

Apparatur zu Hochstrom  $I_c$ ,H-Messungen an  
Kurzproben supraleitender Materialien.

Setup for  $I_c$ ,H-Characteristic Measurements  
on High Current Superconducting Short  
Samples

W. Amenda

IPP 4/71

März 1970

**INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**  
**GARCHING BEI MUNCHEN**



# INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Apparatur zu Hochstrom  $I_c$ , H-Messungen an  
Kurzproben supraleitender Materialien.

Setup for  $I_c$ , H-Characteristic Measurements  
on High Current Superconducting Short  
Samples

W. Amenda

IPP 4/71

März 1970

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

IPP 4/71 W. Amenda Apparatur zu Hochstrom  $I_c$ ,H-Messungen an Kurzproben supraleitender Materialien.

Setup for  $I_c$ ,H-Characteristic Measurements on High Current Superconducting Short Samples.

### Abstract

Es wird eine Apparatur beschrieben, mit der an Kurzproben supraleitender Materialien Messungen bis 52 kOe und 3500 A möglich sind. Die Öffnung der supraleitenden Feldspule ist 50  $\varnothing$  x 240 mm; davon ist im Bereich der Spulenmitte 100 mm der Öffnungslänge dem Einbau der Probe vorbehalten. Neben der Darstellung wichtiger Daten, die die Funktionsweise der Apparatur beschreiben, ist vor allem das Kontaktproblem mit möglichen Erwärmungseinflüssen auf die Probe behandelt. Weiter wird einiges über den Meßablauf, die Auswertung sowie beim Probeneinbau und Messen zu beachtende Dinge gesagt.

A setup is described which allows measurements on superconducting short samples in fields up to 52 kOe and currents up to 3500 A. The 52 kOe coil has a 50 mm bore (diameter) and 240 mm length. An axial length of 100 mm is available for the centered location of the sample. Besides the presentation of data describing the setup performance, the problem of the sample contacts is treated in details especially with regard to the heating influence of the environment on the sample. A description is given of the technique used, measurement process, and evaluation.

## INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung
2. Versuchsordnung
3. Hochstromeinsatz
  - 3.1 Berechnung der Stromzuleitung
  - 3.2 Konstruktion
  - 3.3 Betrieb- (Meßergebnisse)
4. Magnetfeld der Feldspule
5. Meßteil des Hochstromeinsatzes
  - 5.1 Meßkreis
    - 5.1.1 Meßdaten, Meßverfahren, Probeneinbau
  - 5.2 Versuche und Ergebnisse
    - 5.2.1 Strombelastung
    - 5.2.2 Kontaktwiderstand, bei  $H=0$  und  $H=m$
    - 5.2.3.  $I_c, H$ -Messungen an NbTi-Proben, Kontakteinfluß
  - 5.3 Messung der Kontakttemperatur
    - 5.3.1 Eichung
    - 5.3.2 "Thermisch erweiterter" Kontakt
    - 5.3.3 "Normaler" Kontakt
6. Tabellen

## Literaturverzeichnis



## 1. Einleitung

Die Entwicklung auf dem Gebiet der Supraleitung führte in den vergangenen Jahren zu Supraleitern, die sich u.a. durch besonders hohe Stromdichten auszeichnen. Um derartige Supraleiter auf ihr  $I_c$ ,H-Verhalten untersuchen zu können, wurde eine entsprechend leistungsfähige Meßapparatur entwickelt. Die  $I_c$ ,H-Messungen an Kurzproben supraleitender Materialien sind bis zu Strömen von 3500 A seit ca. einem Jahr mit dieser Apparatur durchführbar. Das Magnetfeld der supraleitenden Feldspule ist regelbar bis 52 kOe und bietet mit der Spulenöffnung von 50 mm  $\varnothing$  hinreichend Platz für die Unterbringung der Probe. Bisher wurde mit dieser Apparatur eine Anzahl neuerer Supraleiter getestet. Bei den Untersuchungen des Hochstromeinsatzes war besonders auf die Kontakterwärmung zu achten. Diese Erwärmung mit einem möglichen Einfluß auf die Probe wird in dieser Arbeit besonders berücksichtigt. Weiter werden alle wesentlichen Dinge der gesamten Apparatur dargestellt, insbesondere, wo ihre Belastungsgrenze liegt. Dieser Bericht ist ferner als Unterlage gedacht, um die in gewissen Zeitabständen zugänglichen neuen Supraleiter, zumindest bei routinemäßigen  $I_c$ ,H-Messungen, mit geringem Zeitaufwand und zuverlässig messen zu können.

## 2. Versuchsordnung

Der Aufbau des Versuchs ist in Abb.1 schematisch dargestellt. Die wesentlichen Teile der Apparatur befinden sich innerhalb des Kryostaten. Dazu gehören die Feldspule, Type SSp 50/240 NbTi, mit Stromzuleitung sowie der im Zentrum angeordnete Hochstromeinsatz. Die zu untersuchende Probe befindet sich im Meßteil des Hochstromeinsatzes innerhalb der Feldspule. Am Kryostatendeckel werden die Versorgungs- und Meßanschlüsse hergestellt. Die Darstellung der Geräte in Blockschaltweise soll ihren Zusammenhang erkennen lassen. Der Kryostat mit Feldspule war bereits vorhanden und dient allgemeinen Versuchen im Magnetfeld. Demnach sollen diese

Teile nur, insoweit sie beim gesamten Versuchsaufbau und -ablauf eine Rolle spielen, behandelt werden. Vorwiegende Aufgabe dieses Berichtes wird somit die Untersuchung des Hochstromeinsatzes sein. Genügend Raum wird auch der Beschreibung des Magnetfeldes der Feldspule gegeben.

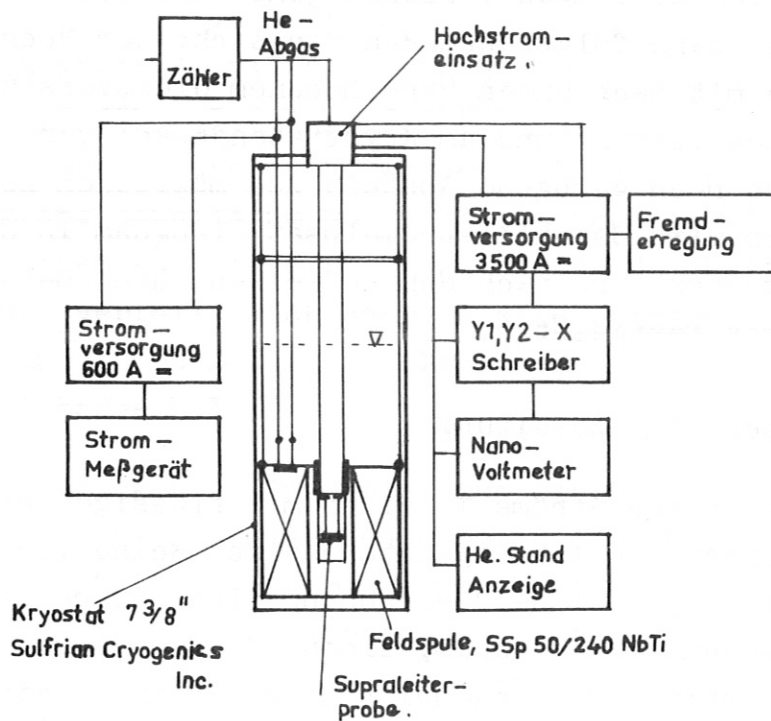


Abb. 1  
Versuchsanordnung

### 3. Hochstromeinsatz

Mit dem Hochstromeinsatz ist das gesamte Bauteil gemeint, welches die Probe in die Feldspule bringt und den erforderlichen Hochstrom zuleitet. Dieses Bauteil mußte sich in den vorhandenen Kryostatenaufbau einfügen. Für die Konstruktion bedeutete das vor allem die Beachtung zweier Dinge. Einmal die variable Standhöhe des Heliumbades mit der Höhendifferenz von 15 cm und zum anderen die beschränkt verfügbare Nutzfläche am Kryostatendeckel. Der Standbereich war nach Möglichkeit zu erhalten, um die Meßzeit nicht von vornherein zu sehr einzuschränken. Dies machte es erforderlich, alle Teile, die einer ständigen Kühlung bei 4,2 °K bedürfen, innerhalb der Feldspule anzuordnen (Abb.7). Wegen der geringen Deckelfläche kam nur eine koaxiale Stromzuleitung in



Frage. Soweit als möglich, wurden allgemein bekannte Gesichtspunkte, wie sie sich bei der Einleitung hoher Ströme in Kryostaten ergeben, bei der Konstruktion berücksichtigt. Beim Sammelteil wurde ein "Gleitverschluß" vorgesehen, womit gewährleistet wird, daß beim Austausch der Proben nicht allzuviel Heliumgas verloren geht (Abb.2). Das Auswechseln geht dann folgendermaßen vor sich: Der Hochstromeinsatz wird mit nach unten verschobenem Gleitverschluß in den Kryostaten gesetzt und am Kryostatendeckel verschraubt; dabei besteht noch genügend Abstand zum möglichen Heliumspiegel. Hiernach wird der Hochstromeinsatz langsam in den Kryostaten gesenkt und nach dem Aufsetzen durch Betätigung des Drehringes festgesetzt.

### 3.1 Berechnung der Stromzuleitung

Das Einleiten hoher Ströme in einen mit flüssigem Helium gefüllten Kryostaten ist Gegenstand einer Reihe von Untersuchungen [1,2,3]. Bei der Berechnung einer Stromzuleitung geht es im wesentlichen darum, einen für die gewünschte Stromstärke optimalen Querschnitt zu ermitteln. Gleichzeitig ist darauf zu achten, daß entlang der Stromzuleitung eine genügend große Kühlfläche zur Verfügung steht. Mit den Werten\* der koaxialen Stromzuleitung errechnet sich die optimale Stromstärke aus der Beziehung

$$I^2 = 2 a_0^2 \Theta_0 k / \rho_0 \ell^2$$

zu  $I_{\ell_1} = 1234$  A und  $I_{\ell_2} = 1763$  A. Die Angabe von zwei Stromwerten ist durch den Heliumstand bedingt. Es bedeuten  $\ell$ - Länge der Stromzuleitung,  $k$ - Wärmeleitzahl,  $\rho_0$ - spezif. Widerstand,  $a_0$ - Querschnitt,  $\Theta_0$ - Temperatur\*\*. Für einen mittleren Heliumstand beträgt der optimale Strom  $I \approx 1500$  A.

Eine Abstufung des Querschnittes über die Länge der Zuleitung wurde in diesem Fall nicht vorgesehen, d.h.  $a(x) = \text{const.}$ \*\*\*

\*/  $\ell_1: 50$  cm  $K: 4,2$  W/cm<sup>2</sup>K  
 $\ell_2: 35$  cm  $\Theta_0: 300$  °K  
 $\rho_0: 1,8 \cdot 10^{-6}$  Ωcm  
 $a_0: 1,65$  cm<sup>2</sup>

\*\*/ am "oberen(warmen) Ende".

\*\*\*/  
X: Strecke der Zuleitung,  
 $0 \leq x \leq \ell$ ,  
 $x = 0$  "oberes Ende"

### 3.2 Konstruktion

Zwischen dem "warmen" und "kalten" Ende (Kryostatendeckel und Heliumspiegel) bilden konzentrische Kupferrohre die Stromzuleitung. Der Querschnitt über die ganze Länge der Rohre ist konstant. Ein Innenrohrbündel aus Kupferrohren mit 4, 6, 8 - 20x 0,5 mm Durchmesser und ein Außenrohrbündel mit 24, 26 - 30x 0,5 mm Durchmesser bilden den Hin- und Rückleiter. Die Querschnitte der beiden Rohrbündel sind ungefähr gleich groß, nämlich  $\sum_{i} a_i = 162 \text{ mm}^2$  und  $\sum_{a} a = 168 \text{ mm}^2$ . Im unteren Rohrbereich, wo der Heliumspiegel variiert, sind am Umfang jeweils um 90° versetzt Schlitze in Achsrichtung eingearbeitet. Diese Schlitze dienen dem Heliumgaseintritt. Das Gas verteilt sich dann in alle Zwischenräume der beiden Rohrbündel und gelangt schließlich in den Sammelraum am Kryostatendeckel.

Sammelteil Abb.2. Im Sammelraum strömt das Gas aus der Leitungsstrecke zusammen und wird in die Abgasleitung geleitet. Die außerhalb des Sammelraumes befindlichen Stromlaschen werden mit den Stromkabeln der Gleichstromversorgung verbunden. Der Verbindung der Meßleitungen zum Prüfling dienen die zwei Vielfachstecker. Das Sammelteil wird über den Gleitverschluß mit dem Kryostatendeckel dicht verbunden.

Meßteil Abb.3, 7. Am "kalten" Ende der coaxialen Stromzuleitung verlängern die Zuleitungsbänder\*\* den Leitungszug bis zu den Fußkontakten. Diese Verbindung ist die "supraleitende Section" der Stromzuleitung. An den Zuleitungsbändern ange-lötete Anschlußstücke sind mit dem Querwiderstand mittels der Schraube (6) verbunden. Der eigentliche Widerstand besteht aus Konstanten von 2 mm  $\varnothing$ . An das untere Meßteil (Fußkontakt und Haltering) können Proben angebracht werden. Die Art des Wickelkörpers, welcher an den Haltering zu befestigen ist, richtet sich nach der Konfiguration des Leiters im Magnetfeld sowie seiner Geometrie. Die Probenkontakte werden ebenfalls den gegebenen Verhältnissen angepaßt. Im allgemeinen wird bei den  $I_c$ , H-Messungen die U-Form ver-

\*/  $i$ : Innenrohre  
 $a$ : Außen "

\*\*/ Bänder aus  $\text{Nb}_3\text{Sn}$



wendet, weshalb die Anordnung auch in Abb.3 eingezeichnet wurde. Hierbei wird an dem Haltering ein Blindstück befestigt, welches das untere Meßteil zusammenhält. Die Probe ist mit einer in den Probenkontakten befestigten Halteleiste fixiert.

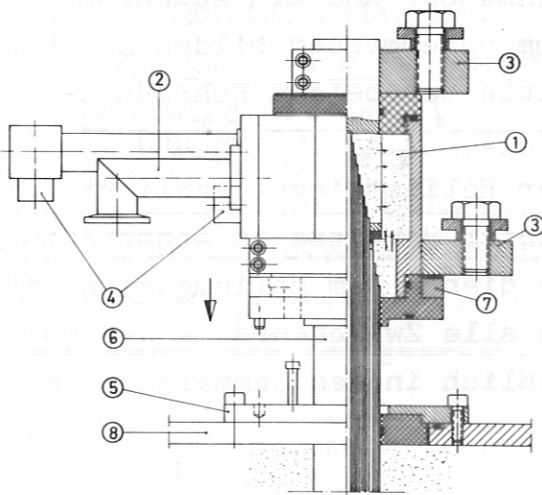


Abb. 2 Hochstromeinsatz, Sammelteil

1. Sammelraum, 2. Abgasleitung, 3. Stromlaschen, 4. Vielfachstecker,
5. Gleitverschluß, 6. Stromzuleitung, 7. Drehring, 8. Kryostatendeckel.

Maßstab der  
Abb.3 > Abb.2

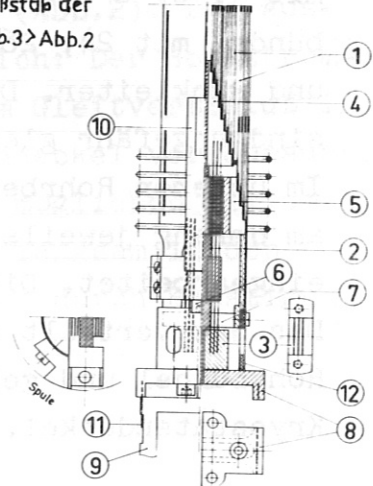


Abb. 3 Hochstromeinsatz, Meßteil

- 1 Stromzuleitung, 2 Zuleitungsbänder, 3 Fußkontakt,
- 4-5 Verbindungsteil, 6 Schraube, 7 Haltering,
- 8 Probenkontakt, 9 Halteleiste, 10 Querwiderstand,
- 11 Supraleiterprobe, 12 Blindstück.

### 3.3 Betrieb- (Meßergebnisse)

Für den Belastungsversuch des Hochstromeinsatzes war der Kryostat in der vorne beschriebenen Anordnung zusammgebaut (Abb.1). Das Meßteil enthielt eine Probe, deren kritische Werte vom Meßstrom nicht zu erreichen waren ( $I_c > I$ ). Den Hochstromeinsatz und die Stromversorgung verbanden  $185 \text{ mm}^2$  Kupferkabel. Der vorliegende Versuchsaufbau zeigt bei Strombelastungen bis 3500 A keine Störanfälligkeit, im Bereich des Hochstromeinsatzes treten keine übermäßigen Erwärmungen auf. Als nächstes waren die Heliumverluste zu ermitteln. Diese Verluste sind abhängig von der jeweiligen Strombelastung. Das Heliumgas kann sowohl über die Stromzuleitung der Feldspule als auch über den Hochstromeinsatz abströmen. Es wurde jeweils die gesamte Abgasmenge gemessen. Die Abhängigkeit der Heliumverluste vom Belastungsstrom ( $I_E = \text{const.}$ ) ist in Abb.4 dargestellt.

Bis  $I_E = 600$  A fallen die Kurven innerhalb der Meßgenauigkeit

$$\dot{m}(0) = (K_1 I_o) + (K_2 I_o) I_E$$

$$\dot{m} = \dot{m}(0) + f(I_z)_{I_E = \text{const.}}$$

$I_o$  : optimaler Strom

$\dot{m}_o$  : He-Verluste bei  $I_o$

$\dot{m}(0)$  : He-Verluste bei  $I_z = 0, I_E = 0$

$K_1$  u.  $K_2$  : Konstanten

$\dot{m}_d$  : Kryostatenverluste

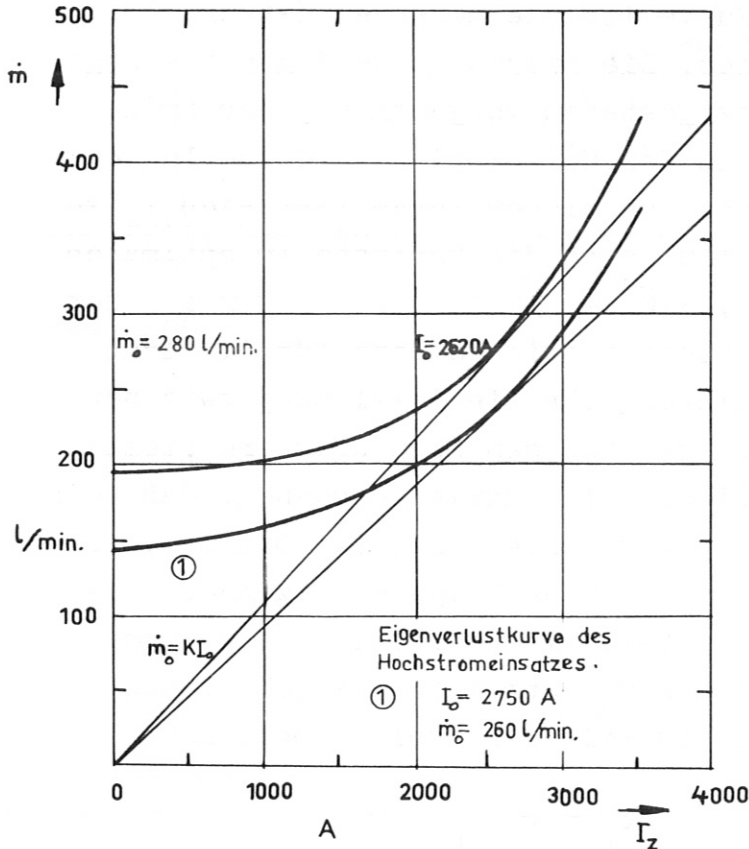


Abb. 4

Heliumverluste  $\dot{m}$  des Kryostaten-  
systems in Abhängigkeit vom Be-  
lastungsstrom  $I_z$ ,  $I_E = \text{const.}$

zusammen. Als günstiger Arbeitsbereich läßt sich ein Strom ( $I_o$ ) von 2620 A ermitteln

$$\left( \frac{d \dot{m}}{d I} \right)_{I=I_o} = \frac{\dot{m}_o}{I_o}$$

Der optimale Strom  $I_o$  entspricht jedoch einem sehr flach verlaufenden Minimum der Verluste

$$\left( \frac{d \dot{m}/I}{d I} \right)_{I=I_o} = 0$$

Bei Belastungsströmen bis 3500 A steigen die Heliumverluste auf 425 l/min. Die Zuordnung der möglichen Strombelastung zur Meßzeit ist aus Abb.5 zu ersehen. Die elektrischen Verluste des Hochstromeinsatzes über seine



gesamte Länge ergab für  $I = I_0$  den Wert 970 Watt\*. Nach  $\approx 2$  min. Betriebszeit bei 3500 A erhöht sich die Leistung infolge der Erwärmung der Stromzuleitung für  $I = I_0$  auf 1280 Watt. Diese bei den verschiedenen Strombelastungen über die Zeit sich einstellenden Erwärmungen sind bei den Messungen der Gasverluste im Mittel berücksichtigt. Die mit ① bezeichnete Kurve ist die Eigenverlustkurve  $\dot{m}(I_z)$  des Hochstromeinsatzes. Die hierzu notwendigen Messungen wurden in einem Glaskryostaten vorgenommen, der im zu messenden Standbereich des Heliumspiegels Gasverluste  $m_d$  von  $\approx 4$  l/min aufwies. Aus dieser Kurve läßt sich  $I_0$  zu 2750 A ermitteln, woraus sich die Verluste im optimalen Arbeitsbereich mit  $8,1 \cdot 10^{-3} \text{ l}_{\text{Fl.}} / \text{h A}$  ergeben. Der aus der theoretischen Betrachtung bestimmte Wert für  $I_0$  liegt bei 1500 A. Eine Erklärung für die Abweichung zwischen dem theoretischen und dem aus den Messungen ermittelten Wert für  $I_0$  ist möglicherweise darin zu suchen, daß keine Querschnittsabstufung vorgesehen wurde (großes  $\dot{m}(0)$ ). Die bei größeren Strömen steiler ansteigende Eigenverlustkurve gegenüber der Systemverlustkurve läßt vermuten, daß zusätzliches, in den Hochstromeinsatz geleitetes kaltes Heliumgas noch zu weiterer Kühlung beiträgt.

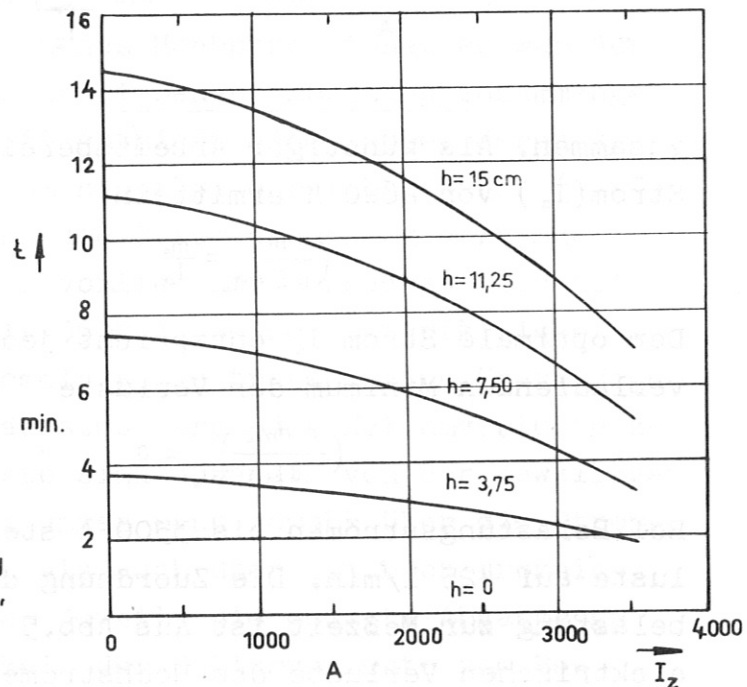
$$t = (d^2 \pi 0,7/4) \cdot h (1/\dot{m}(I_z))$$

$$= c h (1/\dot{m}(I_z)) \quad c = 192$$

$h = \text{const.}$

Abb. 5

Meßzeit bei bestimmtem He.-Stand  
in Abhängigkeit vom Strom  $I_z$ ,  
 $I_E = \text{const.}$



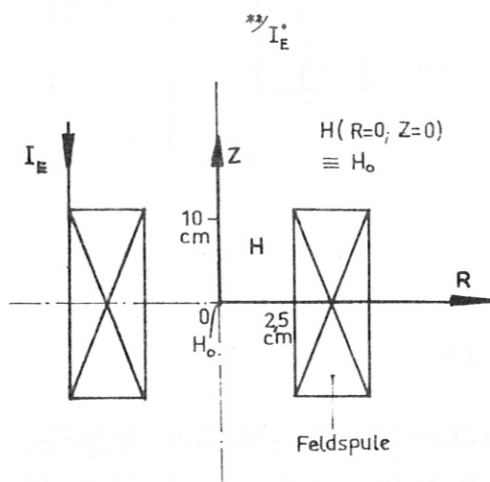
\*/ entspricht dem Oberflächen-  
Wärmefluß von  $\approx 0,14 \text{ W/cm}^2$

#### 4. Magnetfeld der Feldspule

Das Magnetfeld der Feldspule\* wird in den Tabellen 1 bis 4 beschrieben. Die Werte wurden mit der IBM 360/91 berechnet [4]. Die Koordinaten der Tabellen in Bezug zur Feldspule zeigt Abb.6. Tabelle 1 zeigt für den Punkt  $Z=R=0$  die Feldstärke in Abhängigkeit vom Erregerstrom,  $H_0(I_E)$ . In Tabelle 2 bis 4 ist zu den Daten der Spulengeometrie ein Stromwert\*\* angenommen, der für  $H_0$  den Wert  $H_0 = 10^2$  kOe ergibt. Hierdurch ist aus den Tabellen 2 bis 4 abzulesen, auf welchen Prozentsatz das Feld  $H_0$  in den durch  $R, Z$  angegebenen Punkten fällt bzw. ansteigt. Der Erregerstrom der Feldspule für  $H_0 = 10^2$  kOe beträgt 1141,76 A. Der Quenchkpunkt liegt bei etwa 600 A.

Abb.6

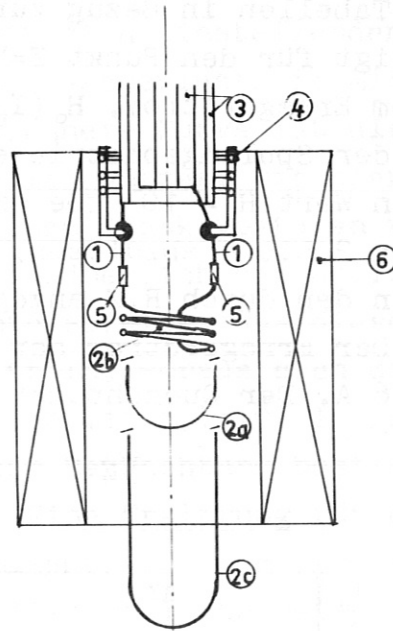
Die Lage der Koordinaten zur Feldspule.



#### 5. Meßteil des Hochstromeinsatzes

Alle Teile, die im Innenraum der Feldspule untergebracht sind, bilden das Meßteil (Abb.7). Dieses soll in den folgenden Abschnitten untersucht werden. Zu den Belastungstests wurden vor allem Untersuchungen über einen möglichen Kontakteinfluß (Erwärmung) auf die Probe angestellt. Diese möglichen Einflüsse sind durch zwei voneinander unabhängige Methoden zu erfassen (5.2.3, 5.3). Zuvor aber soll der Zusammenhang des Meßkreises kurz dargestellt werden, welches, obwohl mit elementarer Rechnung durchzuführen, im Hinblick auf die Meßpraxis erfolgt. Daneben wird das übliche Meß-

verfahren bei den  $I_c, H$ -Messungen erläutert sowie eine Zusammenfassung bekannter Methoden über Verbindungen von Supra- zu Normalleiter (Kupfer) gegeben.



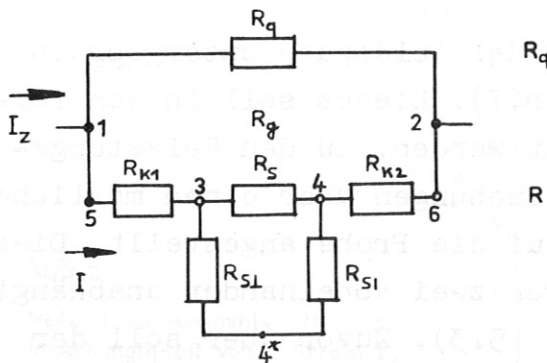
- 1 Zuleitungs-Bänder, aus  $Nb_3Sn$
- 2 Supraleiterprobe
  - a U-Form
  - b Probenspule
  - c Probe\* zu 5.2.1 u. 2.2.2
- 3 Koaxiale Kupferrohre
- 4 Querwiderstand
- 5 Kontakte
- 6 Feldspule

\* Material wie die Zuleitungsbänder

Abb. 7  
Schema des Meßteiles .

### 5.1 Meßkreis

Der Meßkreis erfaßt das gesamte Meßteil. An Hand des Ersatzschaltbildes (Abb.8) werden die aus den Meßdaten zu ermittelnden Größen abgeleitet. Die Meßdaten sind die an den mit Zahlen gekennzeichneten Punkten gemessenen Spannungswerte. Hieraus können die kritischen Stromwerte der Probe ermittelt werden.



\* Siehe Seite 11

- $I_z$  Zuleitungsstrom
- $R$  Widerst. des Probenzweiges
- $R_q$  Querwiderst.
- $R_p$  Parallelwiderst. ( $R \parallel R_q$ )
- $I$  Strom im Probenzweig
- $R_s$  "Probenwiderst."
- $U_{1-2}$  Spannung an  $R_q$  bei  $I_z$
- $U_{3-4}$  Spannung an  $R_s$  bzw.  $R_{s1}^*$  bei  $I$
- $R_{k1}$  u.  $R_{k2}$  Kontaktwiderst.

Abb. 8  
Meßkreis, Ersatzschaltbild



Es ist:  $R_q = U_{1-2} / I_z$  (1)  $R_q = R_q R / (R_q + R)$  (2)

Aus (2), nach R aufgelöst und die Beziehung (1) eingesetzt, folgt der Ausdruck, der es erlaubt, aus den zugänglichen Meßgrößen den Widerstand des Probenzweiges zu bestimmen

$$R = U_{1-2} / \left( I_z - \frac{U_{1-2}}{R_q} \right) \quad (3)$$

Zerlegt man R in seine Einzelwiderstände, läßt sich schreiben

$$R = R_{K1} + R_{K2} + R_s \quad (4)$$

bzw. wenn anstelle von  $R_s$  gesetzt wird  $R_{s1} + R_{s1}$  (siehe weiter unten)

$$R = R_{K1} + R_{K2} + R_{s1} + R_{s1} \quad (5)$$

Mit dem Widerstand des Probenzweiges R aus (3) und  $R_q$  läßt sich der Ansatz für den Strom I anschreiben:

$$(I_z R_q - U_{1-2}) / U_{1-2} = I / (I_z - I) \quad (6)$$

Durch einfache Umformung lautet der Ausdruck für den Strom I im Probenzweig

$$I = I_z - (U_{1-2} / R_q) \quad (7)$$

Bei Supraleitern, die vor dem Quenchnpunkt  $I_c(H)_1$  bereits einen endlichen Widerstand ( $R_s > 0$ ) aufweisen, erscheint nachfolgende Ergänzung angebracht. Bei einem Probenstück im transversalen Magnetfeld soll dieser Widerstandswert mit  $R_{s1}$  bezeichnet sein. Dieser Widerstand zeigt sich dann, wenn oberhalb einer bestimmten Stromstärke nunmehr ein Teil des Leiterstromes vom Supraleiter getragen wird, während der übrige Teil über den stabilisierenden Normalleiter (Kupfer) fließt. Im englischen Sprachgebrauch wird der Strom am Einsatzpunkt dieses Widerstandes üblicherweise als "take off-current" ( $I_t$ ) bezeichnet. Sofern eine Probe in U-Form gemessen wird, soll grundsätzlich die Möglichkeit einbezogen sein, daß die im longitudinalen Magnetfeld liegenden Leiterstücke bereits vor Erreichen des kritischen Stromes  $I_c(H)_1$  einen endlichen Widerstand ( $R_s$ ) in der beschriebenen Art

aufweisen. Dieser evtl. auftretende Widerstand ( $R_{S1}$ ) läßt sich wie folgt aus den gemessenen Kurvenwerten (Abb.9) bestimmen. Übernehmen wir hierzu die Gl.5 und ersetzen nur  $R_{K1} + R_{K2}$  durch  $R_K$ , dann ist

$$R_K + R_{S1} + R_{S1} = U_{1-2} / (I_Z - \frac{U_{1-2}}{R_q}) \quad (8)$$

Alle Größen, mit Ausnahme von  $R_{S1}$ , ergeben sich aus den in 5.1.1 erläuterten Meßdaten. Wir lösen Gl.8 nach  $R_{S1}$  auf und ersetzen  $R_K$  durch Ausdrücke, die das Meßdiagramm enthält (Abb.9). Für  $R_K$  wird  $R$  eingesetzt, wenn noch gilt  $R_{S1} + R_{S1} = 0$ ; weiter ist  $R_{S1} = U_{3-4} / I$  und  $I$  ist noch durch Gl.7 zu ersetzen.

$$R_{S1} = (U_{1-2} / (I_Z - \frac{U_{1-2}}{R_q})) - (U_{3-4} / (I_Z - \frac{U_{1-2}}{R_q}) + \bar{U}_{1-2} / (\bar{I}_Z - \frac{\bar{U}_{1-2}}{R_q})) \quad (9)$$

Damit lautet das Ergebnis

$$R_{S1} = (\Delta U_{1-2} / (I_Z - \frac{U_{1-2}}{R_q})) - (U_{1-2} / (I_Z - \frac{U_{1-2}}{R_q}))_{R_S=0} \quad (10)$$

Die Werte in der Klammer  $R_S = 0$  sind aus dem linearen Teil  $U_{1-2}(I_Z)$  zu entnehmen. Wenn dieser Term bestimmt ist, wird die Gl.10 für beliebige Ströme ( $I > I_t$ ) innerhalb des Bereiches gerechnet, in dem die Spannung stabil ansteigt.

Schließlich sollte noch wegen seiner Wichtigkeit der Kontaktwiderstand besonders herausgestellt werden. Bleibt in Gl.4  $R_S = 0$ , das ist im linearen Bereich  $U_{1-2}(I_Z)$  der Fall, wird  $R_{K1} + R_{K2} = R$  und somit  $R_{K1} = R - R_{K2}$ . Für  $R$  gilt die Gl.3 und  $R_{K2}$  ist  $U_{2-4} / I$ ; berücksichtigt man dazu noch Gl.7, folgt

$$R_{K1} = (\Delta U_{1-2} / (I_Z - \frac{U_{1-2}}{R_q}))_{R_S=0}; \quad R_{K2} = (U_{2-4} / (I_Z - \frac{U_{1-2}}{R_q}))_{R_S=0} \quad (11)$$

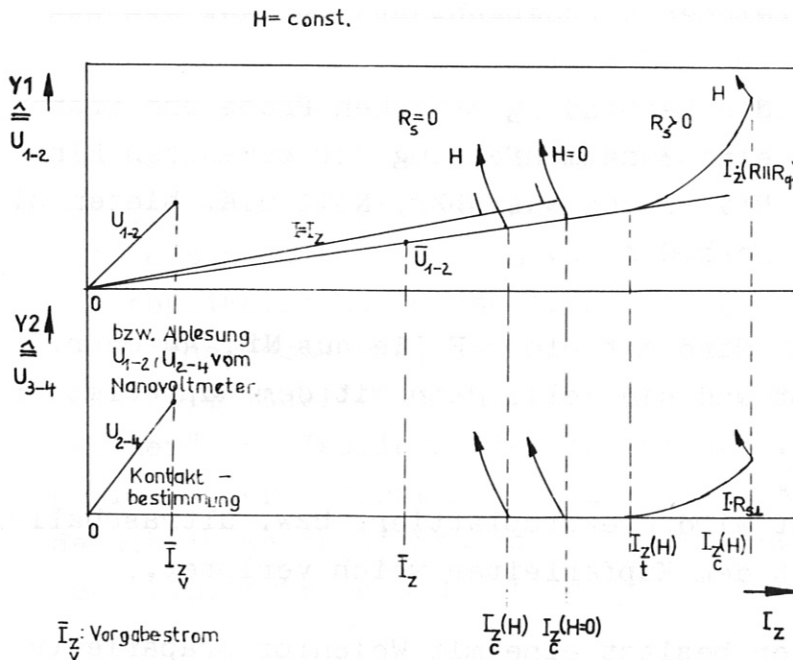
Ist  $U_{2-4} = U_{1-3}$ , schreibt man besser

$$R_K / 2 = (U_{1-2} / (2(I_Z - \frac{U_{1-2}}{R_q})))_{R_S=0} \quad (11a)$$

5.1.1. Meßdaten, Meßverfahren, Probeneinbau

Meßdaten Im letzten Abschnitt wurden die Zusammenhänge des Meßkreises dargestellt. Die Auflösung der Beziehungen wurde so vorgenommen, daß mit möglichst wenig Meßdaten die benötigten Größen berechnet werden können. Aus Gl.7 wird der Probenstrom bestimmt, und zwar ist es dabei gleichgültig, ob die Probe einen endlichen Widerstand ( $R_s > 0$ ) aufweist oder nicht. Ob ein endlicher Widerstand  $R_s$  gemessen über die gesamte Probe aus dem im transversalen Magnetfeld angeordneten Stück besteht, ist mit Gl.10 zu bestimmen. Der Kontaktwiderstand ergibt sich aus Gl.11 bzw. 11a.

Alle zu diesen Berechnungen notwendigen Meßgrößen ergeben sich aus dem in diesem Abschnitt gezeigten Diagramm (Abb.9). Aufgezeichnet werden die Kurven mit Hilfe eines 2-kanaligen X,Y-Schreibers\*. Das Blatt enthält also die Funktionen  $Y1, Y2(I_z)$ . Verwenden wir unsere Bezeichnungen, so ist  $Y1 \triangleq$  Spannung  $U_{1-2}$ ,  $Y2 \triangleq$  Spannung  $U_{3-4}$  bzw. bei der Kontaktbestimmung  $U_{2-4}$ ,  $X \triangleq$  Strom  $I_z$ . Die Kontaktbestimmung kann auch bei vorgegebenem Strom  $\bar{I}_z$  zunächst mit einem Nanovoltmeter\*\*



$\bar{I}_z, \bar{U}$  sind Werte  $I_z, U$  vom Kurven-  
teil  $I_z < I_z^t$ , ( $R_s$  ist noch 0).

$I_z^t, I_z^c$  müssen umgerechnet  
werden zu  $I_c$  bzw.  $I_t$ , Gl. 7.

Abb. 9  
Diagramm vom X,Y-Schreiber.

\*/ Moseley Autograf, 136 AM  
\*\*/ Keithley Instruments, Model 148



vorgenommen werden. Beim Strom  $\bar{I}_Z$  werden die Spannungen  $U_{1-2}$  und  $U_{2-4}$  gemessen und in das Diagramm eingetragen. Dabei ist Y1, Y2 bereits auf die Messung der kritischen Ströme der Probe eingestellt.

Meßverfahren Bei den  $I_c, H$ -Messungen wird nach folgendem Meßablauf verfahren. Man beginnt mit der niedrigsten Stromdichte die Messungen. Wenn  $n$  die Laufzahl der Meßpunkte ausgehend von  $H=0$  ist, also  $I_c(H_n), I_c(H_{n-1}), \dots, I_c(H_{n-1})$ . Da die kritischen Meßpunkte einer Probe im allgemeinen gut reproduzierbar sind, bestätigen sie sich selbst durch eine zweite Messung. Es gilt nämlich zu beachten, daß die nach dem Phasenübergang SL, NL vom abklingenden Strom durchflossene Probe sich in ihrer Materialstruktur nachteilig verändern kann. Im allgemeinen ist es zweckmäßig, nach jeder Meßreihe nur den Punkt  $I_c(H_n)$  zu wiederholen, um diesen mit dem ersten vergleichen zu können. Im besonderen Fall ist der Querwiderstand auf  $R_q < 0,996 \text{ m}\Omega$  abzuändern\*. Das Magnetfeld wird in der Regel von einem eingestellten Wert  $H_n$ , bei dem der Strom bis zum kritischen Punkt gesteigert wurde, auf  $H_{n-1}$  verringert. Eine Anzahl Messungen haben ergeben, daß der Strom  $I_c(H_{n-1})$  unabhängig davon, ob das Feld  $H$  vorher auf Null gebracht wurde oder nicht, den gleichen Wert ergab.

Probeneinbau Für die Verbindung zwischen Probe und Probenkontakt wird hier eine Zusammenfassung der bekannten Einbaumethoden gegeben. Bei Proben aus NbZr, NbTi u.ä. bieten sich vier prinzipielle Methoden an.

1. Der Probendraht wird mit einer Folie aus Ni, Au oder Pt punktgeschweißt und die Folie dann mit dem Kupferleiter weich verlötet.
2. Der Probendraht wird elektroplattiert bzw. ultraschallgelötet und mit dem Kupferleiter weich verlötet.
3. Der Kupferleiter besitzt eine mit Weichlot präparierte Bohrung, in die die Probe eingepaßt und durch Kompression des Kupferleiters kontrahiert wird.

\* u.d.,  
bedeutet Änderung von  $m(I_Z)$   
sowie  $I < I_Z$ .

4. Mit einem Ultraschallötgerät wird Indium auf die Probe aufgetragen. Die so präparierte Probe wird in eine Bohrung des Kupferleiters eingepaßt und durch Kompression des Kupferleiters kontrahiert (kaltverschweißt).

Das Reinigen der Probenoberfläche vor Anwendung der Methoden 1 - 4 geschieht normal mit Trichloräthylen. Für Methode 2 und 4 kommt weiter in Betracht die mechanische (Schaben) bzw. chemische Reinigung mit dem Säuregemisch aus  $\text{HNO}_3$ -HF [5]. Die Übergangswiderstände der oben gezeigten Verbindungen mit Proben aus NbZr sind an anderer Stelle untersucht worden [6]. Sofern unterhalb eines Kontaktwiderstandes von  $10\mu\Omega$  Messungen an Supraleitern durchgeführt werden, ist mit keinem Wärmeeinfluß auf die  $I_c, H$ -Werte zu rechnen.  $I_c, H$ -Messungen wurden allerdings nur bis zu Strömen von  $\approx 50$ -100 A durchgeführt. Die erzielte Stromdichte an den verwendeten Verbindungen betrug jedoch einige  $10^5 \text{ A/cm}^2$ . Kontaktwiderstände wurden mit Strömen von 0,1, 1, 10 A im Feld von 0, 2,1 und 8,75 kOe (90 kOe) gemessen. Die besten Ergebnisse wurden bei den folgend genannten Verbindungen erzielt: Methode 4, Trichloräthylen gereinigt; Methode 2, ultraschallgelötet, Trichloräthylen gereinigt; Methode 4, geschabt. Verbindungen der Art "kaltverschweißt" von Indium zur sauberen Kupferoberfläche haben im Feld bis 90 kOe einen äußerst geringen Magnetwiderstand gezeigt. Der Quotient von Kontaktwiderstand im 70 kOe-Feld zum 0-Feld beträgt ca. 1,1. Dagegen hat vergleichsweise die Verbindung nach Methode 1 (Pt) einen Quotienten von ca. 1,9 mit steigender Tendenz. Die physikalische Beschreibung der gezeigten Stromkontakte (einfache Geometrie) gelingt in Annäherung am besten nach dem "Holm model", welches auf dem Stromfluß durch sogenannte "Löcher" von Isolierschichten (Oxyde) einiger Angströmdicke basiert. Der Widerstand eines solchen Kontaktes ergibt sich danach im wesentlichen aus dem Einschnüren der Stromfäden, dem "Einschnürungswiderstand" [7]. Für die Aufheizung eines

solchen Kontaktes kann für Kupfer angenähert geschrieben werden

$$T_c^2 = T_a^2 + \frac{v^2}{4} \left( \frac{1}{\rho} \frac{dT}{dT} \right)_{\text{mittl. Wert}}$$

$\rho$  ist der elektrische Widerstand,  $\kappa$  die thermische Leitfähigkeit,  $v$  die Kontaktspannung,  $T_c$  und  $T_a$  die Temperaturen. Nimmt man mit von unseren Kontakten gegebenen Werten\* nach dieser Gleichung eine Rechnung vor, so wird trotz des größeren Stromes (3000 A) die in 5.3.3 für den "normalen" Kontakt gemessene Temperatur bestätigt. Es ergibt sich nach der Rechnung  $T_c = 4,57^\circ\text{K}$ .

## 5.2 Versuche und Ergebnisse, Meßteil

### 5.2.1 Strombelastung

Querwiderstand Bei den  $I_c$ -H-Messungen schützt im Falle des Phasenübergangs von SL, NL der Querwiderstand die Probe vor einer Zerstörung, indem er den Großteil des bis zur Abschaltung fließenden Stromes übernimmt. Für eine günstige Stromteilung wurde der Wert von  $R_q \approx 1\text{m}\Omega$  festgelegt. Mit getrenntem Probenzweig R wurde der Querwiderstand bei  $4,2^\circ\text{K}$  auf seine Stromtragfähigkeit hin untersucht (Abb.7). Bis  $2500\text{ A} (\approx 500\text{A}/\text{sec})$  ist die Kennlinie  $U(I_z)$  linear und der Widerstand beträgt  $R_q = 0,996\text{m}\Omega$ . Das durch den Belastungsvorgang verdampfende Helium verursacht im Kryostaten einen Druck, der sich bis  $\approx 0,3\text{ atü}$  steigert.

Zuleitungsbänder und Kontakte Die Zuleitungsbänder haben die Aufgabe, die Kontakte gegen ohm'sche Wärme von außen abzuschirmen. Sie dürfen dabei von den Kontakten nicht über ihre Sprungtemperatur erwärmt werden. Beim größten\*\* Feld und Strom wurde dieses Verhalten untersucht. Im Probenzweig war eine Probe des gleichen wie für die Zuleitungsbänder verwendeten Materials eingesetzt; der Querwiderstand wurde entfernt (Abb.7, 2c). Durch Messen des Potentials der verschiedenen Leiterstrecken konnte nachgewiesen werden, daß die Temperaturerhöhung der Kontakte unterhalb  $T_c$  der Zuleitungsbänder blieb. Die Abhängigkeit des Kontaktpotentials

\* $v$ :  $0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^3\text{ V}$   
 $dK/dT$ :  $0,85\text{ W}/\text{cm}^\circ\text{K}^2$   
 $T_a$ :  $4,2^\circ\text{K}$

\*\* $H$ :  $52\text{ kOe}$   
 $I$ :  $3500\text{ A}$



vom Strom  $I_z$  war linear. Für beliebige Proben besteht weiterhin die Möglichkeit, daß  $\tau_{cx}$  kleiner als  $\tau_c$  sein kann (hierzu siehe 5.2.3, 5.3). Daß die Zuleitungsbänder aber innerhalb des I, H-Bereiches zu keinem vorzeitigen Quench führen, gilt als gesichert.

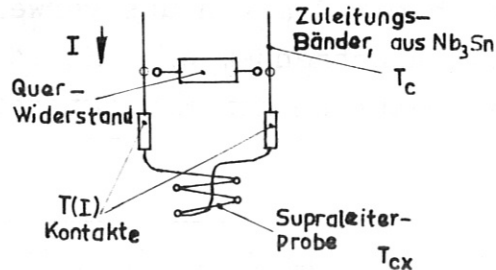


Abb.10  
Temperaturen am Meßteil

### 5.2.2 Kontaktwiderstand, bei $H=0$ und $H=m^*$

Die Aufgabe besteht darin, den Widerstand der Kontakte im Feld  $H=0$  und  $H=m$  zu ermitteln. Gegenüber im Nullfeld wird der Kontaktwiderstand um den Magnetwiderstand  $\Delta R_H$  größer sein. Um diese Messungen durchführen zu können, beinhaltet das Meßteil eine Probe, die beim größten Feld und Strom keinen vorzeitigen Quench zeigte (Abb.7, 2c). Mit dem Parameter  $H$  und steigendem Strom wurde das Potential eines sorgfältig vorbereiteten Kontaktes gemessen. Das Potential wurde über einen Verstärker aufgezeichnet. Die so erhaltenen Kurven zeigt Abb.13. Hieraus lassen sich für  $R_0 + \Delta R_T^{**} = 0,21 \pm 0,022 \mu\Omega$  und  $\Delta R_H = 0,23 \pm 0,045 \mu\Omega$  berechnen. Zumindest zu einer Abschätzung der Kontakttemperatur gelangt man über die Kontaktleistung. Sie beträgt, wenn wir die obere Grenze des Kontaktwiderstandes  $0,8 \mu\Omega$  (siehe 5.2.3) zugrunde legen, bei  $3500 \text{ A}$   $9,8 \text{ Watt}$ . Die Wärmeübergangszahl ist bekannterweise definiert zu

$$q = \alpha A (T_{\text{Oberfläche}} - T_{\text{Flüssigkeit}})$$

Hierin ist  $q$  der Wärmestrom, der die Grenzfläche  $A$  senkrecht durchsetzt. Mit  $q = 9,8 \text{ Watt}$  erhält man  $q/A$  zu  $0,4 \text{ W/cm}^2$ , da die Oberfläche eines Kontaktes zum Heliumbad  $21 \text{ cm}^2$  beträgt. Dieser Wert soll mit ähnlichen aus der Literatur bekannten

\*  $m = 52 \text{ kOe}$

\*\*  $R_0$ : Kontaktwiderstand bei  $4,2^\circ\text{K}$ ,  
 $\Delta R_T$ : dessen Zuwachs bei Erwärmung

Messungen verglichen werden [8]. Dort wurde an einem im flüssigen Helium gebrachten Alu-Streifen  $2,5 \times 64$  mm der Wärmetransport untersucht. Für  $q/A \approx 1$  W/cm<sup>2</sup> wird eine Temperaturdifferenz von 1°K angegeben. Da die Wärmeübergangszahl weitgehend unabhängig vom Material ist und die Gestalt der Grenzfläche ähnlich sein dürfte wie in unserem Fall, ist ein abschätzender Vergleich mit dem von uns verwendeten Kontakt zulässig.  $\Delta T$  sinkt mit abnehmendem  $q/A$ . Es läßt sich hieraus folgern, daß die Temperatur an der Kontaktoberfläche kleiner ist als 5°K.

### 5.2.3 $I_c, H$ -Messungen an NbTi-Proben, Kontakteinfluß.

Es wurden an einer Anzahl von Proben aus NbTi  $I_c, H$ -Messungen vorgenommen. Dies in der üblichen Meßweise, wie sie mit der Aufzeichnung der  $Y_1(I_z)$  Kurven geschieht (Abb.9). Ein Beispiel dazu zeigt die Abb.12\*. Mit einem sorgfältig eingestellten Meßkreis ist die darin zu ersehende Genauigkeit der Kurven selbst im oberen  $I, H$ -Bereich zu erreichen. Mit gemeinsamem Nullpunkt und gleicher Polung von  $Y_1(I_z)$  bei verschiedenem Feld ist die Auflösung zum Erkennen des Magnetwiderstandes nicht ausreichend. Daher wurde die Polung zwischen zwei Messungen  $Y_1(I_z)_{H=0}, Y_1(I_z)_{H=H_m}$  geändert und die Kurven gemittelt. Der hiernach zu berechnende Magnetwiderstand ist  $\approx 0,2 \mu\Omega$  (siehe auch 5.2.2). Der Kontaktwiderstand beträgt je nach dem Einbauzustand der Kontakte (Oxyde) zwischen  $0,2$  und  $0,5 \mu\Omega$ . Der Widerstand eines einmal zusammengebauten Kontaktes ist stromunabhängig. Inwieweit nun bei den  $I_c, H$ -Messungen der Wärmestrom Kontakte-Probe einen nachteiligen Einfluß ausübt bzw. wie man ihn erkennt, wird im folgenden gezeigt: Der Widerstand eines Kontaktes ist auch in der Form zu schreiben  $R_K/2 = R_0 + \Delta R_T + \Delta R_H$ . Zunächst zum Einfluß von  $\Delta R_T$  auf den Meßpunkt  $I_c (H=0)$ . Die hierzu gemessene Kurve  $Y_1(I)$  für den Strom  $I \leq I'_c (H=0)$ \*\* zeigt eine lineare Abhängigkeit (hierbei ist  $R_0=0$ ). Bei Stromdurchgang  $I < I'_c$  wird die Temperatur im Kontakt  $T < T_{cx}$  sein, da unter Wärmeinfluß ein niedrigerer Stromwert  $I'_c$  gemessen worden wäre.

\* / , krit. Werte  $I_c > 3000$  A,  $H=0$

\*\* /  $I'_c$ : gemessener Quenchstrom

Dagegen ist für den Strombereich  $I \geq I_c'$  hier kein Kriterium dafür gegeben, daß  $T < T_{cx}$  bleibt. Es muß somit zumindest die Möglichkeit eines Wärmequenchs berücksichtigt werden, in dem Fall wäre  $I_c > I_c'$ . Beim Wärmequenche ist der Kontakt beim Strom  $I_c'$  gerade auf ein thermisches Niveau gebracht, das ausreicht, die gesamte Probe in den Zustand oberhalb der Sprungtemperatur zu bringen. Sehen wir weiter und wenden uns den Messungen im Feld zu, also  $Y_1(I)$  beim Strom  $I \leq I_c(H)$ . Hierbei soll die Bedingung gelten  $I_c(H) < I_c(H=0)$ , was nicht unbedingt bei allen Proben vorausgesetzt werden darf. Das bedeutet, mit steigendem Magnetfeld sinkt die Stromdichte in Probe und Kontakten ab. Wenn bis  $I_c'(H=0)$  die Temperatur der Kontakte  $T < T_{cx}$  ist, müßten bei niedriger Stromdichte die kritischen Punkte  $I_c(H)$  reell sein, sofern der Wert  $\Delta R_H$  niedrig genug bleibt. Ob dies der Fall ist, soll im weiteren untersucht werden. Dazu benötigen wir aus 5.2.2 den Magnetwiderstand, dessen höchster Wert  $\Delta R_H = 0,27 \mu\Omega$  ist. Aus den Ergebnissen von zwei Meßreihen im Nullfeld mit verschiedenem\* Kontaktwiderstand, die sich um den Betrag  $\Delta R_H$  unterscheiden, sind folgende Aussagen abzuleiten. Hierbei bezeichnet der Index die jeweilige Meßreihe. Der Kontaktwiderstand ist im ersten Fall  $(R_k/2)_{H=0} = 0,46 \mu\Omega$  und im zweiten  $(R_k/2)_{H=0} = 0,8 \mu\Omega$ . Es gilt also

$$(R_0 + \Delta R_{T/2}) \geq (R_0 + \Delta R_T + \Delta R_{H1}) > (R_0 + \Delta R_{T/1}) .$$

Mit dieser Messung erwiesen sich die Ströme  $I_c'$  beider Meßreihen im Nullfeld als identisch. Somit muß für die zweite Meßreihe mit  $(R_k/2)_{H=0} = 0,8 \mu\Omega$  die Kontakttemperatur  $T < T_{cx}$  sein und folglich wird  $\Delta R_H$  bei der ersten Meßreihe zu vernachlässigen sein, d.h. die kritischen Punkte der Meßreihe eins im Feld entsprechen reellen  $I_c, H$ -Werten. Dieses, weil die zusätzliche Aufheizleistung  $I^2 \Delta R_H$  den Wert  $I^2 (R_0 + \Delta R_T)$  nicht in dem Maße vergrößert, daß sich daraus eine Temperaturerhöhung  $T > T_{cx}$  ergibt. Der Kurvenpunkt  $I_c(H=0)$  wird durch Extrapolieren der Kurve erhalten.

Sofern Proben gleicher Sprungtemperatur ( $I(H)_{T=\text{const.}}$ ) wie die hier verwendete mit annähernd gleicher Stabilisierung gemessen werden, genügt, um reelle kritische Punkte zu

\*/ siehe Seite 18, 20/21



messen, den Widerstand  $(R_K/2)_{H=0}$  kleiner  $0,5\mu\Omega$  zu halten. Hierin ist sofort die einschränkende Anwendung dieser Methode zu erkennen, da in der Regel die Sprungtemperatur der zu untersuchenden Proben nicht genau bekannt ist. Dies bedeutet, daß von jeder Probe zwei Meßreihen oben beschriebener Art aufgenommen werden müssen, um eine eindeutige Aussage zu erhalten. Allerdings gibt diese Methode eine Handhabe, einen möglichen Wärmeeinfluß auf die  $I_c, H$ -Werte mit dem Kriterium der Sprungtemperatur der betreffenden Probe direkt festzustellen.

### 5.3 Messung der Kontakttemperatur

Hier nun soll die Belastbarkeit eines im Magnetfeld betriebenen Kontaktes mittels direkter Temperaturmessungen bestimmt werden. Gemeint ist dabei die Temperatur im Kontakt. Sie wird im folgenden mit  $T$  bezeichnet. Für diese Messungen schien eine Germaniumdiode<sup>\*</sup> ihrer großen Empfindlichkeit wegen am geeignetsten. Ihrer nachteiligen Feldabhängigkeit wegen, ließ sie sich erst nach Eichung mit einem Thermoelement verwenden. Dieses seinerseits wurde vorher mit einem Dampfdruckthermometer überprüft. Als Thermopaar wurde das Material Au/Fe, Cromel verwendet. Die bei diesen Messungen verwendete Probe erfüllte die Bedingung  $I_c, H > I, H$  und ihre Sprungtemperatur lag über  $10^\circ K$ . Der Querwiderstand war bei diesen Messungen vom Meßkreis getrennt. Es wurden zuerst an einem "thermisch erweiterten" Kontakt Messungen vorgenommen. Dabei konnten die Thermosonden geeicht als auch die Belastungskurve bestimmt werden. Am "normalen" Kontakt, wie er üblicherweise bei  $I_c, H$ -Messungen gegeben ist, wurden weitere Messungen vorgenommen.

#### 5.3.1 Eichung

Zum Zweck der Eichung wurde die Germaniumdiode und das Thermoelement in den zu untersuchenden Kontakt eingebaut. Zwischen Fuß- und Probenkontakt waren 10 Plättchen aus

\* Scientific Instruments Inc.,  
Lake Worth, Florida 33460,  
Germ. Resistance, Model No 2

Konstantan mit 0,1 mm Dicke aufeinandergelegt und geklemmt (Abb.3). In dem Kontakt konnte durch Veränderung des Stromes jede beliebige Temperatur eingestellt werden. Bei der weiteren Betrachtung wurde davon ausgegangen, daß die Wärme ausnahmslos ans Kupfer übergeht. Im Nullfeld und bei Stromwerten zwischen 0 und 600 A wurde jeweils ( $I(t) = \text{const.}$ ) an beiden Temperatursonden dieselbe Kontakttemperatur gemessen. Nachdem auf diese Weise die Übereinstimmung der beiden Sonden festgestellt worden war, wurde das Magnetfeld bis auf 52 kOe gesteigert. Während das Thermoelement unabhängig vom Feld die gleichen Temperaturwerte anzeigte, veränderten sich die Meßwerte der Germaniumdiode mit der Höhe der Feldstärke. Die so gewonnene feldstärkenabhängige Kennlinie der Germaniumdiode diente uns zur Messung der Temperaturen.

### 5.3.2 "thermisch erweiterter" Kontakt

Es soll hier die Belastungskurve eines Kontaktes unter zusätzlicher thermischer Belastung gezeigt werden. Wie weiter vorne zu ersehen, war bei voller Strom- und Feldbelastung der "normale" Kontakt immer noch im Temperaturzustand  $T < T_{cx}$ . Will man den strombelasteten Kontakt auf eine wesentlich höhere Temperatur bringen (größerer Bereich der Belastungskurve), werden Ströme nötig, die von der Apparatur nicht aufzubringen sind. Um mit geringeren Strömen eine Kontakttemperatur  $T \approx 10^\circ\text{K}$  zu bekommen, wurde daher der mit dem Konstantan geänderte Kontakt 5.3.1 übernommen. Der überwiegende Teil der im Konstantan erzeugten Wärme sollte einer Abschätzung nach sich auf annähernd das gesamte Kontaktvolumen verteilen. Das Verhalten eines solchen Kontaktes wird im folgenden beschrieben. Mit Strömen  $< 600$  A wurden bei  $R_k/2 = 82\mu\Omega = \text{const.}$  Temperaturen  $T \approx 10^\circ\text{K}$  erreicht. Das Magnetfeld war dabei  $H=0$ . Im stationären Zustand strömt die im Kontakt pro Zeiteinheit erzeugte ohm'sche Wärme durch die Grenzfläche ins Heliumbad. Der Temperaturgradient längs des Transportweges hängt dabei von der Größe des Wärmeflusses ab. Mit Vorgabe eines Stromes  $0 < I < 600$  A wurde die Differenz

der Temperatur von Kontaktmaterial und siedendem Helium gebildet. Mit dem Wert für  $I$  und dem Kontaktpotential wurden die Kurvenpunkte  $p(T = 4,2^\circ)$  gerechnet; hier ist  $p$  die Kontaktleistung auf die Flächeneinheit bezogen. In Abb.11 ist die Belastungskurve gezeigt. Die Temperaturabhängigkeit ist bis  $p \rightarrow 0,46 \text{ W/cm}^2$  linear. Ein bis zu dieser Belastungsgrenze gesteigerter Strom erwärmt den Kontakt auf  $T = 4,24^\circ \text{K}$ . Läßt man  $p > 0,46 \text{ W/cm}^2$  anwachsen, wird selbst bei geringer Leistungssteigerung die Temperaturzunahme einige Zehntel Grad betragen. Bei  $p \approx 1,1 \text{ W/cm}^2$  wurde die Temperatur im Kontakt bereits auf  $10^\circ \text{K}$  erhöht. Beim "normalen" Kontakt würde zum Erreichen dieser Temperatur ein Strom von  $5370 \text{ A}$  nötig sein. Dieses ergibt sich mit der oberen Grenze für  $R_k/2$  aus 5.2.3 und aus der Feststellung, daß der "thermisch erweiterte" Kontakt bis  $< 600 \text{ A}$  nicht stromabhängig ist.

### 5.3.3 "normaler" Kontakt

Wie verhält sich nun der "normale" Kontakt? Es wurde die bei  $I_c, H$ -Messungen übliche Kontaktierung zwischen Fuß- und Probenkontakt hergestellt. Das Magnetfeld wurde für das hier

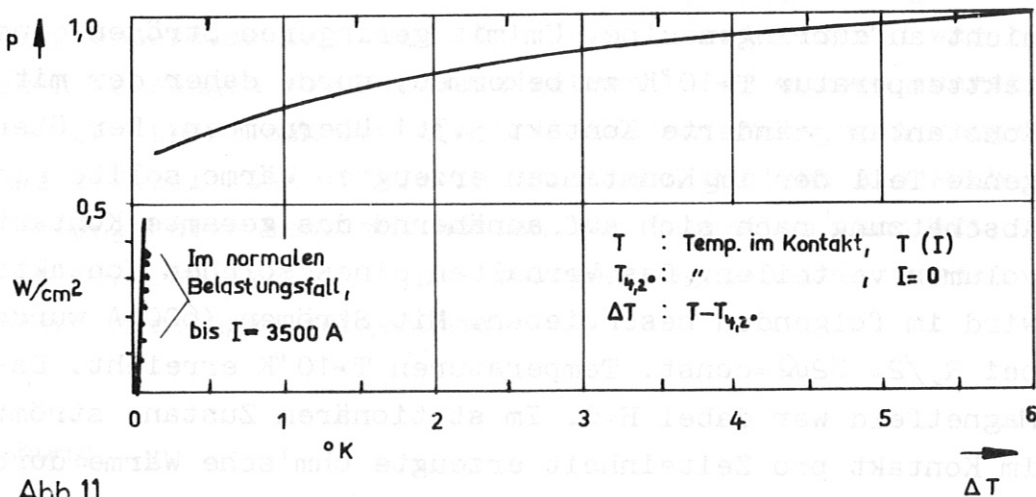


Abb.11

Belastungskurve eines Kontaktes.  $T - T_{4,2}^\circ$  in Abhängigkeit von der Kontaktleistung pro Flächeneinheit  $p$ .

ermittelte Temperaturverhalten auf den vollen Wert  $H = 52 \text{ kOe}$  eingestellt. Bis zu Strömen von  $3500 \text{ A}$  wurden die zugehörigen Temperaturen gemessen. Die aus den Messungen ermittelten Werte sind in Abb.11 eingetragen. Sie beschreiben mit einer geringen Streuung den linearen Teil der Belastungskurve bis  $p = 0,38 \text{ W/cm}^2$ . Mit Messungen von Kontaktpotential und Strom (gleiche Kontaktgeometrie!) wäre auch aus der Belastungskurve die Temperatur ablesbar. Nun wurde aber die Belastungskurve unter gewisser Idealisierung bestimmt. Um jeden Zweifel auszuschalten, wurde deshalb die Temperatur des "normalen" Kontaktes gesondert bestimmt.

Die Belastungskurve bzw. die bei  $I_c, H$ -Messungen an beliebigen Proben aufzunehmenden Kurven (Abb.9) geben eine hinreichende Aussage, ob die  $I_c, H$ -Werte reellen Quenchs entsprechen. Setzt man voraus, daß die Sprungtemperatur der zu messenden Proben über  $4,5^\circ\text{K}$  liegt, ist lediglich aus den Datenblättern der Kontaktwiderstand zu beachten. Er ist nach Gl.11 bzw. wenn  $U_{2-4} = U_{1-3}$  Gl.11a zu berechnen und muß dabei  $(R_k/2)_{H=0} \leq 0,5\mu\Omega$  betragen.



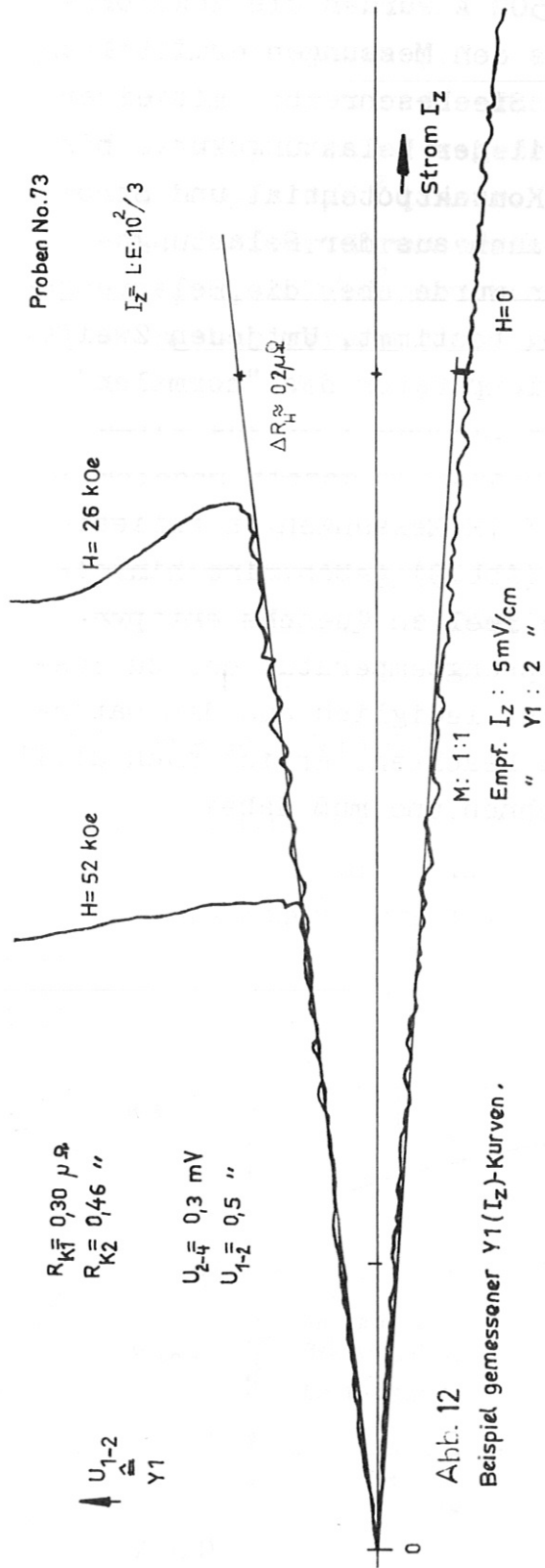


Abb. 12

Beispiel gemessener  $I_z(I_z)$ -Kurven.

Gerät : Nanovoltmeter, X,Y-Schreiber

Eingest. : Range 3 mV

Verst.-Ausg.: 3 mV  $\pm$  1V

\* s. Seite 13

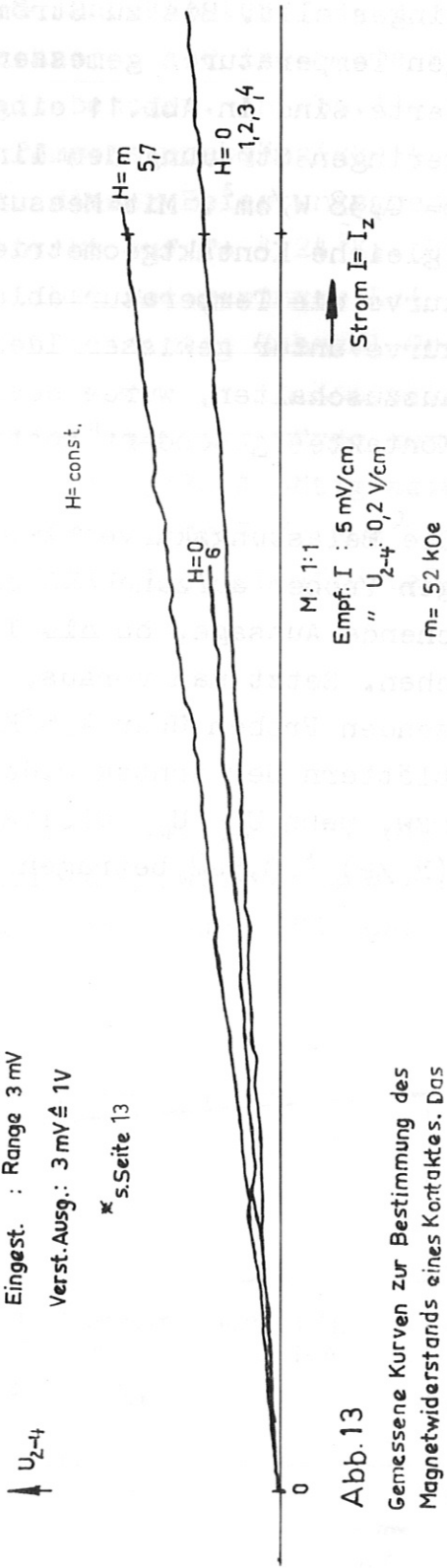
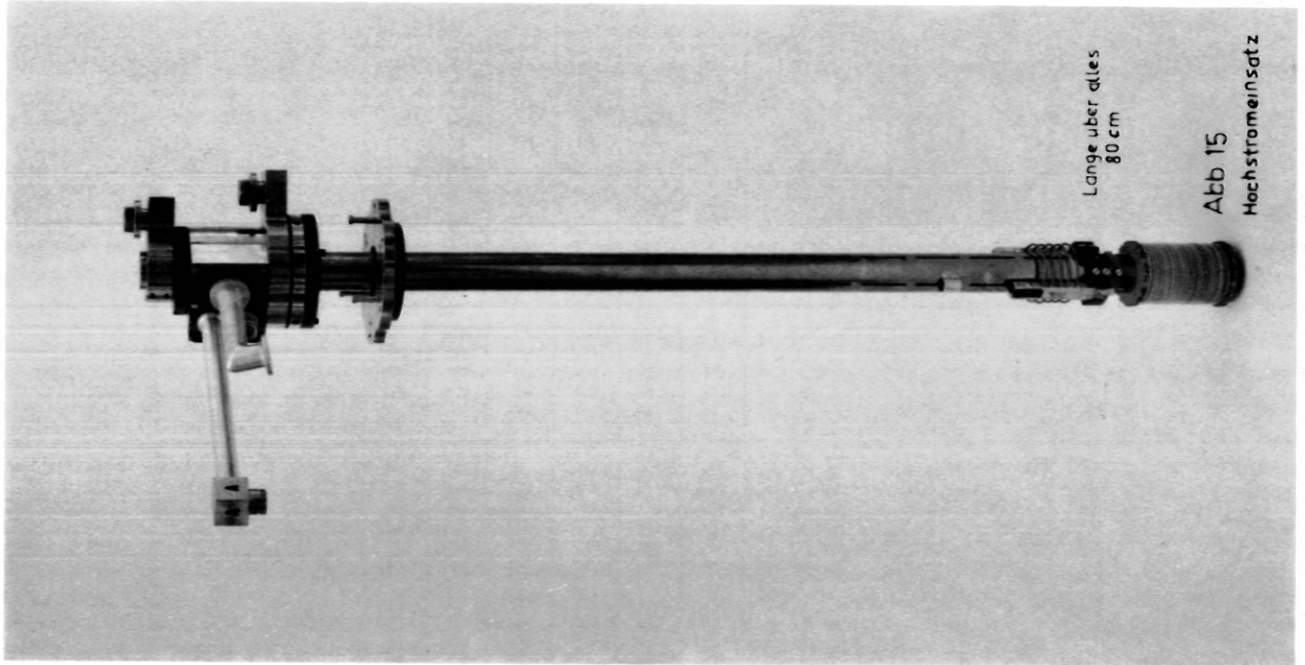


Abb. 13

Gemessene Kurven zur Bestimmung des Magnetwiderstands eines Kontaktes. Das Supraleiter- $I_c(H=m)$  war  $> 3500 \text{ A}$ .



Länge über alles  
80 cm

Abb. 15  
Hochstromensatz

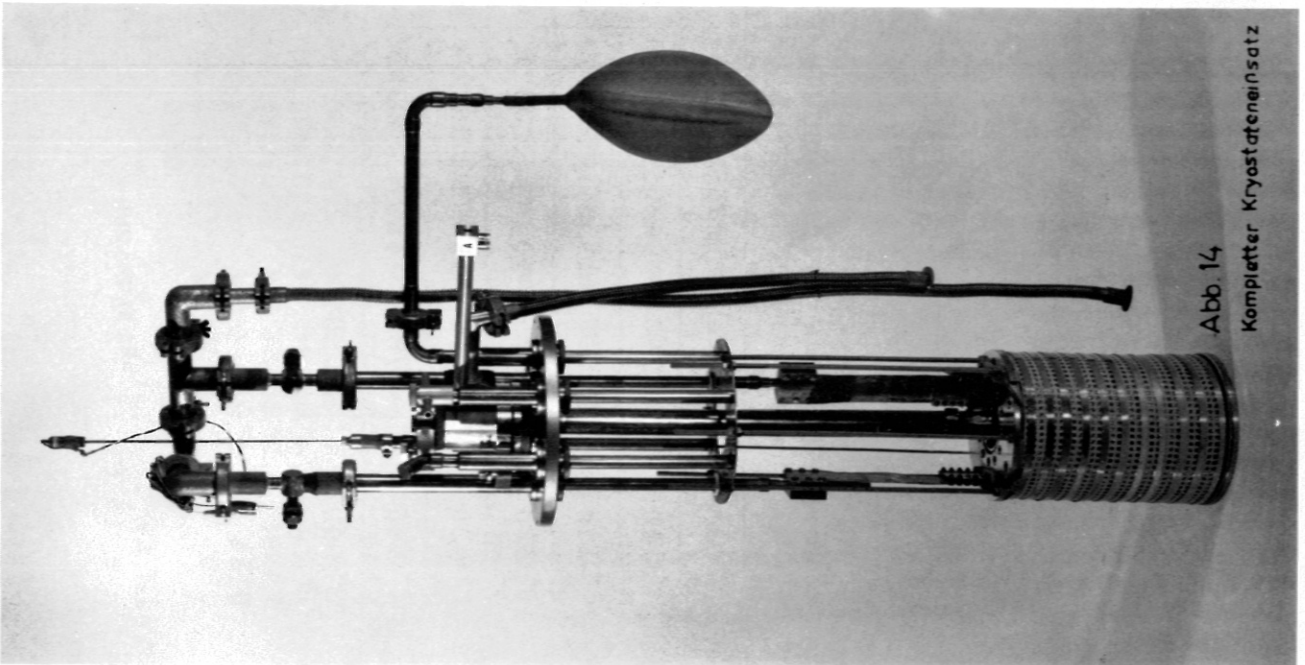


Abb. 14  
Kompletter Kryostatensatz

6. Tabellen

Strom $I_E$ [A]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	$H_0$ [Oe]	875	1715	2627	3503	4379	5255	6130	7006	7882
100	8758	9634	10510	11385	12261	13137	14013	14889	15765	16660
200	17516	18392	19268	20144	21020	21800	22771	23647	24523	25399
300	26275	27151	28026	28902	29778	30654	31530	32406	33281	34157
400	35033	35909	36785	37661	38536	39412	40288	41164	42040	42916
500	43792	44667	45543	46419	47295	48171	49047	49922	50798	51674
600	52550									

Tabelle 1

\* Feldstärke der Feldspule in  $R=Z=0$  abhängig vom Erregerstrom,  $H_0(I_E)$ .

\* SSp 50/240 NbTi

$\cdot 10^{-3}$  HZ IN KILOERSTED

Z	R IN CM	0.0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	
0.0	1.0000E	05	1.0002E	05	1.0009E	05	1.0021E	05
0.50	9.9953E	04	9.9976E	04	1.0005E	05	1.0032E	05
1.00	9.9812E	04	9.9836E	04	9.9908E	04	1.0019E	05
1.50	9.9573E	04	9.9598E	04	9.9674E	04	9.9792E	04
2.00	9.9232E	04	9.9259E	04	9.9340E	04	9.9658E	04
2.50	9.8782E	04	9.8811E	04	9.8899E	04	9.9243E	04
3.00	9.8214E	04	9.8246E	04	9.8343E	04	9.8720E	04
3.50	9.7516E	04	9.7552E	04	9.7659E	04	9.8079E	04
4.00	9.6674E	04	9.6714E	04	9.6835E	04	9.7306E	04
4.50	9.5670E	04	9.5716E	04	9.5852E	04	9.6386E	04
5.00	9.4483E	04	9.4535E	04	9.4690E	04	9.5298E	04
5.50	9.3086E	04	9.3146E	04	9.3324E	04	9.4021E	04
6.00	9.1451E	04	9.1519E	04	9.1723E	04	9.2524E	04
6.50	8.9541E	04	8.9619E	04	8.9853E	04	9.0776E	04
7.00	8.7317E	04	8.7406E	04	8.7674E	04	8.8735E	04
7.50	8.4735E	04	8.4836E	04	8.5140E	04	8.6354E	04
8.00	8.1747E	04	8.1860E	04	8.2200E	04	8.3576E	04
8.50	7.8309E	04	7.8431E	04	7.8802E	04	8.0334E	04
9.00	7.4384E	04	7.4510E	04	7.4897E	04	7.6550E	04
9.50	6.9960E	04	7.0080E	04	7.0452E	04	7.2129E	04
10.00	6.5067E	04	6.5164E	04	6.5471E	04	6.6970E	04

$$HZ(I_E) = 8,75 \cdot 10^{-4} \cdot H_{Z,R}^2 \cdot I_E$$

Tabella 2

Feldstärke der Feldspule,  $H_Z$ -Komponente,  
Bereich Z=10cm, R=2,5 cm,  $I_E = 114,76$  A.

\*) SSp 50/240 NbTi



R IN CM		$\cdot 10^{-3}$ HR IN KILOERSTED									
7 IN CM		0.0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.50	0.0	4.6730E 01	9.2829E 01	1.8749E 02	1.3758E 02	1.8040E 02	2.2051E 02	2.7924E 02	3.4414E 01	4.2374E 02	5.0190E 02
1.00	0.0	9.4414E 01	1.8749E 02	2.8601E 02	2.7792E 02	3.6424E 02	4.4530E 02	5.2512E 02	1.4400E 02	4.2374E 02	7.4351E 02
1.50	0.0	1.4400E 02	2.8601E 02	3.8999E 02	4.2374E 02	5.521E 02	6.7862E 02	7.5696E 02	1.9639E 02	5.7775E 02	9.7381E 02
2.00	0.0	1.9639E 02	3.8999E 02	5.0190E 02	5.7775E 02	7.5696E 02	9.2512E 02	1.1896E 03	2.5280E 02	7.4351E 02	1.4778E 03
2.50	0.0	2.5280E 02	5.0190E 02	6.2407E 02	7.4351E 02	9.2512E 02	1.1896E 03	1.4778E 03	3.1430E 02	9.2411E 02	1.2101E 03
3.00	0.0	3.1430E 02	6.2407E 02	7.5899E 02	9.2411E 02	1.2101E 03	1.4778E 03	1.7958E 03	3.8234E 02	1.1239E 03	1.4712E 03
3.50	0.0	3.8234E 02	7.5899E 02	9.0582E 02	1.1239E 03	1.4712E 03	1.7958E 03	2.1508E 03	4.5834E 02	1.3468E 03	1.7626E 03
4.00	0.0	4.5834E 02	9.0582E 02	1.0800E 03	1.5984E 03	2.0912E 03	2.5508E 03	3.0053E 03	5.4427E 02	1.5984E 03	2.0912E 03
4.50	0.0	5.4427E 02	1.0800E 03	1.2731E 03	1.8843E 03	2.4646E 03	3.0053E 03	3.5251E 03	6.4169E 02	1.8843E 03	2.4646E 03
5.00	0.0	6.4169E 02	1.2731E 03	1.4941E 03	2.2110E 03	2.8917E 03	3.5251E 03	4.1228E 03	7.5201E 02	2.2110E 03	2.8917E 03
5.50	0.0	7.5201E 02	1.4941E 03	1.7474E 03	2.5860E 03	3.3823E 03	4.1228E 03	4.8127E 03	8.8072E 02	2.5860E 03	3.3823E 03
6.00	0.0	8.8072E 02	1.7474E 03	2.0382E 03	3.0173E 03	3.9477E 03	4.8127E 03	5.6113E 03	1.0270E 03	3.0173E 03	3.9477E 03
6.50	0.0	1.0270E 03	2.0382E 03	2.3719E 03	3.5133E 03	4.5999E 03	5.6113E 03	6.5361E 03	1.1946E 03	3.5133E 03	4.5999E 03
7.00	0.0	1.1946E 03	2.3719E 03	2.7528E 03	4.0823E 03	5.3516E 03	6.5361E 03	7.6065E 03	1.3853E 03	4.0823E 03	5.3516E 03
7.50	0.0	1.3853E 03	2.7528E 03	3.1832E 03	4.7297E 03	6.2143E 03	7.6065E 03	8.8408E 03	1.6000E 03	4.7297E 03	6.2143E 03
8.00	0.0	1.6000E 03	3.1832E 03	3.6610E 03	5.4565E 03	7.1961E 03	8.8408E 03	1.0255E 04	1.8363E 03	5.4565E 03	7.1961E 03
8.50	0.0	1.8363E 03	3.6610E 03	4.1740E 03	6.2516E 03	8.2950E 03	1.0255E 04	1.1853E 04	2.0872E 03	6.2516E 03	8.2950E 03
9.00	0.0	2.0872E 03	4.1740E 03	4.6941E 03	7.0812E 03	9.4869E 03	1.1853E 04	1.3612E 04	2.3373E 03	7.0812E 03	9.4869E 03
9.50	0.0	2.3373E 03	4.6941E 03	5.1672E 03	7.8691E 03	1.0696E 04	1.3612E 04		2.5594E 03	7.8691E 03	1.0696E 04
10.00	0.0	2.5594E 03	5.1672E 03								

$$HR(I_E) = 8.75 \cdot 10^{-4} \cdot HR \cdot I_{zR}^E$$

Tabelle 3

Feldstärke der Feldspule\*, HR-Komponente,  
Bereich  $Z=10$  cm,  $R=2,5$  cm  $\cdot I_E^2 = 1141,76$  A.

\* SSp 50/240 Nbt<sub>2</sub>

$\cdot 10^{-3} H'$  IN KILOERSTED

Z IN CM	R IN CM	0.0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
0.0		1.0000E 05	1.0002E 05	1.0009E 05	1.0021E 05	1.0037E 05	1.0057E 05
0.50		9.9953E 04	9.9976E 04	1.0005E 05	1.0016E 05	1.0032E 05	1.0053E 05
1.00		9.9811E 04	9.9836E 04	9.9908E 04	1.0003E 05	1.0019E 05	1.0040E 05
1.50		9.9573E 04	9.9598E 04	9.9674E 04	9.9800E 04	9.9974E 04	1.0019E 05
2.00		9.9232E 04	9.9259E 04	9.9340E 04	9.9475E 04	9.9660E 04	9.9895E 04
2.50		9.8782E 04	9.8811E 04	9.8900E 04	9.9046E 04	9.9248E 04	9.9502E 04
3.00		9.8214E 04	9.8247E 04	9.8344E 04	9.8506E 04	9.8728E 04	9.9007E 04
3.50		9.7516E 04	9.7553E 04	9.7662E 04	9.7842E 04	9.8090E 04	9.8402E 04
4.00		9.6674E 04	9.6716E 04	9.6839E 04	9.7042E 04	9.7322E 04	9.7673E 04
4.50		9.5670E 04	9.5717E 04	9.5858E 04	9.6090E 04	9.6408E 04	9.6808E 04
5.00		9.4483E 04	9.4537E 04	9.4699E 04	9.4965E 04	9.5330E 04	9.5789E 04
5.50		9.3086E 04	9.3149E 04	9.3335E 04	9.3643E 04	9.4065E 04	9.4595E 04
6.00		9.1451E 04	9.1523E 04	9.1740E 04	9.2096E 04	9.2586E 04	9.3201E 04
6.50		8.9541E 04	8.9625E 04	8.9876E 04	9.0291E 04	9.0862E 04	9.1578E 04
7.00		8.7317E 04	8.7415E 04	8.7706E 04	8.8189E 04	8.8854E 04	8.9692E 04
7.50		8.4735E 04	8.4847E 04	8.5185E 04	8.5744E 04	8.6519E 04	8.7500E 04
8.00		8.1747E 04	8.1875E 04	8.2262E 04	8.2906E 04	8.3807E 04	8.4954E 04
8.50		7.8309E 04	7.8452E 04	7.8887E 04	7.9619E 04	8.0656E 04	8.1996E 04
9.00		7.4384E 04	7.4539E 04	7.5013E 04	7.5824E 04	7.6998E 04	7.8552E 04
9.50		6.9960E 04	7.0119E 04	7.0608E 04	7.1465E 04	7.2751E 04	7.4528E 04
10.00		6.5067E 04	6.5214E 04	6.5674E 04	6.6505E 04	6.7819E 04	6.9786E 04

Tabella 4

Feldstärke der Feldspule,  $H'$

Bereich  $Z=10\text{ cm}$ ,  $R=2,5\text{ cm}$ .

Strom  $I_E^* = 114,176 \text{ A}$ ,  $\frac{dH'}{dz}$

$$H(I_E) = 8,75 \cdot 10^{-4} \cdot H' \cdot I_E$$

\*) SSp 50/240 NbTi.

Literaturverzeichnis

- 1 "Optimierung von Stromzuleitungen für cryotechnische Anwendung"  
W. Amenda, B. Oswald (in Vorbereitung)
- 2 "Counterflow Current Leads for Cryogenic Applications"  
J.E.C. Williams  
Cryogenics, Dec. 1963, p. 234-238
- 3 "Investigation into High Current Leads in Liquid Helium Applications"  
V.E. Keilin and E. Yu. Klimenko  
Cryogenics, Aug. 1966, p. 222-228
- 4 "Berechnung des stationären Magnetfeldes kreiszylindrischer Spulen mit rechteckigem Wicklungsquerschnitt und gleichmäßiger Stromdichte"  
R. Pöhlchen  
IPP 4/23 April 1967 Anm.: Inzwischen umgeschrieben für Fortran IV der IBM 360/91
- 5 "Fundamentals of Ultrasonic Selding"  
Thomas, J.G., and D. Bancroft  
Research Report 59-105, AeroProjects, Inc., on ONR Contract No. AS-58-108-C, May 1959  
or  
N.A. Ol'shanskii, "On the Joing of Metals by Ultrasonic Welding", Avtomaticheskaya Svarka 12, p. 3 (1961)
- 6 "Joining Current Contacts to Superconducting Wire"  
R.M. Ralls, A.L. Donlevy, R.M. Rose, J. Wulff  
M.I.T., Internal Report
- 7 "Electric Contacts Handbook"  
Holm, R.  
Springer-Verlag 1958, p. 2

- 8 "Cryogenic Technology", Editor R.W.Vance,  
John Wiley-Sons, New York, 1963.  
Chapter 5, "Heat Transfer", J.A. Clark,  
p. 140 - 142

Ich danke Herrn B. Oswald für die Anregung zu dieser Arbeit,  
deren Durchsicht mit nützlichen Hinweisen sowie Herrn H. Bauer  
für seine Mitarbeit bei der Konstruktion und den Messungen.