

Kryostat mit variabler Temperatur
für Untersuchungen an Supraleitern

Variable Temperature Cryostat
for Studying Superconductors

W. Amenda

IPP 4/95

Juni 1972

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN

Kryostat mit variabler Temperatur
für Untersuchungen an Supraleitern

Variable Temperature Cryostat
for Studying Superconductors

W. Amenda

IPP 4/95

Juni 1972

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die
Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.*

IPP 4/95

W. Amenda

Juni 1972

Kryostat mit variabler Temperatur
für Untersuchungen an Supraleitern

Variable Temperature Cryostat for
Studying Superconductors

(in German)

Abstract

Es wird ein in einen supraleitenden Magneten (50 mm Bohrung) einsetzbarer Metallkryostat beschrieben, in dem sich die zu untersuchende supraleitende Probe bei Temperaturen unterhalb 4,2 K im flüssigen Helium und oberhalb 4,2 K in Gasumgebung befindet. Die Temperatur wird mit Hilfe eines elektrischen Heizers durch ein Regelgerät auf $\pm 0,01$ K konstant gehalten. Der Strom durch die Probe kann einige hundert Ampere betragen.

A metal cryostat inserted in a superconducting magnet (50 mm bore) is described. It is used for studying superconductors in liquid helium below 4.2 K and in gas above 4.2 K. The temperature is kept constant at ± 0.01 K by a temperature control device with an electrical heater. The sample is measurable at currents of up to several hundred amperes.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Apparatur
3. Betriebsweise
4. Thermisches Verhalten
5. Abkühlzeit und Heliumbedarf
6. Sicherheit

1. Einleitung

Für das Projekt W 6 (Quadrupol mit zwei supraleitenden levitierten Ringen) war die Untersuchung des für die Ringe vorgesehenen Supraleiters (Nb_3Sn -Band) erforderlich. Dabei sollten die kritischen Werte sowie das Stabilitätsverhalten oberhalb 4,2 K im Magnetfeld bis 5 T untersucht werden [1].

Ähnliche Untersuchungen an Supraleitern (Nb_3Sn) hinsichtlich ihrer kritischen Werte in Abhängigkeit von der Temperatur wurden von ARON veröffentlicht [2]. Hierbei wird die Probe mit einer geheizten Metallplatte in Wärmekontakt gehalten. Im Gegensatz dazu werden die Proben in der hier beschriebenen Apparatur in Gasumgebung gemessen. Die Apparatur gestattet jedoch nicht nur die Messung von kritischen Strömen an Kurzproben, sondern auch Stabilitätsuntersuchungen an geschichteten Zylindern sowie an kleinen Spulen, außerdem können wärmeerzeugende Proben gekühlt werden [3].

Neben den Gastemperaturen im Probenraum von und ab 4,2 K können im Probenraum durch ein Heliumbad auch Temperaturen unterhalb 4,2 K bis 2,0 K eingestellt werden.

Die Apparatur besteht im wesentlichen aus einem Kryostaten, der in die Bohrung eines supraleitenden Magneten (50 mm Durchmesser) einsetzbar ist. Der Probenraum des Kryostaten befindet sich in einem Kupferzylinder, der für einheitliche Temperaturen im Probenraum sorgt und der von einem abgeschlossenen Metall Dewar umgeben ist. Der obere Teil des Kupferzylinders wird elektrisch beheizt, während am Boden ein Wärmetauscher angebracht ist. Der Deckel des Dewars be-

findet sich unter dem Niveau des Heliumbades für den Magneten. Am Deckel befinden sich die Stromzuleitungen für die Probe und die Meßleitungen. Die Anordnung des Deckels im Heliumbad des supraleitenden Magneten bietet die Möglichkeit, den Meßstrom über Supraleiter zu führen, wodurch eine unerwünschte Erwärmung der Probe durch Stromwärme in den Zuleitungen ausgeschlossen wird.

Der Kryostat läßt sich auch bei eingekühltem Magneten einsetzen bzw. herausnehmen. Das Wechseln der Probe erfolgt am ausgebauten und aufgewärmten Kryostaten. Nach Entfernen des Deckels über dem Probenraum ist die Probe in einfacher Weise zugänglich. [4,5]

2. Apparatur

Abb. 1 zeigt die Anordnung von supraleitendem Magnet (1) und Kryostat (2) im Heliumreservoir (3). Im Betriebsfall ist wesentlich, daß der Probenraumdeckel (4) und das Ansaugventil (5) im Heliumbad (6) eintauchen; dabei kann das Badniveau bis an die Styroporisolation (7) heranreichen. Die Stromzuleitungen (8) für die Probe, die vom Innendeckel des Heliumreservoirs (9) zum Probenraumdeckel führen, bestehen aus Schläuchen aus Kupfergeflecht und sind von Edelstahlrohren (10 \varnothing x 0,2 mm) umgeben. Die Rohre sind im Bereich des Badniveaus perforiert, so daß das Heliumgas aus dem Heliumreservoir in die Rohre strömt und die Stromzuleitungen kühlt [6]. Der Kryostat wird durch vier untereinander verstreute Rohre (10) am Innendeckel gehalten.

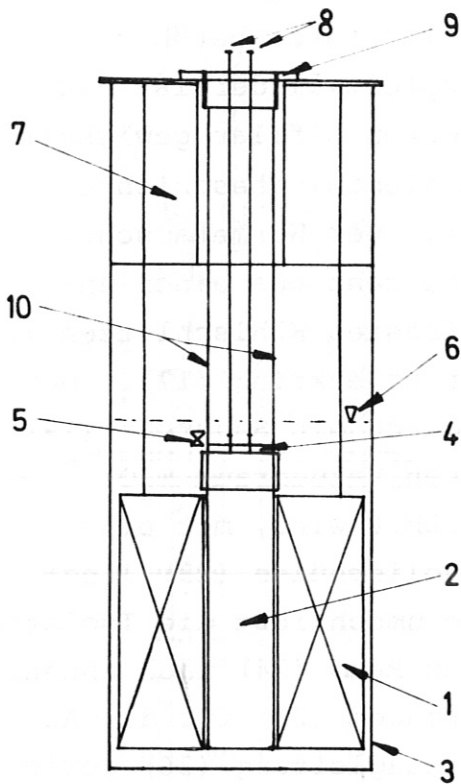
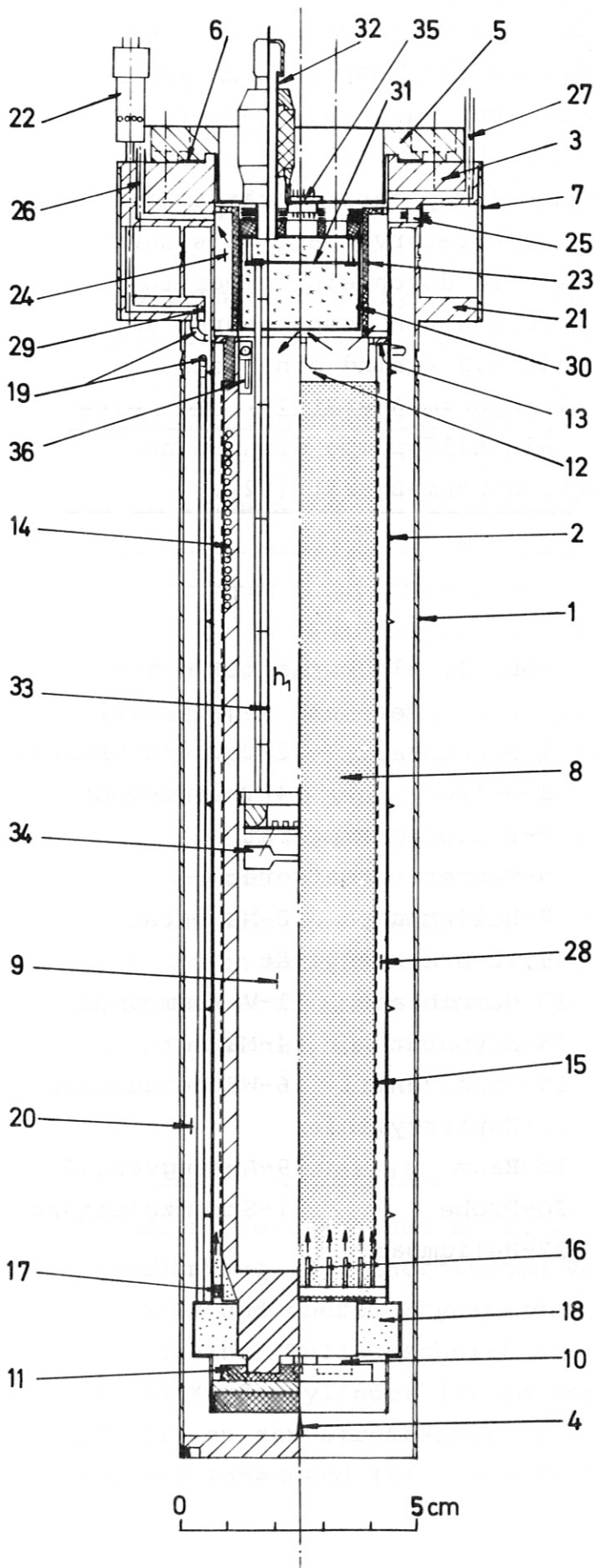


Abb.1: Anordnung des Kryostaten im supraleitenden Magneten.
1-supraleitender Magnet,
2-Kryostat
3-Heliumreservoir
4-Probenraumdeckel
5-Ansaugventil
6-Heliumbad
7-Styroporisolation
8-Stromzuleitungen
9-Innendeckel
10-Halterohre

An Hand von Abb. 2 wird der Kryostat im Detail beschrieben. Außenwand (1) und Innenwand (2) des Dewars sind oben über einen Ringdeckel (3) abgeschlossen; unten sind sie durch einen Kegel (4) gegeneinander zentriert. In den Ringdeckel kann der Probenraumdeckel (5) eingesetzt werden. Ringdeckel und Probenraumdeckel werden durch einen Indiumring (6) gedichtet. Über dem Ringdeckel befindet sich eine Blende (7), die über Edelstahlrohre mit dem Innendeckel des Heliumsreservoirs verbunden ist und den Kryostaten hält. Der Kupferzylinder (8), in welchem sich der Probenraum (9) (26 \varnothing x 195 mm) befindet, steht mit vier Schneiden (10) auf einer Isolierscheibe (11) und wird seitlich und in

vertikaler Richtung durch eine Isolierstütze (12) gegen den Innenring (13) gehalten; die Isolierstütze berührt den Innenring an vier Stellen. Um den Kupferzylinder ist ein koaxialer Heizdraht (14) aus Nickel-Chrom bifilar gewickelt und weich verlötet; außen ist er mit aluminiumbeschichteter Polyethylenefolie (15) fest umwickelt. Der Wärmetauscher am unteren Teil des Kupferzylinders besteht aus einer Anzahl von in den Zylindermantel eingefrästen Kühlschlitzen (16) und einem an den Zylinder anliegenden Umlenkring (17). Der Raum vor dem Wärmetauscher (18) ist durch ein Saugrohr (19) (Edelstahl 3 \varnothing x 0,2 mm), das im oberen Vakuumraum (20) einwindig zu einem Außenring (21) geführt wird, mit einem Ansaugventil (22) verbunden. Eine Isolierhülse (23) liegt am Innenring an vier Stellen auf; sie umschließt die Isolation des Probenraumdeckels und begrenzt den Raum (24) nach innen. In den Raum (24) führen die Durchführungen (25) für die Anschlüsse des Kupferzylinders und die Saugleitung (26) sowie eine Sicherheitsleitung (27). Die Isolierstütze sowie die Isolierhülse sind so geöffnet, daß der Raum vor dem Wärmetauscher (18) und der Raum zwischen Kupferzylinder und Innenwand (28) sowie der Probenraum (9) und der Raum seitlich unter dem Probenraumdeckel (24) untereinander verbunden sind. Der Vakuumraum ist über eine Leitung (29), die am Innendeckel des Heliumreservoirs mit einem Ventil versehen ist, evakuierbar. Um den Probenraum thermisch gegen den Probenraumdeckel zu isolieren, wurden am Probenraumdeckel mehrere Lagen Polyethylenefolie sowie Teflon angebracht. Über dieser Schicht befindet sich in einer dünnwandigen Deckelhülse (30) Baumwollwatte. In der Deckelhülse ist ein thermisch gut isolierter Halter (31) für die Befestigung der Probe angeordnet. Deckelhülse und Probenhalter werden isoliert mit einem Träger am Röhrchen der Durchführung (32) befestigt. Durch dieses Röhrchen sind die supraleitenden Stromzuleitungen (33) (Nb_3Sn -Band) von der Probe (34) zum Heliumbad geführt (die Stromdurchführungen wurden in unserer Technologie Gruppe entwickelt). Die Meßleitungen für die Probe werden an die Durchführungen (35) gelötet.

Abb. 2: Schnitt durch den Kryostaten



- 1-Außenwand
- 2-Innenwand
- 3-Ringdeckel
- 4-Kegel
- 5-Probenraumdeckel
- 6-Indiumring
- 7-Blende
- 8-Kupferzylinder
- 9-Probenraum
- 10-Schneiden
- 11-Isolierscheibe
- 12-Isolierstütze
- 13-Innenring
- 14-Heizer
- 15-Isolierfolie
- 16-Kühlschlitz
- 17-Umlenkring
- 18-Raum
- 19-Saugrohr
- 20-Vakuumraum
- 21-Außenring
- 22-Ansaugventil
- 23-Isolierhülse
- 24-Raum
- 25-Durchführung
- 26-Saugleitung
- 27-Sicherheitsleitung
- 28-Raum
- 29-Vakuumleitung
- 30-Deckelhülse
- 31-Halter
- 32-Durchführung
- 33-Stromzuleitung
- 34-Probe
- 35-Durchführung
- 36-Thermosonde

3. Betriebsweise

Abb. 3 zeigt das Blockschaltbild des Meß- und Regelsystems für den Kryostaten. Der Regelkreis für Temperaturen im Probenraum (1) oberhalb 4,2 K besteht aus einem Temperaturregelgerät (2) (IPD-Regler), einem Heizer (3) und einer Thermosonde (4). Mit Hilfe eines Zeitprogrammgerätes (5) ist es möglich, den zeitlichen Temperaturverlauf zu steuern. Die Temperatur des Probenraumes wird durch ein Temperaturmeßgerät (6) angezeigt. Zur Regelung von Temperaturen im Probenraum unterhalb und oberhalb 4,2 K sind eine Heliumpumpe (7), ein Manostat (8), ein Druckmeßgerät (9) und eine Gummiblase (10) erforderlich. Als Hilfspumpe dient eine Vakuumpumpe (11) mit zugehörigem Druckmeßgerät (12). Die Temperatur des Probenraumes wird durch ein Temperaturmeßgerät (6) angezeigt. Zur Regelung von Temperaturen im Probenraum unterhalb und oberhalb 4,2 K sind eine Heliumpumpe (7), ein Manostat (8), ein Druckmeßgerät (9) und eine Gummiblase (10) erforderlich. Als Hilfspumpe dient eine Vakuumpumpe (11) mit zugehörigem Druckmeßgerät (12).

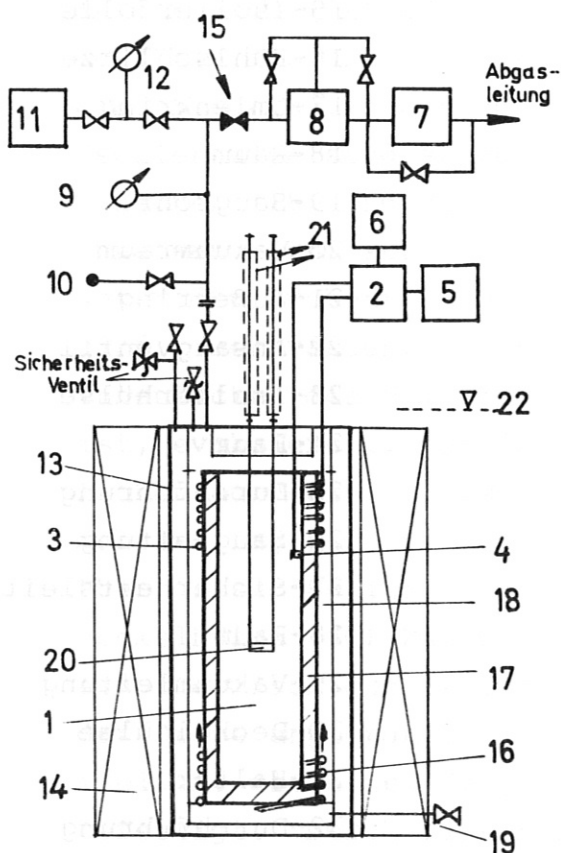


Abb. 3: Blockschaltbild des Meß- und Regelkreises

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1-Probenraum | 2-Temperaturregler |
| 3-Heizer | 4-Thermosonde |
| 5-Zeitprogrammgerät | |
| 6-Temperaturmeßgerät | |
| 7-Heliumpumpe | 8-Manostat |
| 9,12-Druckmeßgerät | |
| 10-Gummiblase | 11-Vakuumpumpe |
| 13-Kryostat | 14-Magnet |
| 15-Nadelventil | 16-Wärmetauscher |
| 17-Kupferzylinder | |
| 18-Raum | 19-Ansaugventil |
| 20-Probe | 21-Stromzuleitung |
| 22-Heliumbad | |

Im folgenden werden Einkühlvorgang und Betriebsweise während der Messung beschrieben. Der auf Raumtemperatur befindliche Kryostat (13) muß entweder evakuiert oder mit Heliumgas gefüllt sein, bevor er in den betriebsbereiten Magneten (14) eingesetzt wird. Zur Einkühlung des Kryostaten wird ein Nadelventil (15) geöffnet. Der Druck im Probenraum wird mit Hilfe der Heliumpumpe erniedrigt, die über den Bypass des Manostaten an den Kryostaten angeschlossen ist. Das in den Wärmetauscher (16) gelangende flüssige Helium verdampft und kühlt den Kupferzylinder (17) ab. Sobald der Kupferzylinder die Temperatur von 4,2 K erreicht hat, sammelt sich nacheinander im Raum zwischen Innenwand und Kupferzylinder (18) und im Probenraum (1) flüssiges Helium an (Nachweis durch Kohlewiderstände). Im Probenraum kann das Heliumbad bei geschlossenem Ansaugventil (19) und bei geöffnetem Bypass der Heliumpumpe aufrechterhalten werden. Wird der Druck über dem Heliumbad bei geschlossenem Bypass der Heliumpumpe erniedrigt, so werden Temperaturen unterhalb 4,2 K eingestellt, die sich mit Hilfe des Manostaten regeln lassen. Zur Einstellung von Temperaturen oberhalb 4,2 K wird das flüssige Helium im Probenraum vollständig verdampft und die Zylinderwand erwärmt. Einstellung und Regelung der Temperatur erfolgen über das Regelgerät. Ist zur Kühlung von wärmeerzeugenden Proben (20) ein andauernder Heliumdurchsatz durch den Probenraum erforderlich, so wird dieser mit dem Nadelventil und dem Ansaugventil eingestellt und gesteuert.

4. Thermisches Verhalten

Die Heliumverluste und Abkühlzeit des Kryostaten sind maßgebend von der thermischen Verbindung zwischen Kupferzylinder und oberem Kryostatenteil bestimmt. Hierzu zeigt Abb. 4 einen Teilausschnitt des Kryostaten. Vom zunächst warmen Kupferzylinder (1) gelangt Wärme über das Austauschgas (2) zu den Strombändern (3), zur Deckelisolierung (4) und zur Innenwand (5). Zur Ermittlung des Wärmeflusses

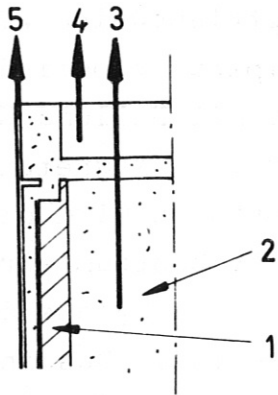


Abb. 4: Schematischer Teilausschnitt des Kryostaten

- 1-Kupferzylinder
- 2-Austauschgas
- 3-Strombänder
- 4-Deckelisolierung
- 5-Innenwand

wurde der Kupferzylinder beheizt. Bei stationärer Temperatur im Probenraum sind die Beträge der elektrisch erzeugten Wärme und der durch Wärmeleitung abgeführten Wärme gleich groß. In Übereinstimmung damit zeigen die Messungen, daß die Differenz zwischen Probenraumtemperatur und Temperatur des Bades im Heliumreservoir (4,2 K) annähernd mit dem Quadrat des Heizstromes zunimmt. In Abb. 5 ist dieser Zusammenhang durch die beiden Kurven P und I_H als Funktion der Temperaturdifferenz dargestellt. Dazu zeigten Temperaturmessungen mit Germaniumwiderständen im oberen und unteren Teil des Probenraumes einheitliche Temperaturen. Die aus der Kurve P berechneten Heliumverluste konnten auch durch Messung des verdampfenden Heliums bestätigt werden. Nach Abschalten der Heizung kühlt sich der zunächst warme Probenraum auf die Temperatur des Heliumbades ab. Der zeitliche Abkühlungsvorgang ist für den Temperaturbereich 20-4,2 K durch Kurve A in Abb. 6 gezeigt. Von 100-20 K beträgt die Abkühlzeit 43 min. Bei Drucker-niedrigung über dem Heliumbad ist eine Temperaturerniedrigung bis 2,0 K möglich. Die Aufwärmung des Heliumbades von 2 auf 4,2 K nach ausgeschalteter Pumpe zeigt die Kurve B in Abb. 6. Aus dem Kurvenverlauf ist bei bekannter Heliummenge im Probenraum (12 g) der Wärmetransport in den Probenraum zu berechnen. Er ergibt sich zu einem Mittelwert von 0,03 J/sec.

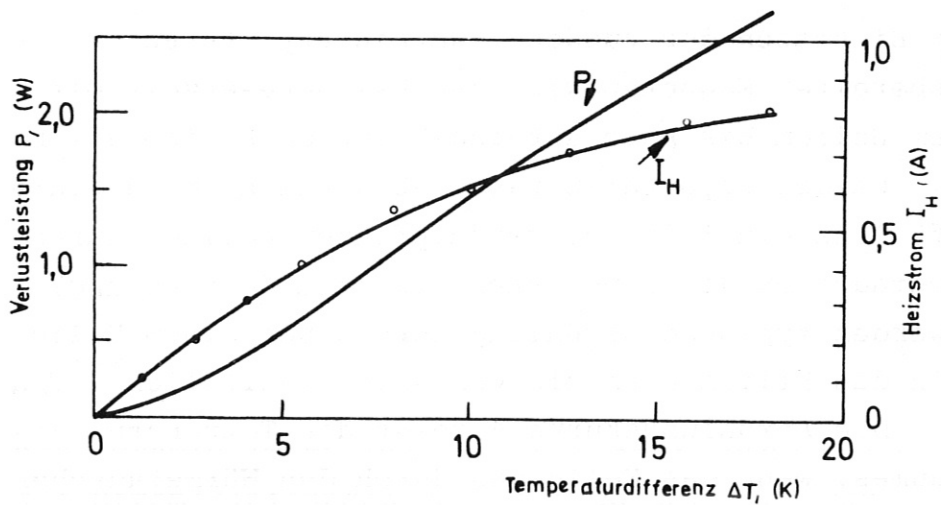


Abb. 5: Abhängigkeit der Verlustleistung P und des Heizstromes I_H von der Temperaturdifferenz zwischen Probenraum und äußerem Heliumbad.

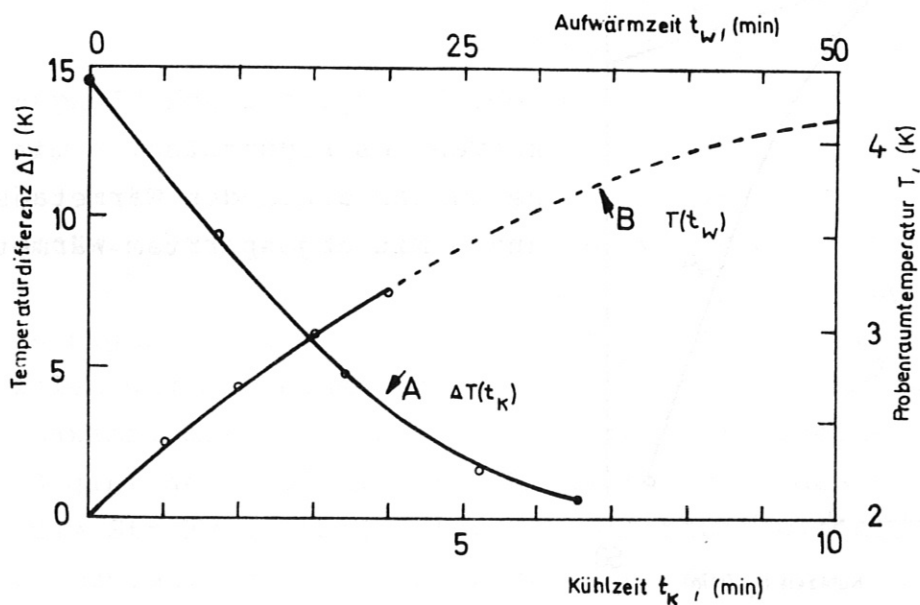


Abb. 6: Kurve A. Abkühlung des zunächst auf 20 K erwärmten Probenraumes. Dargestellt ist die Temperaturdifferenz zwischen Probenraum und äußerem Heliumbad als Funktion der Kühlzeit. Kurve B. Aufwärmung des Probenraumes von 2,0 bis 4,2 K nach dem Abpumpen bei der Außenwandtemperatur des Kryostaten von 4,2 K.

5. Abkühlzeit und Heliumbedarf

Nach dem Einsetzen des zunächst warmen Kryostaten in den betriebsbereiten Magneten wird das Heliumreservoir mit flüssigem Helium bis kurz unterhalb der Deckelisololation gefüllt. Um den Kryostaten rasch abzukühlen, wird während des Auffüllens ein Teil des verdampfenden Heliums durch den Wärmetauscher des Kryostaten geleitet (Gaskühlung). In Abb. 7 werden typische Abkühlungskurven bei einem Heliumzulauf in das Heliumreservoir von durchschnittlich 7 l/h gezeigt. Die Abkühlungskurve A zeigt die Temperatur des Probenraumes, wenn das Heliumgas durch den Wärmetauscher geleitet wird, während Kurve B die Temperatur bei abgesperrtem Wärmetauscher zeigt. Im ersten Fall kann der Kryostat innerhalb 50 min auf Heliumtemperatur abgekühlt werden. Es hat sich gezeigt, daß für die Aufwärmung des Kryostaten beim maximalen Heizstrom von 3A ebenfalls eine Zeit von etwa 50 min erforderlich ist.

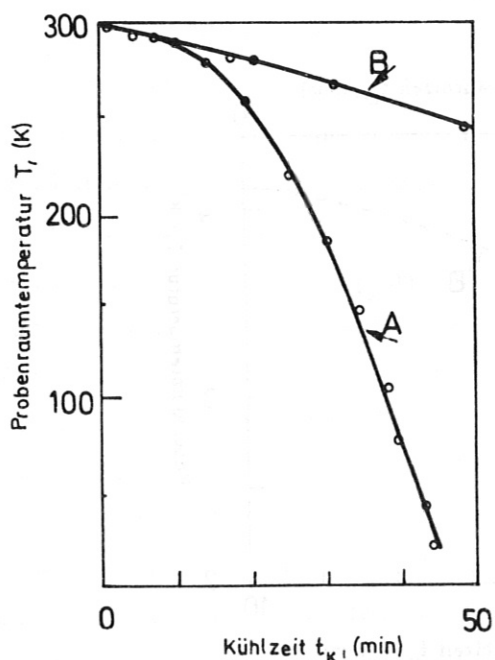


Abb. 7: Typische Abkühlungskurven des Kryostaten. A mit Heliumgas durch den Wärmetauscher und B mit abgesperrtem Wärmetauscher.

Im stationären Betrieb sind die Heliumverluste, die sich bei einem mittleren Badniveau im Heliumreservoir ergeben, etwa 8,14 l/h. Diese Verluste erhöhen sich bei Erregung

des Magneten (bis 70 A) infolge der Stromwärmeverluste in den Zuleitungen um weitere 0,4 ℓ/h . Zusätzliche Heliumverluste ergeben sich durch Stromwärme in den Stromzuleitungen zum Probenraum sowie bei Einstellung von Temperaturen im Probenraum von mehr als 4,2 K. In Abb. 8 ist der gesamte Heliumbedarf als Funktion des Meßstromes für verschiedene Probenraumtemperaturen dargestellt. Die Kurven A und B zeigen die Heliumverluste in Abhängigkeit vom Meßstrom bei Probenraumtemperaturen von 4,2 bzw. 20 K. Dabei ist zu bemerken, daß zur Herabsetzung der Heliumverluste das gesamte im Heliumreservoir anfallende Heliumgas durch die Stromzuleitungen geleitet wurde. Der Durchsatz durch die stromlosen Stromzuleitungen von 8,14 ℓ/h ist jedoch um eine Größenordnung zu groß, da Messungen ergeben haben, daß zur Kühlung der stromlosen Stromzuleitungen bereits 0,8 ℓ/h ausreichend sind. Die Heliumverluste nehmen mit zunehmendem Strom gemäß Kurve C zu. Die Kurven A, B und C zeigen an, daß die Zunahme des Heliumbedarfs in allen drei diskutierten Fällen ähnlich ist.

Durch Anlegen der Tangente durch den Ursprung an Kurve C läßt sich der auf den optimalen Strom I_0 bezogene minimale Heliumverbrauch m_0 ermitteln, für den die Stromzuleitung ausgelegt worden ist. Nach Abb. 8 ergeben sich für I_0 etwa 150 A und für m_0 etwa 1,3 ℓ/h . Daraus folgt die für eine Stromzuleitung charakteristische Größe m_0/I_0 von etwa $9 \cdot 10^{-3}$ ℓ/hA . Durch Anlegen der Ursprungstangente an Kurve A ergibt sich ein optimaler Strom von 350 A. Die Stromzuleitung mit einem Leitergeflecht von $3,5 \text{ mm}^2$ wurde dabei maximal mit 400 A belastet. Die gestrichelte Kurve D gibt den Heliumverbrauch als Funktion des Stromes durch die Stromzuleitung unter der Bedingung wieder, daß die Stromzuleitung gerade noch supraleitend ist. Der schraffierte Bereich zwischen Kurve A und D stellt den Heliumverbrauch als Funktion des Stromes durch die Stromzuleitung dar, wenn sie supraleitend ist. Den Zusammenhang von kritischer Temperatur und Meßstrom im Eigenfeld der Zuleitung (0,15 x 5 mm, Kupfer stabilisiertes Nb_3Sn , hergestellt von Intermagnetic General) zeigt Kurve E.

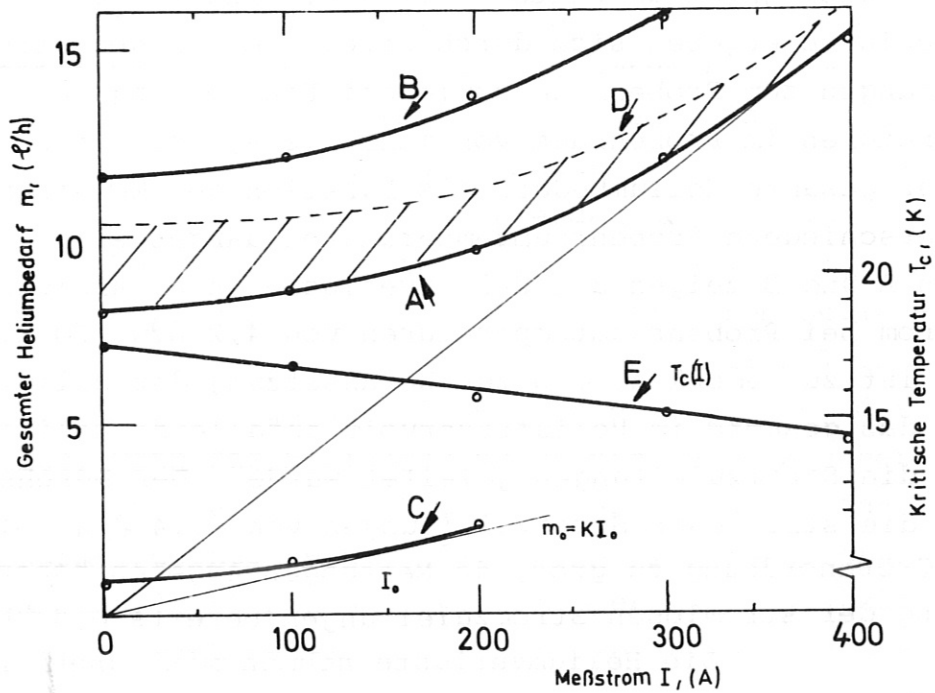


Abb. 8: Gesamter Heliumbedarf für verschiedene Probraumtemperaturen in Abhängigkeit vom Meßstrom. Durch die supraleitende Stromzuleitung ergibt sich gemäß Kurve E die Kurve D. Kurve C dient der Bewertung der Stromzuleitung.

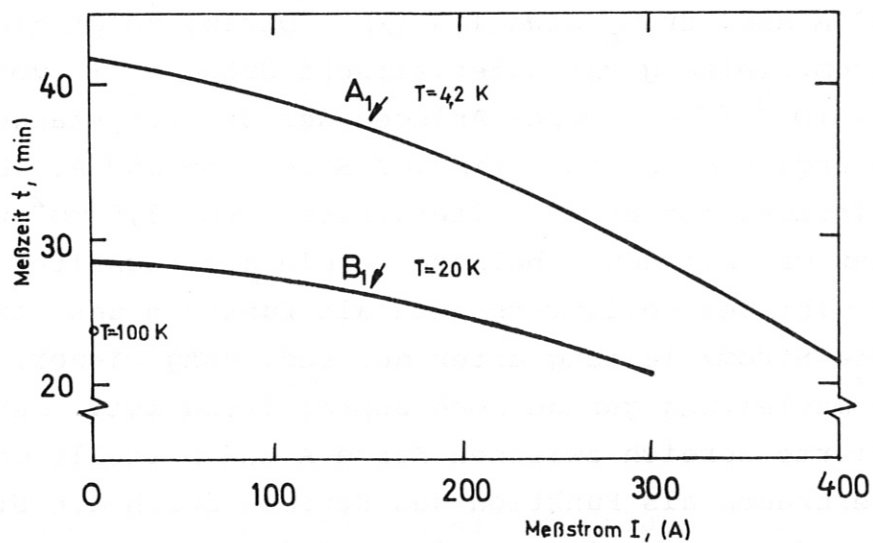


Abb. 9: Meßzeit der Versuchsanordnung in Abhängigkeit vom Meßstrom bei verschiedenen Probenraumtemperaturen.

Wird das Heliumreservoir vor Beginn einer Meßreihe stets maximal mit flüssigem Helium gefüllt (5,5 l), so ergeben sich gemäß Kurven A und B in Abb. 8 unterschiedlich lange Meßzeiten. Ihre Abhängigkeit vom Meßstrom bei Probenraumtemperaturen von 4,2 und 20 K ist nach der Beziehung $M/m(I)_T$ berechnet und wird durch die Kurven A_1 und B_1 in Abb. 9 wiedergegeben. Danach braucht das Heliumreservoir nur etwa alle 20 bis 40 min neu aufgefüllt zu werden, um auch Dauerversuche an Supraleitern bei erhöhter Temperatur im Gasraum durchführen zu können.

6. Sicherheit

Unter der Annahme eines Betriebsdrucks p im Probenraum von maximal 2 atm wurde das Innengefäß des Kryostaten hinsichtlich seiner Festigkeit berechnet, wobei von den bekannten Formeln der Festigkeitslehre für den Zylindermantel $s = p d_a / (2 K/S)$ und für die Bodenplatten $s = C d_i \sqrt{p / (K/S)}$ ausgegangen wurde. Der Festigkeitskennwert für das Innengefäß aus Edelstahl (Stainless Steel 304, AISI-Norm) ist $K = 70,3 \text{ kp/mm}^2$ im Bereich 3-20 K [7]. Mit einem Sicherheitsbeiwert $S = 1,8$ liegt die in die Rechnung eingesetzte zulässige Spannung noch unterhalb der Proportionalitätsgrenze des Materials bei 300 K. Die Rechnung liefert für einen Innendurchmesser d_i von 36 mm eine Mindestwanddicke von $s = 0,01 \text{ mm}$; der gefertigte Mantel besitzt eine Dicke von 0,3 mm. Die berechnete Mindestwanddicke für die Platten ist $s = 0,35 \text{ mm}$ (Beiwert $C = 0,4$); die tatsächliche Wanddicke beträgt 2 mm. Somit ist in beiden Fällen die Mindestwanddicke bei weitem gegeben.

Sicherheitsüberlegungen müssen den Fall berücksichtigen, daß das Helium im verschlossenen Kryostaten erwärmt wird, was natürlich vermieden werden muß. Die Erwärmung kann zu Drücken führen, die weit oberhalb des Betriebsdruckes

liegen. Die Zustandsfunktion von Helium kann im Temperaturbereich 5,2 bis 300 K hinreichend genau durch das allgemeine Gasgesetz beschrieben werden. Die Masse Heliumgas, die bei 5,2 K im Kryostaten ($V \approx 110 \text{ cm}^3$) den Druck von 1 atm erzeugt, ist $M = pV/RT \approx 1 \text{ g}$. Würde man diese Gasmenge im abgesperrten Kryostaten bis 300 K erwärmen, so würde der Druck auf 55 atm ansteigen. Wird der Kryostat nicht nur mit Heliumgas, sondern der Probenraum bis zur Marke h_1 (Abb. 2) mit flüssigem Helium gefüllt ($M \approx 8 \text{ g}$), so ergeben sich folgende Druckwerte: $p(5,2 \text{ K}) = 8 \text{ atm}$, $p(100 \text{ K}) = 148 \text{ atm}$, $p(300 \text{ K}) = 443 \text{ atm}$. Die Verdampfung von 8 g Helium von 4,2 auf 5,2 K bei einer Heizleistung von 1 Watt (Heizstrom 0,5 A durch den Heizer 4Ω) erfolgt in etwa 2 min, d.h. der Druck steigt in dieser kurzen Zeit auf 8 atm an. Aus Sicherheitsgründen muß also im Falle des Ausheizens mit geöffneten Ventilen und laufender Pumpe gearbeitet werden.

Mein Dank gilt Herrn Dr. A. Elsner für die kritische Durchsicht dieser Arbeit sowie Herrn Dr. A.P. Martinelli für nützliche Hinweise. Herrn H. Bauer möchte ich für die geschickte Arbeit bei der Fertigung des Kryostaten danken.

Literatur

- 1 F. Rau: Internal Report IPP 2/67, (1968).
- 2 P.R. Aron, G.W. Ahlgren: Advances in Cryogenic Engineering, 13, 21, Plenum Press, New York (1968).
- 3 W. Amenda, A.P. Martinelli: Proceedings of XIII. Int. Congress of Refrigeration, Washington, Aug. 27-Sept. 3 (1971).
- 4 H.W. Lehmann, E. Meier: Journal of Physics E. Sci. Instrum. 3, 326 (1970).
- 5 V.A. Moiseev, A.M. Pshisukha, A.J. Zvyagin: Cryogenics 10, 332 (1970).
- 6 K.R. Efferson: Rev. Sci. Instrum. 38, 1776 (1967).
- 7 Cryogenic Material Data Handbook, Report ML-TDR-64-280, by Martin Company, Denver Colorado, (1964).

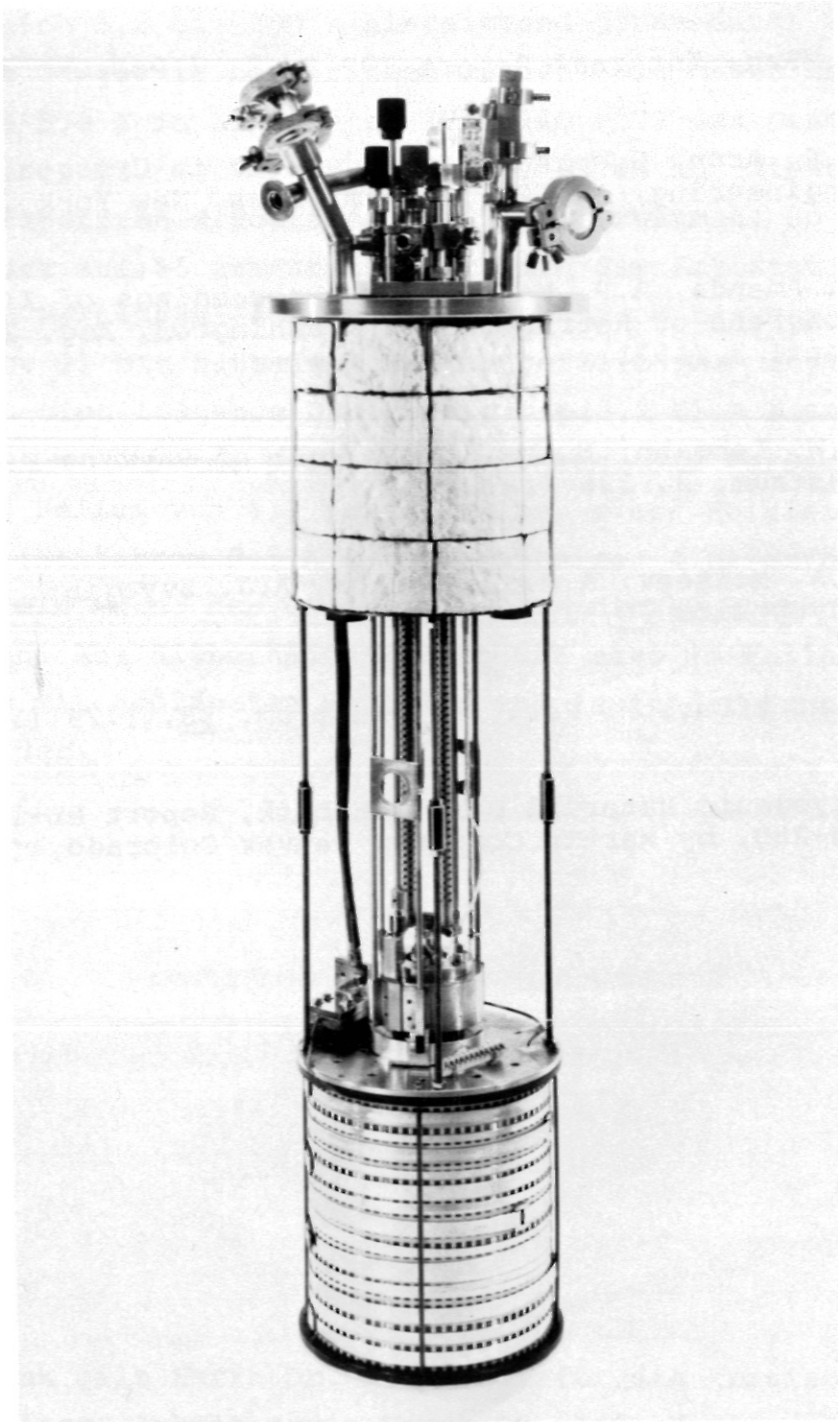


Abb. 10: Kryostat mit supraleitendem Magnet.