermische Leistung durch Kondensation
$q_{He}$	thermische Leistung auf das Heliumbad
$q_{HeL}$	thermische Leistung auf das Heliumbad durch Wärmeleitung
$q_K$	thermische Leistung durch Konvektion
$q_{Kalt}$	Kälteleistung
$\bar{q}_{Kalt}$	mittlere Kälteleistung
$q_L$	thermische Leistung durch Wärmeleitung
$q_{rad}$	thermische Leistung durch Wärmestrahlung
$q_S$	thermische Leistung auf den Schirm
$q_{SI}$	thermische Leistung durch die Superisolation
$q_{SL}$	thermische Leistung auf den Schirm durch Wärmeleitung
$q_{sorb}$	thermische Leistung durch Kryosorption
$\dot{q}_v$	je Volumen und Zeiteinheit durch innere Wärmequellen freigesetzte Wärmemenge
$q_{12}$	thermische Leistung, die durch den freien Durchgang eingestrahlt wird
$R$	Reynolds-Zahl
$R_i$	Wärmewiderstand
$R_S$	Wärmewiderstand des Schirms

$r$	Radius
$r_x$	Radius an der Stelle $x$
$S$	Steigung
$s$	spezifische Entropie
$T$	Temperatur
$T_C$	Temperatur des kalten Volumens
$T_c$	Temperatur am kritischen Punkt
$T_i$	Temperatur der Fläche $i$
$T_s$	Siedetemperatur
$T_W$	Temperatur des warmen Volumens
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$t$	Zeit
$t_0$	Abkühlzeit des Kaltkopfes ohne Bauteile im Vakuum
$u_S$	Schallgeschwindigkeit
$u_F$	mittlere Geschwindigkeit der thermischen Bewegung der Elektronen entsprechend der Fermienergie
$V_C$	kaltes Volumen
$V_w$	warmes Volumen
$x$	Ortskoordinate, Länge
$y$	Ortskoordinate, Länge
$\Delta_L$	Laplace-Operator
$\alpha$	Winkel
$\beta$	Winkel zwischen der Flächennormalen und dem Strahl

$\delta$	Abstand Heliumbad zum Schirm
$\delta_{SI}$	Dicke einer Lage Superisolation
$\epsilon_i$	Emissionskoeffizient der Oberfläche i
$\epsilon_R$	zusammengesetzter Emissionskoeffizient
$\Phi$	magnetischer Fluß
$\Phi_0$	magnetisches Flußquant
$\varphi_i$	Winkel
$\varphi_s$	Phasendifferenz
$\varphi_{21}$	Einstrahlwert
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{eff}$	Wärmeleitfähigkeit einer Superisolation
$\lambda_{ph}$	Gitterleitfähigkeit
$\bar{\lambda}$	gemittelte Wärmeleitfähigkeit
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Strahlungskoeffizient
$\sigma_{Grenz}$	0.2%-Dehngrenze
$\sigma_{zul}$	auf tretende Zugbelastung
$\nu$	Bemessungsfaktor

EP-GF	Epoxydharz, glasvaserferstärkt
ESR	Experimentier-Speicherring
FEM	Finite-Element Methode
FPM	Viton
FRS	Fragmentseparator
GSi	Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH
HeII	superfluides Helium
LHe	flüssiges Helium
LN <sub>2</sub>	flüssiger Stickstoff
PETP	Polyethylentriphosphat (Mylar)
PTFE	Polytetrafluoräthylen
SEETRAM	Secondary Electron Transmission Monitor
SI	Superisolation
SIS	Schwerionen-Synchrotron
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
UHV	Ultrahochvakuum
UNILAC	Universeller Ionen-Linearbeschleuniger
VI	Vakuumisolation

## 1. Einleitung

Die Diplomarbeit wurde bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) durchgeführt. Diese ist eine Großforschungseinrichtung der Bundesrepublik Deutschland und des Landes Hessen zum Zwecke der Grundlagenforschung auf den Gebieten Atom- und Kernphysik mit schnellen, schweren Ionen.

Abb. 1 zeigt den Grundriß der gesamten Anlage. Neben den beiden Beschleunigeranlagen UNILAC (Linearbeschleuniger) und SIS (Schwer-Ionen-Synchrotron) existiert ein Experimentier-Speicher-Ring (ESR).

Der UNILAC dient als Injektor für das Schwerionensynchrotron, welches eine Erweiterung des zugänglichen Energiebereichs von 20 MeV/u auf 2.0 GeV/u für Ionen mit

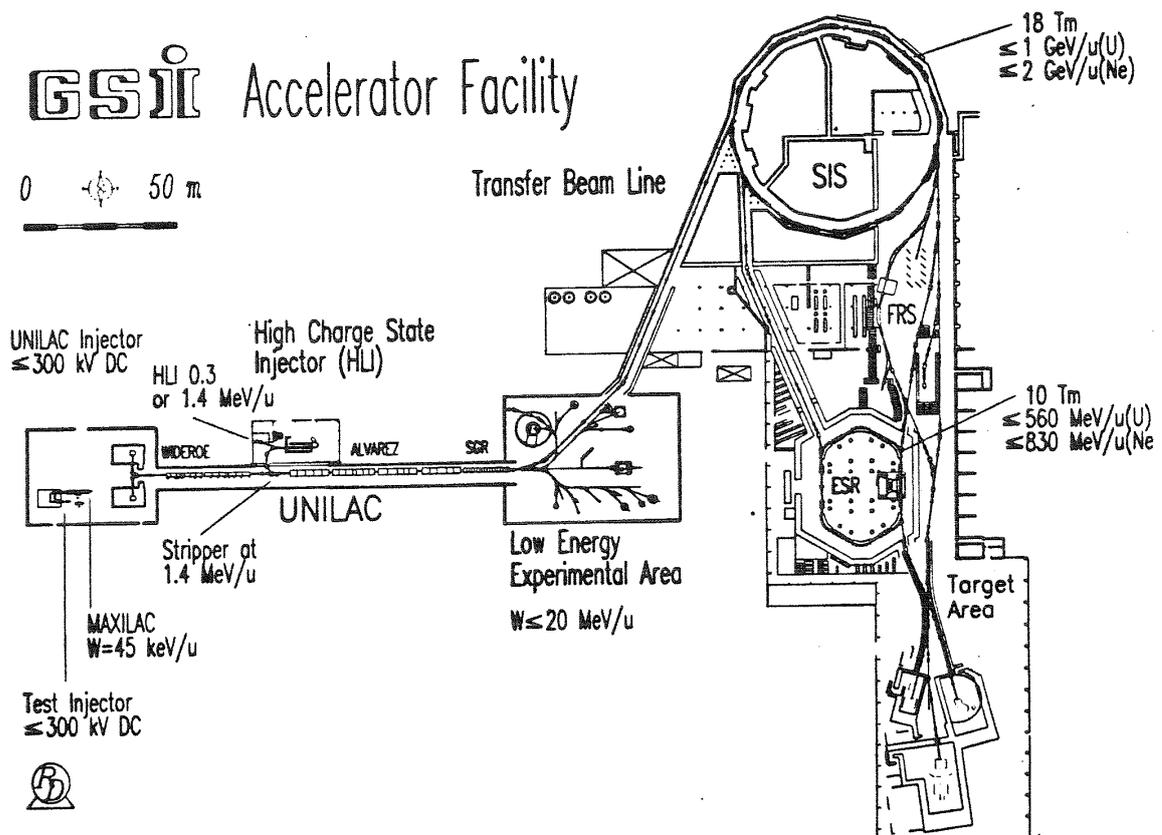


Abb.1: Grundriß der GSI /1/

einem Ordnungszahl-zu-Masse-Verhältnis von ca. 0.5 beziehungsweise für schwere Ionen bis zum Uran auf Energien von 1.0 GeV/u ermöglicht. Der Ionenstrahl aus dem SIS versorgt die verschiedenen Experimente in der Targethalle, kann aber auch in den ESR und den sogenannten Fragmentseparator (FRS) geleitet werden.

Für den Betrieb einer solchen Anlage ist es unumgänglich, genaue Kenntnisse über die einzelnen Parameter des Ionenstrahles zu haben. Als meßbare Parameter werden folgende herangezogen:

- Strahlstrom
- Strahlprofil
- Strahlposition
- Emittanz
- Energie

Betrachtet man die Strahlstrommessung (Abb.2), so stellt man fest, daß in einem Bereich zwischen  $10^{-12}A$  und  $10^{-6}A$  eine sinnvolle, das heißt kalibrierbare Messung nicht möglich ist.

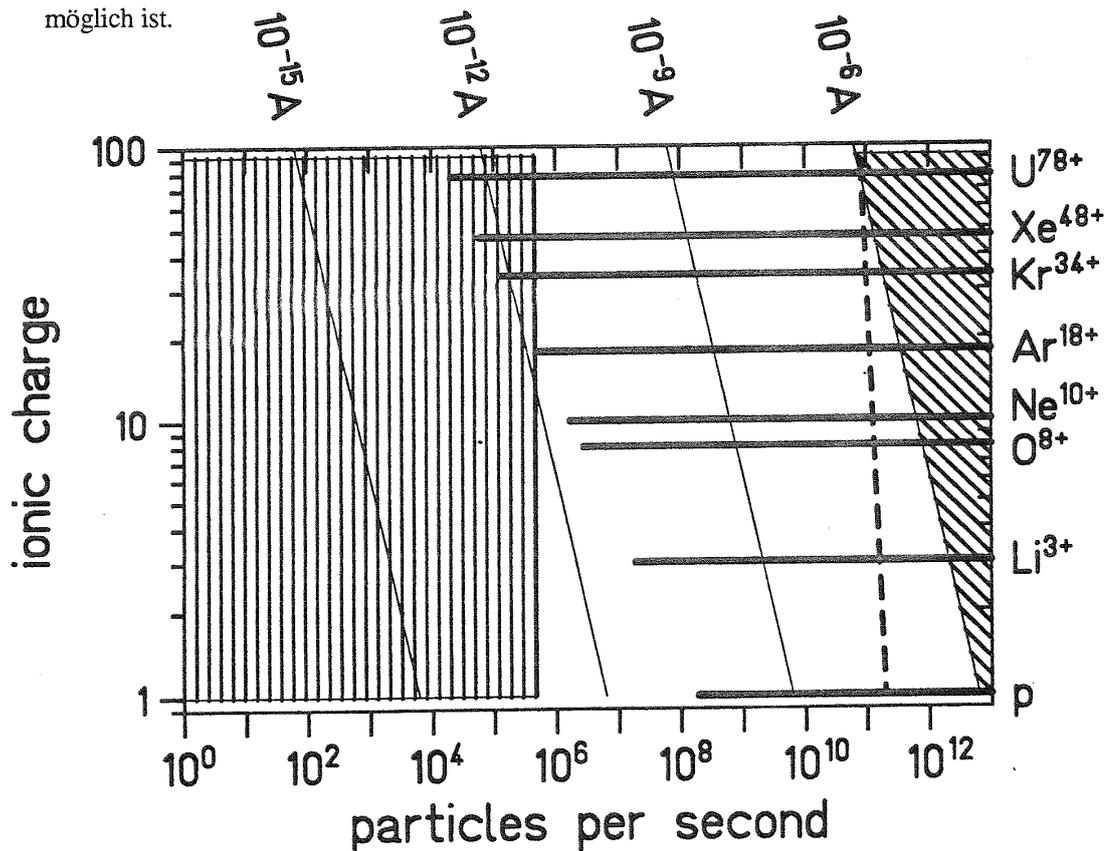


Abb.2: Einsatzbereiche verschiedener Detektoren für unterschiedliche Strahlionen und Intensitäten. Teilchenzähler (vertikale Schraffur), Strahlstromtransformatoren (diagonale Schraffur) und SEETRAMs (horizontale Balken)/2/

Im Bereich kleiner  $10^{-12}$  A arbeiten Szintillationszähler (vertikale Schraffur), im Bereich größer  $10^{-6}$  A haben sich normalleitende Strahltransformatoren bewährt (diagonale Schraffur). Die horizontalen Balken zeigen den Einsatzbereich der SEETRAMs (Secondary Electron Transmission Monitors) an. Diese sind jedoch nur schwer kalibrierbar und nicht zerstörungsarm. Ein weiterer Nachteil dieser SEETRAMs ist, daß man ihre Eigenschaften in Bezug auf Strahlenschäden und Lebensdauer bei Strahlströmen größer  $10^{-9}$  A nicht kennt. Dies bedeutet, daß für die Hochenergiestrahls-transportstrecken vom SIS zu den Meßplätzen zwischen  $10^{-6}$  A und  $10^{-12}$  A keine zuverlässige Strahlstrommessung möglich ist.

Bei der GSI wird versucht, Meßmethoden für diesen Bereich zu entwickeln. Zum einen sollen die Szintillatoren so modifiziert werden (Betrieb im Strommode), daß eine Messung bis  $10^{-9}$  A möglich wird /3,4/. Zum anderen wird ein Kryo-Strahlstrom-Komparator entwickelt, der eine Messung zwischen  $10^{-9}$  A und  $10^{-6}$  A möglich machen soll /5/ (Abb.3).

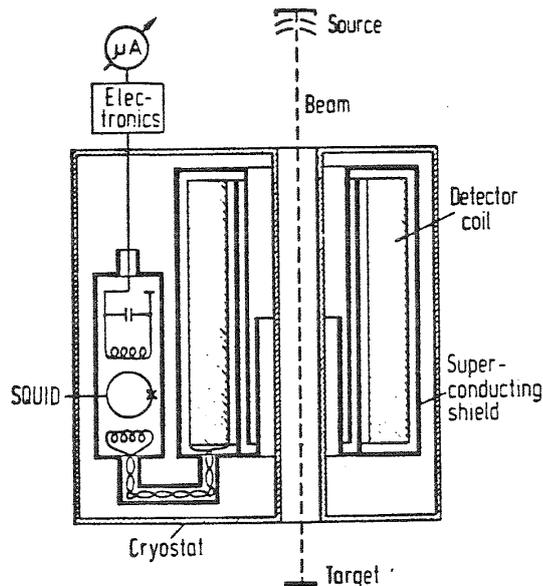


Abb.3: Detektorsystem, schematisch /6/

Ein solches Detektorsystem benötigt eine Kammer, die eine möglichst konstante Temperatur von 4.2 K bereitstellt. Die vorliegende Diplomarbeit befaßt sich mit der Entwicklung dieses Kryostaten. Eine vollständige Konstruktion wurde nötig, nachdem die Anforderungen, die ein solches Detektorsystem an den Kryostaten stellt, formuliert waren. Ziel ist es, diese Kammer so durchzukonstruieren, daß sie nicht nur als Testkryostat verwendbar ist, sondern auch in die Anlagen der GSI eingebaut werden kann ist. Der Anhang der Arbeit enthält die Konstruktionszeichnungen und Stücklisten sowie, eine Liste der zusätzlich verwendeten Baugruppen und Datenblätter.

## **2. Grundlagen**

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Kryotechnik nur insoweit beschrieben, wie sie zum Verständnis der Konstruktion notwendig sind. Die ausführliche Beschreibung des Gifford-McMahon-Prozesses steht im Zusammenhang mit dem an den Kryostaten angeflanschten Refrigerator.

### **2.1 Methoden der Kälteerzeugung**

Zur Erzeugung tiefer Temperaturen verwendet man drei grundlegende Verfahren:

1. Verdampfung
  - von verhältnismäßig hochsiedenden Kältemitteln, zum Beispiel in der Kaldampfmaschine,
  - von tiefsiedenden Kältemitteln unter Atmosphärendruck oder unter Vakuum, zum Beispiel im Badkryostaten;
2. gedrosselte Entspannung von Gasen wie beispielsweise im Joule-Thompson-Ventil oder Expansionsejektor;
3. adiabate Entspannung von Gasen unter Verrichtung von Arbeit wie in den Prozessen nach Brayton, Claude, Stirling, Gifford-McMahon und Vuilleumier.

Bei der Verdampfung stehen bereits verflüssigte Kältemittel zur Verfügung, zu deren Herstellung die Verfahren nach 2 oder 3 verwendet werden. Außer zur Herstellung von verflüssigten Kältemitteln können diese Verfahren auch zur direkten Kälteerzeugung am Objekt genutzt werden.

#### **2.1.1. Kältemittel**

Unter Kältemitteln versteht man verflüssigte Gase, deren normale Siedetemperatur  $T_S$  bei 1 bar unterhalb von 120 K liegt. In Tab. 1 sind sie nach steigender Siedetemperatur zusammengefaßt. In der Kryotechnik sind heute vor allem Helium (He) und Stickstoff ( $N_2$ ) von Bedeutung.

#### **Helium**

Helium ist ein Edelgas aus der ersten Gruppe des Periodensystems. Das Heliumatom ist kugelsymmetrisch und hat von allen Elementen den kleinsten Durchmesser. Es ist chemisch inaktiv, geruch- und farblos und als Gas unter Normaldruck ohne besondere Sicherheitsvorkehrungen verwendbar. Je nach Herkunft besteht Helium aus einem Gemisch zweier stabiler Isotope mit den Massen 4 ( $^4\text{He}$ , Häufigkeit 99,9999%) und 3 ( $^3\text{He}$ , Häufigkeit 0.00013%).

Tabelle 1 : Thermische und physikalische Eigenschaften von Kältemitteln /7/

		<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> He	p-H <sub>2</sub>	n-H <sub>2</sub>	Ne	N <sub>2</sub>	Luft	O <sub>2</sub>
relative Masse, bezogen auf 1 kmol	kg/mol	3,0160	4,0026	2,0159	2,0159	20,183	28,013	28,96	31,999
Siedetemperatur T <sub>S</sub> bei 1 bar	K	3,190	4,215	20,28	20,397	27,102	77,348	78,8 f 81,8 d	90,188
kritischer Punkt									
Temperatur T <sub>C</sub>	K	3,33	5,22	32,98	33,24	44,39	125,98	132,5	154,78
Druck p <sub>C</sub>	bar	1,17	2,50	12,93	12,98	27,22	33,94	37,7	50,82
R*T <sub>C</sub> p <sub>C</sub> /Mp <sub>C</sub>		3,308	3,262	3,304	3,179	3,250	3,426	3,528	3,008
T <sub>S</sub> /T <sub>C</sub>		0,96	0,81	0,61	0,61	0,61	0,62	0,60 f 0,62 d	0,59
Tripelpunkt			λ-Punkt						
Temperatur	K		2,173	13,81	13,956	24,555	63,148		54,361
Druck	mbar		50,52	70,4	72	433	126,12		1,52
Dichte									
Gas, 273 K, 1 bar	kg/m <sup>3</sup>	0,13448	0,17847	0,08985	0,08985	0,8999	1,2505	1,2928	1,4289
kritischer Punkt	kg/m <sup>3</sup>	41,8	69,5	31,4	30,1	483,5	311	350	380
Dampf bei T <sub>S</sub>	kg/m <sup>3</sup>	27,3	17,2	13,4	13,3	9,46	4,59	4,485	4,44
Flüssigkeit bei T <sub>S</sub>	kg/m <sup>3</sup>	58,9	124,8	70,8	70,8	1204	804,2	873,9	1140
fest bei T <sub>t</sub>	kg/m <sup>3</sup>			87			946		
am Nullpunkt T = 0 p = 0	kg/m <sup>3</sup>		146	88,4		1442	1137		1568
Vol. Gas 273 K, 1 bar aus 1 m <sup>3</sup> Flüssigkeit	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	438	699	788	788	1338	644	676	798
latente Wärme									
Verdampfung bei T <sub>S</sub>	kJ/kg	15,87 (bei 1,65 K)	20,91	446,5	448,3	87,20	199,1	205,2	213,1
Schmelzen bei T <sub>t</sub>	kJ/kg		5,22 (103 bar)	58,04	58,04	16,60	25,73		13,88
Verdampfungs- entropie	kJ/kmol K	14,9	19,9	44,4	44,4	64,6	72,0	74,0	74,5
spezifische Wärme									
Gas, 273 K, 1 bar	kJ/kgK	6,89	5,233		14,21	1,030	1,042	1,006	0,918
Dampf bei T <sub>S</sub>	kJ/kgK	6,89	5,23	10,31	10,31	1,030	1,039	1,002	0,909
Flüssigkeit bei T <sub>S</sub>	kJ/kgK		4,410	9,30	9,28	1,84	2,03	1,96	1,70
fest bei T <sub>t</sub>	kJ/kgK			2,90	3,03	1,302	1,691		1,444
Debye-Temperatur	K		29 (T < 0,7)			64 (T < 12)	68 (T < 20)		90,9 (T < 15)
c <sub>p</sub> /c <sub>v</sub> , 1 bar, 300 K	–	1,66	1,660	1,405	1,405	1,668	1,401	1,4017	1,396
Enthalpie des Dampfes	kJ/kg		1541,8		3509,5	283,46	233,8	223,2	193,2
Dielektrizitätskonstante									
Gas, 273 K, 1 bar	10 <sup>-4</sup>		0,728		2,64	1,274	5,87	5,89	5,30
Flüssigkeit bei T <sub>S</sub>			1,0492	1,225			1,4318		1,4837
fest bei T <sub>t</sub>				1,248			1,5140		1,594
Oberflächenspannung bei T <sub>S</sub>	10 <sup>-3</sup> J/m <sup>2</sup>		0,093		1,91	4,8	8,8		13,6
Viskosität									
Gas, 273 K, 1 bar	10 <sup>-7</sup> kg/ms	161	185,5		84	296,2	166,3	171	191,9
Gas bei T <sub>C</sub> , 1 bar	10 <sup>-7</sup> kg/ms		13,2		17,5	74,8	86,2	92	115,0
Dampf bei T <sub>S</sub>	10 <sup>-7</sup> kg/ms	12,1	13,0		11	46	55	55	70
Flüssigkeit bei T <sub>S</sub>	10 <sup>-7</sup> kg/ms	19	35	133	124	1240	1650	1700	1900
Wärmeleitfähigkeit									
Gas, 273 K, 1 bar	10 <sup>-3</sup> W/mK		143	175	168	46,1	24,0	24,1	24,5
Gas bei T <sub>C</sub> , 1 bar	10 <sup>-3</sup> W/mK		10,9	25,0	25,0		12,6	12,2	14,0
Dampf bei T <sub>S</sub>	10 <sup>-3</sup> W/mK	13	9,0	15,8	15,8		7,5	7,6	8,1
Flüssigkeit bei T <sub>S</sub>	10 <sup>-3</sup> W/mK	17	27,2	119	119	113	139,8	142	148

Die physikalischen Eigenschaften ändern sich mit abnehmender Temperatur und zeigen Anormalitäten, die von großem Interesse sind.

Beide Isotope haben -im Gegensatz zu allen anderen Gasen- keinen Tripelpunkt, so daß zur Erzeugung von festem Helium, zusätzlich zur Temperaturniedrigung der Druck erheblich erhöht werden muß.

Eine weitere Besonderheit von He ist das Auftreten von zwei Flüssigkeitsgebieten. Wird die Temperatur von  $^4\text{He}$  bei normalem Druck auf 2,19 K (Abb. 4) erniedrigt, so tritt ein Phasenübergang zweiter Art ( $\lambda$ -Übergang) auf. Das flüssige Helium I geht in Helium II, das heißt in die Form mit suprafluiden Eigenschaften, über. Als Superfluidität (auch Supraflüssigkeit) bezeichnet man eine bei flüssigem He II beobachtete Erscheinung, die dadurch gekennzeichnet ist, daß die Flüssigkeit praktisch frei von Viskosität ist.

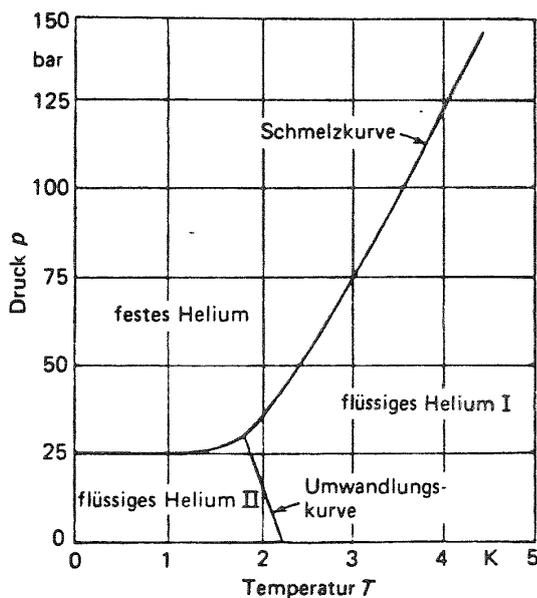


Abb.4: p, T-Diagramm von  $^4\text{He}$  (Schmelzkurve und He I-He II-Umwandlungskurve) /7/

Abb. 5 zeigt die Dichte von flüssigem Helium beim Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur.

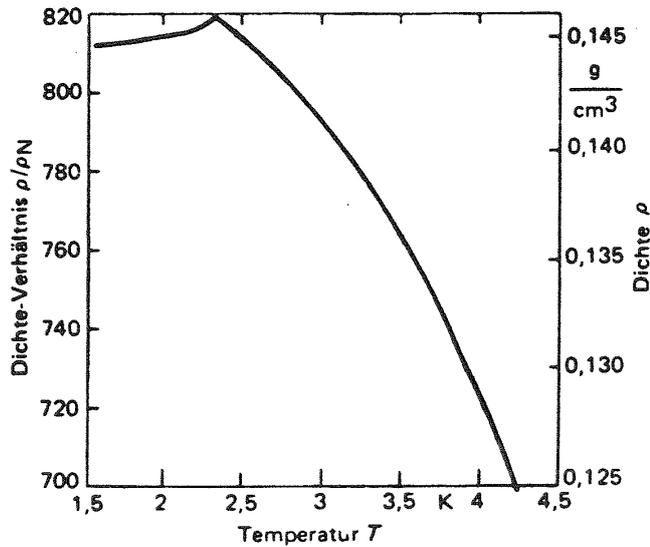


Abb.5: Dichte von flüssigem Helium beim Sättigungsdampfdruck [7/]

### Stickstoff

Stickstoff ( $N_2$ ), mit 78% Hauptbestandteil der Erdatmosphäre, ist bei Raumtemperatur inert, nicht korrosiv, geruch- und farblos. Erst unterhalb der kritischen Temperatur von 126.1 K kann Stickstoff verflüssigt werden. Bei Atmosphärendruck verflüssigt sich Stickstoff bei 77.4 K. Die in einem Liter flüssigem Stickstoff ( $LN_2$ ) gespeicherte Kälte beträgt 335 kJ (bezogen auf 15°C und 1 bar).

In Abb. 6 ist die Dampfdruckkurve von  $N_2$ , in Abb. 7 die Verdampfungswärme von  $LN_2$  graphisch dargestellt.

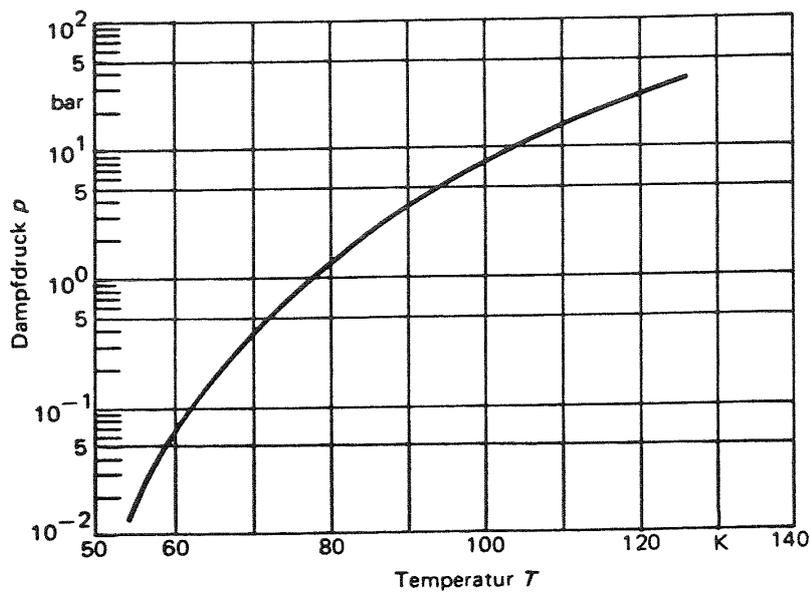


Abb.6: Dampfdruckkurve von Stickstoff [7/]

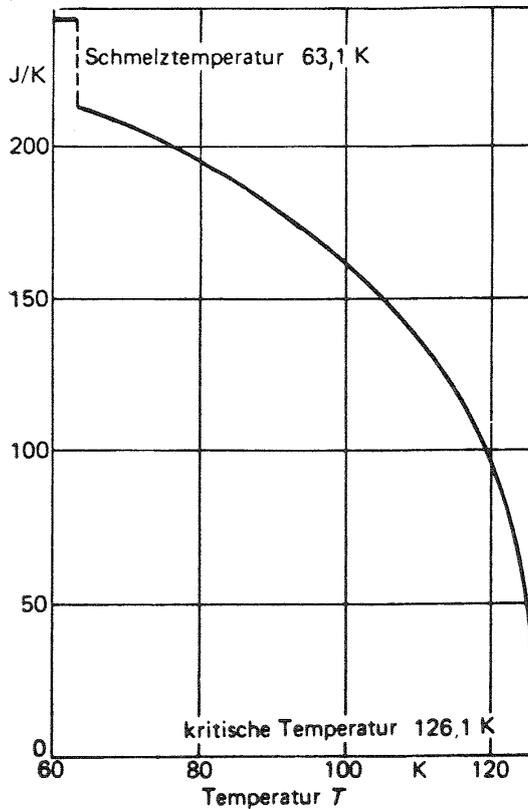


Abb.7: Verdampfungswärme von flüssigem Stickstoff [7]

Von weitreichender Bedeutung für die Konstruktion des Kryostaten ist es zu wissen, daß  $\text{LN}_2$  paramagnetischen Sauerstoff mit einem Anteil von etwa  $5 \cdot 10^{-4}$  Volumen% bindet (dieser übt Störeinflüsse auf das Meßsystem aus).

### 2.1.2. Regenerativer Kälteprozeß nach Gifford-McMahon

Das Gifford-McMahon-Verfahren ist ebenso wie das Verfahren nach Stirling und Vuilleumier ein Prozeß mit regenerativer Wärmeübertragung. Charakteristisch für die nach dieser Methode arbeitenden Gaskältemaschinen ist die Anordnung, wie sie in Abb. 8 dargestellt ist.

Ein Verdränger D teilt den Zylinder (in dem er frei verschiebbar ist), in die beiden Arbeits-räume  $V_c$  und  $V_w$  unterschiedlicher Temperatur, die durch einen Regenerator R, das heißt durch einen Wärmespeicher großer Wärmekapazität und großer Wärmeübertra-gungsfläche (z.B. feines Bleigranulat) miteinander verbunden sind.

Im Betriebszustand herrscht am Regenerator das Temperaturgefälle  $T_w - T_c$ . Wird der Verdränger abwärts bewegt, so strömt Gas hoher Temperatur über R nach  $V_c$  und kühlt sich dabei auf  $T_c$  ab, so daß der Druck im (isochoren) System fällt.

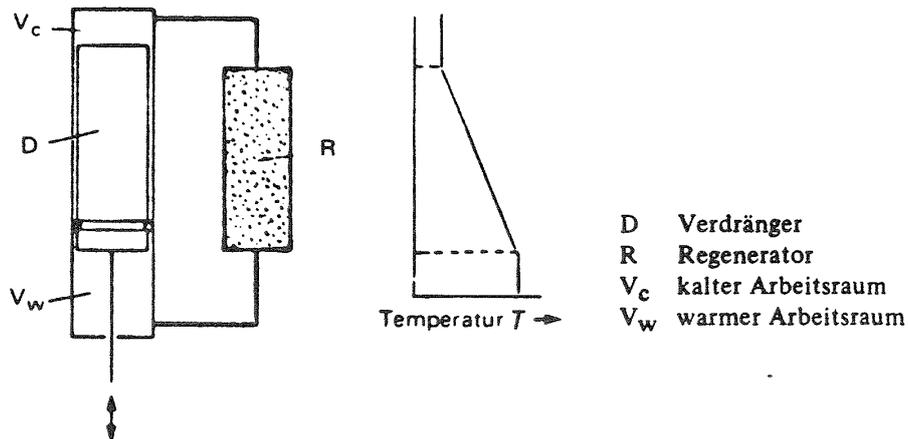


Abb.8: Zum Kälteprozeß mit regenerativer Wärmeübertragung, schematisch.

Wird dann der Verdränger aufwärts bewegt, strömt das kalte Gas über R nach  $V_w$  und erwärmt sich dabei wieder auf  $T_w$ , so daß der Druck im System steigt. Sieht man von den geringen Druckverlusten im Regenerator ab, so herrscht zu beiden Seiten des Verdrängers gleicher Druck, und seine Bewegung erfolgt im Idealfall vernachlässigbarer Reibung ohne Arbeitsaufwand.

Treibt man den Verdränger an, so ändern sich mit dem Drehwinkel  $\alpha$  die Volumina

$$(1) \quad V_c = V_0 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad \text{und} \quad V_w = V_0 \frac{1 - \cos \alpha}{2}$$

sowie der Druck

$$(2) \quad p = p_m (1 - e \cdot \cos \alpha)$$

periodisch mit der Zeit.  $V_0$  ist die Summe aus  $V_c$  und  $V_w$ ,  $p_m$  der zeitliche Mittelwert des Drucks und  $e = e(T_w, T_c)$  ein aus den Gasgesetzen zu berechnender Faktor. Bei der Umlauffrequenz  $f$  beträgt die erzeugte Kälteleistung

$$(3) \quad q_{kalt} = f \int_0^{2\pi} p \cdot dV_c$$

Setzt man in (3) die Ausdrücke aus Gleichung (1) und (2) ein, so erhält man  $q_{\text{kalt}} = 0$ , weil sich die Größen  $V_c$  und  $p$  gegengerichtet ändern. Um eine Kälteleistung ungleich Null zu erzielen, muß Arbeit in Form einer Druckvariation aufgebracht werden, die gegenüber der Variation der Verdrängerposition eine geeignete Phasenverschiebung  $\alpha \neq 0$  oder  $\pi$  haben muß. Hierfür gibt es drei Möglichkeiten:

1. Beim Stirling-Prozeß wird im warmen Teilvolumen ein Kompressionskolben angeordnet, der gegenüber dem Verdrängerkolben um  $90^\circ$  nacheilt;
2. beim Gifford-McMahon-Prozeß werden Druckvariationen durch Variation des Gasinhaltes des Systems erzeugt. Dies erfolgt dadurch, daß das System abwechselnd mit der Hoch- und der Niederdruckseite eines Kompressors entsprechend Abb.9 verbunden wird;
3. beim Vuilleumier-Prozeß werden zwei Verdränger/Regeneratorsysteme miteinander gekoppelt.

#### Beschreibung des Gifford-McMahon-Prozesses:

Abb. 9 zeigt das System schematisch. Der Unterschied zum allgemeinen regenerativen Kälteprozeß (Abb.8) sind die gesteuerten Ventile  $h$  und  $n$ , mit welchen Hoch- und Niederdruckseite des Kompressors  $K$  abwechselnd mit dem System verbunden werden. Herrscht nun im System der Niederdruck  $p_n$  und befindet sich der Verdränger in der unteren Totpunktlage, so beginnt der im  $T, s$ -Diagramm (Abb. 10) dargestellte Zyklus:

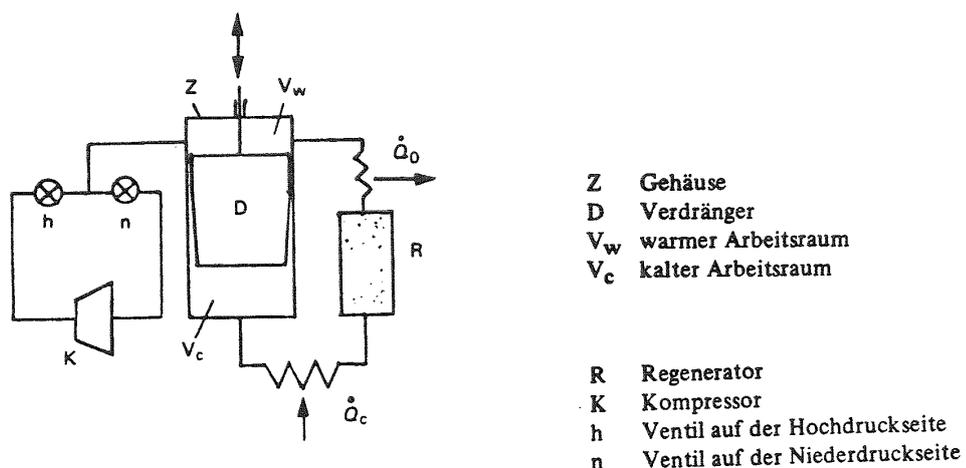


Abb.9:Gifford-McMahon-Prozeß, schematisch //

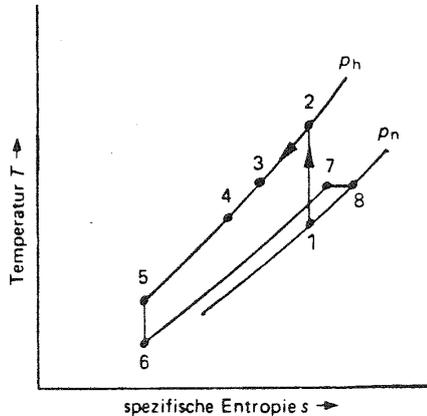


Abb.10: T, s-Diagramm des Gifford-McMahon-Prozesses

### I. Füllen des warmen Arbeitsraumes mit Druckgas

Die über h als erstes einströmende Gasmenge findet ein großes Druckgefälle vor und wird durch das nachfolgende Gas adiabate komprimiert, so daß sie sich auf eine Temperatur oberhalb von 300 K erwärmt (Zustandsänderung 1 nach 2 in Abb. 10). Später folgendes Gas wird wegen des abnehmenden Druckgefälles weniger stark erwärmt, so daß sich nach der Durchmischung in  $V_w$  ein Zustand zwischen 3 und 4 einstellt.

### II. Isobare Abkühlung

Der Verdränger bewegt sich in die obere Totpunktlage, so daß das Gas vom warmen in den kalten Arbeitsraum umgefüllt wird. Dabei nimmt zunächst der Druck ab, so daß weiteres Druckgas nachfließt und dadurch die Temperatur am warmen Regeneratorende auf  $T_3$  steigt. Beim Umfüllen in den kalten Arbeitsraum wird das Gas isobar auf dessen Temperatur abgekühlt (Zustand 5).

### III. Quasi-isentrope Entspannung im kalten Arbeitsraum

Das System wird an die Niederdruckseite des Kompressors angeschlossen. Dadurch strömt Gas über den Regenerator mit geringer Geschwindigkeit aus. Das Gas in  $V_c$  wird somit quasi-isentrop entspannt und verrichtet Arbeit, indem es das ausströmende Gas vor sich herschiebt und sich selbst abkühlt (Zustand 6). Das Äquivalent dieser Arbeit kann dem zu kühlenden Objekt als thermische Energie  $Q_c$  entzogen werden.

#### IV. Auslassen des Gases

Der Verdränger kehrt in die untere Totpunktlage zurück, das Gas strömt aus  $V_c$ , erwärmt sich im Regenerator (Zustand 7) und wird über das verbleibende Druckgefälle in den Leitungen isotherm entspannt (Zustand 8).

Die Austrittstemperatur  $T_8$  am Ende des Zyklus ist größer als die Eintrittstemperatur  $T_1$ . Die dieser Temperaturdifferenz entsprechende Enthalpiedifferenz des Arbeitsgases ist gleich der an die Umgebung abgeführten Wärmemenge  $Q_0$  und zum anderen nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik gleich der im kalten Arbeitsraum aufgenommenen Wärmemenge  $Q_c$ .

Der Gifford-McMahon-Kreislauf erlaubt die Trennung von Antriebs(Kompressor)- und Verdrängersystem (Kaltkopf). Dadurch hat man an der Kühlstelle eine geringe Masse und, im Verhältnis zu anderen Systemen, geringe Vibrationen. Außerdem bedingt durch die niedrigen Verdrängerfrequenzen (2 Hz) und ein niedriges Druckverhältnis (6 bar zu 22 bar) einen erschütterungsarmen Lauf und hohe Betriebssicherheit.

#### 2.2. Kryostatentechnik

Ein wesentlicher Teil einer Tieftemperaturapparatur ist das Vakuumgefäß, der Kryostat, in dem sich die abzukühlende Anordnung befindet. Je nach Anwendungsfall verwendet man Bad-, Verdampfer- oder Refrigeratorkryostate, die mit  $^4\text{He}$  als Kältemittel Temperaturen von etwa 3 K zu erreichen gestatten (um diese Temperaturen zu erreichen, wird der Heliumdampf über dem LHe abgepumpt). Zum Betrieb eines Kryostaten bedarf es jedoch noch einer Reihe zusätzlicher Bauelemente wie Transferleitungen, Abfüllvorrichtungen, Stromzuführungen und Dichtungen. All diese Bauelemente stehen für Anwendungen bis hinunter zu etwa 2.5 K zur Verfügung. Unter dieser Temperatur macht das auftretende HeII vor allem im Dichtungsbereich große Schwierigkeiten, so daß hier nur noch spezielle Bauteile Verwendung finden können.

Auch Kryostaten sind für viele Anwendungen und in unterschiedlichen Größen lieferbar. Jedoch machen besondere Randbedingungen und Anwendungen auch heute noch die Konstruktion spezieller Kryostate notwendig. Der Aufbau des Kryostaten wird im wesentlichen durch die Art der Kühlung bestimmt; man unterscheidet:

- Badkühlung: das zu kühlende Objekt ist mit siedendem Kältemittel im Kontakt;
- Verdampferkühlung: das Objekt steht mit einem Verdampfer in Kontakt, durch den ein Kältemittelstrom mittels Unterdruck (Vorvakuumpumpe) geleitet wird;

- Kühlung mittels Refrigerator: das Objekt ist thermisch mit dem Kaltkopf des Refrigeratorsystems gekoppelt und wird auf diese Weise gekühlt.

### 2.3. Wärmetransportvorgänge

Bei der Konstruktion eines Kryostaten, gleich welcher Bauart, kommt es im wesentlichen darauf an, den Wärmetransport in den kalten Bereich so klein als irgend möglich zu halten.

Dem ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik folgend versucht man also, ein möglichst abgeschlossenes System herzustellen, in welches möglichst wenig Wärmeenergie von außen gelangt, die die innere Energie des Systems erhöht. Dies setzt voraus, die Wärmetransportmechanismen in ihren Gesetzmäßigkeiten zu kennen.

Im wesentlichen setzt sich die auf eine Kryofläche übertragene thermische Leistung aus den Anteilen, die durch Wärmestrahlung ( $q_{\text{rad}}$ ), Wärmeleitung ( $q_l$ ) und Konvektion ( $q_k$ ) verursacht sind zusammen. Der Vollständigkeit wegen soll noch erwähnt werden, daß weitere thermische Belastungen durch Kondensation ( $q_{\text{cond}}$ ) und Kryosorption ( $q_{\text{sorb}}$ ) auftreten. Diese Belastungen sind für die Auslegung von Kryopumpen von Bedeutung, spielen jedoch bei einem Kryostaten keine wesentliche Rolle (falls dieser bei einem ausreichendem Vakuum betrieben wird). Die Leistungsbilanz lautet daher

$$(4) \quad q_{\text{rad}} + q_l + q_k + q_{\text{cond}} + q_{\text{sorb}} - q_{\text{kalt}} = m_k c_k dT_k/dt ,$$

wobei  $q_{\text{kalt}}$  die von der Kältequelle gelieferte Kälteleistung ist.

#### 2.3.1. Konvektion

Die Konvektion ist ein Transport von Wärmeenergie, gebunden an die Strömung eines Mediums. Dabei unterscheidet man freie Konvektion (die Strömung im Medium entsteht durch Temperaturunterschiede in demselben) und erzwungene Konvektion (die Strömung wird durch äußere Kräfte erzwungen).

Da die durch Konvektion transportierte Wärme maßgeblich von der Dichte des strömenden Mediums abhängt, können Gase mit geringem Druck kaum Wärme übertragen.

Durch Verwendung eines ausreichend guten Isoliervakuum (kleiner  $10^{-3}$  mbar) kann ein Wärmetransport durch Konvektion ausgeschlossen werden, ebenso wie die Kryosorption und Kondensation durch ein Isoliervakuum von kleiner  $10^{-5}$  mbar.

Als maßgebliche thermische Belastungen für einen Kryostaten verbleiben somit die Wärmeleitung und die Wärmestrahlung, die nicht durch ein gutes Isoliervakuum minimiert werden können, vielmehr sind hier konstruktive Lösungen zu suchen.

### 2.3.2. Wärmeleitung

#### a) Isolatoren

Der Prozeß der Wärmeleitung im Festkörper von Isolatoren kann als Ausbreitung von Phononen im Kristall betrachtet werden. Der Koeffizient der Gitterleitfähigkeit lautet entsprechend dem Ausdruck der Wärmeleitfähigkeit aus der kinetischen Gastheorie:

$$(5) \quad \lambda_{ph} = \frac{1}{3} \cdot c \cdot u_s \cdot l_{ph} \cdot \rho.$$

(Hier ist  $c$  die spezifische Wärmekapazität der Phononen, das heißt im allgemeinen die des Isolators,  $u_s$  die Schallgeschwindigkeit,  $l_{ph}$  die freie Weglänge der Phononen und  $\rho$  die Dichte des Isolators.)

Die Schallgeschwindigkeit ist nahezu temperaturunabhängig, während die Wärmekapazität und die freie Weglänge sehr temperaturabhängig sind. Dementsprechend wird durch diese beiden Größen der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bestimmt.

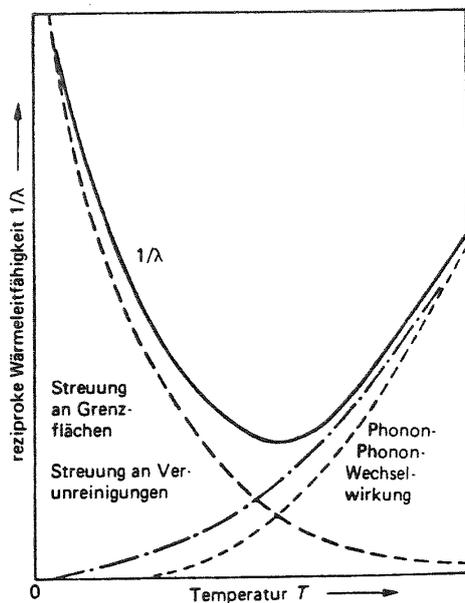


Abb.11: Reziproke Wärmeleitfähigkeit von Isolatoren in Abhängigkeit von der Temperatur [7/

## b) Metalle

Metalle besitzen im allgemeinen eine große Wärmeleitfähigkeit, die im wesentlichen durch den Energietransport der freien Elektronen bestimmt wird. Zur Herleitung der Wärmeleitfähigkeit des Elektronengases verwendet man die kinetische Gastheorie und erhält:

$$(6) \quad \lambda_{el} = \frac{1}{m} \cdot \frac{\pi^2}{3} \cdot \frac{k^2 \cdot n \cdot l_{el}(E_F) \cdot T}{m_e \cdot u_F}$$

Die Elektronen können wie die Phononen an den Gitterfehlern gestreut werden. Für diese Streuprozesse ist die freie Weglänge durch den mittleren Abstand der Gitterfehler gegeben und somit temperaturabhängig.

Bei höheren Temperaturen können die Elektronen auch an Phononen gestreut werden. In diesem Falle ist die freie Weglänge umgekehrt proportional zur Phononenzahl. In reinen Metallen überwiegt der Beitrag der Elektronen zur Wärmeleitung bei allen Temperaturen. In verunreinigten Metallen und ungeordneten Legierungen kann der Beitrag der Phononen den Beitrag der Elektronen erreichen. Abb. 12 zeigt schematisch den Verlauf der reziproken Wärmeleitfähigkeit.

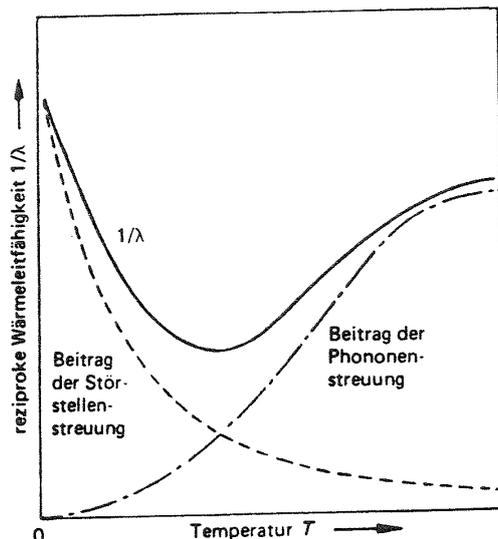


Abb.12: Reziproke Wärmeleitfähigkeit von Metallen in Abhängigkeit von der Temperatur

## c) Wärmeleitintegrale

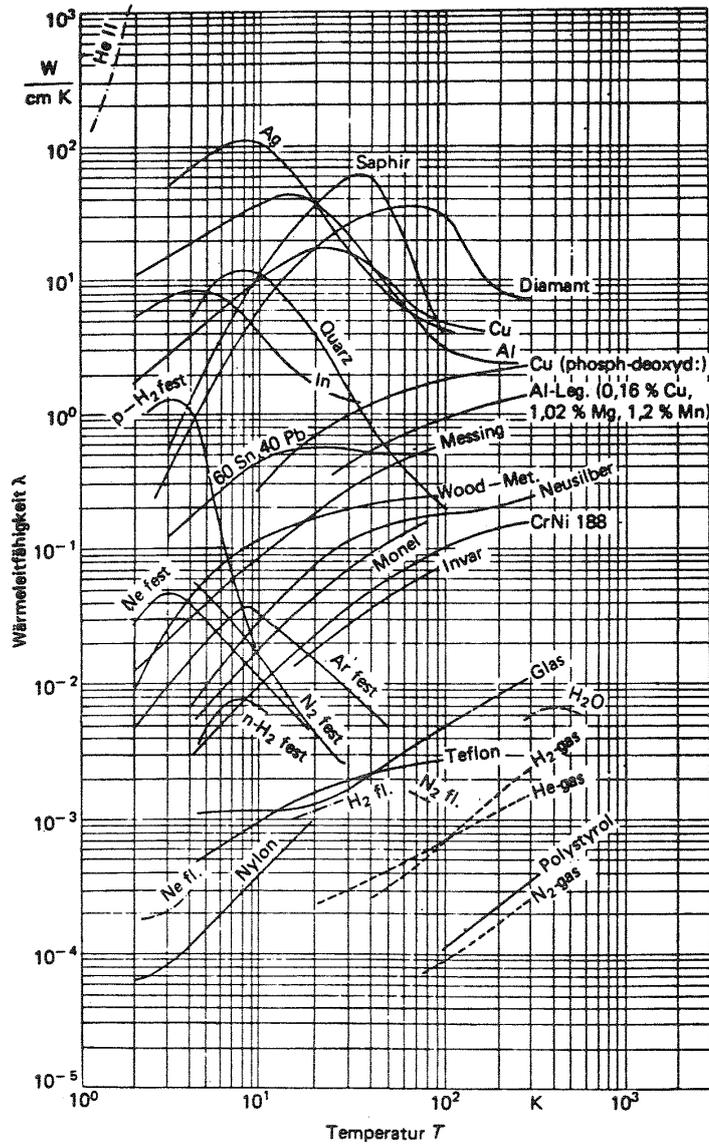


Abb.13: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur /7/

Da bei tiefen Temperaturen die Wärmeleitfähigkeit bei allen Werkstoffen eine starke Temperaturabhängigkeit zeigt (Abb. 13), müssen für die Berechnung der über große

Temperaturdifferenzen transportierten Wärmemengen Integrale der Wärmeleitfähigkeit benutzt werden. Ausgehend von

$$(7) \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \Delta T + \frac{q_v}{c \cdot \rho}$$

gilt im eindimensionalen Fall und beim Fehlen innerer Wärmequellen

$$(8) \quad \int_0^l \frac{dQ}{dt dy dz} \cdot dx = \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT .$$

Die Werte des Wärmeleitintegrals werden meist graphisch berechnet und liegen in verschiedenen Kryonachschlagewerken vor (z.B. /8/). In Tab. 2 sind Daten für einige Werkstoffe zusammengestellt und im Anhang befinden sich weitere Tabellen mit Wärmeleitintegralen.

Die durch einen Leiter mit konstantem Querschnitt A und der Länge l bei einer Temperaturdifferenz  $T_2 - T_1$  übertragene Leistung wird berechnet zu

$$(9) \quad q_l = \frac{A}{l} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \lambda dT ,$$

wobei gilt:

$$(10) \quad \int_{T_1}^{T_2} \lambda dT = \int_{4\text{ K}}^{T_2} \lambda dT - \int_{4\text{ K}}^{T_1} \lambda dT .$$

Somit lassen sich lineare Wärmeleitungsprobleme behandeln. Die Wärmeleitung, die in Befestigungen und Zuleitungen eine Rolle spielt, kann folglich durch konstruktive Gestaltung und die Wahl der Werkstoffe minimiert werden. Aus (9) ist zu erkennen, daß die wirksamen Querschnitte möglichst klein, die Längen jedoch möglichst groß zu gestalten sind.

Zusätzlich können Bauelemente auch thermisch abgefangen werden, um die Wärmeleitung in den LHe-Bereich zu verringern. Dabei werden die Bauelemente an einer geeigneten Stelle mit einem höheren Temperaturniveau als LHe thermisch verbunden (im Normalfall mit der LN<sub>2</sub>-Abschirmung, 77 K). Dadurch wird erreicht, daß sich das Temperaturgefälle nicht mehr linear über das Bauteil verteilt. So können die Längen

zwischen 300 K und 77 K verkürzt, und dafür die Längen zwischen 77 K und 4.2 K entsprechend vergrößert werden.

Tabelle 2: Wärmeleitintegrale verschiedener Werkstoffe

T K	Wärmeleitintegrale $\int_{T_0=4\text{K}}^T \lambda dT$ in W/cm										
	Blei 44 % Zinn	Rosesches Metall	Titan	Blei 50 % Indium	Woodsches Metall	Gallium	Indium	Thallium	Uran	Lanthan	Cer
6	0,203	0,0292		0,0204	0,112	52	16,6	14,2	0,111	0,016	0,011
8	0,486	0,0772		0,0466	0,284	108	31,1	20,9	0,261	0,039	0,026
10	0,836	0,139		0,0787	0,502	159	41,8	24,7	0,445	0,069	0,044
15	1,95	0,331		0,184	1,17	246	58,8	30,8	1,03	0,174	0,106
20	3,31	0,566	0,0722	0,325	1,97	292	69,3	34,8	1,76	0,319	0,189
25	4,84	0,832	0,174	0,497	2,85	318	77,4	38,2	2,58	0,499	0,294
30	6,49	1,12	0,299	0,697	3,77	337	84,0	41,2	3,45	0,709	0,422
35	8,26	1,42	0,440	0,927	4,73	352	89,8	43,9	4,34	0,947	0,567
40	10,1	1,75	0,594	1,18	5,72	364	95,0	46,5	5,24	1,21	0,727
50	14,1	2,43	0,939	1,77	7,77	386	104	51,3	7,05	1,80	1,10
60	18,4	3,18	1,32	2,46	9,92	406	113	56,0	8,91	2,46	1,53
70	22,7	3,97	1,74	3,23	12,1	424	121	60,5	11,0	3,20	2,03
76	25,3	4,46	2,00	3,75	13,4	435	126	63,1	12,3	3,68	2,34
80	27,1	4,80	2,18	4,11	14,4	442	129	64,7	13,2	4,01	2,56
90	31,6	5,66	2,66	5,10	16,6	458	137	68,9	15,8	4,89	3,14
100	36,2	6,56	3,15	6,21	19,0	474*	144	73,1	18,6	5,84	3,77
120	45,6	8,44	4,20	8,91	23,6	505	158	81,3	24,6	7,90	5,14
140	55,0	10,4	5,31	12,4	28,4	534	172	89,2	31,1	10,1	6,61
160	64,4	12,6	6,48	16,8	33,0	562	186	97,0	38,2	12,5	8,25
180	73,8	14,9	7,71	22,5	37,8	590	199	105	45,9	15,0	9,95
200	83,3	17,4	8,99	29,5	42,6	618	213	112	54,1	17,7	11,7
250	107	24,3	12,5	54,5	54,6	688	246	131	75,8	24,8	16,5
300	131	32,3	16,5	92,5	66,6	758	279	150	98,8	32,3	21,6

T K	$\int_{T_1}^{T_2} \lambda dT$ ( $T_1 = 4\text{K}$ )										T K
	Wärmeleitung in W/cm							mW/cm			
	Monel	Monel	Inconel	Inconel	Cu OFHC	Messing	ZrCN 18.10	Glas	Teflon	Nylon	
6	0,0235	0,0123	0,0133	0,00712	6,1	0,053	0,0063	2,11	1,13	0,321	6
8	0,0605	0,0329	0,0348	0,0185	14,5	0,129	0,0159	4,43	2,62	0,807	8
10	0,112	0,0629	0,0653	0,0345	25,2	0,229	0,0293	6,81	4,4	1,48	10
15	0,315	0,181	0,182	0,0975	61,4	0,594	0,0816	13,1	9,85	4,10	15
20	0,618	0,364	0,356	0,195	110	1,12	0,163	20,0	16,4	8,23	20
25	1,01	0,614	0,592	0,325	168	1,81	0,277	27,9	23,9	13,9	25
30	1,48	0,929	0,882	0,488	228	2,65	0,424	36,8	32,2	20,8	30
35	2,01	1,30	1,22	0,685	285	3,63	0,607	47,1	41,3	29,0	35
40	2,58	1,73	1,60	0,918	338	4,76	0,824	58,6	50,8	38,5	40
50	3,85	2,73	2,47	1,48	426	7,36	1,35	84,6	71,6	60,4	50
60	5,23	3,88	3,45	2,15	496	10,4	1,98	115	93,6	85,9	60
70	6,69	5,13	4,52	2,94	554	13,9	2,70	151	116	113	70
76	7,61	5,92	5,19	3,47	586	16,2	3,17	175	130	131	76
80	8,24	6,47	5,66	3,84	606	17,7	3,49	194	139	142	80
90	9,86	7,91	6,85	4,84	654	22,0	4,36	240	240	173	90
100	11,5	9,40	8,06	5,93	700	26,5	5,28	292	187	204	100
120	15,0	12,6	10,6	8,33	788	36,5	7,26	403	237	269	120
140	18,7	15,9	13,1	11,0	874	47,8	9,39	542	287	336	140
160	22,5	19,5	15,7	13,8	956	60,3	11,7	694	338	405	160
180	26,4	23,2	18,3	16,8	1040	73,8	14,1	858	390	475	180
200	30,5	27,1	21,0	19,9	1120	88,3	16,6	1030	442	545	200
250	41,2	37,3	28,0	28,1	1320	128	23,4	1500	572	720	250
300	52,5	48,0	35,4	36,9	1520	172	30,6	1990	702	895	300

### 2.3.3. Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung gehorcht den Strahlungsgesetzen. Sie ist unabhängig vom Abstand zwischen kalter und warmer Wand. Man erhält für eine kalte Fläche  $A_1$  mit der Temperatur  $T_1$ , die vollständig von der Fläche  $A_2$  mit der Temperatur  $T_2$  umschlossen ist:

$$(11) \quad q = \sigma \cdot \varepsilon_R \cdot A_1 \cdot (T_2^4 - T_1^4).$$

mit

$$(12) \quad \varepsilon_R = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)},$$

wobei  $\sigma$  der Strahlungskoeffizient und  $\varepsilon$  der Emissionskoeffizient ist.

Die Wärmestrahlung läßt sich vermindern, indem man den Emissionskoeffizienten möglichst klein macht /9/ (Tab.3).

$\varepsilon$  hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie zum Beispiel der Leitfähigkeit, den Legierungszusätzen und dem Bearbeitungszustand. Die kleinsten Werte erhält man für die Stoffe mit größter elektrischer Leitfähigkeit (Au, Ag, Cu, Al). Mit sinkender Temperatur nimmt der Emissionskoeffizient zwar ab, jedoch in den meisten Fällen nur sehr wenig /10/. Verschmutzungen und Legierungszusätze erhöhen den Wert von  $\varepsilon$ . Eine mechanische Bearbeitung der Oberfläche führt zu einer leichten Erhöhung, wenn das Material dabei verdichtet wird. Ein optischer Glanz, das heißt gutes Reflexionsvermögen im sichtbaren Bereich, bedeutet nicht immer gutes Reflexionsvermögen im langwelligeren Infrarotbereich ( $10\mu\text{m}$ ), der für die Wärmeübertragung bei tiefen Temperaturen maßgebend ist.

Eine weitere, konstruktive Möglichkeit, die Wärmestrahlung in einen kalten Bereich zu vermindern, eine strahlungsundurchlässige Wand S zwischen der kalten Wand mit der Temperatur  $T_1$  und der warmen Wand mit der Temperatur  $T_2$  zu installieren. Hat nun S dieselben Strahlungseigenschaften wie die Außenwände, so strahlt S nach beiden Seiten gleichmäßig, erhält jedoch praktisch nur von der warmen Wand 2 Strahlungsenergie  $q$ , so daß im Gleichgewicht  $q_S = \frac{1}{2} q$  sein muß. Bringt man eine weitere Wand P zwischen die Wände 2 und S, so muß diese Wand wieder nach beiden Seiten strahlen. Man sieht, daß  $q_S = \frac{1}{3} q$  wird.

Tab. 3: Emissionskoeffizienten von Konstruktionswerkstoffen /11/

Werkstoff	Temperatur des schwarzen Strahlers K	Temperatur der Oberfläche K	$\epsilon$
Aluminium, elektrolytisch poliert	300	300	0.03
	300	76	0.018*
	300	4	0.011
Aluminium, rauh	300	300	0.055
Aluminium mit Oxidschicht			
0.25 $\mu\text{m}$ dick	311	311	0.06
1.0 $\mu\text{m}$ dick	311	311	0.30
7.0 $\mu\text{m}$ dick	311	311	0.75
Aluminium mit Lackschicht			
0.5 $\mu\text{m}$ dick	311	311	0.05
2.0 $\mu\text{m}$ dick	311	311	0.30
8.0 $\mu\text{m}$ dick	311	311	0.57
Bleifolie, 0.1 mm dick	300	76	0.036*
	300	4	0.011
Blei, stark oxidiert	295	295	0.28
Blei-Zinn-Lot, 0.05mm dick auf Cu	300	76	0.032*
Chrom auf Cu-Unterlage	300	76	0.08*
Edelstahlblech, 0.12mm	300	76	0.048*
Glas	293	293	0.94
Goldauflage, 5 $\mu\text{m}$ auf Edelstahl	295	76	0.025*
Goldfolie, 40 $\mu\text{m}$ dick	295	76	0.01*
Gußeisen, poliert	311	311	0.21
Kupfer, oxidiert	300	300	0.78
Kupfer, poliert	300	300	0.03
Kupfer, mechanisch poliert	295	4	0.015
Kupfer, elektrolytisch poliert	295	4	0.0062
	295	76	0.015*
Kupfer, abgebeizt	295	76	0.017*
Kupfer, poliert	295	76	0.019*
Messing, poliert	373	373	0.03
Messingblech (65%Cu, 35%Zn)	295	4	0.018
Messingblech, oxidiert	373	373	0.6
Nickel, elektrolytisch poliert	295	295	0.04
Platin	290	85	0.016
Silber	295	295	0.022
	295	76	0.01*
Silberauflage auf verkupferten und vernickeltem Edelstahl	300	76	0.007
Silber, matt, auf Glas abgeschieden	293	90	0.036
Zinn	300	300	0.05
Zinn + 5% Indium	295	4	0.017
Zinnaufgabe, dünn auf Cu	300	300	0.02

\*Halbraumstrahlung

Setzt man  $n$  Strahlungsschilde zwischen 1 und 2, so erhält man:  $q_S = \frac{q}{n+1}$ . Aus (11) erhält man folglich:

$$(13) \quad q = \frac{1}{n+1} \cdot \sigma \cdot \epsilon_R \cdot A_1 \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Durch Vermehrung der Schilde läßt sich also theoretisch die Wärmestrahlung beliebig vermindern. Dies ist die Grundlage der heute in der Kryotechnik weitverbreiteten Superisolation.

Diese Superisolation (SI), oder auch Vielschichtisolation, besteht aus einer Anzahl hochreflektierender Schichten, die als Strahlungsschirme entsprechend den obigen Gleichungen wirken und untereinander nur einen geringen Wärmekontakt haben. Jedoch sind der beliebigen Verminderung der Wärmestrahlung durch in der Superisolation auftretende Effekte wie Kontakteitung und Konvektion durch eingeschlossene Gase Grenzen gesetzt (vgl. 5.2.1.).

Eine weitere Möglichkeit, die Wärmestrahlung in den inneren Bereich zu minimieren, folgt aus (13). Man kann zwischen den kalten und warmen Bereich ein zusätzlich gekühltes Strahlungsschild montieren. Wird ein solches Schild zum Beispiel bei einem Heliumbadkryostaten mittels flüssigem Stickstoff gekühlt (der billiger und leichter zu handhaben ist als flüssiges Helium) kann die Verdampfungsrate des Heliums weiter verringert werden.

### 3. Konstruktionstechnische Anforderungen

Die konstruktiven Vorgaben an den Kryostaten werden zum einen durch die Anpassung an die bei der GSI üblichen Vakuumapparaturen und zum anderen durch das verwendete Meßsystem bestimmt.

#### 3.1. Das Detektorsystem mit SQUID

Das Meßsystem soll in groben Zügen vorgestellt werden, für genauere Darstellungen wird auf /5/ verwiesen.

Das grundlegende Prinzip des Meßsystems ist das des normalleitenden Strahltransformators wie er auch in der GSI bereits zu Meßzwecken verwendet wird /12/. Jedoch ist der verwendete Strahltransformator supraleitend und als echter DC- Trafo verwendbar. Die Steigerung der Empfindlichkeit wird mit sogenannten SQUIDs (Superconducting QUantum Interference Devices) erreicht. Dies sind supraleitende Ringe mit einer oder mehreren Schwachstellen (Abb. 14). SQUID-Magnetometer sind die

empfindlichsten Detektoren für magnetische Flüsse, die es gibt. Darüber hinaus kann man mit SQUIDs sehr viele physikalische Größen messen, wenn sie zuvor in magnetischen Fluß umgewandelt worden sind. So lassen sich mit hoher Empfindlichkeit magnetische Flußdichten (etwa bis  $10^{-14}$  T), magnetische Feldgradienten, elektrischer Strom ( $10^{-12}$  A), elektrische Spannung ( $10^{-13}$  V) sowie mechanische Bewegungen oder Beschleunigungen messen.

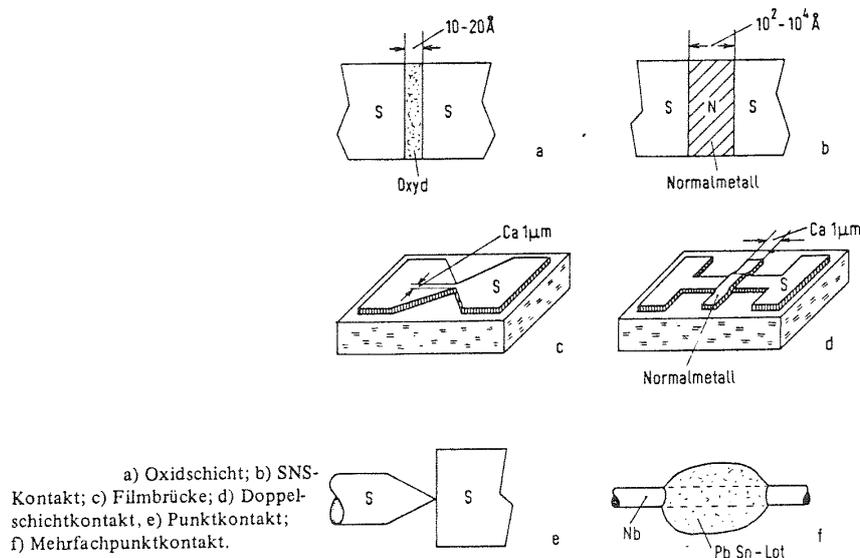


Abb.14: Schematische Darstellung zur Herstellung von schwachen Kopplungen /13/

Der Name deutet schon darauf hin, daß SQUIDs auf der Basis von Quanten-Interferenz funktionieren. Solche Phänomene treten bei supraleitenden Ladungsträgern (Cooper-Paaren) auf, die sich in einem Supraleiter in demselben quantenmechanischen Zustand befinden. Dieser Zustand läßt sich mit einer Wellenfunktion beschreiben. In bestimmten Fällen können solche Wellenfunktionen interferieren, z.B. eben in solchen Ringen mit einer oder mehreren schwachen Kopplungen. Das besondere Merkmal supraleitender Interferometer ist die feste Verknüpfung der quantenmechanischen Phasendifferenz  $\varphi_s$  über einer Schwachstelle mit dem magnetischen Fluß  $\Phi$  durch die Fläche der Interferometerschleife. So gilt z.B. für das Interferometer mit einer Schwachstelle

$$(14) \quad \varphi_s = \frac{2 \cdot \pi}{\Phi_0} \cdot \Phi$$

wobei

$$(14a) \quad \Phi_0 = \frac{h}{2 \cdot e} \cong 2.05 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$$

ist. Auf diese Weise ist die mikroskopische Quantengröße  $\phi_s$  mit der makroskopischen Größe  $\Phi$  verknüpft. Bei meßtechnischen Anwendungen wird genau genommen die Impedanz des Interferometers gemessen. Diese Impedanz hängt vom magnetischen Fluß durch die Schleife ab. Mithilfe der entsprechenden Auswerteelektronik ist es somit möglich, äußere Magnetfelder zu detektieren.

Diese Magnetfelder werden mittels eines supraleitenden Strahltransformators mit Ringbandkern aufgenommen. Damit der supraleitende Strahltransformator nur die Magnetfelder aufnimmt, die vom Ionenstrahl ausgehen, muß dieser so abgeschirmt werden, daß praktisch nur azimutale Felder ins Innere der Abschirmung gelangen können. Eine solche Abschirmung ist durch eine verschachtelte Anordnung von supraleitenden Flächen möglich. Der SQUID selbst befindet sich in einer geschlossenen supraleitenden Abschirmung. Das verwendete Meßprinzip ist das des Kryo-Strahlstrom-Komparators, der in Abb. 15 dargestellt ist.

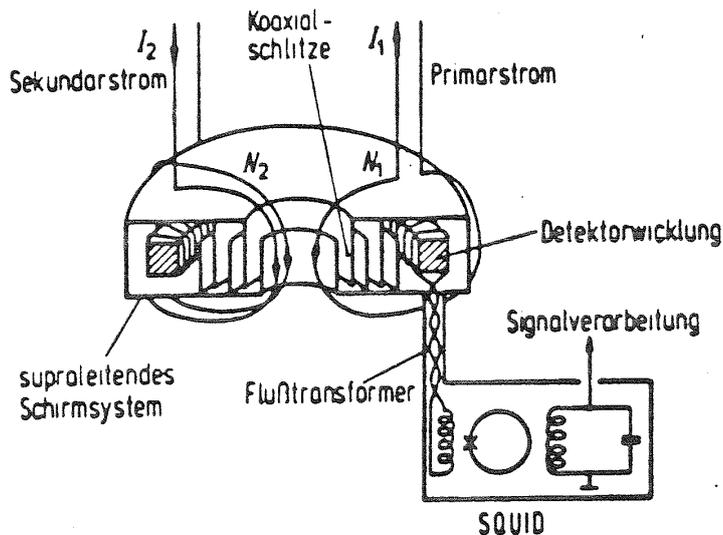


Abb.15: Prinzip eines Kryo-Strahlstrom-Komparators /8/

Ein solches Meßsystem ist äußerst störanfällig, vor allem gegenüber elektromagnetischen Feldern, die Meßsignale vortäuschen und verfälschen. Aufgrund der ungünstigen Umgebung (Ablenkmagnete, Getterpumpen und stromführende Netzteile) wurde eine supraleitende Abschirmung für das Meßsystem entworfen /5/. Bei dem Kryostaten war darauf zu achten, das durch die Werkstoffauswahl nicht unbemerkt Störquellen in die direkte Nähe des Meßsystems gelangen. Speziell wurde hierbei an paramagnetische Stoffe gedacht, die bei Bewegung Magnetfelder verursachen. Bei den Untersuchungen zu diesem Problemfeld stellte sich heraus, daß flüssiger Stickstoff  $5 \cdot 10^{-4}$  Volumen % paramagnetischen Sauerstoff bindet.

Dieser Sauerstoff kann zwar nicht direkt mit den Supraleitern wechselwirken, jedoch wären die durch die Bewegungen des paramagnetischen Sauerstoffs erzeugten Magnetfelder eine nicht zu unterschätzende Störquelle in direkter Nähe des Meßsystems. Der hier für paramagnetischen Sauerstoff genannte Effekt gilt auch für alle anderen Paramagnetika und besonders für Ferromagnetika, wie zum Beispiel Nickel.

Das Strahlrohr muß an der Stelle des Meßsystems elektrisch unterbrochen werden, um zu verhindern, daß der vom Ionenstrahl influenzierte Wandstrom sowie Hochfrequenz- und Ausgleichsströme, die durch das Strahlrohr fließen, mitgemessen werden.

Ein weitere Störquelle stellen Temperaturänderungen im Kryostaten dar. Das zum Einbau in den Kryostaten bestimmte Meßsystem ist in Abb. 16 dargestellt. Eine Originalkopie der Zusammenbauzeichnung des Meßgerätes befindet sich im Anhang C.

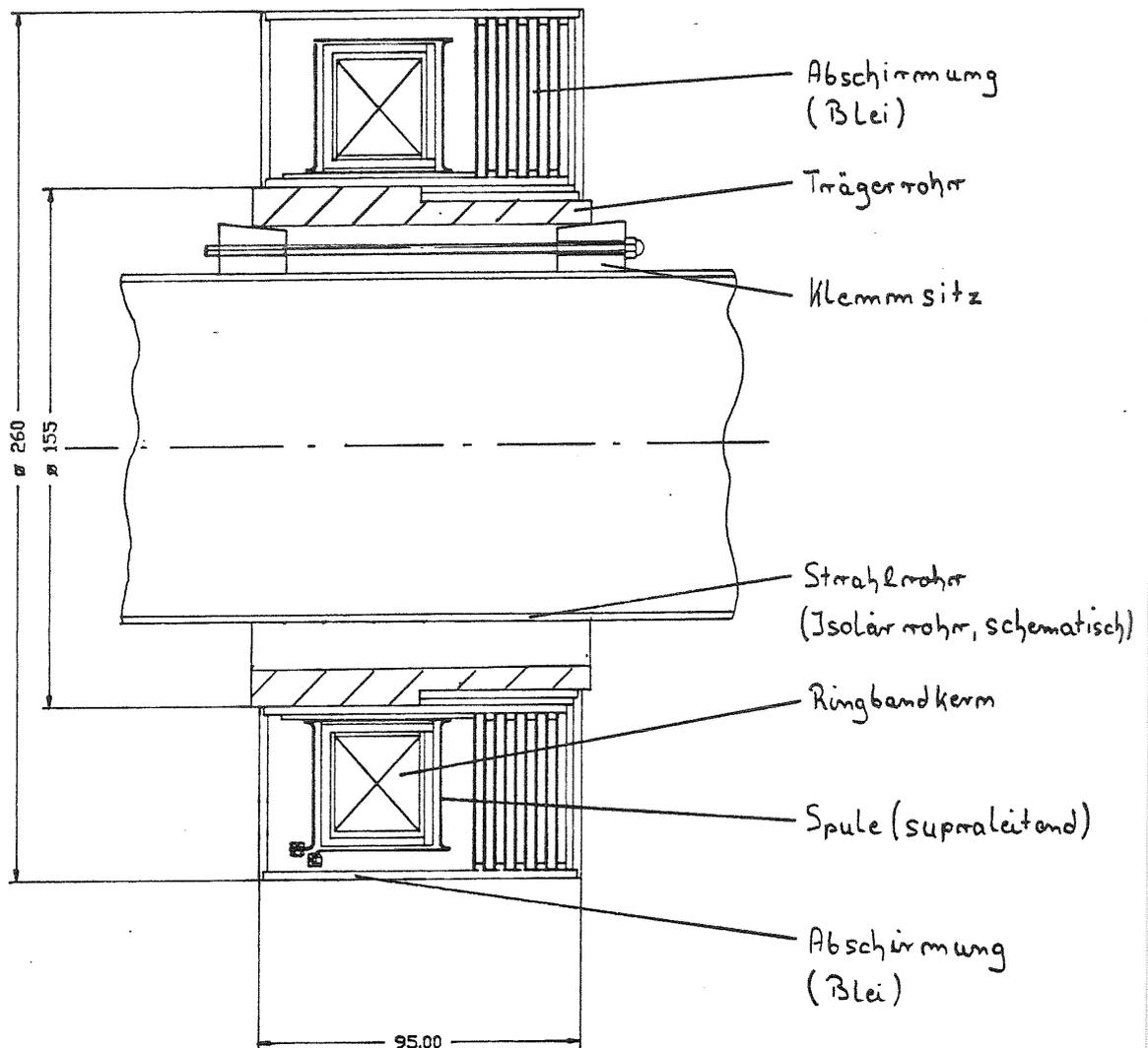


Abb.16: Zum Einbau bestimmtes Meßsystem /5/

### 3.2. Vakuumtechnische und konstruktive Voraussetzungen

Das Vakuumsystem der GSI hat an den ins Auge gefaßten Einbaustellen folgende mechanische Basisabmessungen und Betriebsbedingungen:

Nenndurchmesser des Strahlrohrs:	150mm
UHV-Flansche:	DN 150 CF
Maximal zur Verfügung stehende Einbaulänge:	2000mm
Abstand Strahlrohrachse- Boden:	2000mm
Betriebsdruck des Vakuumsystems:	$10^{-8}$ - $10^{-6}$ mbar

Da der Kryostat beim späteren Betrieb in einem während der Strahlzeiten nicht zugänglichen Bereich montiert wird (Strahlenschutzbereich), werden sehr hohe Anforderungen an die Standzeit gestellt. Die Standzeit sollte etwa 4 Tage betragen. Da das Vorratsvolumen nicht größer als 20 Liter sein soll, ergibt sich ein maximaler Verbrauch von etwa 5 l LHe/Tag. (Mit einem Dewar-Gefäß von 100 l zum Umfüllen ergibt sich eine Standzeit von etwa 3 Wochen.) Das SQUID-Meßsystem gibt folgende mechanische Randbedingungen vor:

Nenndurchmesser des "kalten Strahlrohrs":	100mm
Innendurchmesser Detektorsystem:	132mm
Außendurchmesser Detektorsystem:	260mm
Länge Detektorsystem:	100mm
Gewicht ca.	8 kg

Da das gesamte einzubauende Meßsystem im Betrieb supraleitend sein muß und die kleinste Sprungtemperatur die der Bleiabschirmung mit  $T_c = 7.2$  K ist, wird ein Kryostat mit Helium als Kältemittel notwendig. Mit einem Refrigeratorcryostat ist diese Temperatur für eine solch große Masse nicht zu erreichen. Ein Verdampfercryostat ist für einen solch großen Körper ebenfalls nicht zweckmäßig, zumal Temperaturschwankungen bei diesem Kryostatentyp schwer auszuschalten sind.

Bereits zu Beginn der Arbeit hat man sich aus den genannten Gründen daher für einen Badkryostaten entschieden, bei dem das Meßsystem im Kontakt mit siedendem, flüssigem Helium ist. Wird die Heliumkammer stets drucklos gehalten so kann die LHe-Temperatur konstant bei 4.2 K gehalten werden.

Für das Gesamtsystem ergibt sich also die in Abb.17 abgebildete Prinzipskizze. Das Detektorsystem mit Abschirmung soll sich in einem Heliumbadkryostaten auf einer konstanten Temperatur von 4.2 K befinden. Der Ionenstrahldurchgang ist frei.

### **3.3. Anforderungsliste**

Aus allen oben genannten Aspekten ergab sich die folgende Anforderungsliste, die das Ziel der Konstruktion festlegt.

#### **Festforderungen:**

- Badkryostat
- Rohranschluß mit DN 150 CF
- Nenndurchmesser des kalten Strahlrohrs 100mm
- Kammertemperatur 4.2 K
- freier Ionenstrahldurchgang
- keine Verwendung von LN<sub>2</sub>
- demontierbare Kammer
- 1 mechanische Lineardurchführung mit DN 20 KF  
für den Heliummantelheber
- 1 elektrische Meßdurchführung für 8 Pole mit DN 20 KF
- 1 elektrische Meßdurchführung für 6 Meßleitungen mit DN 16 KF
- 1 elektrische Meßdurchführung ins Vakuum für 8 Pole mit DN 16 KF
- Abstand zum Boden 2000 mm

#### **Mindestforderungen:**

- maximale Einbaulänge 2000mm
- LHe-Verbrauch kleiner 5 l/Tag
- LHe-Vorratsvolumen maximal 20 l
- maximale Leckrate  $10^{-9} \frac{\text{mbar l}}{\text{s}}$

# Prinzipskizze

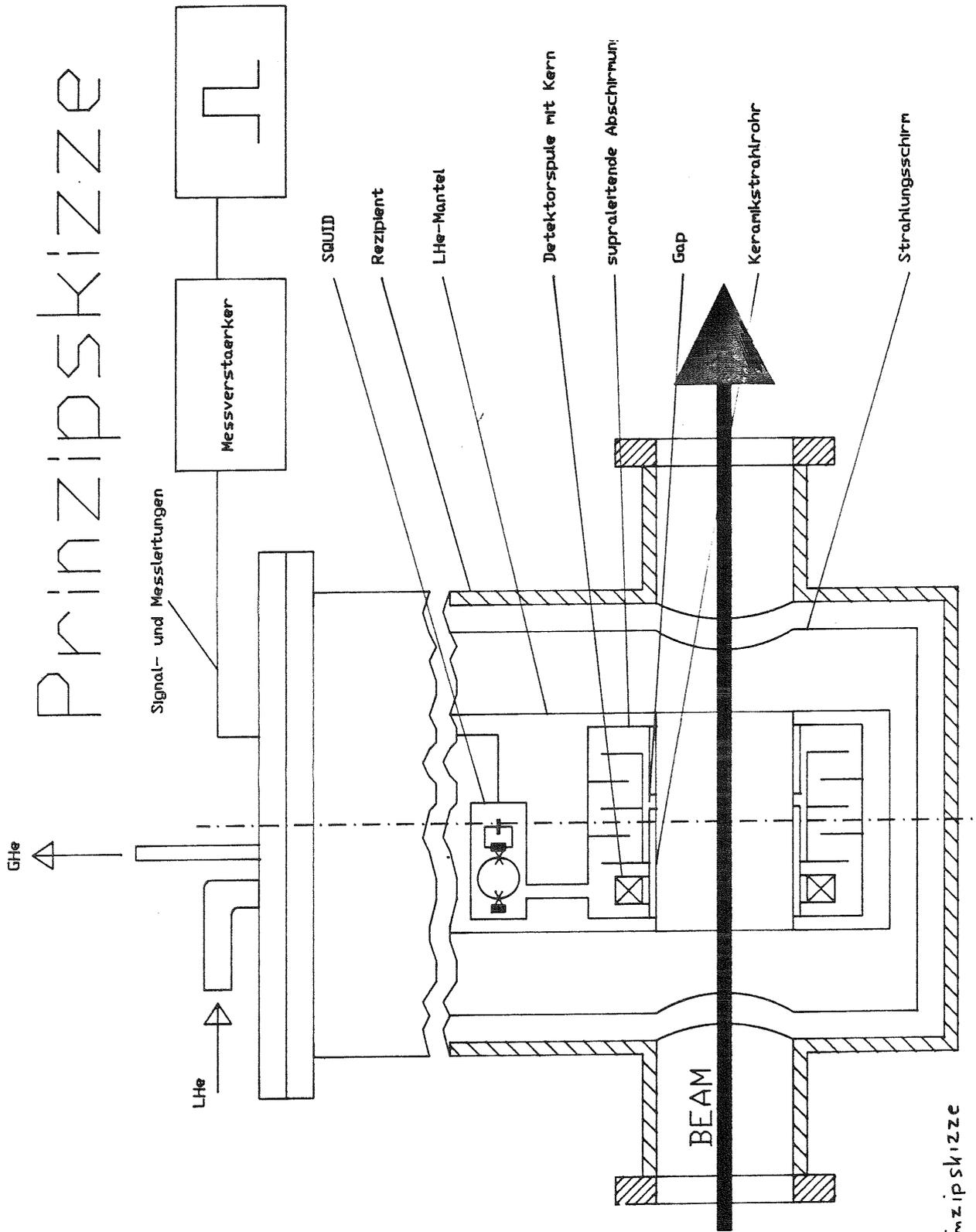


Abb. 17: Prinzipskizze

#### **4. Lösungsvarianten**

Im Verlauf der Diplomarbeit wurden zwei grundsätzliche Lösungsvarianten entworfen. Der Hauptunterschied lag in der Realisierung des Strahlungsschirmes, bei dem zu bedenken war, daß auf die übliche LN<sub>2</sub>-Abschirmung zu verzichten ist.

Zum einen wurde ein abgasgekühlter Strahlungsschirm entworfen, bei dem das Strahlungsschild passiv mit Hilfe von kaltem Heliumgas gekühlt wird, zum anderen eine aktive Strahlschildkühlung mittels Kryo-Refrigerator.

Ein zu diesem Zeitpunkt bereits fertigkonstruiertes Bauteil war das kalte Strahlrohr (Strahlrohr durch den LHe-Bereich) mit seinem Isolierrohr. Eine genauere Beschreibung dieses zentralen Bauelementes findet sich in den Kapiteln 6.2. und 6.3.. Auf alle Einzelheiten, die schließlich zur endgültigen Kostruktion geführt haben, kann in diesem Rahmen nicht eingegangen werden.

##### **4.1. Abgasgekühlter Strahlungsschirm**

Diese Variante verwendet weder ein zusätzliches Kältemittel noch eine zusätzliche Kältemaschine. Die zu Grunde liegende Idee ist die Ausnutzung der Enthalpie des kalten He-Dampfes, die bei 1541.8 kJ/kg liegt. Die Entwurfskizze zu dieser Variante ist in Abb.18 dargestellt.

Ein solches System regelt sich selbst. Die thermische Belastung des Heliumbades führt zur Verdampfung von Helium. Dieser kalte Heliumdampf wird nicht direkt aus dem Kryostaten geleitet, sondern durch ein doppelwandiges Abschirmsystem um das Bad herum. Dabei nimmt der Dampf weiter Energie auf, kühlt also die Abschirmung, wird erwärmt und verläßt den Kryostaten mit annähernd Raumtemperatur. Da die Badbelastung und somit auch die Abdampftrate, unter anderem von der Abschirmtemperatur abhängt, und diese wiederum von der Abdampftrate, entsteht ein sich selbst regelndes System. Erwärmt sich die Abschirmung, so steigt die thermische Belastung des Bades. Durch die höhere Belastung verdampft mehr Helium und dadurch wird der Schirm abgekühlt, die thermische Belastung des Bades wird also wieder geringer.

Aufwendig ist die Konstruktion der Heliumabgasführung. In dem Entwurf wurden dünn- und doppelwandige Gefäße verwendet, in welchen das Helium nach unten und schließlich nach oben aus dem Kryostaten herausgeführt wird. Um eine gewisse Festigkeit dieser Gefäße zu erreichen und gleichzeitig den kalten Heliumdampf möglichst turbulent strömen zu lassen, sollten die Wände punktverschweißt werden.

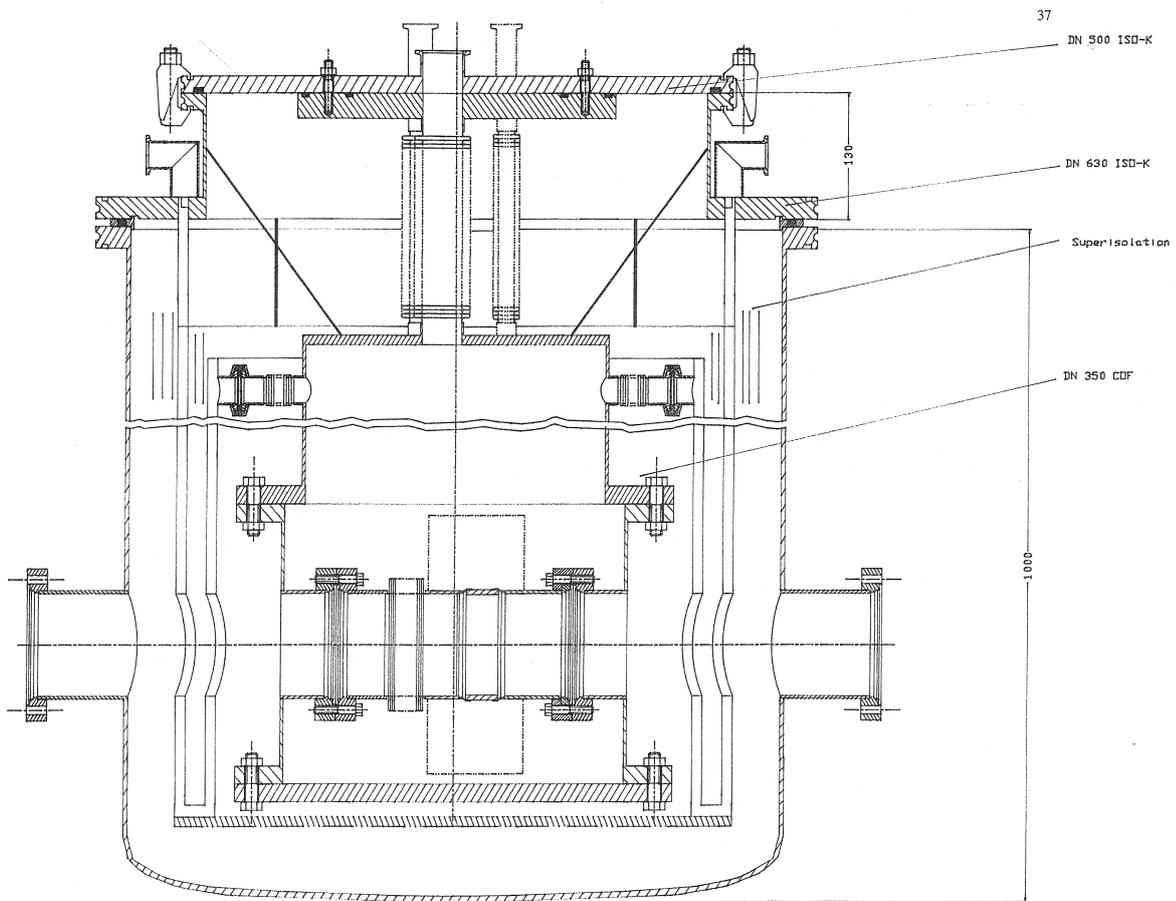


Abb. 18: Entwurfskizze eines Kryostaten mit enthalpiegekühlten Strahlungsschirm

#### **4.2. Refrigeratorgekühlter Strahlungsschirm**

In dieser Lösungsvariante wird eine zusätzliche, aktive Kühlung verwendet, um einen Strahlungsschild auf tiefe Temperatur zu bringen. Da eine Kühlung mit Stickstoff nicht möglich ist, wurde als Alternative ein Refrigeratorsystem (z.B. Gifford-McMahon-Verfahren, vgl. 2.1.2.) in Betracht gezogen. Die Konstruktion der Abschirmung vereinfacht sich gegenüber der abgasgekühlten Variante; die Abschirmung besteht dann aus einem einwandigen Kupferblech, an das der verwendete Refrigerator thermisch angekoppelt wird.

Große Probleme machen bei der Verwendung eines solchen Refrigerators die mechanischen Schwingungen. Zum einen muß darauf geachtet werden, daß der verwendete Kaltkopf selbst möglichst vibrationsfrei arbeitet, zum zweiten muß man bei einem dermaßen empfindlichen Meßgerät auch die Möglichkeit einplanen, daß der Kaltkopf für die Dauer einer Messung abgestellt werden kann.

Das Refrigeratorsystem kann so ausgewählt und dimensioniert werden, daß der Strahlungsschirm eine Temperatur weit unter 80 K erreicht. Dadurch ist es möglich, die Heliumbadbelastung durch Strahlung sehr gering zu halten. Sollte es auch nötig sein, den Kaltkopf für die Dauer einer Messung abzuschalten, wäre dies ohne zu hohe Heliumverluste möglich.

Der Strahlungsschirm muß nicht mehr getrennt aufgehängt werden, er sitzt auf dem Kaltkopf.

#### **4.3 Auswahl**

Die Auswahlkriterien waren vor allem die bereits angesprochenen Vor- und Nachteile der einzelnen Lösungsvarianten. Ausschlaggebend war die Tatsache, daß erste Berechnungen mit Finite-Element-Programmen für die enthalpiegekühlte Schirmungsvariante gezeigt haben, daß die Abdampfraten für einen solch großen Kryostaten zu hoch wären, um den Schirm auf eine vertretbare Temperatur zu bringen. Mit einer solchen passiven Kühlung ist die angestrebte Standzeit nicht zu realisieren.

Allein aus diesem Grund ist eine Entscheidung für einen refrigeratorgekühlten Schirm gefallen. Hinzu kommt die weitaus einfachere Konstruktion dieses Schirmes und die einfachere Kryostatmontage.

Der größte Nachteil dieser Variante sind die Vibrationen, die durch den Kaltkopf erzeugt werden. Jedoch ist es hier möglich, diese konstruktiv zu vermindern und gegebenenfalls den Refrigerator für die Dauer einer Messung abzuschalten.

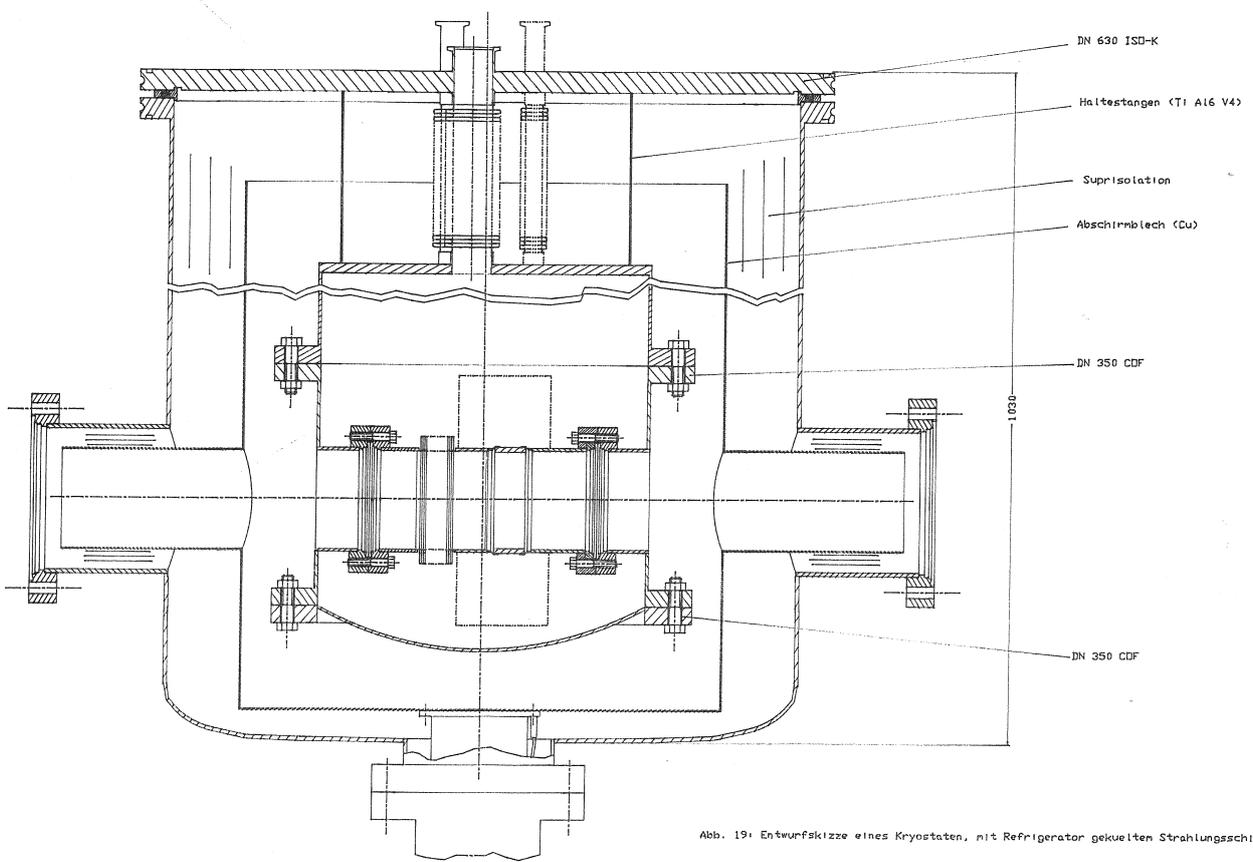


Abb. 19: Entwurfskizze eines Kryostaten, mit Refrigerator gekühlten Strahlungsschirm

## **5. Dimensionierung**

Bei der Dimensionierung des Kryostaten kommt der Minimierung der Heliumbadbelastung die größte Bedeutung zu. Festigkeitsberechnungen sind in dieser statischen Konstruktion nur für die Heliumbadaufhängung durchzuführen. Für die durch Überdruck belasteten Teile wurden Standardwandstärken verwendet.

Außer durch die vorgegebenen Anschlußmaße und Forderungen wurde die Konstruktion durch die Dimensionierung auf einen LHe-Verbrauch von 5 l LHe pro Tag bestimmt. Im folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Dimensionierungsrechnungen für den Kryostaten, wie er in Kapitel 6 vorgestellt wird, dargelegt. Diese Ergebnisse sind die Folge einer schrittweisen Annäherung an die endgültige Konstruktion, welche durch einen sukzessiven Prozeß gewonnen wurden. Die folgenden Berechnungen stellen das Endergebnis dieses Prozesses dar.

Wie bereits in Kapitel 2.3. dargelegt, können bei einem Isoliervakuum von  $10^{-6}$  mbar die das Heliumbad thermisch belastenden physikalischen Prozesse auf zwei wesentliche reduziert werden, nämlich die Wärmeleitung und die Wärmestrahlung. Sind diese Anteile bekannt, läßt sich eine Aussage über den zu erwartenden LHe-Verbrauch und somit die Standzeit machen.

### **5.1. Wärmeleitung**

Der Anteil der Wärmeleitung wird im wesentlichen durch Festkörperleitung erzeugt. Wie bereits in Kapitel 2.4. gezeigt, läßt sich die Leitung durch große Längen, kleine Querschnitte, geeignete Werkstoffe und thermische Anbindung an einen separat gekühlten Strahlungsschirm minimieren. Aufgrund der sehr hohen Anforderungen an die Standzeit mußten alle diese Möglichkeiten in der Konstruktion berücksichtigt werden.

#### **5.1.1. Wärmeleitung durch die Aufhängung**

Es handelt sich hierbei um 3 Stäbe mit Gewinde M4, also einem Kerndurchmesser von 3.2 mm. Als Werkstoff wird wegen seiner guten Zugfestigkeit und geringen Wärmeleitung eine Titanlegierung gewählt (Ti Al6 V4). Diese ist ein in der Kryotechnik gern verwendeter Konstruktionswerkstoff, da er es wegen seiner Eigenschaften (6.2.) möglich macht, auch bei großer Belastbarkeit die Querschnitte gering zu halten. Die Wärmeleitkurve ist in Abb.20 dargestellt.

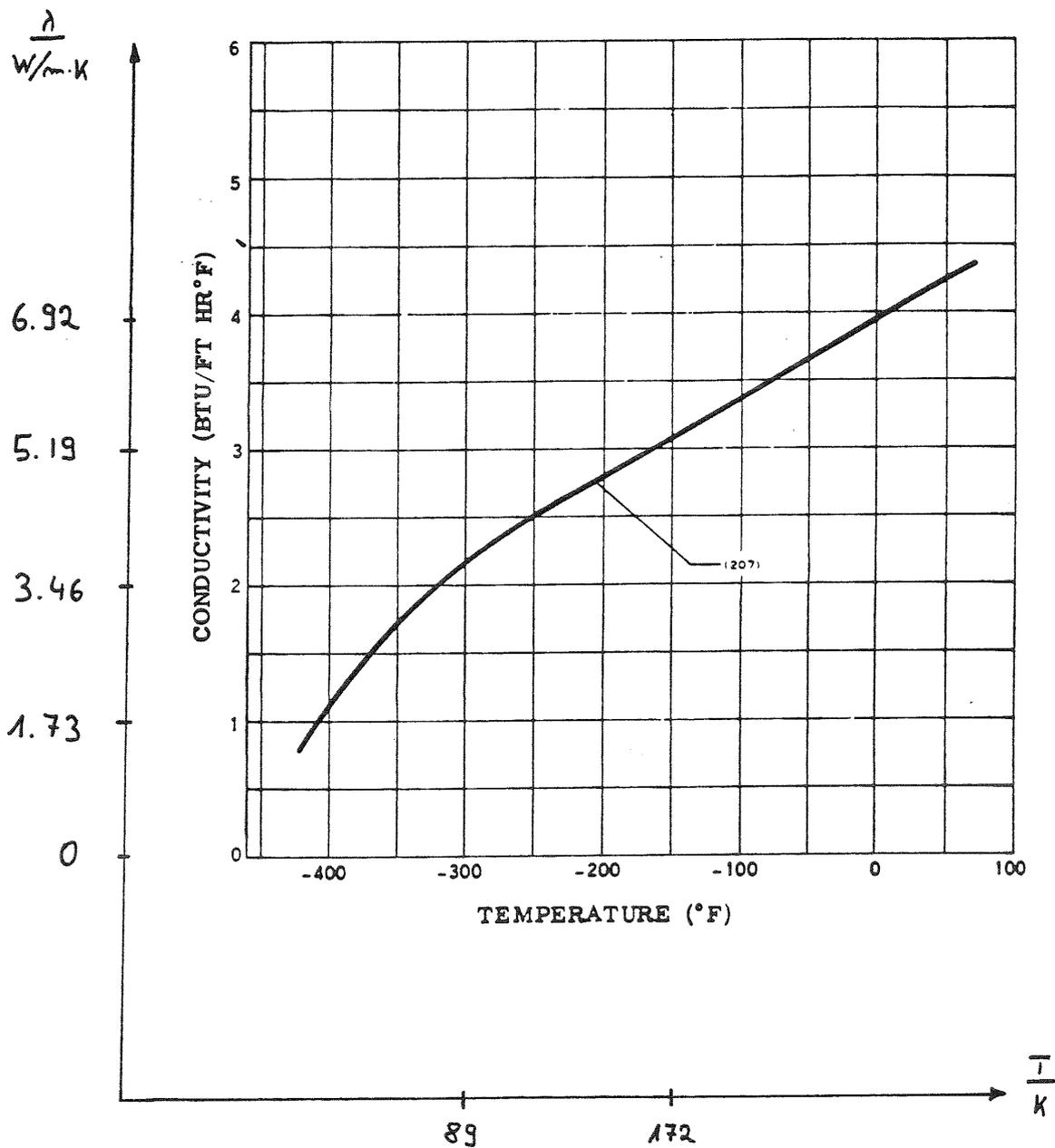


Abb.20: Wärmeleitkurve von Ti Al6 V4 /15/

Die Aufhängung wird nach 100 mm thermisch mit einem Cu-Strahlungsschirm verbunden, der mittels Refrigerator und Abgaskühlung gekühlt wird. Die Temperatur an der Koppelstelle beträgt etwa 50 K (vgl. Kapitel 5.4). Für diese Anordnung ist in Abb.21 das entsprechende Ersatzschaltbild gezeichnet.

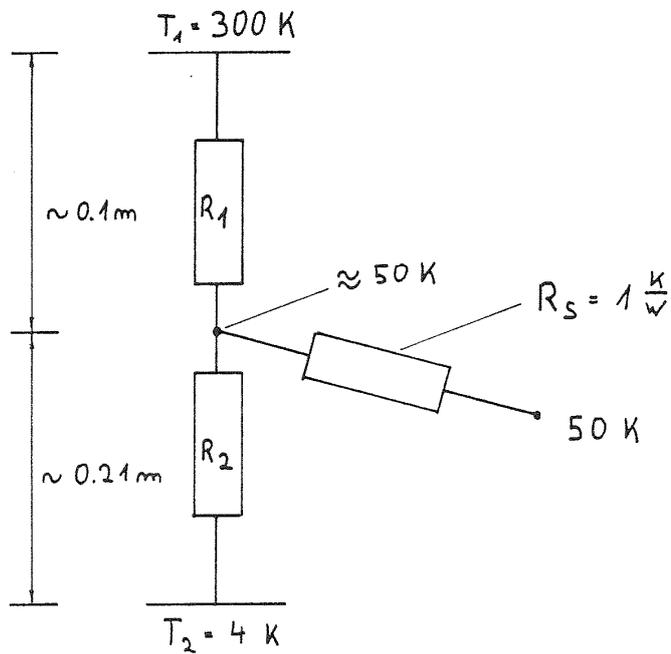


Abb.21: Ersatzschaltbild für die Wärmeleitung durch die Aufhängung

Aus (9) erhält man einen Ausdruck für den Wärmewiderstand

$$(15) \quad R_w = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{A}$$

mit

$$(15a) \quad \bar{\lambda} = \frac{1}{\Delta T} \cdot \int_{T_2}^{T_1} \lambda \cdot dT.$$

Aus Abb.20 wird  $\int \lambda \cdot dT$  approximiert mit  $\lambda = mT + b$ . Für

-150°F = 172 K folgt 3 BTU/FT HR°F = 5.19 W/m K

-300°F = 88.7 K folgt 2 BTU/FT HR°F = 3.46 W/m K.

Man erhält also

$$(16) \quad \lambda = 0.0208 \cdot T + 1.612$$

und

$$(17) \quad \int_{4K}^T \lambda \cdot dT = 0.0104 \cdot T^2 + 1.612 \cdot T - 6.612$$

Daraus lassen sich die jeweiligen Wärmewiderstände berechnen.

$$\text{Für } T=50 \text{ K gilt } \int_4^{50} \lambda \cdot dT = 99.98 \frac{\text{W}}{\text{m}}; \text{ daraus folgt } \bar{\lambda}_2 = 2.17 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}.$$

$$\text{Für } T=300 \text{ K gilt } \int_4^{300} \lambda \cdot dT = 1413 \frac{\text{W}}{\text{m}}; \text{ also nach (10) } \int_{50}^{300} \lambda \cdot dT = 1313 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

$$\text{und somit } \bar{\lambda}_1 = 5.25 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}.$$

Mit  $r = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  und  $A = 8.04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$  folgt mit den gegebenen Längen  $l_1$  und  $l_2$

$$R_1 = 2367.5 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_2 = 12012 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Damit läßt sich die thermische Belastung auf den Schirm  $q_S$  und auf das Heliumbad  $q_{\text{He}}$  berechnen. Mit

$$(18a) \quad q_{\text{ges}} \cdot R_1 = T_1 - T_0$$

$$(18b) \quad q_S \cdot R_S = T_0 - 50\text{K}$$

$$(18c) \quad q_{\text{He}} \cdot R_2 = T_0 - 4\text{K}$$

und

$$(19) \quad q = q_S + q_{\text{He}}$$

folgt

$$q_{\text{He}} = 3.8 \text{ mW}$$

$$q_S = 102 \text{ mW}$$

$$q_{\text{ges}} = 105.8 \text{ mW},$$

für drei Halterungen also

$$q_{\text{He}} = 11.4 \text{ mW}$$

$$q_S = 306 \text{ mW} .$$

### 5.1.2. Wärmeleitung durch die Durchführungen

Die Durchführungen sind ebenfalls nach 100 mm an den Schirm thermisch gekoppelt. Zusätzlich zu dieser Ankopplung verringert sich der Querschnitt nach 100 mm und die effektive Länge wird durch die Verwendung von Wellbälgen größer (Abb.22).

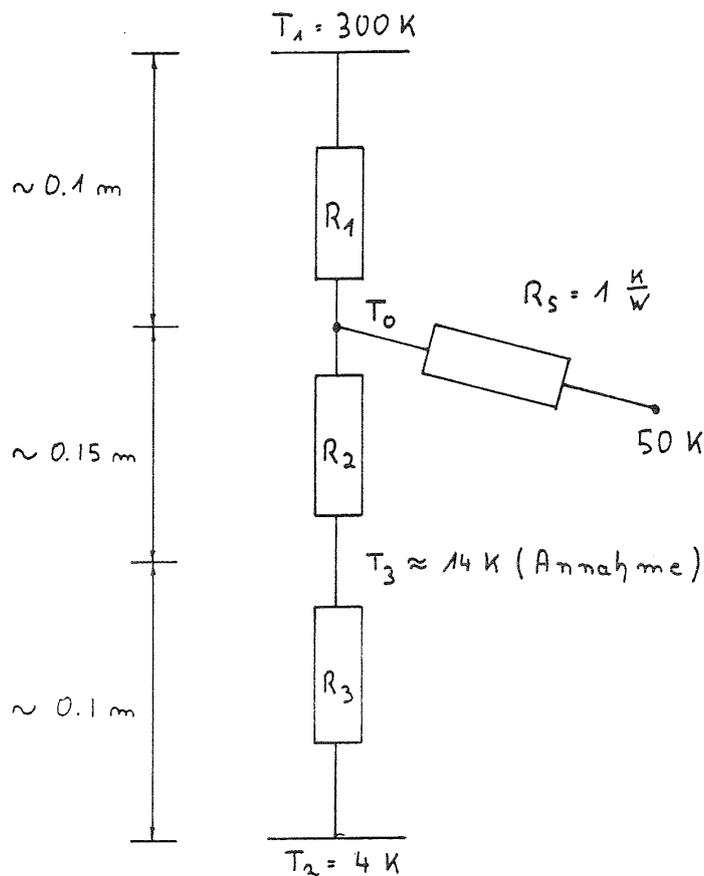


Abb.22: Ersatzschaltbild für die Wärmeleitung an den Durchführungen

Für das Rohr Durchmesser 16x1 mm ergibt sich eine Fläche von  $5.34 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ . Für den Wellbalg ergibt sich eine effektive Länge von 4.12 mm auf 1 mm und mit der Wandstärke von 0.1 mm eine gemittelte Fläche von  $A_w = 6.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ .

Die Temperatur  $T_3$  wird mittels Iterationsverfahren (vgl. Abschnitt 5.2.1.) ermittelt.  $T_3$  ergibt sich zu etwa 10 K. Mit denselben Berechnungen wie oben ergibt sich

$$q_{\text{He}_{16}} = 1.5 \text{ mW}$$

$$q_{\text{S}_{16}} = 1.55 \text{ W.}$$

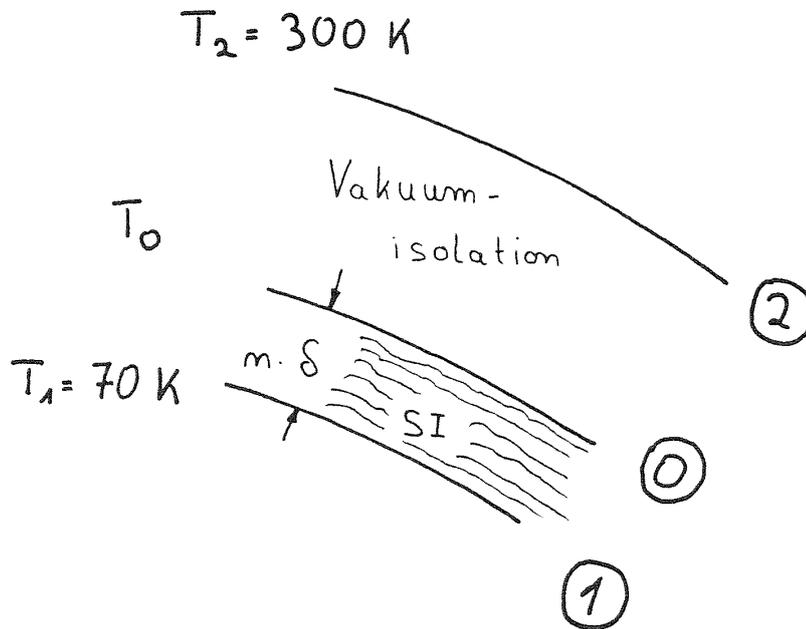


Abb.23: Strahlungsschirm mit Vakuum- und Superisolation

Superisolation besitzt einen Wärmestrahlungs- und einen Wärmeleitungswiderstand (Kontakte der SI- Schichten oder Kontakte über die Abstandhalter). Mit steigender Temperatur nimmt der Leitungsanteil ab (bei 300 K beträgt er noch etwa 20% /16/). Der Widerstand einer Superisolation berechnet sich aus der Summe der beiden Anteile, also nach /16/ zu

$$(20) \quad q_{SI} = \frac{1}{n+1} \left( \frac{\lambda_{eff}}{\delta} \cdot A_{mR} + \frac{\sigma \cdot \epsilon_R (T_0^4 - T_1^4)}{T_0 - T_1} \cdot A_1 \right) \cdot (T_0 - T_1)$$

mit

$$(21) \quad A_{mR} = \frac{A_0 - A_1}{\ln \frac{A_0}{A_1}}$$

Daraus wird

$$(22) \quad \frac{1}{R_1} = \frac{1}{n+1} \cdot \left( \frac{\lambda_{eff}}{\delta} \cdot A_{mR} + \frac{\sigma \cdot \epsilon_R \cdot (T_0^4 - T_1^4)}{T_0 - T_1} \cdot A_1 \right),$$

wobei  $\epsilon_R$  mit 0.05 in der Literatur angegeben wird /16/. Der Widerstand der Vakuumisolation ist folglich

$$(23) \quad \frac{1}{R_2} = \frac{\sigma \cdot \epsilon'_R \cdot (T_2^4 - T_0^4) \cdot A_0}{T_2 - T_1}.$$

$$(23a) \quad T_0 - T_1 = R_1 \cdot q_S$$

$$(23b) \quad T_2 - T_0 = R_2 \cdot q_S.$$

Mit (22), (23), (23a), analog zu (18), und (23b) lässt sich  $T_0$  durch Iteration bestimmen und folglich auch die durch die Vakuum- und Superisolation auf den Schirm übertragene Leistung.

Zunächst wird die Iteration für die Abschirmrohre durchgeführt. Wichtig ist der Hinweis auf die Temperatur der Abschirmung, welche mit 50 K angegeben wird. Diese wird in Kapitel 5.4. berechnet, und hängt von der Belastung ab, wobei aber auch umgekehrt die Belastung von der Schirmtemperatur abhängig ist. Diese Ergebnisse wurden ebenfalls durch Iteration gewonnen.

Tab.4: Abmessungen und Temperaturen der Abschirmrohre

l	d <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	d <sub>0</sub>	A <sub>0</sub>	d <sub>2</sub>	A <sub>mR</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
2x0.4 m	0.1 m	0.25 m <sup>2</sup>	0.13 m	0.33 m <sup>2</sup>	0.15 m	0.29 m <sup>2</sup>	50 K	300 K

Mit den Abmessungen und Temperaturen der Konstruktion, die in Tab.4 aufgelistet sind, erhält man durch das Iterationsverfahren:

Tab.5: Darstellung der Ergebnisse des Iterationsverfahrens

	1. Durchlauf	2. Durchlauf	3. Durchlauf
T <sub>0</sub> (Aus vorherigem Durchlauf) [K]	200 (Annahme)	298.0	299.8
R <sub>1</sub> [K/W]	1379	694	656
R <sub>2</sub> [K/W]	8.23	5.0	4.95
q <sub>S</sub> [W]	0.18	0.36	0.36
T <sub>0</sub> (neu) [K]	298.0	299.8	297.9

Die Iteration konvergiert sehr schnell und wird deshalb nach dem 3. Iterationsschritt abgebrochen. Die Strahlungsbelastung auf die beiden Abschirmrohre durch die Superisolation beträgt etwa

$$q_{S_R} = 0.36 \text{ W}.$$

Berücksichtigt man zusätzlich die Strahlung, die von 300 K warmen Flächen in das Rohr (also ohne dazwischenliegende SI) gelangt, in grober Näherung nach (11) und mit der Fläche, die das Rohr abschließen würde, erhält man eine Gesamtwärmebelastung auf die Rohre von

$$q_{S_{\text{Ges}}}} = 1.0 \text{ W}.$$

Um herauszufinden, ob diese Leistung einen Einfluß auf die Temperatur des Kupferschirmes, in diesem Fall speziell der Rohre, hat, wurden Berechnungen nach der Finite-Elemente-Methode durchgeführt. Es ergab sich, daß der Temperaturgradient über das gesamte Rohr maximal 1 K beträgt und somit praktisch bedeutungslos ist. Man kann dies durch einen Vergleich der Wärmeleitkoeffizienten erklären, denn es ist

$$\frac{\lambda_{Cu}}{\lambda_{eff}} = \frac{3 \cdot 10^2}{8 \cdot 10^{-5}} \approx 4 \cdot 10^6. \text{ Das heißt, die Leistung, die von außen radial auf den Kupferschirm dringt, wird axial praktisch sofort abgeführt.}$$

Mit denselben Methoden wurden die Belastungen der Mantelfläche, des Boden und des Deckels berechnet.

Tab.6: Flächenabmessungen der Konstruktion

$A_{\text{Boden}}$	$A_{\text{Deckel}}$	$A_{\text{Mantel}}$	$A_{\text{mR Mantel}}$	$A_1$	$A_2$
0.2 m <sup>2</sup>	0.2 m <sup>2</sup>	1.1 m <sup>2</sup>	1.2 m <sup>2</sup>	0.75 m <sup>2</sup>	2.0 m <sup>2</sup>

Mit den Flächenmaßen aus Tab.6 folgt

$$q_{S_{\text{Boden}}} = 0.28 \text{ W}$$

$$q_{S_{\text{Deckel}}} = 0.28 \text{ W}$$

$$q_{S_{\text{Mantel}}} = 1.71 \text{ W}.$$

Die Summe aller thermischen Belastungen (Leitung und Strahlung) auf den Schirm beträgt also:

$$q_{S_{\text{Gas}}} \approx 9.0 \text{ W} .$$

### **5.2.2. Wärmestrahlung vom Strahlungsschirm in den LHe-Bereich**

Die Leistung, die durch Strahlung vom Schirm in den LHe-Bereich transportiert wird, läßt sich unter Nichtberücksichtigung des freien Durchgangs direkt mit (11) berechnen. Mit  $A_1=0.75 \text{ m}^2$  und  $T_2=50 \text{ K}$  folgt

$$q_{\text{HeSchild}} = 0.026 \text{ W} .$$

### **5.2.3. Wärmestrahlung durch den freien Durchgang in den LHe-Bereich**

Besondere Bedeutung kam der Dimensionierung der Strahlrohrabschirmung in Bezug auf die immer vorhandene Strahlung von 300 K-Flächen auf 4 K-Flächen zu. Die Strahlrohrabschirmung sollte so konstruiert werden, daß die Leistung, die durch den freien Durchgang in den LHe-Bereich transportiert wird, in der Größenordnung derjenigen in 5.2.2 berechneten liegt.

In Abb.24 ist der betreffende Bereich schematisch dargestellt. Berechnet wird die Strahlung vom Bereich 1 (300 K) in den Bereich 2 (4 K) ohne die Berücksichtigung wechselseitiger Reflexionen. Aus (11) wird unter Beachtung, daß nicht immer die gesamten Flächen einander zugekehrt sind (Einstrahlwert  $\varphi_{21}$ )

$$(24) \quad q_{12} = \varphi_{21} \cdot A_2 \cdot \epsilon_R \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) ,$$

mit

$$(25) \quad \varphi_{21} = \frac{1}{\pi \cdot A_2} \cdot \iint_{A_1, A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{s^2} dA_1 dA_2 .$$

Dabei sind  $\beta_i$  die Winkel zwischen der Strahlungsrichtung und der Flächennormalen;  $s$  gibt den Abstand zweier Punkte auf den Flächen 1 und 2 an (Abb.25).

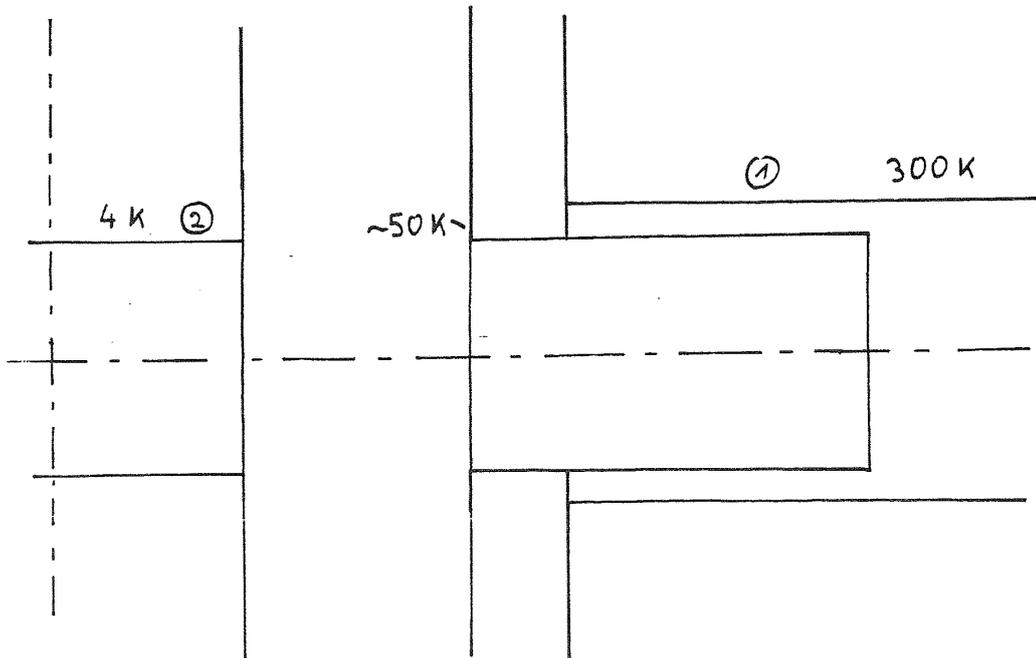


Abb.24: Bereich des freien Strahlrohrdurchganges, schematisch

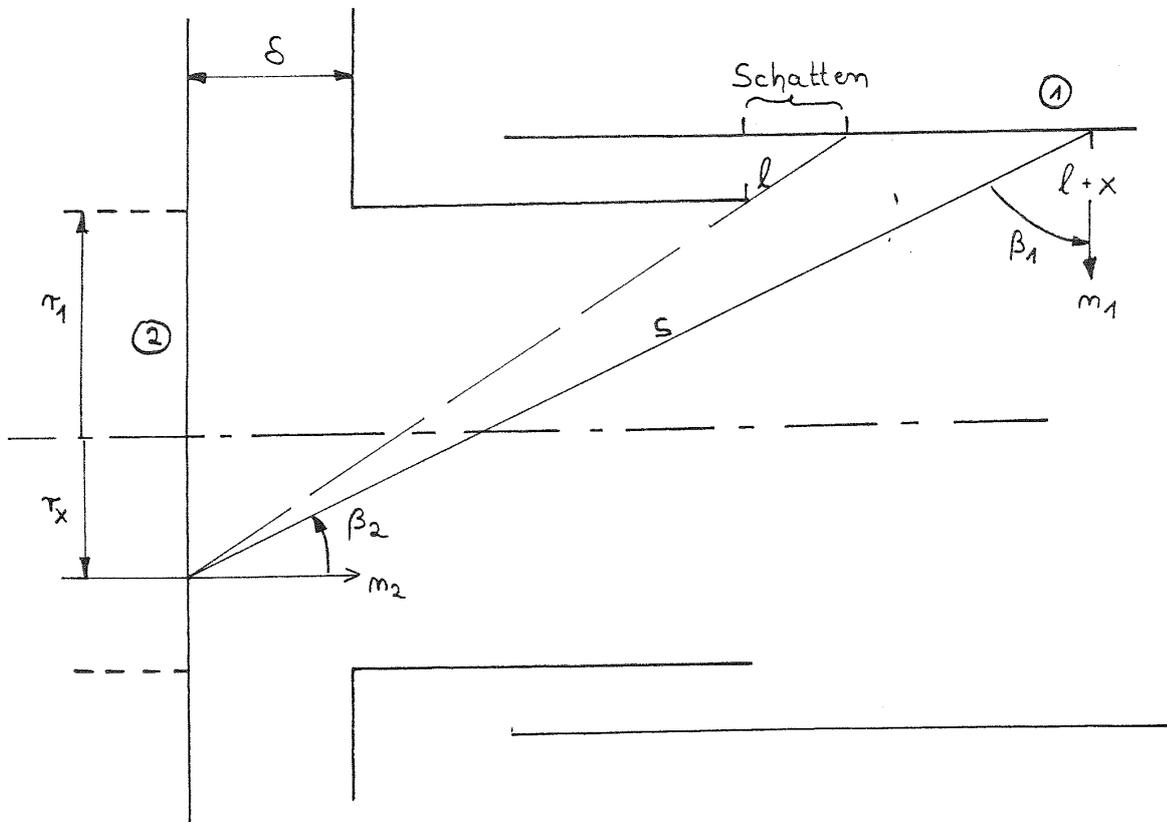


Abb.25: Schattenwurf



Also gilt

$$(26) \quad r_x = r_1 + \Delta x = r_1 \left( 1 + \frac{2 \cdot \delta}{l+x} \right)$$

und mit

$$(27) \quad r_{x_{\max}} = r_{x \rightarrow 0} = r_1 \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot \delta}{l} \right)$$

folgt

$$(28) \quad \int_{A_2} dA_2 \Rightarrow \int_0^{2\pi} d\varphi_2 \cdot \int_0^{r_1} r \cdot dr = 2\pi \cdot \int_0^{r_1} r \cdot dr.$$

### 3. Näherung

Der Winkel  $\beta_2$  erreicht einen Maximalwert von  $11^\circ$  (Abb.26). Daraus berechnet sich ein minimaler Cosinuswert von 0.98. Es wird vereinfacht:

$$\cos \beta_2 \cong 1$$

### 4. Näherung

Für die weiteren Berechnungen wird der Einfluß des Schattenwurfs im Sinne einer oberen Grenze vereinfacht: die Kupfer-Abschirmung wird um die Länge des Schattens bei  $x=0$  verlängert.

Im Fall eines 400 mm langen Rohres wird in den weiteren Berechnungen 500 mm eingesetzt.

### 5. Näherung

Auch für die Fläche 1 wird axiale Symmetrie angenommen:

$$(29) \quad \int_{A_2} dA_1 \Rightarrow r_1 \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi_1 \cdot \int_0^{\infty} dx = 2\pi \cdot r_1 \cdot \int_0^{\infty} dx.$$

Mit den bisherigen Näherungen reduziert sich (25) auf

$$(30) \quad \varphi_{21} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r_1}{\pi \cdot A_2} \int_0^\infty dx \cdot \int_0^{r_1 \left(1 + \frac{2\delta}{l+x}\right)} \frac{r \cdot \cos \beta_1}{s^2} \cdot dr.$$

Der Ausdruck  $\frac{\cos \beta_1}{s^2}$  berechnet sich nach Abb.28 zu

$$(31) \quad \frac{\cos \beta_1}{s^2} = \frac{1}{(l+x+\delta)^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{r_1+r}{l+x+\delta}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}.$$

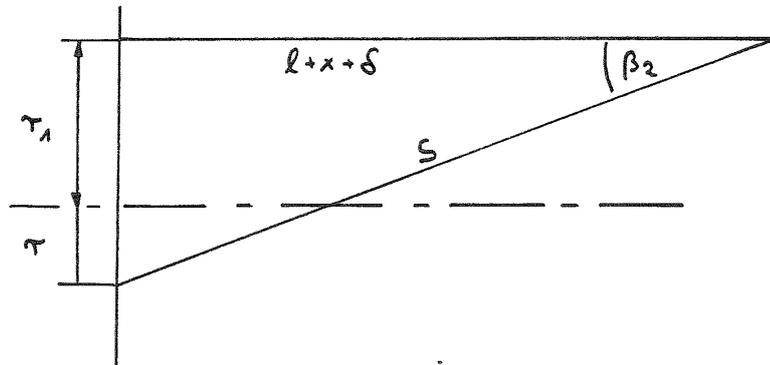


Abb.28: Zur Berechnung von  $\frac{\cos \beta_1}{s^2}$

6. Näherung

Die Näherung

$$(32) \quad \frac{1}{(l+x+\delta)^2} \cdot \left(1 + \left(\frac{r_1+r}{l+x+\delta}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}} \approx \frac{1}{(l+x+\delta)^2} \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{(r_1+r)^2}{(l+x+\delta)^2}\right)$$

mit

$$(33) \quad \frac{r_1 + r}{l + x + \delta} \ll 1$$

gilt also für  $l > 2 \cdot r$ . Daraus ergibt sich der Einstrahlwert zu

(34)

$$\Phi_{21} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_1^3}{A_1} \cdot \int_0^\infty \left( \frac{dx}{2 \cdot (d+l+\delta)} + \frac{2 \cdot \delta \cdot dx}{(d+l+\delta)^2 \cdot (l+x)} - \frac{17 \cdot r_1^2 \cdot dx}{(x+l+\delta)^4 \cdot 8} - \frac{12 \cdot r_1^2 \cdot \delta \cdot dx}{(x+l+\delta)^4 \cdot (l+x)} \right)$$

### 7. Näherung

Für die Abschätzung einer oberen Genze wird

$$\frac{1}{(l+x+\delta)^n} \approx \frac{1}{(l+x)^n} \cdot \left( 1 - \frac{n \cdot \delta}{l+x} \right) \text{ entwickelt mit der Voraussetzung } \delta \ll l+x.$$

Mit der Substitution  $y = l+x$  und mit  $\int_0^\infty \frac{dy}{y^n} = \frac{-1}{(n-1) \cdot y^{n-1}} \Big|_l^\infty = \frac{1}{(n-1) \cdot l^{n-1}}$  für  $n \geq 2$

ergibt sich

(35)

$$q_{21} = 4 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot \left( \frac{r_1}{l} \right) \cdot \left[ \frac{1}{2} + \frac{\delta}{2 \cdot l} - \left( \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{\delta}{l} \right)^2 + \frac{17}{24} \cdot \left( \frac{r_1}{l} \right)^2 \right) - \frac{7}{8} \cdot \left( \frac{r_1}{l} \right)^2 \cdot \frac{\delta}{l} + \frac{48}{5} \cdot \left( \frac{r_1}{l} \right)^2 \cdot \left( \frac{\delta}{l} \right)^2 \right] \cdot \epsilon_R \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Tab.7: Parameter und konstruktionsbedingte Abmessungen

$\epsilon_R$	$\sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)$	$4 \cdot \pi \cdot r_1^2$	$r_1 = \delta$	1	$\frac{r_1}{l} = \frac{\delta}{l}$
0.02	467 W/m <sup>2</sup>	0.0314 m <sup>2</sup>	0.05 m	0.5 m	0.1

Mit den Parametern und Abmessungen aus Tab.7 ergibt sich eine Belastung von

$$q_{12} = 0.031 \text{ W}$$

für eine Einstrahlung von beiden Seiten.

Das Ziel, die Badbelastung durch das warme Loch in der Größenordnung der restlichen Gesamtbelastung durch Strahlung zu halten, wurde somit rechnerisch erreicht.

### 5.3. Gesamtbelastung des LHe-Bades und LHe-Verbrauch

Die Summe der Badbelastung aus Wärmeleitung und Wärmestrahlung beträgt

$$q_{\text{HeGas}} \approx 150 \text{ mW} .$$

Daraus berechnet sich ein Verbrauch von etwa  $51 \frac{\text{LHe}}{\text{Tag}}$ , womit diese Forderung der Anforderungsliste theoretisch erfüllt wird.

### 5.4. Gesamtbelastung auf den Schirm, die zu erwartende Schirmtemperatur und die Abkühlzeit

Die Gesamtbelastung auf die Kupfer-Abschirmung beträgt, wie in 5.2.1. abgeschätzt, etwa 9 Watt. Dies würde für den verwendeten Kaltkopf (6.3.) einer Endtemperatur von etwa 40 K entsprechen (vgl Abschnitt 6.3., Abb.36). Um jedoch all den Unsicherheiten und Unwägbarkeiten einer Dimensionierung eines solchen Kryostatensystems Rechnung zu tragen, wurde für alle Berechnungen, die auf diese Schirmtemperatur aufbauen, ein Wert von 50 K angenommen. Die Abkühlzeit  $t$  für den Schirm ist abhängig von den Massen, die gekühlt werden müssen, also der Masse der gesamten Cu-Abschirmung (Wärmekapazität). Die Abkühlzeit berechnet sich nach

$$(36) \quad t = t_0 + \frac{C}{\bar{q}_{\text{kalt}}}$$

mit

$$(37) \quad C = \sum_i m_i \cdot \int_{20\text{K}}^{300\text{K}} c_i(T) \cdot dT$$

Dabei ist  $t_0$  die Abkühlzeit des Kaltkopfes (ohne angebaute Bauelemente) unter den vom Hersteller verlangten Standard-Abnahmebedingungen im Vakuum. (36) und (37) vernachlässigen die thermische Belastung durch Wärmestrahlung und sind somit nur für Abschätzungen geeignet. Geht man für den verwendeten Kaltkopf von  $t_0=30$  min und einer durchschnittlichen Kälteleistung von 80 Watt aus, ferner von einem Wert für das Integral in (37) von 79 Ws/g für Kupferwerkstoffe, so erhält man eine Abkühlzeit auf die Endtemperatur von etwa 200 Minuten (3.3 Stunden).

### 5.5 Abkühlung des LHe-Bereiches

Die Abkühlung des Kryostaten soll in zwei Schritten erfolgen. Zum ersten soll der Kaltkopf auf seine Endtemperatur gebracht werden und gleichzeitig durch Strahlungswechselwirkung den LHe-Bereich auf eine Temperatur von etwa 80 K bringen. Dann soll mit flüssigem Helium weiter heruntergekühlt werden.

Die Wärmekapazität des LHe-Bereiches ist durch die verwendeten Flanschverbindungen sehr groß. Die Gesamtmasse mit Meßsystem beträgt 70 kg. Nach [7] läßt sich der Verbrauch von LHe zum Abkühlen einer solchen Masse von 80 K auf 4 K angeben:

- 90 l LHe, falls nur die Verdampfungswärme zur Abkühlung genutzt wird,
- 6 l LHe falls zusätzlich die Entalpie des Heliumgases genutzt wird.

### 5.6. Zugbelastung der Aufhängestäbe

Um sicherzustellen, daß die als Aufhängung gewählten Gewindestäbe auch den zu erwartenden Zugbelastungen gerecht werden, sollen diese kurz dimensioniert werden. Das Gewicht der Heliumkammer beträgt gefüllt etwa 80 kg, daraus berechnet sich die Last zu etwa 800 N.

Geht man von einer ruhenden Belastung aus, so ergibt sich mit  $A = 24.12 \text{ mm}^2$  nach

$$(38) \quad \sigma_{zul} = \frac{F}{A}$$

eine Belastung von  $34 \text{ N/mm}^2$  für alle drei Stäbe. Setzt man nun für  $\sigma_{Grenz}$  die 0.2%-Dehngrenze von Ti Al6 V4 ein ( $1050 \text{ N/mm}^2$ ) so erhält man einen Bemessungsfaktor von

$$(39) \quad v = \frac{\sigma_{Grenz}}{\sigma_{Zul}} = 31.$$

Da der Bemessungsfaktor (Sicherheitsfaktor) das Verhältnis von auftretender zur maximal möglichen Belastung angibt, ist klar, daß die Gewindestäbedurchmesser der Aufgabe gerecht werden, selbst wenn schwellende oder gar wechselnde Belastungen auftreten würden.

## 6. Beschreibung des Kryostaten

Die Kryostatenkonstruktion läßt sich in drei Baugruppen unterteilen; zum einen das Isolierrohr (Abb.29), zum zweiten der gesamte restliche Kryostat (Abb.30) und der Refrigerator, der als Kaufteil nicht zu konstruieren war.

Das Isolierrohr konnte nicht im zeitlichen Rahmen dieser Diplomarbeit fertiggestellt werden, da Verzögerungen bei der Auftragsabwicklung und beim Hersteller den Liefertermin bis hinter das Ende der Diplomarbeitszeit verzögerten. Der Kryostat befindet sich im Bau und soll im Februar 1993 geliefert werden.

### 6.1. Konstruktionsmerkmale

Die in Abb.29 und Abb.30 mit den entsprechenden kleinen Buchstaben gekennzeichneten Wirkorte beschreiben die Konstruktionsdetails. Im Anhang befinden sich die vollständigen Konstruktionszeichnungen des Kryostaten.

- (a) Um zu verhindern, daß der vom Strahl influenzierte Wandstrom sowie Hochfrequenz- und Ausgleichsströme durch die Detektorspule des Meßsystems mitgemessen werden, muß das Strahlrohr elektrisch unterbrochen werden.  
Der zu diesem Zweck eingebaute Isolierring muß heliumdicht bei  $10^{-9}$  mbar und 4.2 K, sowie mechanisch stabil mit den Metallanschlußstücken verbunden sein. Dieser Ring ist aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Sinterkeramik gefertigt und mit zwei dünnwandigen Anschlußringen aus 1.3981 oder 1.3982 im Vakuumofen hart verlötet. Dieser Keramik-Metall-Übergang kann nun mit weiteren Bauteilen aus 1.4571 verschweißt werden; diese sind an den Schweißstößen mit Nuten versehen, die die Wärmeleitung in den Grundwerkstoff beim Schweißen vermindert.
- (b) Der Wellbalg hat verschiedene wichtige Aufgaben zu erfüllen. Zum einen muß das Isolierrohr zwischen zwei fest fixierte Flansche eingepaßt werden, so daß ein in seiner Länge veränderliches Bauteil unumgänglich ist. Zum zweiten müssen thermische Verformungen (300 K bis 4.2 K) abgefangen werden.
- (c) Um das Meßsystem mit einem Innendurchmesser von 133mm montieren zu können, mußten Flansche mit möglichst kleinem Außendurchmesser gefunden werden. Eine Möglichkeit wären sogenannte Klammerflansche,

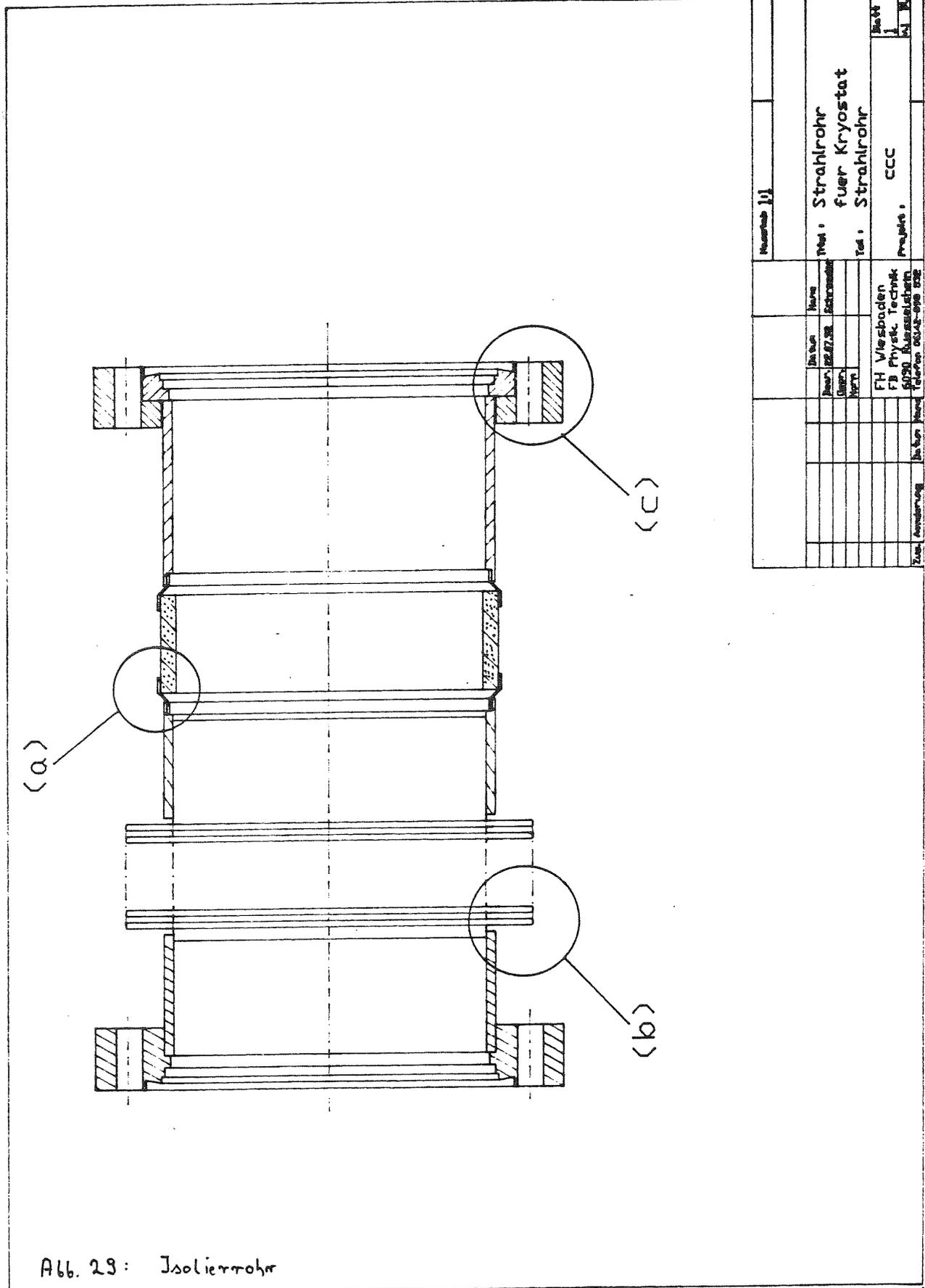


Abb. 23: Isolierrohr

Zeich. Nummer		Blatt	
111		1	
Name		Projekt	
Strahlrohr fuer Kryostat		CCC	
Teil		Strahlrohr	
FH Wiesbaden		FB Physik. Technik	
5030 Kaiserslautern		Telefon 06342-998 028	
Zust. Anfertigung		Zeich. Nord	
Name		Name	
Beauf. 22.07.88		Schröder	
Gezeichnet		Name	
Name		Name	

**ABBILDUNG: GESAMTBAU ABB30**

welche jedoch wegen Sicherheitsbedenken nicht verwendet wurden, da die Heliumdichtigkeit nach mehreren Kalt-Warm-Zyklen nicht garantiert ist. Der auch in der Kryotechnik bewährte Conflatflansch muß modifiziert werden, damit das Meßsystem montiert werden kann. Es wird daher ein drehbarer CF-Flansch verwendet, dessen Lochkreis-Ring geteilt und somit abnehmbar ist. Der Außendurchmesser des Flanschinnteils (ohne Lochkreis) beträgt 118 mm und bietet somit genug Raum, um das Meßsystem zu montieren.

- (d) Zur Montage der Abschirmrohre und zur thermischen Kontaktierung wurde diese Cu-Cu-Flanschverbindung konstruiert. Um den thermischen Kontakt zu verbessern, werden zwischen den Flanschen Indiumringe verpreßt. Die Durchmesserreduzierung macht eine Montage von ca. 20 Lagen Superisolation möglich, so daß das Strahlrohr mit aufgebrachtener Superisolation von innen durchgeschoben und befestigt werden kann.
- (e) Eines der wichtigsten konstruktiven Merkmale des Kryostaten ist der freie Durchgang für den Ionenstrahl. Daraus folgt, daß auch der Strahlungsschirm diesen freien Durchgang bieten muß. Jedoch ist, um die geforderte Standzeit zu erreichen, für den Strahlschirmdurchgang eine zusätzliche Schirmung notwendig. Die Länge dieses Abschirmrohres ergibt sich aus der Dimensionierung (Abschnitt 5.2.3.).  
Der Raum zwischen Abschirmrohr und Außenrohr bietet genügend Raum zum Aufbringung einer Vielschichtisolation.
- (f) Ein weiteres Merkmal ist die Demontierbarkeit des Kryostaten, speziell des Heliumbehälters. Konnten beim Strahlrohr noch DN 100 CF Flansche (c) verwendet werden, so wurde wegen des Durchmessers von 350 mm eine andere Flanschverbindung nötig. Da sich diese Flansche im LHe-Bereich befinden, werden an sie auch hohe Anforderungen hinsichtlich Heliumdichtigkeit bei Kalt-Warm-Zyklen zu stellen. Verwendet werden sogenannte COF-Flansche, die einen Cu-Ring in eine V-Nut verpressen. Diese Flansche haben sich in der Kryotechnik auch gegenüber superfluidem Helium als dicht erwiesen /17/. Das Prinzip dieser Dichtung ist in Abbildung 31 dargestellt.

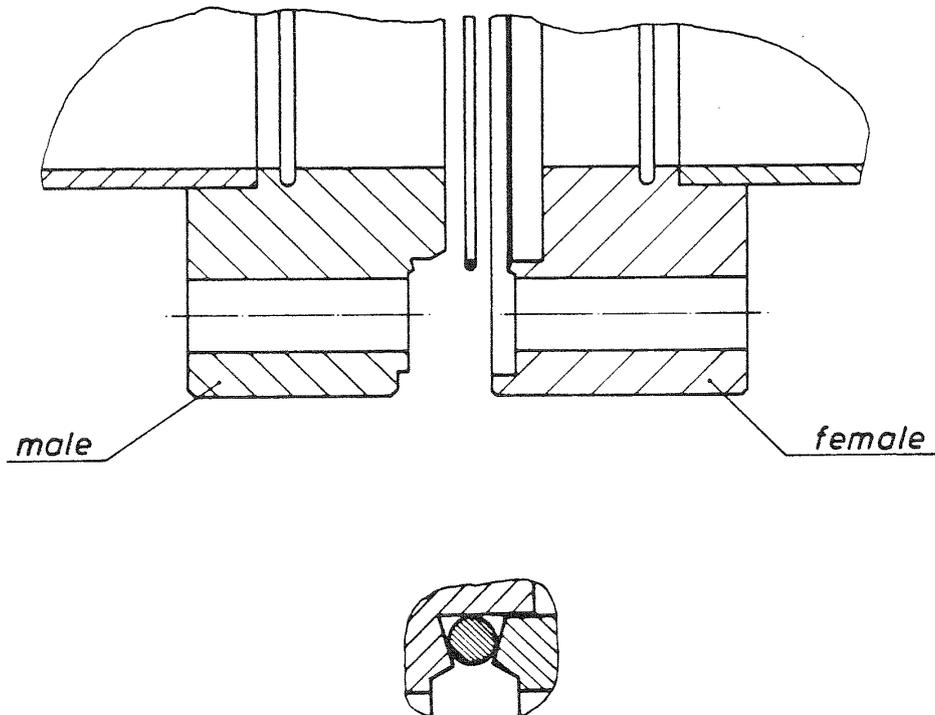


Abb.31: COF-Flansch /18/

- (g) Gehalten wird der gesamte Heliumbehälter von 3 M4-Gewindestäben aus einer Titanlegierung (Ti Al6 V4). Diese Legierung ermöglicht zum einen, aufgrund ihrer sehr hohen Zugfestigkeit auch bei tiefen Temperaturen, einen kleinen Querschnitt bei großer Last zu verwenden, zum anderen ist die Wärmeleitfähigkeit bei tiefen Temperaturen sehr gering (vgl. 5.6.). Die Gewindestäbe dienen der Minimierung der Wärmeleitungsverluste (große Längen bei kleinem Querschnitt).  
Zusätzlich sind die Gewindestäbe an den Strahlungsschirm (50 K) mittels Cu-Band thermisch angebunden. Diese Anbindung ermöglicht eine weitere Verminderung der thermischen Belastung des He-Bades (vgl.5.1.1.).
- (h) Zur weiteren Verminderung der thermischen Belastung wurden Hülsen aus EP-GF (Stesalit) an der oberen und unteren Befestigung der Gewindestäbe vorgesehen (Abb.32). Der Wärmewiderstand dieses Materials ist bei 300 K etwa um den Faktor 5 höher als der der Titanlegierung. Zusätzlich bedeuten die Hülsen weitere Wärmeübergangswiderstände.

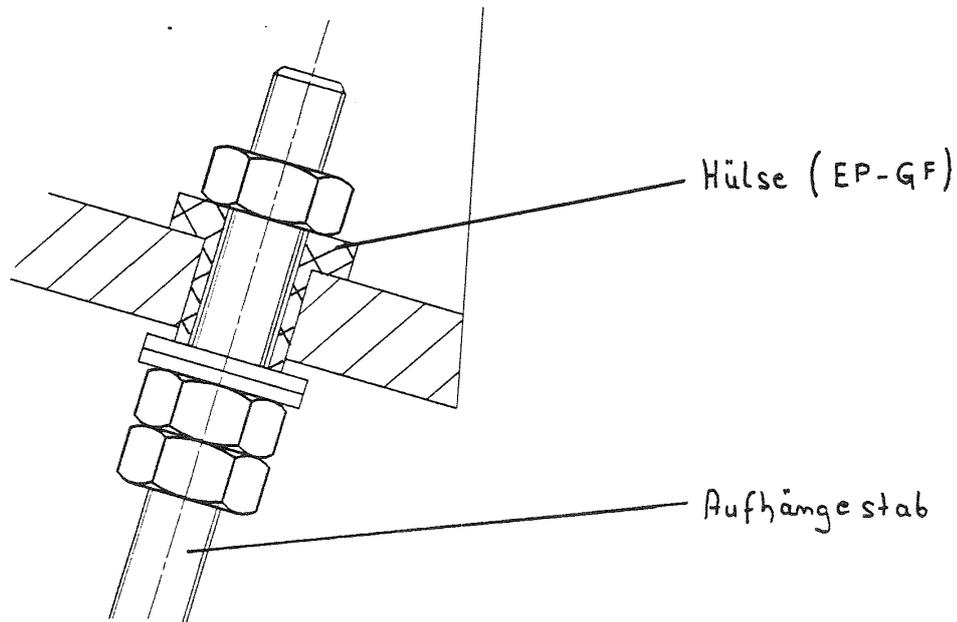


Abb.32: Zusätzliche Wärmeübergangswiderstände an den Aufhängestäben (Titan-Aluminium-Vanadium-Legierung) durch Hülsen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (EP-GF;Stesalit)

- (j) Um die obere Abschirmung zu halten und gleichzeitig eine möglichst gute Wärmekopplung zwischen Durchführung und Abschirmung zu erhalten, sind an den Durchführungsrohren Scheiben angeschweißt, die als Befestigung für die Abschirmung dienen. Die Aufgabe dieser Wärmekopplung entspricht der unter (g) beschriebenen.
- (k) Auf die Ausnutzung der Enthalpie des kalten Heliumgases sollte bei der Apparatur nicht vollständig verzichtet werden. Die obere Abschirmung wird mit einer Wendel aus heliumdurchströmtem Kupferrohr verlötet, so daß die obere Abschirmung nicht von dem Kaltkopf, sondern vom kalten Heliumgas gekühlt wird.
- (l) Um die Vereisung des oberen Flansches zu verhindern, wird der Abgasflansch in eine zusätzliche Hülse eingebaut.
- (m) Die Wellbälge der Durchführungen haben neben ihrer Aufgabe als Federelemente noch eine weitere. Mithilfe der Wellbälge ist es möglich, die Wärmeleitung über die Durchführungen in den Heliumbereich drastisch zu vermindern. Zum einen haben diese Wellbälge nur eine Wanddicke von 0.1 mm, zum anderen ist die für

die Wärmeleitung entscheidende Länge um den Faktor 4.5 größer als der überbrückte Abstand.

- (n) Wichtig ist ein möglichst guter Wärmekontakt zwischen Kaltkopf und Cu-Abschirmung. Aus diesem Grund wird auch an dieser Stelle mit einer Schraubverbindung ein Draht aus Indium zwischen die Cu-Bauteile gepreßt. Die Bodenplatte des Cu-Schirms wird als Kältekapazität genutzt, da der Kaltkopf während der Strahlstrommessungen wegen der Vibrationen höchstwahrscheinlich abgeschaltet werden muß.

## **6.2 Werkstoffe und Fertigungsverfahren**

Vor allem der Werkstoffauswahl für den LHe-Bereich kommt eine besondere Bedeutung zu. In diesem Kapitel werden die verwendeten Werkstoffe und Fertigungsverfahren, die für die Konstruktion gewählt wurden, kurz spezifiziert:

- Die Vakuumkammer, die keinen besonderen Anforderungen wie thermischer Wechselbelastung ausgesetzt ist, besteht aus 1.4301 und wird mit Hilfe eines WIG-Schweißverfahrens verbunden. Lediglich der Klöpperboden besteht aus 1.4571. Dies ergab sich jedoch aus dem Angebot des Zulieferers und hat keine weitere Bedeutung.
- Die verwendeten CF- und COF-Flansche sind aus 1.4429 gefertigt. Dieser austenitische Edelstahl ist mit seinem hohen Ni-Anteil zu den kaltzähren Stählen zu zählen und somit für Tieftemperaturanwendungen geeignet. Der ebenfalls erhöhte N<sub>2</sub>-Gehalt macht ihn beständig gegen Kornzerfall und Korngrenzenausscheidung. Diese Effekte verursachen einen Festigkeitsverlust bei höheren Temperaturen (Glühbehandlung), der dazu führt, daß sich die Dichtschneiden im Betrieb verformen und es so zu Lecks kommen kann.
- Ebenfalls aus einem kaltzähren Stahl bestehen die Bauteile der Heliumkammer. Verwendet wird hier 1.4571, der neben seinem hohen Ni-Anteil noch Titan enthält. Diese Titanbeimischung verhindert die Martensitbildung. Der bei plastischer Verformung entstehende krz-Martensit würde zu einer deutlichen Versprödung des Stahls führen.
- Der Werkstoff der Membranbälge ist 1.4541, ebenfalls ein austenitischer Edelstahl mit einer Titanbeimischung, jedoch mit einem geringeren Anteil an Ni als 1.4571. Dieser Werkstoff läßt sich gut mit 1.4571 verschweißen und ist ebenfalls für

Tieftemperaturanwendungen geeignet. Beim Verschweißen der Wellbälge mit den Anschlußteilen ist auf eine schweißgerechte Konstruktion der Anschlußteile zu achten, da diese eine vielfach größere Wanddicke haben. Die Wellbalgverbindung für das Strahlrohr ist für eine MikroWIG-Schweißung konzipiert. Die Wellbalgverbindungen an der Heliumkammer wurden für eine Rollnahtschweißung entworfen, welche von den Wellbalgherstellern an bereitzustellenden Anschlußteile bevorzugt durchgeführt wird.

- Der Isolerring besteht aus einer Oxydkeramik (96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), die sich durch eine sehr gute Temperatur-Wechselbeständigkeit und hohe Druckfestigkeit auszeichnet. Die Reinheit und Dichtigkeit dieser Keramik genügt den Vakuumanforderungen. Der Isolator ist mit zwei dünnwandigen Anschlußringen aus 1.3981 oder 1.3982 mittels L-CuAg (Eutektikum) im Vakuumofen hart verlötet. Um diese Lötverbindung zu ermöglichen, wird der Isolator mittels Mo-Mn-Verfahren metallisiert. Dabei stellt eine vor dem Löten eingesinterte Schicht aus einem Mo-Mn-Pulvergemisch die Verbindung mit dem Isolator her. Diese Schicht wird dann noch galvanisch verkupfert und ermöglicht so die Lötverbindung mit den Anschlußteilen.
- Die Anschlußteile aus 1.3981 oder 1.3982 sind hinsichtlich ihrer Wärmeausdehnung so gewählt, daß sie die Aluminiumoxidkeramik im Temperaturbereich von 4.2-500 K nur auf Druck belasten. Gleichzeitig kommen diese Werkstoffe der thermischen Längenänderung 1.4571 so nahe, daß die Schweißverbindung sich nicht reißt.
- Für alle Wärmeschirmbauteile wird ein elektrolytisch raffiniertes Kupfer hoher Leitfähigkeit verwendet. Dieses E-Cu hat eine Zusammensetzung von 99,9% Cu und maximal 0.04% Sauerstoff. Größte Bedeutung hat in diesem Fall die Wärmeleitfähigkeit von 396 W/mK, da Wärme schnellst möglich zum Kaltkopf weitergeleitet werden soll.
- Die Halterungen der Heliumkammer bestehen aus einer Titanlegierung. Es wurde die zweiphasige ( $\alpha+\beta$ )-Legierung Ti Al6 V4 gewählt. Diese erreicht zwar nicht die hohe Festigkeit der reinen  $\beta$ -Legierung, besitzt aber durch die geringere Dichte ein besonders günstiges Verhältnis von Festigkeit zu Dichte. Die Wärmeleitkurve ist die günstigste aller Titanlegierungen, so daß die Wärmeleitung über den gesamten Temperaturbereich etwa um den Faktor 3 kleiner ist als die von Edelstahl. Die Zugfestigkeit liegt mit  $1200 \text{ N/mm}^2$  weit über der von kaltzähem Edelstahl (ca.  $250-320 \text{ N/mm}^2$ ).

### 6.3 Der Refrigerator

Es handelt sich hierbei um einen einstufigen Kaltkopf mit Kompressor. Dieses System hat eine Kälteleistung von etwa 100 Watt Stickstoffäquivalent (also bei einer Temperatur von 80 K).

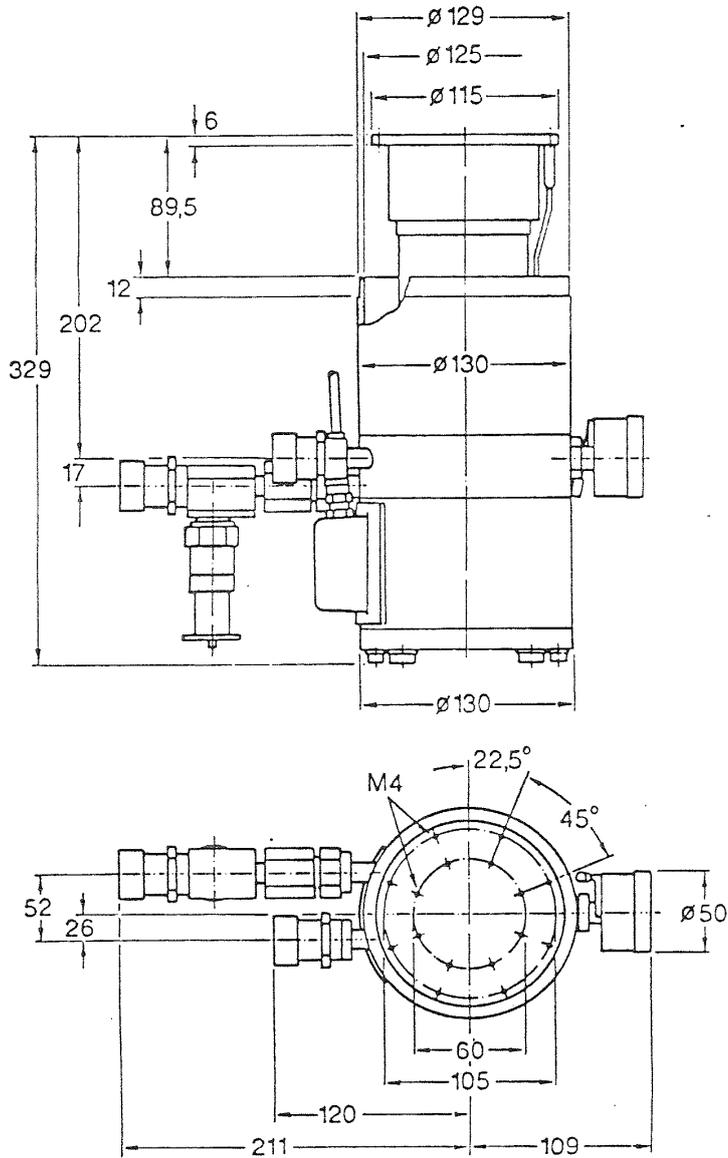


Abb.33: Kaltkopf RGS120 im Schnitt, schematisch /19/

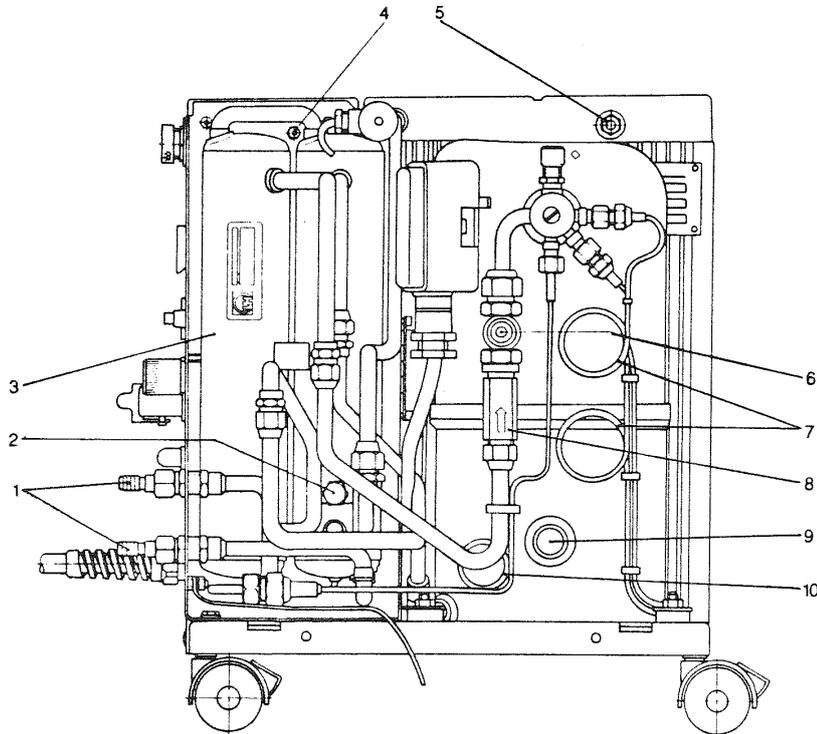


Abb.34: Kompressoreinheit RW 4000 /20/

Dieser Refrigerator arbeitet nach dem Gifford-McMahon-System (vgl. Abschnitt 2.1.2). Abb.33 zeigt den Kaltkopf im Schnitt, und Abb.34 stellt die Kompressoreinheit dar. Der Kaltkopf wird mit einem Vakuumflansch am Außenmantel versehen. Der Vakuumflansch ist ein DN 150 CF, der von der Herstellerfirma so montiert wird, daß der eigentliche Kaltkopf 130mm in den Vakuumbereich hineinreicht. Zusätzlich ist der Kaltkopf mit einem einfachen  $N_2$ -Dampfdruckthermometer ausgerüstet.

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, stellen die mechanischen Schwingungen des Kaltkopfs eine nicht zu unterschätzende Störgröße für das Meßsystem dar. Aus diesem Grunde kommt nur ein Refrigeratorsystem nach dem Gifford-McMahon-Verfahren in Betracht, da dieses die geringsten Schwingungen aller Refrigeratorsysteme hat. Zusätzlich wird der Kaltkopf in einer schwingungsgedämpften Version geliefert, bei der der Verdrängerkolben mit Tellerfedern abgefangen wird.

Um sich eine Vorstellung von dieser Schwingungsdämpfung zu machen, sind in Abb.35 ein gedämpfter und ein ungedämpfter Kaltkopf mit etwa der Leistung des verwendeten Systems miteinander verglichen. Die mechanischen Schwingungen sind in Verhältnissen von  $a_K$  zu  $g$  aufgezeichnet. Das Schwingungsverhalten zeigt eine deutliche Temperaturabhängigkeit und ist bei der Endtemperatur am geringsten. Durch die Federdämpfung können die Schwingungen etwa um den Faktor 2 verringert werden.

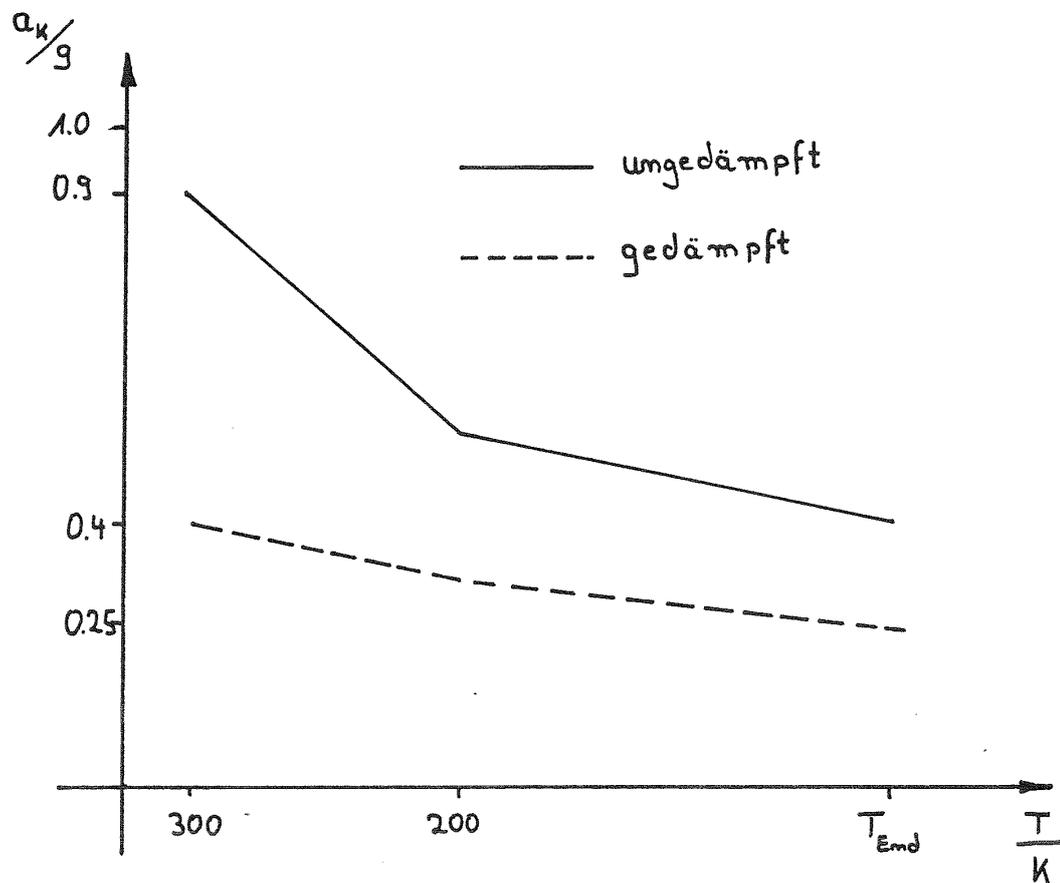


Abb.35: Vergleich zwischen gedämpftem-und ungedämpftem Kaltkopf /21/

Die Vibrationen sind für die Wahl der Leistung des Refrigerators von Bedeutung. Sollten (und dies ist zu erwarten) die Vibrationen, trotz Dämpfung, das Meßsystem beeinflussen, so muß ein intermittierender Betrieb möglich sein, ohne zu große Heliumverluste zu verursachen. Wird der Schirm mit Hilfe des verwendeten Refrigeratorsystems auf eine Temperatur weit unter 80 K abgekühlt und gleichzeitig eine Kältekapazität installiert, können Messungen bei ausgeschaltetem Kaltkopf stattfinden, ohne zu hohe thermische Belastungen des LHe-Bereichs zu verursachen. Ist die Messung beendet, erreicht das System relativ schnell wieder die Endtemperatur.

Das Kälteleistungsdiagramm für das System ist in Abbildung 36 dargestellt. Der Refrigerator wurde so ausgewählt, daß bei der berechneten Wärmelast auf den Schirm eine Endtemperatur erreicht wird, die weit unter der eines üblichen Stickstoffschirms (77 K) liegt. So ist es möglich, die hohen Anforderungen an den Heliumverbrauch zu erreichen.

### Kälteleistungsdiagramm RGS120/RW4000

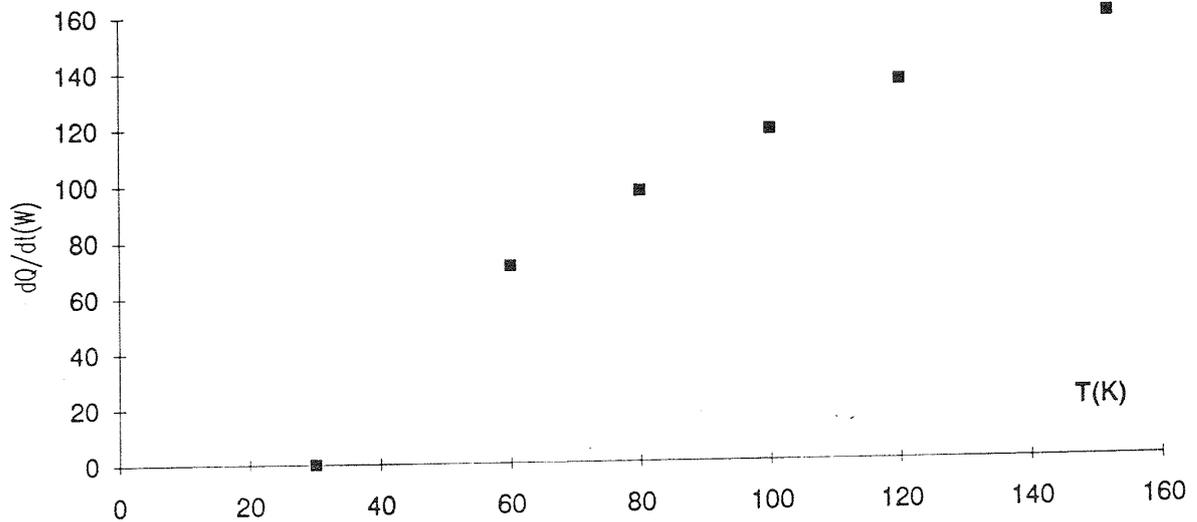


Abb.36: Kälteleistungsdiagramm des Refrigerators RGS120/RW4000 /21/

### 7. Ein- und Anbauten

Um den Kryostaten zu komplettieren und funktionstüchtig zu machen sind weitere Teile nötig. Da es sich dabei um nicht zu konstruierende Kaufteile handelt, werden sie am Ende dieser Diplomarbeit mit ihrer Funktion kurz vorgestellt.

#### 1. Durchführung für den Vakuummantelheber.

Die in der GSI verwendeten Mantelheber haben einen Außendurchmesser von 12mm. Speziell für diese Mantelheber gibt es eine Quetschdurchführung mit einem Flansch DN 20 KF (Abb.37).

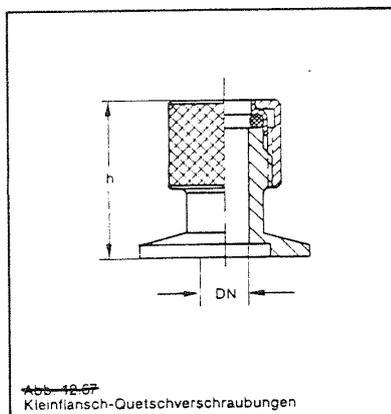


Abb. 37  
Kleinflansch-Quetschverschraubungen

Abb.37: Quetschverschraubung für 12mm-Rohre

## 2. Überdruckventil

Der Kryostat wird zwar drucklos arbeiten, jedoch ist die Entstehung eines Überdrucks nicht auszuschließen. Zur Sicherheit wird ein Überdruckventil installiert. Dieses Überdruckventil ist ebenfalls mit einem Flansch DN 20 KF ausgestattet. Quetschverschraubung und Überdruckventil sollen an denselben Flansch des Kryostaten montiert werden. Hierzu ist ein zusätzliches DN 20 KF- T-Stück notwendig.

## 3. Stromdurchführungen

Die beiden Flansche DN 16 KF und der zweite Flansch DN 20 KF sind für Strom- und Meßdurchführungen vorgesehen. Für die Meßdurchführung am DN 20 KF wird ein Blindflansch mit einer Lemosadurchführung hergestellt. In den DN 16 KF werden handelsübliche 8-Pol-Durchführungen verwendet.

## 4. Füllstandsmessung

Für die Füllstandsmessung wird ein supraleitendes Material mit  $T_c = 4.5 \text{ K}$  als Widerstandsdraht verwendet. Die Messung erfolgt durch eine Widerstandsmessung, da der Widerstand von der Höhe des LHe-Pegels abhängig ist. Solche Meßsysteme zu Bestimmung von LHe-Pegeln sind bei mehreren Herstellern zu beziehen.

## 5. Temperaturmessung

Temperaturmessungen sind zum einen am LHe-Bad und zum anderen am Kupferschirm geplant. Da die Meßleistung im LHe-Bereich gegen 0 gehen sollte, der Meßbereich sich aber von 4 K bis 300 K erstrecken soll, kommt nur ein Thermoelement aus Chromel/Gold (mit etwas Eisen) in Frage. Für die Temperaturmessung am Kupferschirm kommen verschiedene Widerstandsthermometer in Frage (z.B. Platin, Rhodium, Kohle-Glas). Temperatursensoren sind wie die Füllstandssensoren bei verschiedenen Herstellern lieferbar.

## 6. Superisolation und Glasgittergewebe

Die Superisolation wird bei der Fa. Cryophysics, Darmstadt bezogen. Es handelt sich hierbei um eine Polyesterfolie mit einseitig aufgedampfter, hochreflektierender Aluminiumschicht (Foliendicke  $6.4 \mu\text{m}$ , Aluminiumschicht etwa  $0.025 \mu\text{m}$ ), die unter der Bezeichnung NRC-2 zu bestellen ist.

Als Abstandhalter zwischen den einzelnen Lagen SI dient ein spezielles Glasgittergewebe, das bei der Fa. Vitrolan GmbH in Marktschorgast unter der Bezeichnung SD 4220 C/53 zu bestellen ist. Dieses Gewebe hat sehr gute Vakuumeigenschaften und eine schlechte Wärmeleitfähigkeit.

## **8. Ausblick**

Die Entwicklung des Kryostaten wurde im Verlauf der Diplomarbeit so umfangreich, daß mit dem Bau erst im Dezember 1992 begonnen werden konnte. Die drei Baugruppen (Isolierrohr, Kryostat und Refrigerator) sollen bis zum März 1993 fertiggestellt bzw. geliefert werden. Daraufhin soll die Gesamtapparatur zunächst ohne das Meßsystem zusammengebaut werden. Ziel der ersten Tests wird sein, die Funktionstüchtigkeit der Apparatur (Heliumdichtigkeit!) festzustellen. Dabei werden während verschiedener Kalt-Warm-Zyklen die Betriebssicherheit, die unterschiedlichen Anforderungen (Standzeit!) überprüft und der Umgang mit der Apparatur geübt.

Sind diese Tests erfolgreich abgeschlossen wird die Meßapparatur montiert werden. Die folgenden Untersuchungen werden (noch außerhalb der Hochenergiestrahlintransportstrecken) die Funktionstüchtigkeit des Meßgerätes und Wechselwirkungen mit dem Kryostaten (Vibrationen des Kaltkopfs (!), Temperaturschwankungen) zum Thema haben.

Sollten all diese Tests erfolgreich verlaufen, sind erste Messungen unter realen Bedingungen vorgesehen.

**Literaturnachweis**

- /1/ Kienle P., Siebert G.: Neue Beschleuniger und Experimentieranlagen für schwere Ionen bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung, Sonderdruck aus den Physikalischen Blättern, 46 (1990), 109-112, Physik Verlag GmbH Weinheim
- /2/ Heeg, P.: Proc. Europ. Pert. Conf., Berlin (1992), 1100
- /3/ Keller, O.: Untersuchung zum Betrieb eines Szintillationsdetektors im Strom-Mode, Diplomarbeit, FH Darmstadt/GSI Darmstadt (1992)
- /4/ Hecker, J.: Entwicklung und Test eines Strahlprofilmeßgitters aus Szintillationsfasern, Diplomarbeit, FH Darmstadt/GSI Darmstadt (1992)
- /5/ Dürr, V.: Konstruktion, Dimensionierung und Bau eines mit LHe gekühlten Strahltransformators mit einem SQUID, Diplomarbeit, FH Wiesbaden/GSI Darmstadt, Rüsselsheim (1993)
- /6/ Grohmann K., Hechtfisher D. und Jakschik J., A cryodevice for Induction Monitoring of a DC Electron or Ion Beam with Nano-Ampere Resolution, Physikalisch Technische Bundesanstalt, Berlin (1977)
- /7/ Frey, H., Haefer, R.A. : Tieftemperaturtechnologie, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1981)
- /8/ Kipping, I.: Datensammlung zur Kryotechnik, VDI-Verlag, Berlin (1975)
- /9/ Dickson, P.F. , Jones, M.C. : Infrared Reflectances of Metals at Cryogenic Temperatures, NBS Technical Note 348, (1966)
- /10/ Verking, B.J. , Michalchenko, R.S. und Ashukin, V.A. : Temperature - Dependence below 300 K, Proc. ICEC 2, (1968), 128
- /11/ Fastowski, W.G. , Petrowski, J.W. und Riwinski, A.E. : Kryotechnik, Akademie-Verlag, Berlin (1970)

- /12/ Reeg, H.: Dimensionierung, Konstruktion, Bau und Erprobung eines elektromagnetisch abgeschirmten Strahltransformators mit einer Zeitkonstante von etwa 0.5 $\mu$ s, Diplomarbeit, FH Wiesbaden/GSI Darmstadt, Rüsselsheim (1986)
- /13/ Buckel, W.: Supraleitung, 4. Auflage, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim (1990)
- /14/ Grohmann K., Hechtfisher D., PTB-Mitteilungen, Sonderdruck Forschen und Prüfen, Kryostromkomparatoren als Präzisionsstandards für rationale Gleich- und Wechselstromverhältnisse, 92 (1982), 327-344
- /15/ Schwarzberg, F.R. et al : Cryogenic Materials DATA- Handbook (Revised), Vol.1., Martin Marietta Corp., Denver (Colorado) (1970)
- /16/ Schmidt, F.: Thermische Isolation, VDI-Verlag, Berlin (1971)
- /17/ Lehmann, K.: priv. Mitt., KFK, Karlsruhe (1992)
- /18/ Fa. Pink, Firmenschrift: Vakuumtechnische Bauelemente, Wertheim (1992)
- /19/ Fa. Leybold, Firmenschrift: Kaltkopf RGS 20/30/120, RGD 210/330/510/580/1245,(1992)
- /20/ Fa. Leybold, Firmenschrift: Kompressoreinheit RW 4000, (1992)
- /21/ von Sydow, B.: priv. Mitt., Fa. Leybold, Darmstadt (1992)

**Dank**

Mein Dank gilt allen, die mich in dieser Zeit (wissentlich oder unwissentlich) unterstützt und kritisiert haben, vor allem Herrn Graf, Herrn Riedel, Herrn Peters, Herrn Reeg, Herrn Wolfangel und Volker für die fachliche, und meinen Eltern und Anke für die menschliche Unterstützung.