

KfK 2811  
Mai 1979

# **Take-off- und Recovery-Strommessungen an bad- und zwangsgekühlten NbTi-Supraleitern**

T. Brodbeck, E. Seibt  
Institut für Technische Physik

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Technische Physik

KfK 2811

Take-off- und Recovery-Strommessungen an bad- und zwangsge-  
kühlten NbTi-Supraleitern

T. Brodbeck, E. Seibt

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

## Zusammenfassung

Magnetfeldabhängige Take-off- und Recovery-Strommessungen wurden an NbTi/Cu-Supraleiterproben mit unterschiedlichem Kupferanteil ( $\alpha$ ) zur Bestimmung ihres Stabilitätsverhaltens durchgeführt. Hierbei wurde ein besonderes Meßverfahren angewandt, bei dem der Supraleiter durch Transportstromerhöhung in die Normalleitung geführt wird. In Verbindung mit Messungen bei variierten Leiterlängen und gekühlter Leiteroberfläche konnte gezeigt werden, daß die auf diese Weise gemessenen Take-off- und Recovery-Ströme vom elektrischen Widerstand der Matrix, der Wärmeleitung längs des Leiters, dem maximalen Wärmeübergang zum Helium beim Blasensieden und dem Filmsiedeminimum bestimmt werden.

Für den bei diesen Messungen benutzten NbTi/Cu-Supraleiter beträgt der maximale Wärmeübergang beim Blasensieden  $0,68 \pm 0,04 \text{ W/cm}^2$  bei einer Temperaturdifferenz zwischen Leiteroberfläche und Heliumbad von  $\Delta T = 0,4 \text{ K}$ . Vergleichende Messungen bei Heliumbad- und Zwangskühlung ergaben, daß bei Zwangskühlung das Minimum der Wärmeflußdichte beim Filmsieden relativ stark reduziert wird.

## Abstract

"Take-off and Recovery Current Measurements of NbTi Superconductors in Helium Bath and Forced Flow Cooling."

Magnetic field dependent take-off and recovery current measurements of NbTi/Cu superconductor samples with different copper-to-superconductor ratios ( $\alpha$ ) were performed to determine their stability behavior. A special measuring method was used in which the superconductor was led to normal conduction by raising the transport current. In this way it was shown in measurements conducted on variable sample lengths and differently cooled sample surfaces that take-off and recovery currents depend on the electrical matrix resistance, the thermal conductivity along the conductor, the nucleate boiling heat flux and the film boiling minimum. For the NbTi/Cu superconductor used the maximum nucleate boiling heat flux was found to be  $0.68 \pm 0.04 \text{ W/cm}^2$  at a temperature difference of  $\Delta T = 0.4 \text{ K}$  between the conductor surface and the helium bath. Measurements performed in helium bath cooling compared with forced flow cooling showed the film boiling minimum to be reduced strongly by forced flow cooling.

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<i>Zusammenfassung/Abstract</i>	
1. <i>Einleitung</i>	1
2. <i>Experimentelles</i>	3
2.1 Meßanordnung	3
2.2 Proben	5
3. <i>Messungen</i>	6
3.1 Take-off- und Recoverystrom bei Heliumbadkühlung	6
3.2 Take-off- und Recoverystrom bei He-Zwangskühlung	7
3.3 Variation von Leiterlänge und Kühl- oberfläche	8
4. <i>Diskussion der Meßergebnisse</i>	9
4.1 Temperaturprofil der Leiterprobe	9
4.2 Einfluß der Kühloberfläche	10
4.3 Vergleich von Bad- und Zwangskühlung	11
5. <i>Schlußbemerkungen</i>	12
<i>Literaturhinweise</i>	14
<i>Tabellen</i>	15
<i>Abbildungen</i>	18

## 1. Einleitung

Supraleiter können durch Störungen (Temperatur-, Magnetfeldschwankungen, u.a.) normalleitend werden. Man stabilisiert den Supraleiter deshalb mit normalleitenden Metallen (hochreines Cu oder Al), die in Störfällen den Strom bzw. einen Teil davon übernehmen sollen. Stabilitätsuntersuchungen an technischen Supraleitern sind daher notwendig, um Materialdaten für die Auslegung geeigneter Supraleiter für den sicheren Betrieb von Großmagneten zu gewinnen. Charakteristische Meßgrößen für das Verhalten der Proben bei Transportstrombelastung im Magnetfeld  $B$  sind kritischer Strom ( $I_C$ ), Take-off-Strom ( $I_{to}$ ) und Recoverystrom ( $I_R$ ).  $I_C$  liefert nur Informationen über das Supraleitermaterial selbst.  $I_{to}$  und  $I_R$  werden dagegen von den Materialeigenschaften der Matrix, elektrischer Widerstand, Wärmeleitung, Oberflächenbeschaffenheit und dem Wärmeübergang zum Helium beeinflusst.

Fließt in einem stabilisierten Supraleiter der Transportstrom oder ein Teil davon in der normalleitenden Matrix, dann muß die dabei erzeugte Wärme an das Kühlmedium, meist Helium, abgeführt werden. Der Wärmefluß zum Helium hängt dabei von den Kühlbedingungen ab. Für den Fall der Badkühlung findet man experimentell bestimmte Wärmeübergangskurven [1, 2, 3], die in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Leiteroberfläche und Helium die abgeführte Leistung pro Flächeneinheit angeben. Im Bereich des Blasensiedens, d.h. bei kleinem  $\Delta T$ , steigt der Wärmeübergang stärker als linear mit der Temperaturdifferenz an. Die maximale Wärmestromdichte beim Blasensieden hängt wesentlich von der Orientierung und Beschaffenheit der Oberfläche ab und liegt für Kupfer zwischen  $0,5$  und  $0,9 \text{ W/cm}^2$  bei einer Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen  $0,2$  und  $0,8 \text{ K}$ . Wird dieser Punkt überschritten, dann erreicht  $\Delta T$  relativ große Werte. Diesen Bereich nennt man Filmsieden. Seine untere Grenze liegt bei etwa  $0,15 \text{ W/cm}^2$  bei  $\Delta T \sim 2 \text{ K}$ .

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Take-off- und Recoverystrommessungen an NbTi/Cu-Supraleiterproben durchgeführt. Das dabei angewandte Verfahren soll hier unter dem Aspekt des Stekly'schen Stabilitätskriteriums [4] näher untersucht werden. Dies besagt, daß im stationären Fall bei Vernachlässigung der Wärmeleitung längs des Leiters die Wärmeerzeugung im Stabilisierungsmaterial nicht größer sein darf als der Wärmeübergang zum Helium.

Wenn der Transportstrom den Take-off-Stromwert  $I_{to}$  erreicht, dann entspricht die Wärmeleistung des Leiters gerade dem maximalen Wärmeübergang zum Helium beim Blasensieden:

$$R_o I_{to} (I_{to} - I_{co}) = q_{to} \cdot P \cdot L$$

- mit
- $R_o$ : elektrischer Widerstand der Kupfermatrix bei Heliumbadtemperatur  $|\Omega|$ ,
  - $I_{to}$ : Take-off-Strom  $|A|$ ,
  - $I_{co}$ : linear auf Spannung Null extrapolierter kritischer Strom  $|A|$ ,
  - $q_{to}$ : maximale Wärmestromdichte beim Blasensieden  $|W/cm^2|$ ,
  - $P$ : gekühlter Leiterumfang  $|cm|$ ,
  - $L$ : Leiterlänge  $|cm|$ .

Bei einer weiteren Stromerhöhung und einer damit verbundenen Erhöhung der Wärmeleistung geht das Blasensieden des Heliums in Filmsieden über. Die Temperatur des Leiters springt schlagartig auf Werte, die weit über der kritischen Temperatur von NbTi liegen. Dadurch wird die Probe normalleitend, und der gesamte Strom fließt in der Matrix.

Reduziert man den Transportstrom, bis die Wärmeleistung der Matrix kleiner ist als die minimale Wärmeflußdichte beim Filmsieden, dann folgt sprunghaft der Übergang zum Blasensieden. Der damit verbundene Temperatursprung senkt die Proben temperatur unterhalb von  $T_c$ , und der supraleitende Teil der Probe kann wieder Strom übernehmen. Der entsprechende Transportstrom, bei dem dieser Vorgang erfolgt, wird als Recoverystrom  $I_R$  bezeichnet.

Häufig findet folgendes Verfahren bei experimentellen Stabilitätsuntersuchungen Anwendung [5, 6, 7]: Eine mit Strom belastete Supraleiterprobe wird durch pulsartige Temperaturerhöhung mittels einer Heizwicklung in die Normalleitung getrieben. Der größte Transportstrom, bei dem die Probe anschließend wieder in den supraleitenden Zustand zurückkehrt, wird hier als Recovery-Strom bezeichnet. Bei dieser Methode wird neben dem nur unsicher bestimmbareren Wärmeübergang (Wärmeableitung durch Isolationsmaterial) auch ein Teil der Leiteroberfläche von der Heizung abgedeckt und dadurch das Stabilitätsverhalten mit beeinflusst.

In dem hier angewendeten Verfahren wird der Supraleiter allein durch Erhöhung des Transportstromes in die Normalleitung getrieben. Die dazu aufzuwendende Leistung ist direkt meßbar (im Gegensatz zur oben beschriebenen Methode). Recovery tritt hier ein, wenn anschließend der Strom so weit abgesenkt wird, daß die Probe in den supraleitenden Zustand zurückkehrt. Diese Messungen sind relativ einfach durchzuführen, da der Zustand der Probe direkt beobachtet werden kann, und bieten außerdem den Vorteil, daß die Oberflächen der untersuchten Probe nicht beeinträchtigt werden. Ein wesentliches Ziel war mit, die NbTi 50/Cu-Leiterproben sowohl bei Heliumbad- als auch bei Zwangskühlung auf ihr Stabilitätsverhalten zu untersuchen und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

## 2. Experimentelles

### 2.1 Meßanordnung

Apparatur: An supraleitenden NbTi/Cu-Leiterproben mit unterschiedlichen Flächenverhältnissen  $\alpha = A_{\text{Cu}}/A_{\text{NbTi}}$  wurden kritischer Strom, Take-off-Strom und Recoverystrom magnetfeldabhängig und bei unterschiedlichen Kühlbedingungen gemessen.

Der schematische Aufbau der Meßapparatur ist in Abb. 1 dargestellt. In einem Heliumbadkryostat befindet sich ein supraleitender NbTi-Solenoidmagnet mit einem Maximalfeld von 7,5 T und einer kalten Bohrung von 50 mm.

Der für die jeweilige Messung entsprechend modifizierte Proben-träger ist mit einer maximal 2000 A-Tieftemperatur-Strom-zuführung ausgestattet. Ein 1500 A Netzgerät (Heinzinger) liefert den Transportstrom für die Proben. Die Steuerung dieses Netzgerätes erfolgt mit einem speziellen Funktionsgenerator [8].

Der Transportstrom wird über einen Shunt (2000 A/100 mV/0,5) mit einem Digitalvoltmeter (hp 2401 c) gemessen. Eine Nanomat-anlage (Burster g 208, Galvanometer mit Fotozellenverstärker,  $\pm 10^{-9}$  V) mißt die Proben-spannung. Transportstrom und Proben-spannung werden zur Aufzeichnung von U-I-Kurven in Abhängigkeit von B auf einen x-y-Schreiber gegeben.

Meßmethode: Die supraleitenden NbTi/Cu-Proben werden in Abhän-gigkeit vom transversalen Magnetfeld durch lineare Transport-stromerhöhung in den normaleitenden Zustand getrieben. Der Strom, bei dem sich die Proben-spannung sprunghaft erhöht, wird als Take-off-Strom  $I_{to}$  definiert. Abb. 2 zeigt ein Original-schreiberbild einer typischen U-I-Kurve. Ausgewertet wurde derjenige Strom, für den der Spannungssprung bei  $I_{to}$  gerade den halben Wert erreicht hat. Bei der anschließend linearen Abnah-me des Probenstromes definiert man den Recoverystrom  $I_R$  als den Wert, bei dem die Proben-spannung den Wechsel vom normal- in den supraleitenden Zustand bzw. Zwischenzustand anzeigt. Als kriti-scher Strom  $I_C$  wird derjenige Transportstrom I bezeichnet, bei dem an 1 cm Leiterlänge 0,5  $\mu$ V Spannung abfallen. Wie in mehre-ren Messungen nachgewiesen wurde, sind die  $I_{to}$ -,  $I_R$ - und  $I_C$ -Werte für Transportstrom-Änderungsgeschwindigkeiten  $\dot{I} < 500$  A/min geschwindigkeitsunabhängig. Daraufhin wählte man  $\dot{I} = 300$  A/min. Die Streuung der Strommeßwerte aus jeweils 5 Messungen ist klei-ner als  $\pm 5$  A. Die bei den Messungen vorkommenden Stromdefini-tionen sind in Tabelle 1 nochmals zusammengefaßt.

Zwangskühlung: Abb. 3 zeigt das Schema der Kryoanordnung. Schließt man die Kaltleitung KL 1, so baut sich im Kryostat, durch das Ab-dampfen des flüssigen Heliums, eine Druckdifferenz gegenüber der Abgasleitung auf. Der geringe Heliumgasfluß durch KL 2, der benö-tigt wird, um die Stromzuführung zu kühlen, beeinträchtigt diesen

Effekt nicht wesentlich. Dieser Überdruck drückt flüssiges Helium an der Probe vorbei in die Leitung KL 3. In einem Wärmetauscher wird das Helium auf Raumtemperatur erwärmt und anschließend mit einem Rotameter die Durchflußmenge bestimmt. Ein Thermoelement dient zur Temperaturüberwachung.

Der Druck in der Abgasleitung liegt typisch zwischen 740 und 760 Torr. Im Verlaufe einer Messung bewirkt das Einleiten des anfallenden Heliumgases eine Erhöhung auf maximal 790 Torr. Der im Kryostat maximal einstellbare Druck liegt bei etwa 850 Torr und ist durch die Einstellung der Sicherheitsventile begrenzt. Diese Druckdifferenz ermöglicht einen maximalen Massendurchsatz von 40 bis 50 Nm<sup>3</sup>/h. Über das Ventil der Leitung KL 1 wird der Druck im Kryostat und damit auch der gewünschte Heliummassendurchsatz durch den Kühlkanal des Probenträgers eingestellt.

Durch eine Testmessung wurde nachgewiesen, daß der überwiegende Teil des an der Probe vorbeiströmenden Heliums flüssig und nicht gasförmig ist: Sinkt der Flüssigkeitsspiegel des Heliums im Kryostat unterhalb der Eintrittsöffnung des Probenträger-Kühlkanals, so kann Heliumgas durch KL 3 entweichen. Bei gleicher Druckdifferenz zwischen Kryostat und Abgasleitung reduziert sich der mit dem Rotameter gemessene Massendurchsatz auf einen relativ kleinen Wert ( $< 2 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ).

## 2.2 Proben

Probenbeschreibung: Für das Experiment wurde ein kupferstabilisierter NbTi (50 Gew. % Ti)-Multifilamentsupraleiter der Firma VAKUUMSCHMELZE mit  $\alpha = A_{\text{Cu}}/A_{\text{SL}} = 5$ , 300 Filamenten und einer Querschnittsfläche von  $(2,45 \times 1,4) \text{ mm}^2$  verwendet. Für  $\alpha$ -abhängige Messungen wurde auf den Leiter zusätzliches Kupfer (Stabilisierungskupfer: BEBC-Leiter, CERN) mit Ultraschall aufgeschweißt ( $\alpha \approx 5$  bis 15) [8]. Diese Verbindungen haben sehr geringe Übergangswiderstände (bei 4,2 K:  $\lesssim 10^{-9} \Omega$ ) und ermöglichen problemloses Einlöten der Proben in den Probenträger. Abb. 4 zeigt verschiedene Querschliffbilder. Weitere Angaben zur Geometrie der Proben sind in Tab. 2 zusammengefaßt.

Probenträger für Heliumbadkühlung: Der in Abb. 5 gezeigte Probenträger ist für 1500 A ausgerüstet und ermöglicht Messungen in einem Magnet mit 50 mm Bohrungsdurchmesser. Die supraleitende Probe wird mit Indium U-förmig auf jeweils 50 mm Länge festgelötet. Die freie Probenlänge beträgt 30 mm bzw. die Meßlänge zwischen den Potentialabgriffen 20 mm. Der Transportstrom des Supraleiters fließt senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes. Der freie Teil der Probe ist allseitig von flüssigem Helium umgeben. Da sich die Kupferteile des Probenträgers selbst bei maximaler Strombelastung nur unwesentlich erwärmen ( $\Delta T \lesssim 0,01$  K), liegen die Enden der Probe immer auf Badtemperatur.

Für längere Proben ( $\geq 20$  cm) wurde ein zylindrischer Probenträger ( $\varnothing = 48$  mm) aus GFK-Material verwendet.

Probenträger für Zwangskühlung: Für die 2-Phasen-Heliumzwangskühlung wurde zusätzlich eine Abdeckung (V2A) gebaut, die, auf den Probenträger geschoben, zusammen mit diesem einen Kühlkanal (Querschnitt etwa  $1 \text{ cm}^2$ ) um die Probe bildet. Abb. 6 zeigt den Probenträger schematisch. Das Helium tritt durch die leicht aufgeweitete Öffnung ein, fließt an der Probe vorbei und wird zur Abgasleitung geleitet.

### 3. Messungen

#### 3.1 Take-off- und Recoverystrom bei Heliumbadkühlung

Mit der in Abschn. 2 beschriebenen Apparatur wurden im Heliumbad kritische Strom-, Take-off- und Recoverystrommessungen durchgeführt. In Abb. 7 sind die bei einer NbTi/Cu-Probe mit  $\alpha = 5$  gemessenen Ströme in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld aufgetragen. Abb. 8 zeigt die zugehörigen mit einem x-y-Schreiber aufgenommenen U-I-Kurven. Wie erwartet, verringert sich  $I_C$  monoton mit zunehmendem Magnetfeld. Da  $I_{t0}$  maßgeblich von  $I_C$  und dem magnetfeldabhängigen Matrixwiderstand beeinflusst und  $I_R$  neben dem Matrixwiderstand entscheidend von seiner feldabhängigen Wärmeleitfähigkeit bestimmt wird, nehmen auch diese Ströme mit dem Magnetfeld ab. So ist z. B.  $I_{t0}$  bei  $B = 3$  T um den Faktor 2 größer als

bei 7,5 T. An dem unterschiedlichen Abfall der  $I_c(B)$ -Kurve erkennt man, daß kritischer Strom, Wärmeleitung und Matrixwiderstand eine unterschiedliche Magnetfeldabhängigkeit haben.

Das Verhalten der Take-off- und Recoveryströme für NbTi/Cu-Proben mit unterschiedlichen  $\alpha$ -Werten ( $\alpha = A_{Cu}/A_{SL}$ ) ist in Abbildungen 9 und 10 in Abhängigkeit von B dargestellt. Die zugehörigen Ströme liegen mit zunehmendem  $\alpha$  bei höheren Werten, zeigen aber bezüglich der Änderung des äußeren Magnetfeldes alle qualitativ den gleichen Verlauf. Die Geometrie der Proben wurde im vorliegenden Fall so gewählt, daß bei größerem  $\alpha$  auch die gekühlte Oberfläche, der Matrixwiderstand und die Wärmeleitung längs des Leiters bezüglich des Stabilitätsverhaltens positiv beeinflußt werden. Dies macht sich in einer Erhöhung der Take-off- und Recoveryströme bemerkbar. In den Abb. 11 und 12 sind  $I_{to}$  und  $I_R$  in Abhängigkeit von  $\alpha$  für unterschiedliche Magnetfelder aufgetragen. Man erkennt, daß mit steigendem  $\alpha$  die Recoveryströme stärker anwachsen als die Take-off-Ströme. Da bei den untersuchten Proben die gekühlte Oberfläche nicht linear mit  $\alpha$  zunimmt, wird der nicht gleichförmige Anstieg der  $I_{to}(\alpha)$ -Kurve verständlich.

Reproduzierbarkeitsmessungen (d. h. Messungen an verschiedenen Proben mit gleichem  $\alpha$ ) ergeben Streuungen von  $\pm 2\%$  für  $I_{to}$  bzw.  $\pm 3\%$  für  $I_R$ . Die Streuung der  $I_R(\alpha)$ -Werte wird wesentlich vom Wärmeübergangswiderstand der Lötstelle mit beeinflußt.

### 3.2 Take-off- und Recoverystrom bei He-Zwangskühlung

An einer NbTi/Cu-Probe mit  $\alpha = 5$  wurden im Heliumbad und bei 2-Phasen-Heliumzwangskühlung Take-off- und Recoveryströme gemessen. Ohne Änderungen an der Probe und den Spannungsabgriffen vorzunehmen, wurde der Probenträger für Bad- und Zwangskühlung entsprechend modifiziert (s. Abschn. 2).

Abb. 13 zeigt  $I_{to}$  und  $I_R$  in Abhängigkeit vom Heliummassenfluß  $\phi$  durch den Kühlkanal (Querschnittsfläche  $\approx 1 \text{ cm}^2$ ) bei einem Druck zwischen 780 und 840 Torr. Für  $\phi > 0,25 \text{ g/sec}$  ( $\approx 5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) beginnt flüssiges Helium an der Probe vorbeizufließen und die Ströme steigen stark an. Der Take-off-Strom geht bei einem Massenfluß von

etwa 1,5 g/sec ( $30 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) in die Sättigung. Der Recoverystrom scheint mit zunehmendem  $\phi$  noch langsam anzusteigen. Im Verlaufe der Messung konnte man starke Druck- und Massenflußoszillationen beobachten ( $\Delta p = 10 \text{ Torr}$ ). Der Heliumdurchsatz war deshalb nur auf  $\pm 0,25 \text{ g/sec}$  ( $\hat{=} \pm 5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) genau einstellbar. Maximal wurden Durchflußmengen von  $2,5 \text{ g/sec}$  ( $\hat{=} 50 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) erreicht.

In Abb. 14 sind  $I_{\text{to}}$  und  $I_{\text{R}}$  bei Zwangskühlung ( $\phi = 1,75 \text{ g/sec}$ ; Kanalquerschnitt  $\approx 1 \text{ cm}^2$ ) und Badkühlung in Abhängigkeit vom Magnetfeld aufgetragen. Man sieht, daß im Falle der Zwangskühlung die Take-off-Ströme nur wenig, die Recoverystrome aber wesentlich größer sind (z. B. 25 % für  $B = 7 \text{ T}$ ) als die vergleichbaren Ströme bei Badkühlung. Da kein weiterer Parameter der Meßanordnung geändert wurde, ist die Erhöhung des Recoverystromes nur durch den Abbau des Filmsiedeminimums zu erklären.

### 3.3 Variation von Leiterlänge und Kühloberfläche

Variation der Leiterlänge: Durch Variation der Probenlänge soll der Einfluß der Wärmeleitung auf das Take-off- und Recoveryverhalten experimentell überprüft werden. NbTi/Cu-Proben ( $\alpha = 5$ ) können wegen der Wärmeleitung längs des Leiters stabil normalleitend bei kurzen Leiterlängen (freie Probenlängen ca. 30 mm) betrieben werden.

An NbTi/Cu-Proben ( $\alpha = 5$ ) mit freien Längen von 55 mm (L55) sowie 210 mm (L210) wurden  $I_{\text{to}}$  und  $I_{\text{R}}$  im Heliumbad gemessen. Die Ergebnisse wurden mit denen von 30 mm langen Proben (L30) verglichen. In Abb. 15 ist eine Originalschreiberaufnahme für einen 210 mm langen NbTi/Cu-Leiter mit  $\alpha = 5$  in einem Magnetfeld von  $B = 7,5 \text{ T}$  dargestellt. An dem nichtlinearen U-I-Zusammenhang im Bereich der Normalleitung erkennt man deutlich (im Gegensatz zu Abb. 2) den Einfluß der Temperaturabhängigkeit des Matrixwiderstandes.

Zusammenfassend zeigt Tab. 3, daß die Take-off-Ströme weniger stark von der Vergrößerung der freien Probenlänge und der dadurch verminderten Wärmeleitung reduziert werden als die Recoverystrome. So ist z. B. zwischen L30 und L55 bezüglich  $I_{\text{to}}$  innerhalb der Meßgenauigkeit keine Änderung festzustellen,  $I_{\text{R}}$  hingegen liegt

für L55 bei etwa 20 % kleineren Werten. Bei freien Längen von 210 mm (L210) kann der Leiter in Magnetfeldern  $B \leq 7$  T nicht mehr stabil normalleitend mit  $I_{to}$  betrieben werden.

Reduktion der Kühloberfläche: Hierzu wurden die  $I_{to}$ - und  $I_R$ -Messungen im Heliumbad bei einer freien Probenlänge von 30 mm durchgeführt. Zur Reduktion der kühlbaren Leiteroberfläche wurde der Leiter mit einem GFK-Plättchen abgedeckt (ca. 30 %). In Tab. 4 sind die ermittelten Take-off- und Recoveryströme für NbTi/Cu-Leiter mit reduzierter Kühloberfläche (red) im Vergleich zu vollständig gekühlten Proben (voll) eingetragen.

Bei reduzierter Kühloberfläche nimmt  $I_{to}$  deutlich ab (im Mittel um 15 %). Für  $I_R$  ist der Effekt sehr gering (1 - 2 %). Diese Messungen bestätigen, daß unterhalb des Take-off-Punktes die Kühlung des Leiters hauptsächlich durch den Wärmeübergang an das Helium erfolgt, beim Recovery jedoch mit durch Wärmeleitung längs der Leiterprobe. Die in Tab. 4 angegebenen Fehler beziehen sich auf die Abweichung zweier an verschiedenen Proben durchgeführten Messungen. Der relativ größere Fehler bei den Messungen mit reduzierter Kühloberfläche ist mit bedingt durch die Wärmeleitung des GFK-Abdeckmaterials.

#### 4. Diskussion der Meßergebnisse

##### 4.1 Temperaturprofil der Leiterprobe

Das Temperaturprofil über der NbTi/Cu-Leiterprobe wurde nach der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung:

$$\frac{A_M}{P} \frac{d}{dx} \left( K(T) \frac{dT}{dx} \right) = q(T) - g(T),$$

$A_M$  : Querschnittsfläche der Matrix,

$P$  : gekühlter Leiterumfang,

$K$  : Wärmeleitung,

$T$  : Temperatur der Leiterprobe,

$q$  : Wärmeübergangsstromdichte zum Heliumbad,

$g$  : Wärmeerzeugung,

$x$  : Ortsvariable,

mit ermittelten temperaturabhängigen Materialparametern bestimmt. Dazu benutzte man ein für stationäre Verhältnisse modifiziertes Rechenprogramm zur Vorhersage des Stabilitätsverhaltens eines Supraleiters von Nick [9]. Mit diesem Programm kann das Temperaturprofil des Leiters in dem Zustand kurz vor dem Take-off berechnet werden. Als Eingabedaten wurden folgende Größen benutzt:

1. Take-off-Strom,
2. Materialparameter,
3. Wärmeübergangscharakteristik.

In Tab. 5 sind die in das Programm eingesetzten Daten zusammengestellt, um das Temperaturprofil der NbTi/Cu-Probe ( $\alpha = 5$ ) bei einem Magnetfeld von  $B = 3$  T kurz vor dem Take-off-Punkt zu berechnen. Dabei wurde eine quadratische Abhängigkeit der Wärmestromdichte von der Temperaturdifferenz angenommen. Maximale Wärmestromdichte beim Blasensieden  $q_{to}$  und zugehörige Temperaturdifferenz  $\Delta T$  werden variiert, bis das Temperaturprofil des Leiters (Länge  $L$ ) folgende Randbedingungen erfüllt:

1. Leiterenden ( $x = L/2$ ) liegen auf He-Badtemperatur,
2.  $\Delta T$  stimmt mit der Temperaturerhöhung in der Leitermitte ( $x = 0$ ) überein [8].

Das gefundene Temperaturprofil ist in Abb. 16 dargestellt. Dieses Profil wurde auch zur Berechnung der maximalen Wärmestromdichte beim He-Blasensieden benutzt und lieferte einen Wert von  $(q_{to})_{theor.} = 0,7 \text{ W/cm}^2$ .

#### 4.2 Einfluß der Kühloberfläche

Die Wärmeerzeugung der Probe pro Längeneinheit wurde aus Strom- und Spannungsdaten am Take-off-Punkt berechnet. Abzüglich der Wärmeleitung längs des Leiters entspricht diese Leistung dem Wärmefluß zum Helium beim Blasensieden. Für Proben mit unterschiedlichem  $\alpha$  sind diese Werte in Abhängigkeit ihrer gekühlten Oberfläche in Abb. 17 aufgetragen. Aus der Steigung der Geraden erhält man über dem Leiter zwischen den Spannungsabgriffen (s. Temperaturprofil in Abb. 16) den integralen Wärmefluß von  $q = (0,55 \pm 0,03) \text{ W/cm}^2$ .

Mit der Annahme, daß die Wärmestromdichte quadratisch mit der Temperaturdifferenz zwischen Leiteroberfläche und Helium ansteigt, kann man aus  $q$  die maximale Wärmestromdichte beim Blasensieden zu  $q_{to} = (0,68 \pm 0,04) \text{ W/cm}^2$  berechnen. Ein Vergleich mit dem über das Rechenprogramm ermittelten Wert  $(q_{to})_{\text{theor}}$  zeigt die Konsistenz der Ergebnisse.

#### 4.3 Vergleich von Bad- und Zwangskühlung

Messungen bei He-Zwangskühlung zeigen, daß die Recoveryströme deutlich größer sind (25 %) als bei Badkühlung. Als Ursache wird ein Abbau des Filmsiedeminimums vermutet [10]. Die Überlegung hierzu ist folgende: Benutzt man für die Messung die gleichen Supraleiterproben, dann sind auch kritischer Strom, Matrixwiderstand, gekühlte Oberfläche und Wärmeleitung gleich, und die Erhöhung des Recoverystromes kann nur durch eine Änderung in der Wärmeübergangscharakteristik erklärt werden.

Für eine quantitative Abschätzung werden folgende Voraussetzungen angenommen:

1. Die minimale Filmsiede-Wärmeflußdichte ist  $q_{F_{\text{min}}} = 0,15 \text{ W/cm}^2$ . Die restliche im Leiter erzeugte Wärme soll durch Wärmeleitung abgeführt werden.
2. Im normalleitenden Zustand kurz vor dem Recovery hat der Leiter bei Bad- und Zwangskühlung das gleiche Temperaturprofil (d. h. im normalleitenden Zustand ist die Wärmeleitung dominierend).

Für den im Heliumbad gekühlten Leiter wurde unter diesen Voraussetzungen am Recoverypunkt die durch Wärmeleitung abgeführte Leistung aus der Differenz zwischen ohmscher Leistung und Wärmefluß im Filmsiedeminimum berechnet. Nach Voraussetzung 2 ist diese identisch mit der bei Zwangskühlung. Damit erhält man für das Minimum der Wärmeflußdichte beim Filmsieden  $q_F = 0,44 \text{ W/cm}^2$ . In Abb. 13 zeigt der Recoverystrom die Tendenz, bei noch größerem Heliummassenfluß weiter anzusteigen. Man kann deshalb annehmen, daß bei genügend großem Helium-Massendurchsatz das Filmsiedeminimum völlig abgebaut wird.

## 5. Schlußbemerkungen

Die an NbTi/Cu-Leiterproben durchgeführten Untersuchungen bezüglich des Take-off- bzw. Recoverystromverhaltens durch Transportstromerhöhung bis zum Normalübergang lieferten detaillierte Aussagen über Matrix- und Stabilitätseigenschaften. Es zeigte sich, daß der Take-off-Strom  $I_{to}$  in besonderen Maße vom Matrixwiderstand und vom maximalen Wärmeübergang beim Blasensieden abhängig ist. Dagegen wird der Recoverystrom  $I_R$  neben Wärmeleitung und Matrixwiderstand mehr durch die Wärmeübergangsverhältnisse beim Filmsieden des Heliums bestimmt. Im einzelnen ergaben sich folgende wesentliche Ergebnisse:

1. Take-off- und Recoverystrome erhöhen sich monoton mit zunehmendem Matrixflächenanteil.  $I_R$  steigt dabei um einen Faktor 2 schneller an (im Mittel etwa 17 %) als  $I_{to}$ , wenn der  $\alpha$ -Wert um 1 erhöht wird.
  2. Für die untersuchten NbTi/Cu-Leiterproben wurden folgende Wärmestromdichten ermittelt:
    - maximale Wärmestromdichte beim He-Blasensieden:  $(0,68 \pm 0,04) \text{ W/cm}^2$  bei einer Temperaturdifferenz von 0,4 K,
    - minimale Wärmestromdichte beim He-Filmsieden:  $0,44 \text{ W/cm}^2$ ,
    - integrale Wärmestromdichte über freier Leiterprobe ( $l = 2 \text{ cm}$ ):  $(0,55 \pm 0,03) \text{ W/cm}^2$ .
  3. Ein Vergleich von Heliumbad- und Zwangskühlung zeigt, daß insbesondere nur die Recoverystrome einen deutlichen Effekt zeigen.  $I_R$  liegt dabei gegenüber Badkühlung um etwa 25 % höher.
  4. Eine Reduktion der Kühloberfläche von Leiterproben wirkt sich relativ stark auf Take-off-Ströme aus, jedoch nur gering auf das Recovery-Verhalten.
-

Für die Herstellung der Schliffbilder danken wir Frau U. Hofmann, Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF II, KfK). Für Arbeiten am Ultraschallschweißgerät sowie für Unterstützung bei der experimentellen Ausstattung danken wir Herrn J. Reiner und der Elektronischen Werkstatt des Instituts für Technische Physik (ITP, KfK) unter Leitung von Herrn J. Bröckl. Unser besonderer Dank gilt Herrn A. Heneka, der beim Aufbau der Apparatur und bei der Durchführung der Messungen mitbeteiligt war.

Literaturhinweise

- |1| R.V. Smith, Cryogen. 9 (1969) 11.
- |2| J. Iwasa, B.A. Apgar, Cryogen. 18 (1978) 267.
- |3| V. Arpetal, NBS Report 10703, NBS Boulder, (1971).
- |4| Z.J.J. Stekly, J.L. Zar, IEEE Trans. Nucl. Science NS-12 (1965) 367.
- |5| M.N. Wilson, J. Iwasa, Cryogen. 18 (1978) 17.
- |6| W. Nick, H. Krauth, G. Ries, IEEE Transact. Magn. MAG-15 (1979) 359.
- |7| J.R. Miller, J.W. Lue, L. Dresner, IEEE Transact. Magn. MAG-13 (1977) 24.
- |8| T. Brodbeck, Diplomarbeit: Take-off- und Recoverystrommessungen an technischen NbTi-Supraleitern zur Bestimmung von Stabilitätseigenschaften bei Heliumbad- und Zwangskühlung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technische Physik (1978).
- |9| W. Nick, Diplomarbeit: Kryogene Stabilität badgekühlter Supraleiter, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technische Physik (1978).
- |10| S.G. Sydoriak, IEEE Transact. Magn. MAG-13 (1977) 682.

## Tabellen

Tab. 1: Stromdefinitionen

$I_{to}$ : Als Take-off-Strom  $I_{to}$  wird derjenige Transportstrom bezeichnet, bei dem ein sprunghafter Spannungsanstieg in der U-I-Charakteristik den Übergang der supraleitenden Probe in die Normalleitung anzeigt (s. Abb. 2). Ausgewertet wurde bei halbem Spannungssprung.

$I_{to}$  ist ein Maß für den elektrischen Matrixwiderstand sowie den maximalen Wärmeübergang beim Blasensieden.

$I_R$ : Als Recovery-Strom  $I_R$  wird hier der Transportstrom bezeichnet, bei dem die Probe vom normalleitenden Zustand in den supraleitenden bzw. Zwischenzustand zurückkehrt.

Neben der Wärmeleitung wird  $I_R$  auch vom Minimum der Wärmeflußdichte beim Filmsieden mitbestimmt.

$I_c$ : Als kritischer Strom wird derjenige Transportstrom durch die Probe definiert, bei dem pro cm Leiterlänge 0,5  $\mu$ V Spannung abfällt:  $I_c$  (0,5  $\mu$ V/cm).

Durch Messen dieses Stromes kann man mit überprüfen, ob die Supraleitereigenschaften der NbTi-Proben durch äußere Einflüsse (wie Kontaktierung, Aufbringung von weiterem Stabilisierungsmaterial) verändert wurden.

$I_{co}$ : Der aus dem Spannungsanstieg im Übergangszustand linear auf die Spannung Null extrapolierte kritische Stromwert wird hier  $I_{co}$  genannt.

$I_{co}$  wurde für Stabilitätsberechnungen verwendet.

Tab. 2: Geometrie der Supraleiterproben

$\alpha$	$A_{\text{ges}} \text{  mm}^2 \text{  }$	$A_M \text{  mm}^2 \text{  }$	$P \text{  mm }$
5,0 $\pm$ 0,1	3,43 $\pm$ 0,03	2,86 $\pm$ 0,03	7,7 $\pm$ 0,1
7,3 $\pm$ 0,3	4,75 $\pm$ 0,13	4,18 $\pm$ 0,16	8,8 $\pm$ 0,2
8,5 $\pm$ 0,3	5,43 $\pm$ 0,17	4,86 $\pm$ 0,20	9,4 $\pm$ 0,2
10,4 $\pm$ 0,3	6,50 $\pm$ 0,18	5,93 $\pm$ 0,21	10,2 $\pm$ 0,2
11,5 $\pm$ 0,3	7,14 $\pm$ 0,19	6,57 $\pm$ 0,22	10,8 $\pm$ 0,2
13,2 $\pm$ 0,4	8,13 $\pm$ 0,21	7,55 $\pm$ 0,24	11,5 $\pm$ 0,2
15,1 $\pm$ 0,6	9,19 $\pm$ 0,30	8,62 $\pm$ 0,33	12,3 $\pm$ 0,3

mit  $\alpha$ :  $A_M/A_{SL}$   
 $A_{\text{ges}}$ : Probenquerschnittsfläche  
 $A_M$ : Matrixquerschnittsfläche (Cu)  
 $A_{SL}$ : Supraleiterquerschnittsfläche  
 $P$ : gekühlter Leiterumfang

Tab. 3: Take-off- ( $I_{to}$ ) und Recoverystrome ( $I_R$ ) für unterschiedliche freie Probenlängen in Abhängigkeit vom Magnetfeld B.

B  T	$I_{to} \text{  A }$			$I_R \text{  A }$		
	L30	L55	L210	L30	L55	L210
5	1101 $\pm$ 22	1112 $\pm$ 22	963 $\pm$ 19	722 $\pm$ 22	570 $\pm$ 17	-
6	947 $\pm$ 19	947 $\pm$ 19	822 $\pm$ 16	610 $\pm$ 18	504 $\pm$ 15	-
7	825 $\pm$ 17	802 $\pm$ 16	680 $\pm$ 14	535 $\pm$ 16	446 $\pm$ 13	-
7,5	773 $\pm$ 15	743 $\pm$ 15	610 $\pm$ 12	507 $\pm$ 15	431 $\pm$ 13	319 $\pm$ 10

Tab. 4:  $I_{to}$  und  $I_R$  bei variiert gekühlter Leiteroberfläche;  
Reduktion der Leiteroberfläche ca. 30 % (red).

B T	$I_{to}$  A		$I_R$  A	
	voll	red	voll	red
4	1276 <sub>+25</sub>	1109 <sub>+32</sub>	870 <sub>+17</sub>	860 <sub>+20</sub>
5	1091 <sub>+22</sub>	933 <sub>+29</sub>	723 <sub>+15</sub>	717 <sub>+24</sub>
6	939 <sub>+19</sub>	790 <sub>+31</sub>	617 <sub>+12</sub>	613 <sub>+23</sub>
7	818 <sub>+16</sub>	669 <sub>+35</sub>	545 <sub>+11</sub>	537 <sub>+18</sub>
7,5	767 <sub>+15</sub>	612 <sub>+33</sub>	517 <sub>+10</sub>	506 <sub>+20</sub>

Tab. 5: Daten zur Berechnung des Temperaturprofils einer  
NbTi/Cu-Leiterprobe ( $\alpha=5$ ) am Take-off-Punkt bei B=3T

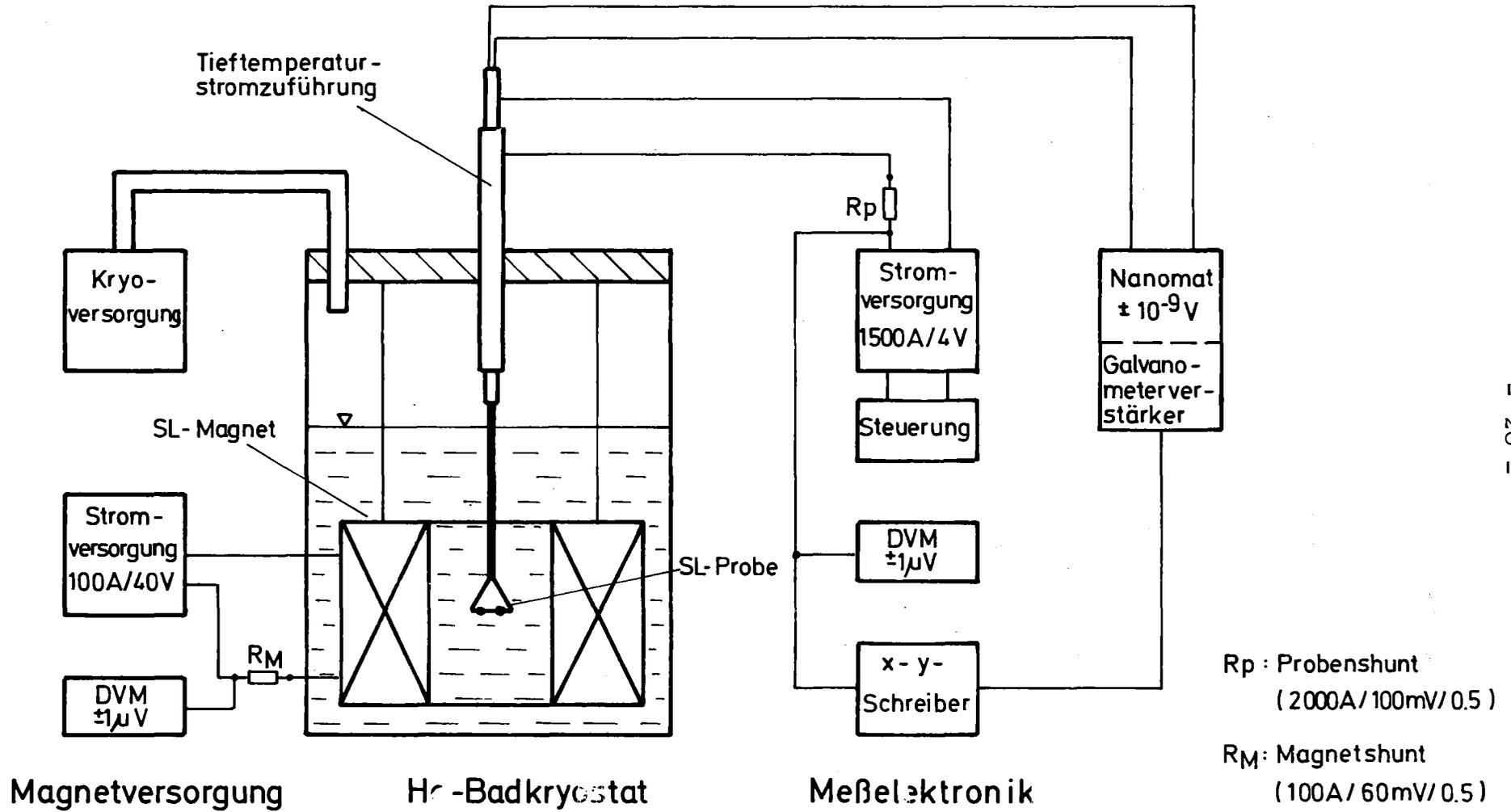
Querschnittsfläche des Leiters	0,034 cm <sup>2</sup>
Gekühlter Leiterumfang	0,77 cm
$\alpha$ = Cu/SL-Querschnittsverhältnis	5,0
Stromstärke (am Take-off)	1508 A
Kritische Stromdichte ( $I_{co}/A_{SL}$ ) für T = 4,2 K	2,007 · 10 <sup>5</sup> A/cm <sup>2</sup>
Kritische Temperatur	7,8 K
Spez. elektr. Widerstand	2,11 · 10 <sup>-8</sup> Ωcm
Spez. Wärmeleitfähigkeit	4,55 W/cm·K

Anm.: Wärmeübergangsdaten wurden fiktiv eingesetzt.

Abbildungen

- Abb. 1: Schematische Darstellung der Meßapparatur für kritische Strom-, Take-off- und Recoverystrommessungen.
- Abb. 2: Originalschreiberbild für den U-I-Zusammenhang des NbTi/Cu-Supraleiterprobe für  $B = 5 \text{ T}$  und  $T = 4,2 \text{ K}$ .
- Abb. 3: Schema der Kryoanordnung für Heliumzwangskühlung.
- Abb. 4: Querschliffbilder von NbTi 50/Cu-Supraleiterproben mit ultraschall-aufgeschweißtem Kupfer ( $\alpha$ -Variation).
- Abb. 5: Probenträger (schemat.) für Take-off- und Recoverystrommessungen bei Heliumbadkühlung.
- Abb. 6: Probenträger (schemat.) für Messungen bei Heliumzwangskühlung. VA-Abdeckung bildet um den Leiter einen Kühlkanal von etwa  $1 \text{ cm}^2$  Querschnitt.
- Abb. 7: Kritischer Strom ( $I_c$ ), Take-off- ( $I_{to}$ ) und Recoverystrom ( $I_R$ ) eines NbTi/Cu-Supraleiters mit  $\alpha = 5$  in Abhängigkeit vom transversalen Magnetfeld.  $I_c$ -Definition:  $0,5 \text{ } \mu\text{V/cm}$ .
- Abb. 8: U-I-Kurven eines NbTi/Cu-Leiters mit  $\alpha = 5$  für B-Felder zwischen 3 und  $7,5 \text{ T}$ .
- Abb. 9: Verhalten des Take-off-Stromes  $I_{to}$  in Abhängigkeit vom Magnetfeld B für NbTi/Cu-Leiterproben mit unterschiedlichem Cu-Flächenanteil  $\alpha$ .
- Abb. 10: Recoverystrom  $I_R$  in Abhängigkeit vom Magnetfeld B für NbTi/Cu-Leiterproben mit unterschiedlichem Cu-Flächenanteil  $\alpha$ .
- Abb. 11: Abhängigkeit des Take-off-Stromes  $I_{to}$  von  $\alpha$  für verschiedene Magnetfelder.

- Abb. 12: Abhängigkeit des Recoverystromes  $I_R$  von  $\alpha$  für verschiedene Magnetfelder.
- Abb. 13: Take-off- und Recoverystrome in Abhängigkeit vom Heliummassenfluß  $\Phi$  bei Zwangskühlung (Kanalquerschnitt  $\approx 1 \text{ cm}^2$ ) für  $B = 4$  und  $7 \text{ T}$ .
- Abb. 14: Vergleich von Heliumbad- und Zwangskühlung ( $\Phi = 1,75 \pm 0,25 \text{ g/sec}$ ) für Take-off- und Recoverystrome eines NbTi/Cu-Leiters mit  $\alpha = 5$ .
- Abb. 15: U-I-Kurve eines NbTi/Cu-Leiters ( $\alpha = 5$ ; freie Länge =  $210 \text{ mm}$ ) bei  $B = 7,5 \text{ T}$  und  $T = 4,2 \text{ K}$  (s. zum Vergleich Abb. 2).
- Abb. 16: Berechnetes Temperaturprofil der NbTi/Cu-Probe ( $\alpha = 5$ ; freie Leiterlänge  $30 \text{ mm}$ ) am Take-off-Punkt für  $B = 3 \text{ T}$ .
- Abb. 17: Erzeugte Joulsche Wärme am Take-off-Punkt einer NbTi/Cu-Probe ( $\alpha = 5$ ) in Abhängigkeit von der gekühlten Leiteroberfläche.



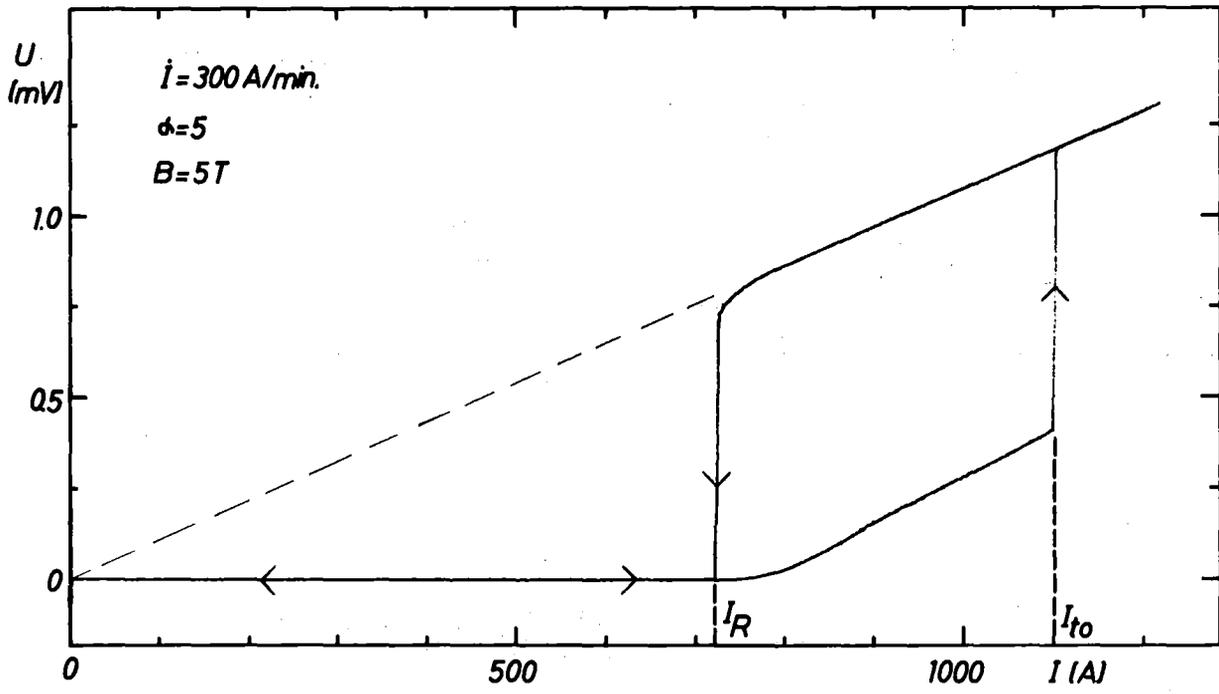
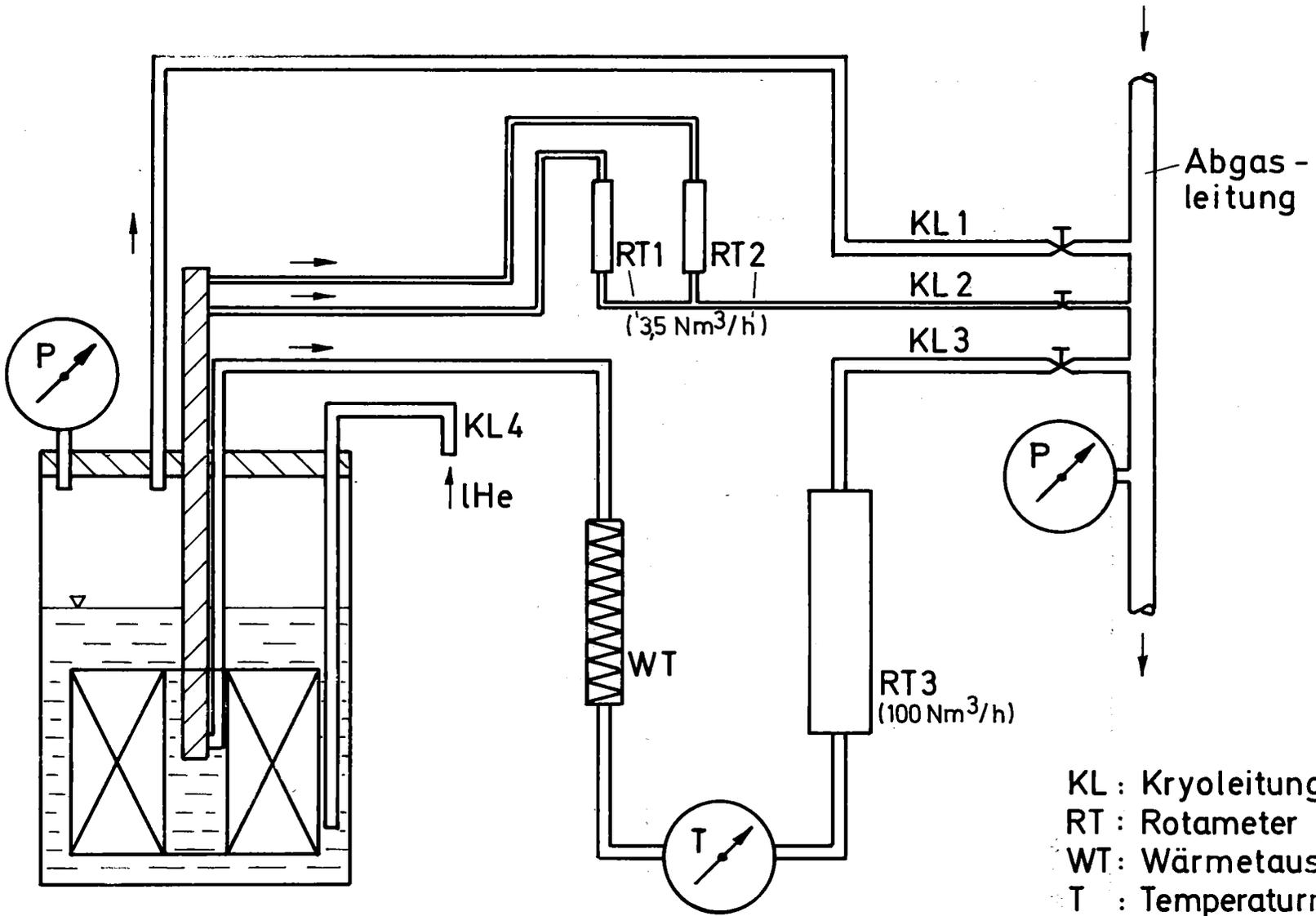


Abb. 2

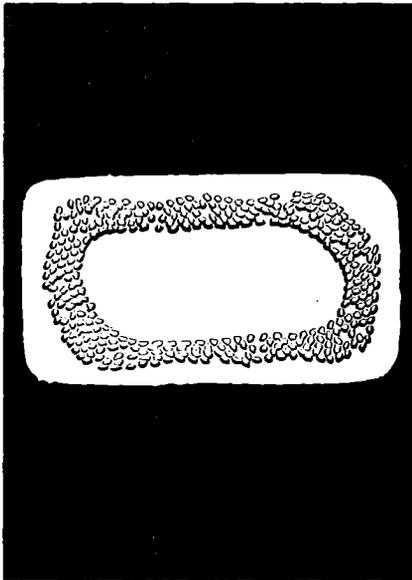


- KL : Kryoleitung
- RT : Rotameter
- WT : Wärmetauscher
- T : Temperaturmeßgerät
- P : Manometer

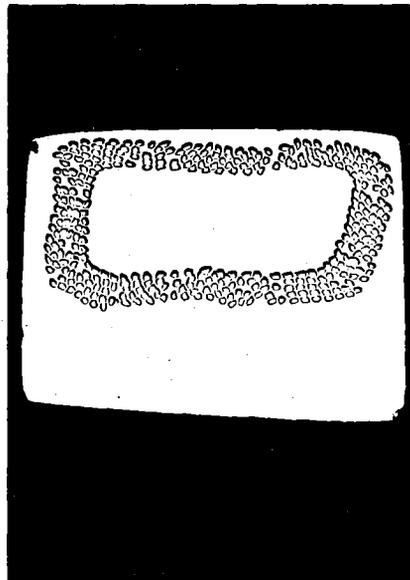
Abb. 3

## Schliffbilder von NbTi50/Cu-Supraleiterproben

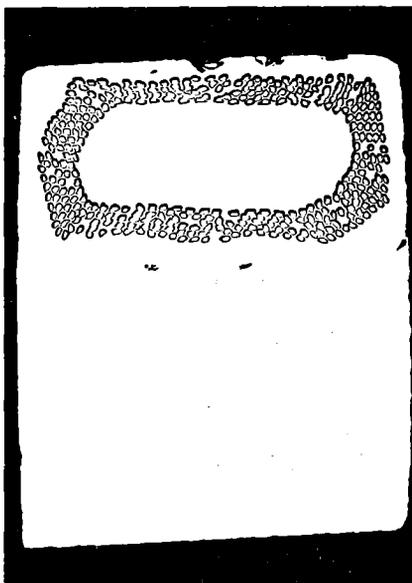
Bei Proben mit  $\alpha > 5$  ist zusätzlich Cu mit Ultraschall aufgeschweißt !



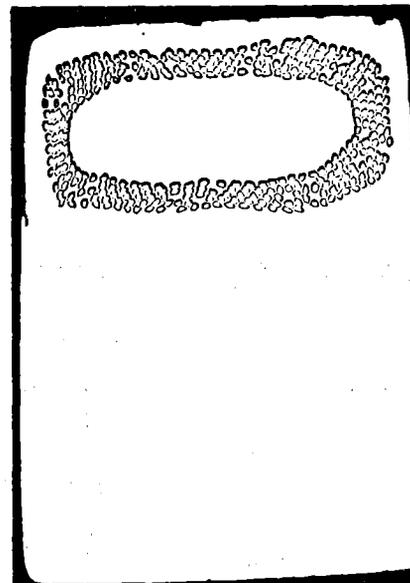
$\alpha = 5$



$\alpha = 7,5$



$\alpha = 11,5$



$\alpha = 15,1$

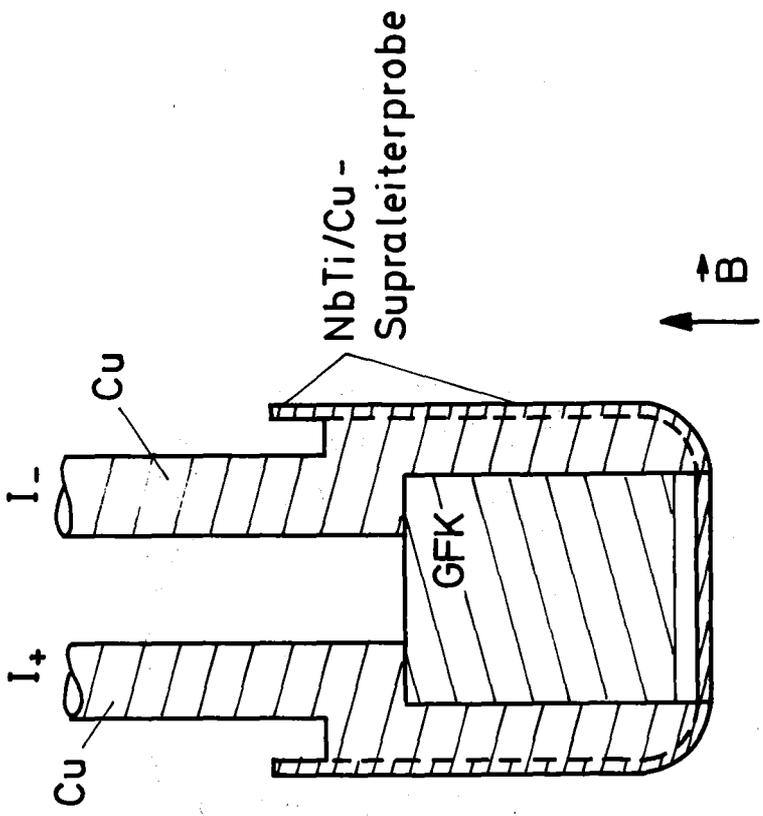


Abb. 5

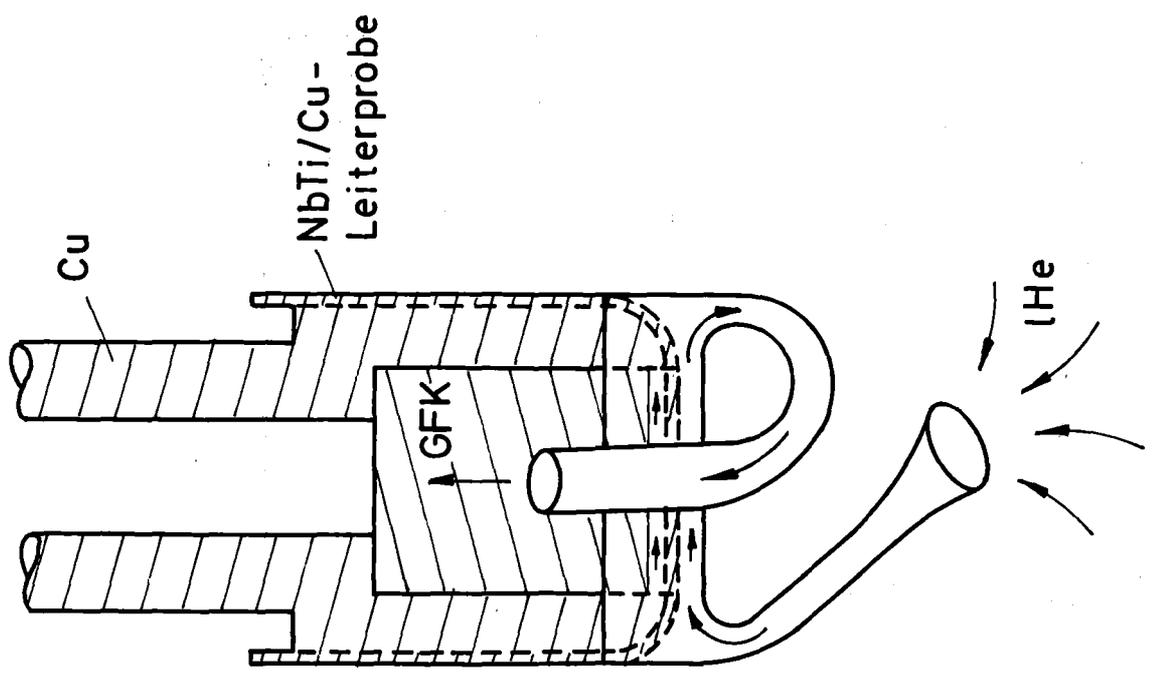


Abb. 6

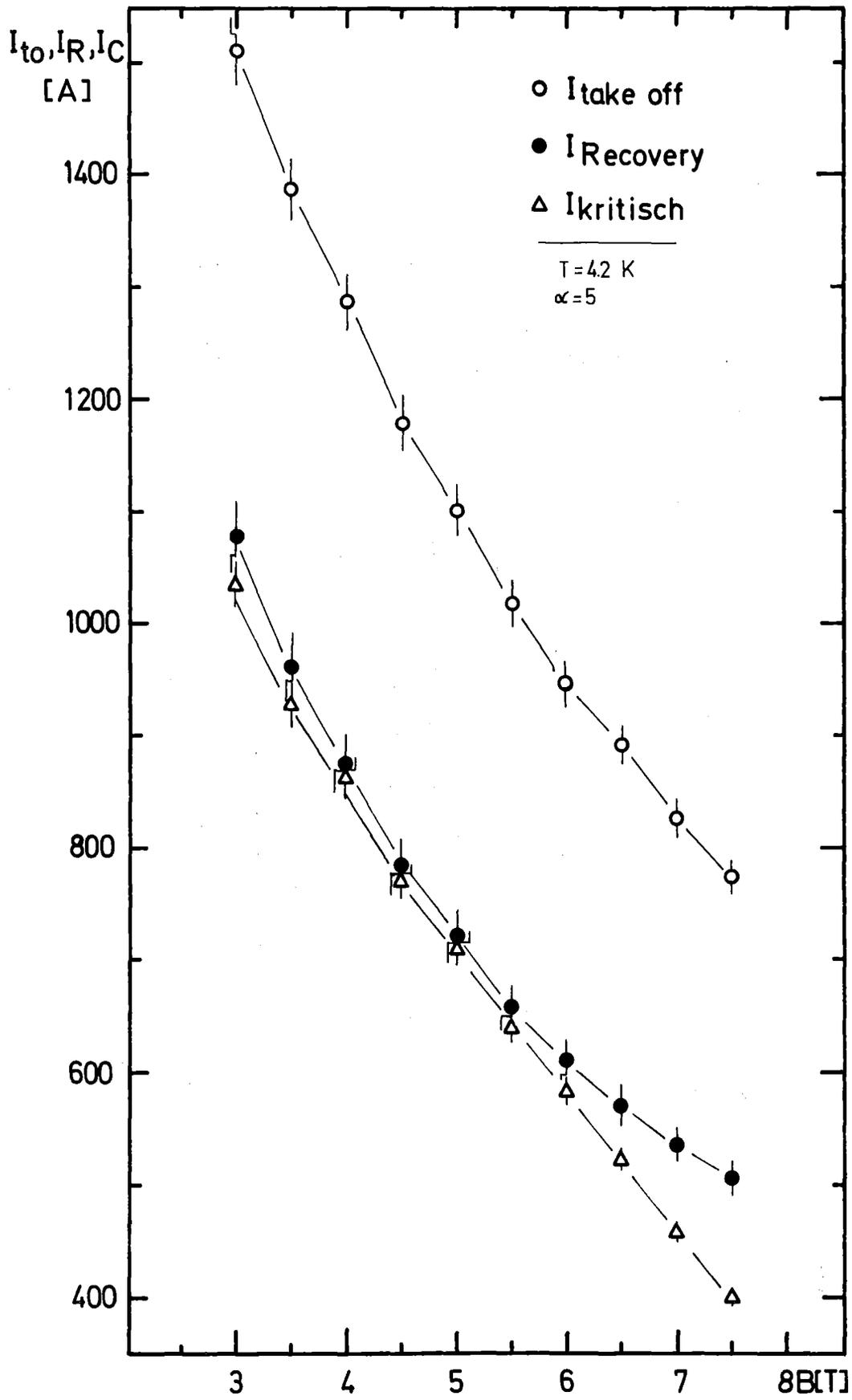


Abb. 7

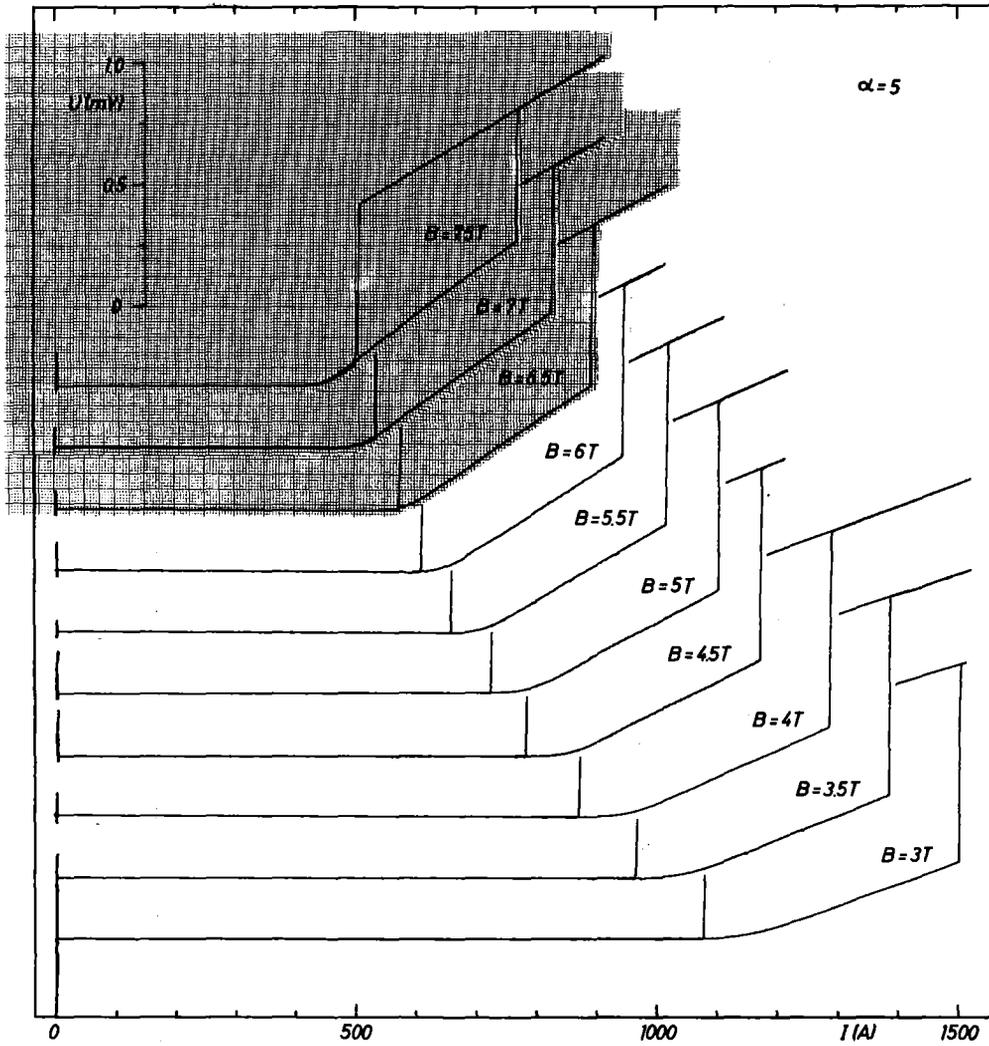


Abb. 8

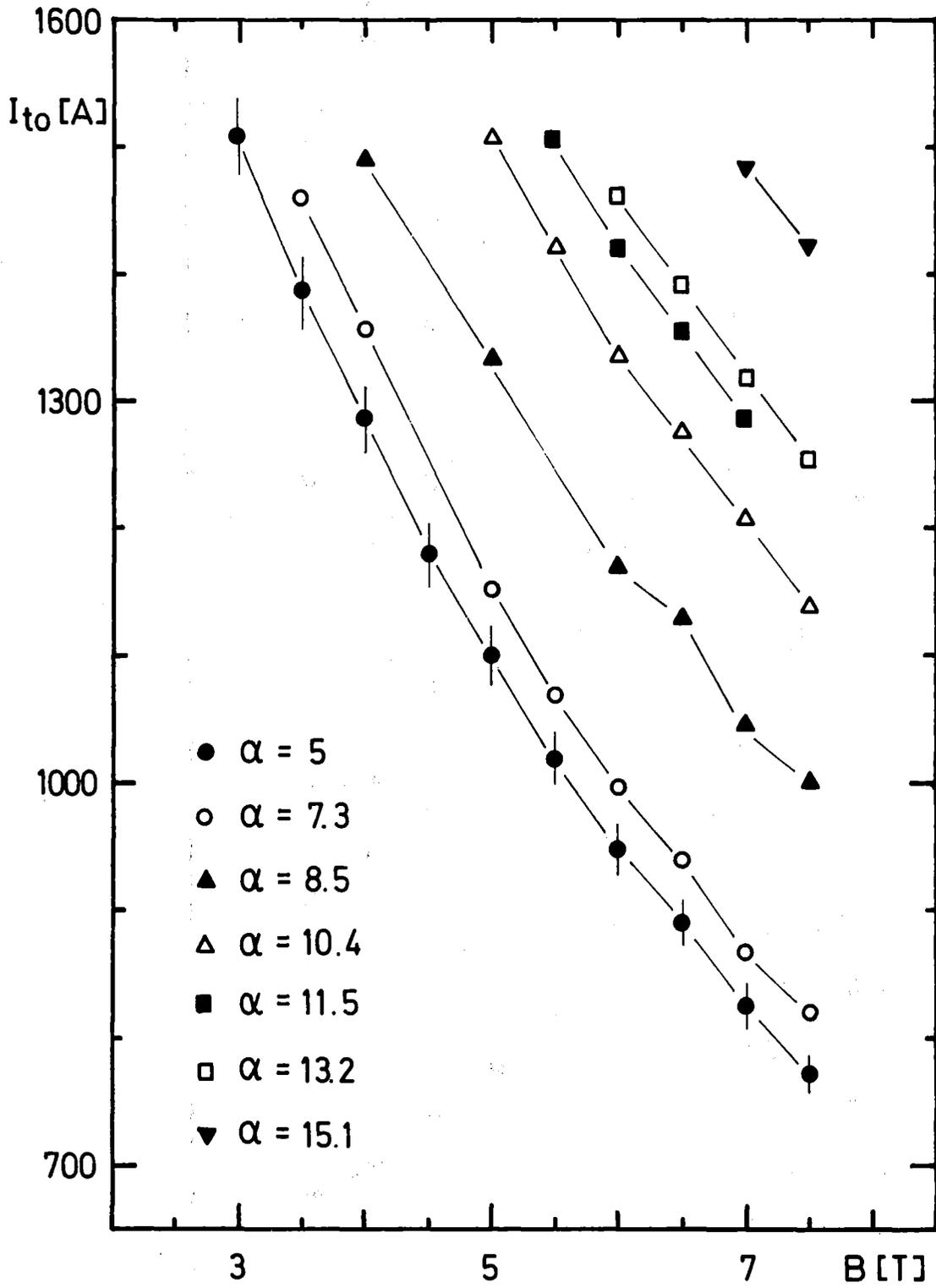


Abb. 9

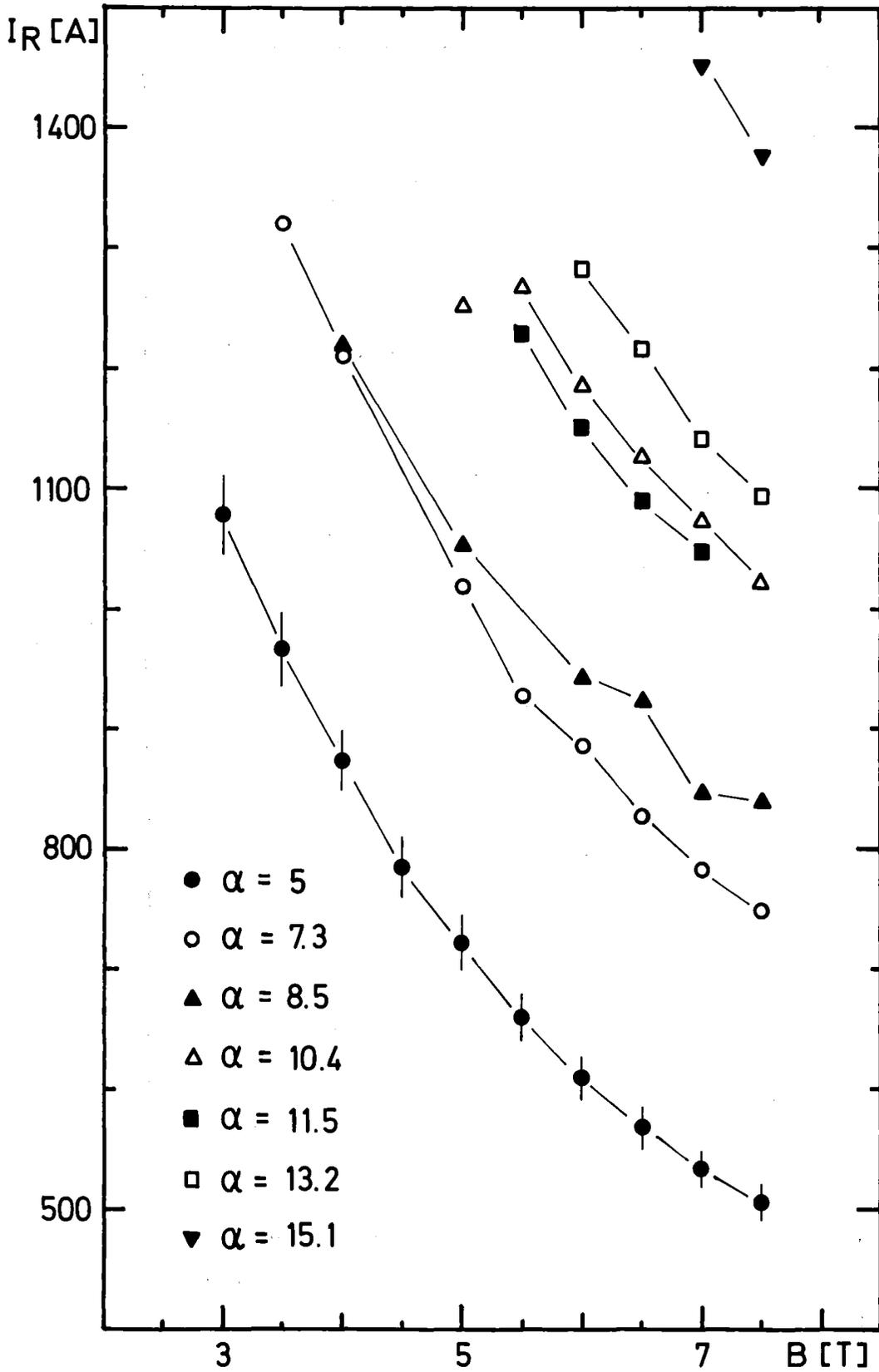


Abb. 10

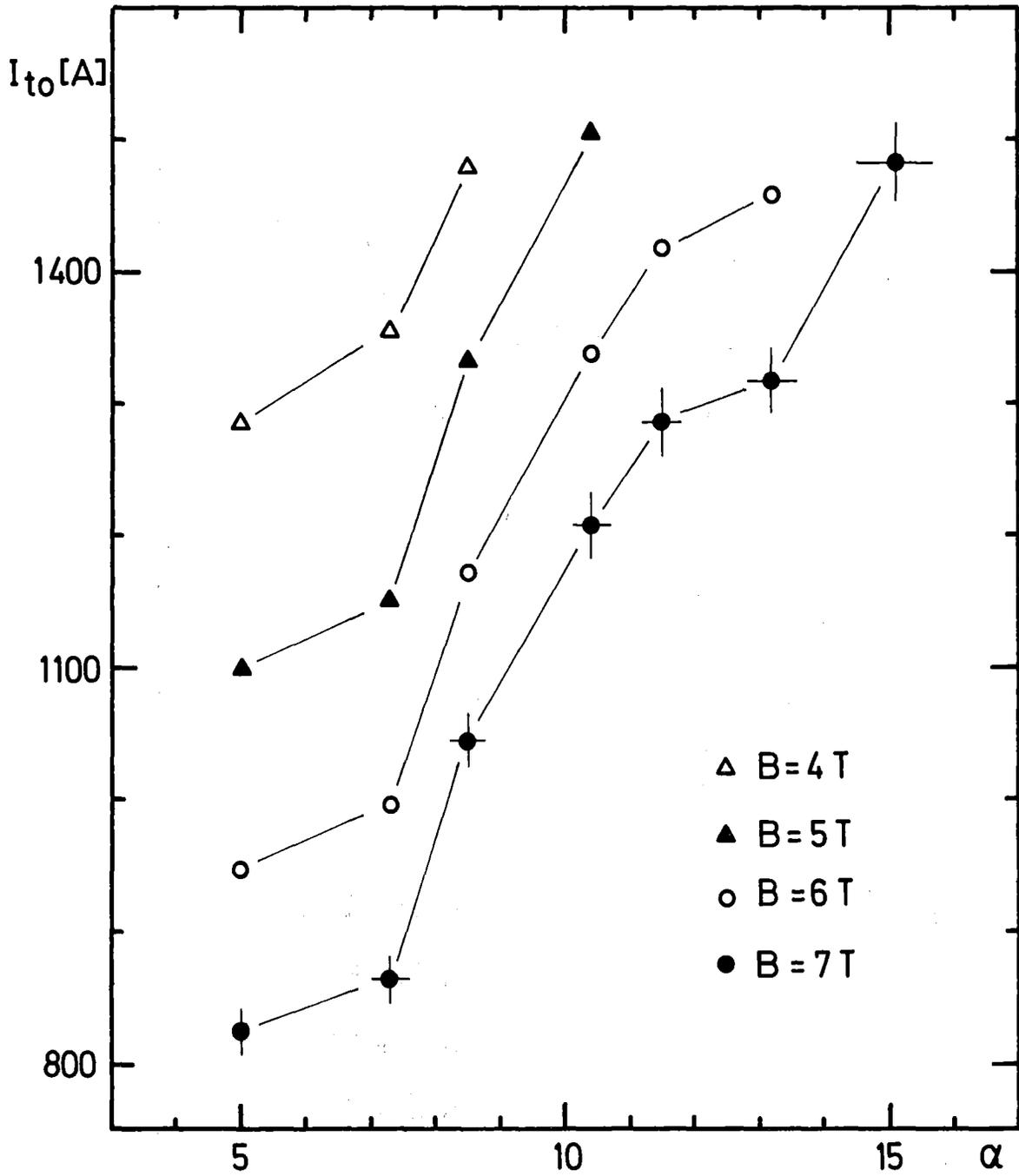


Abb. 11

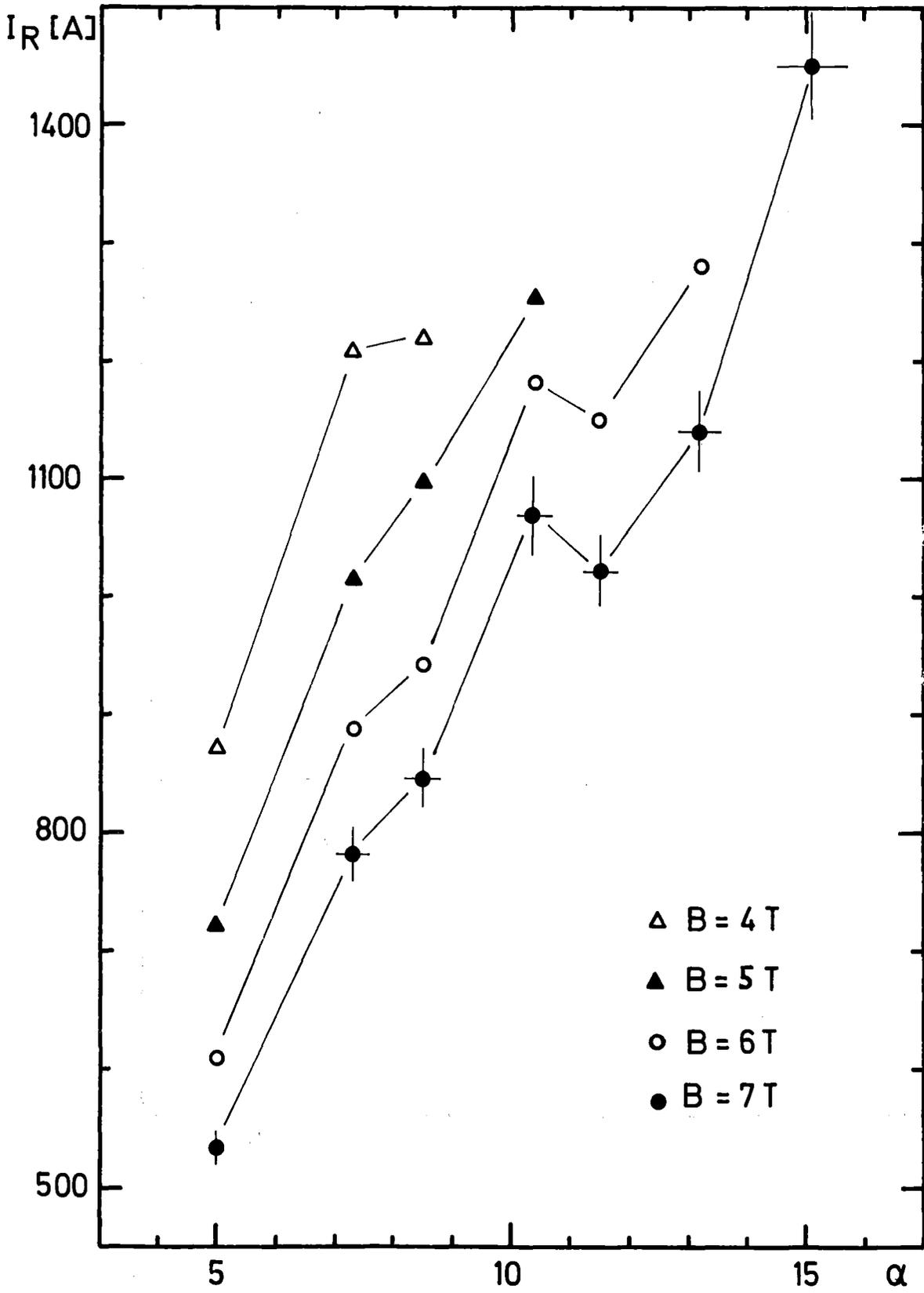


Abb. 12

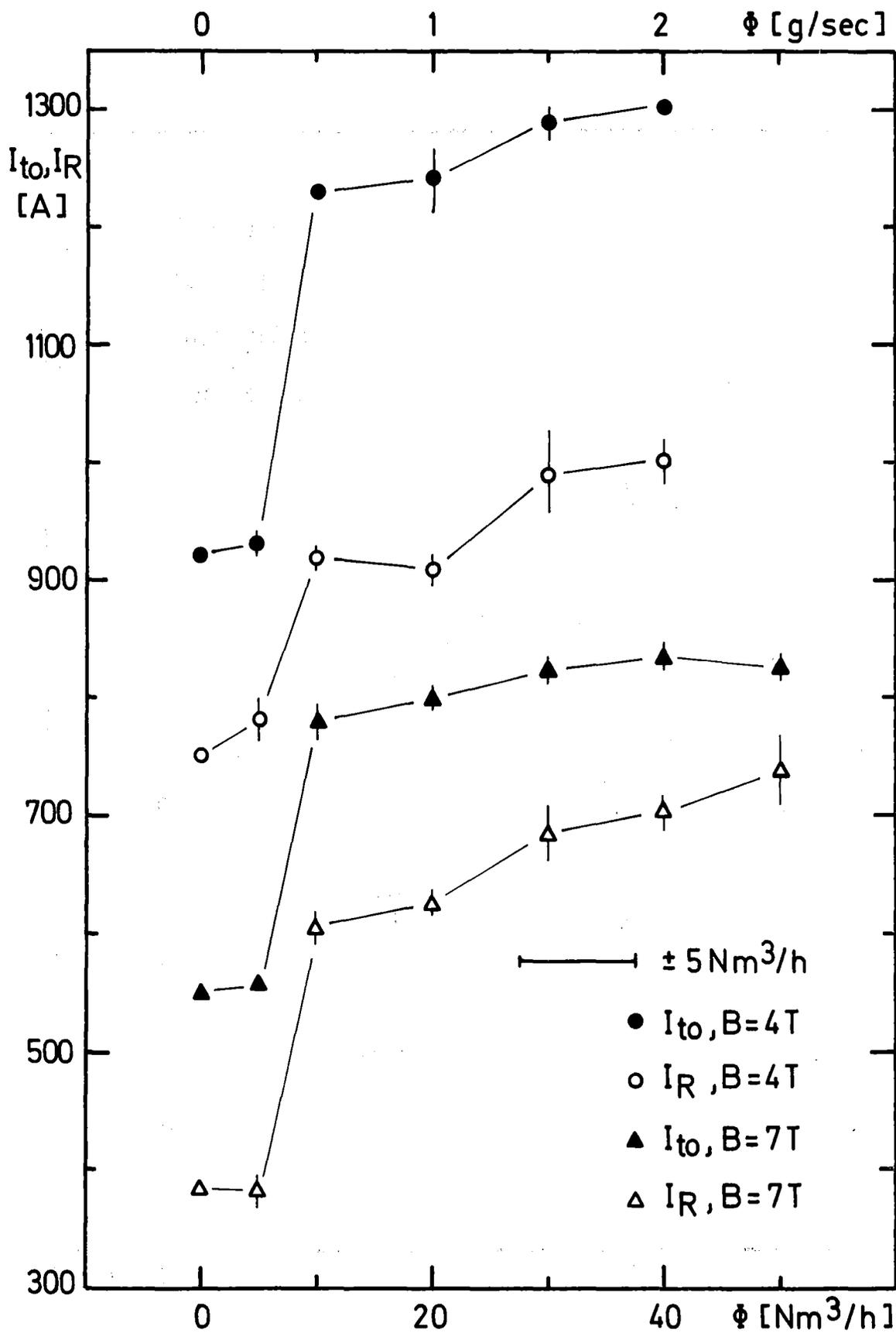
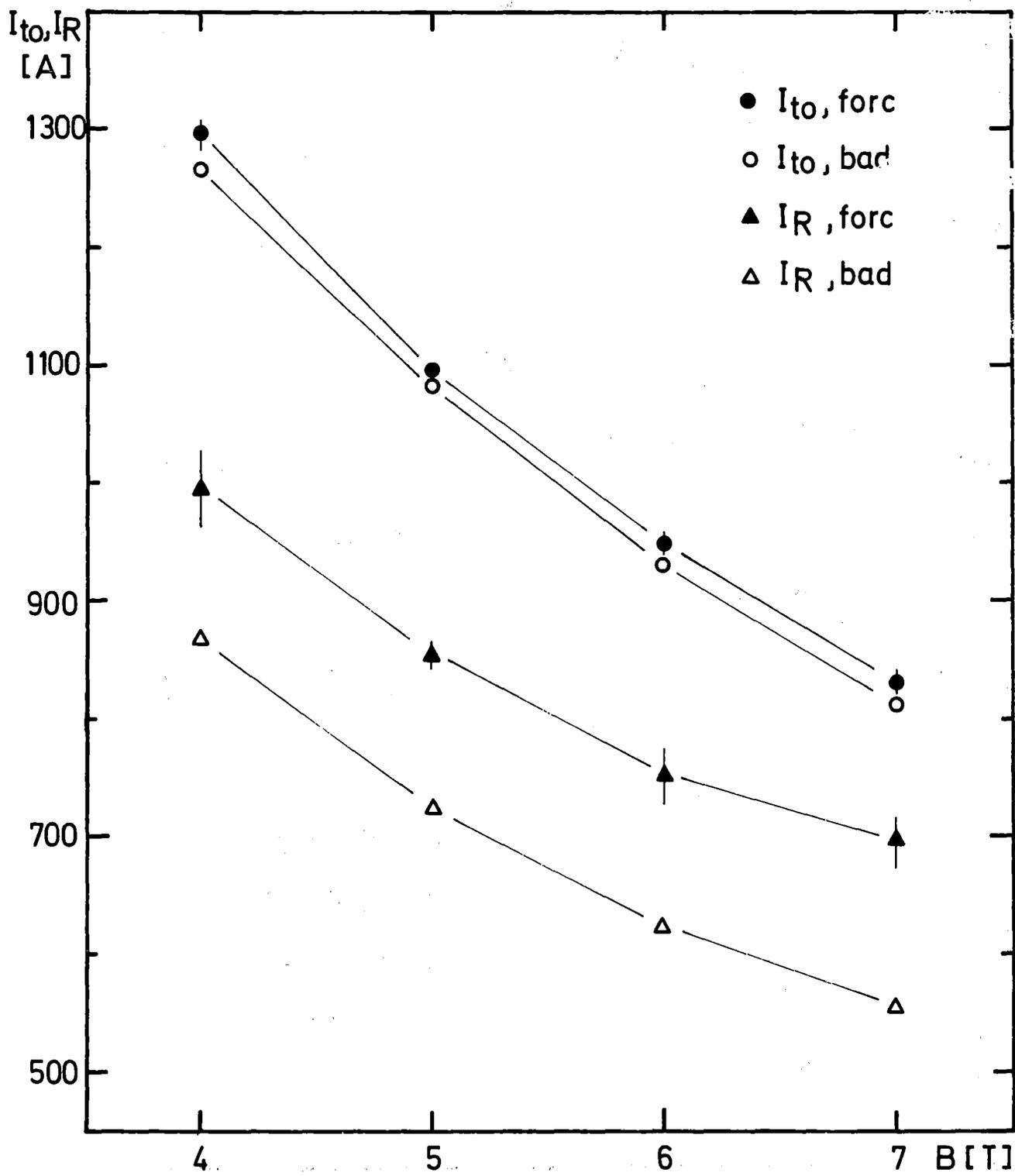
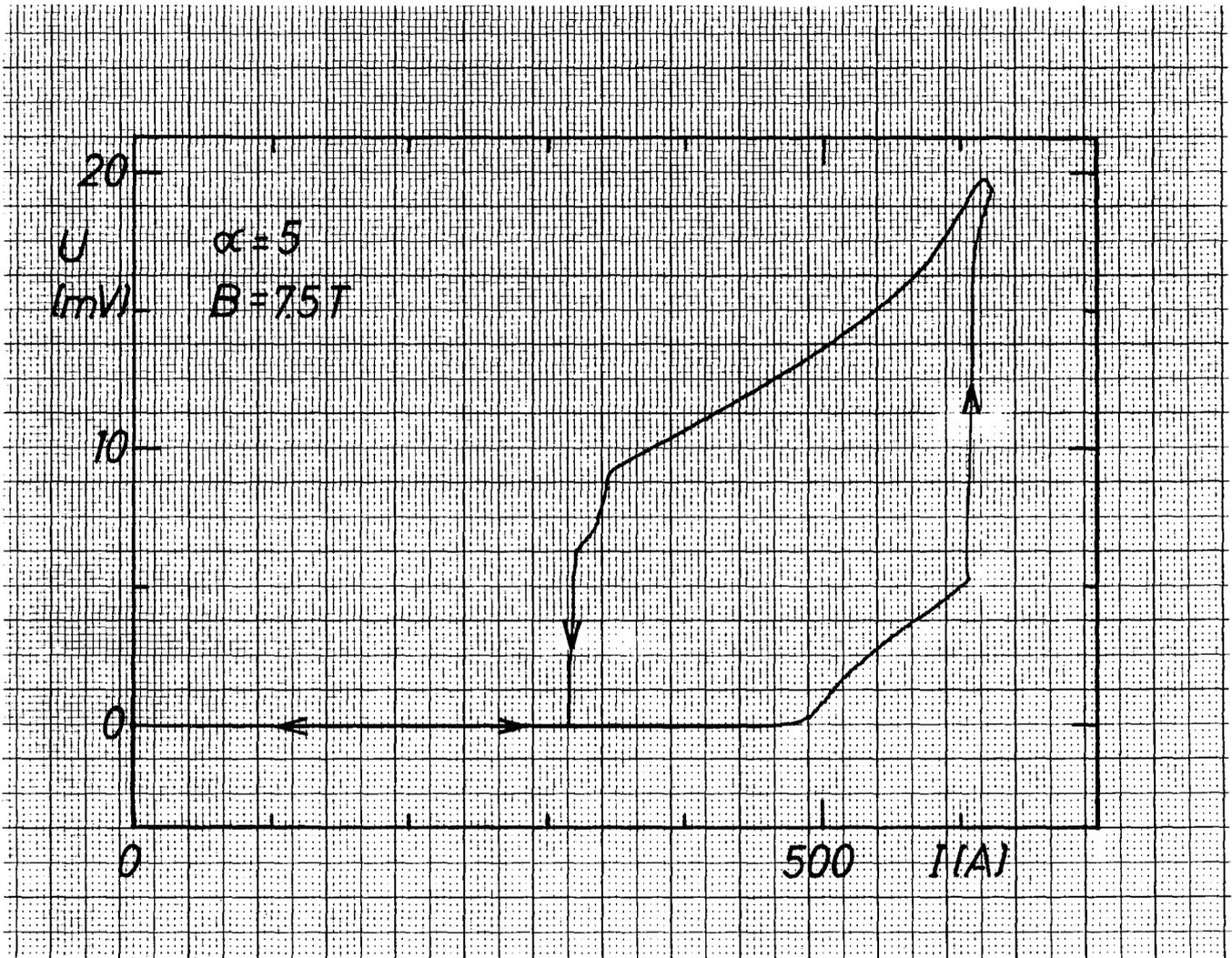


Abb. 13





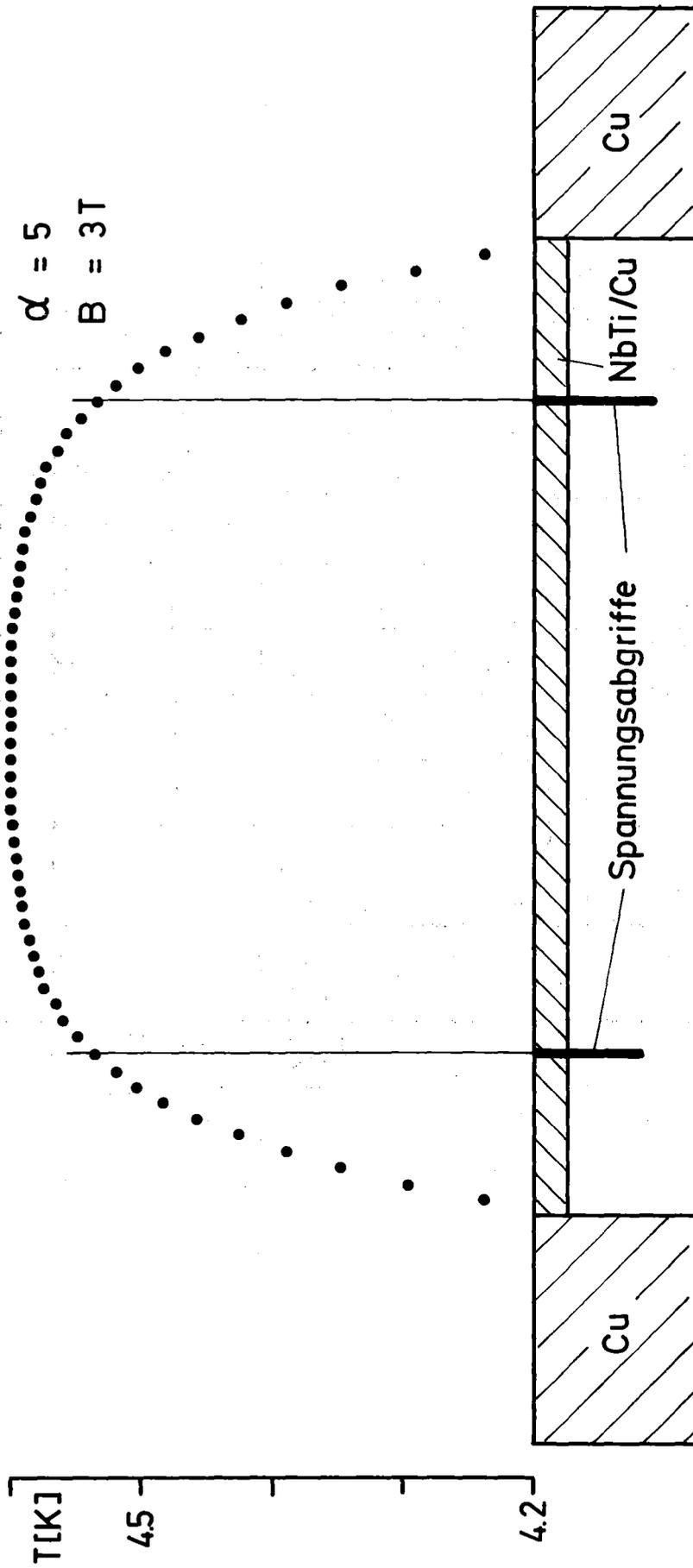


Abb. 16

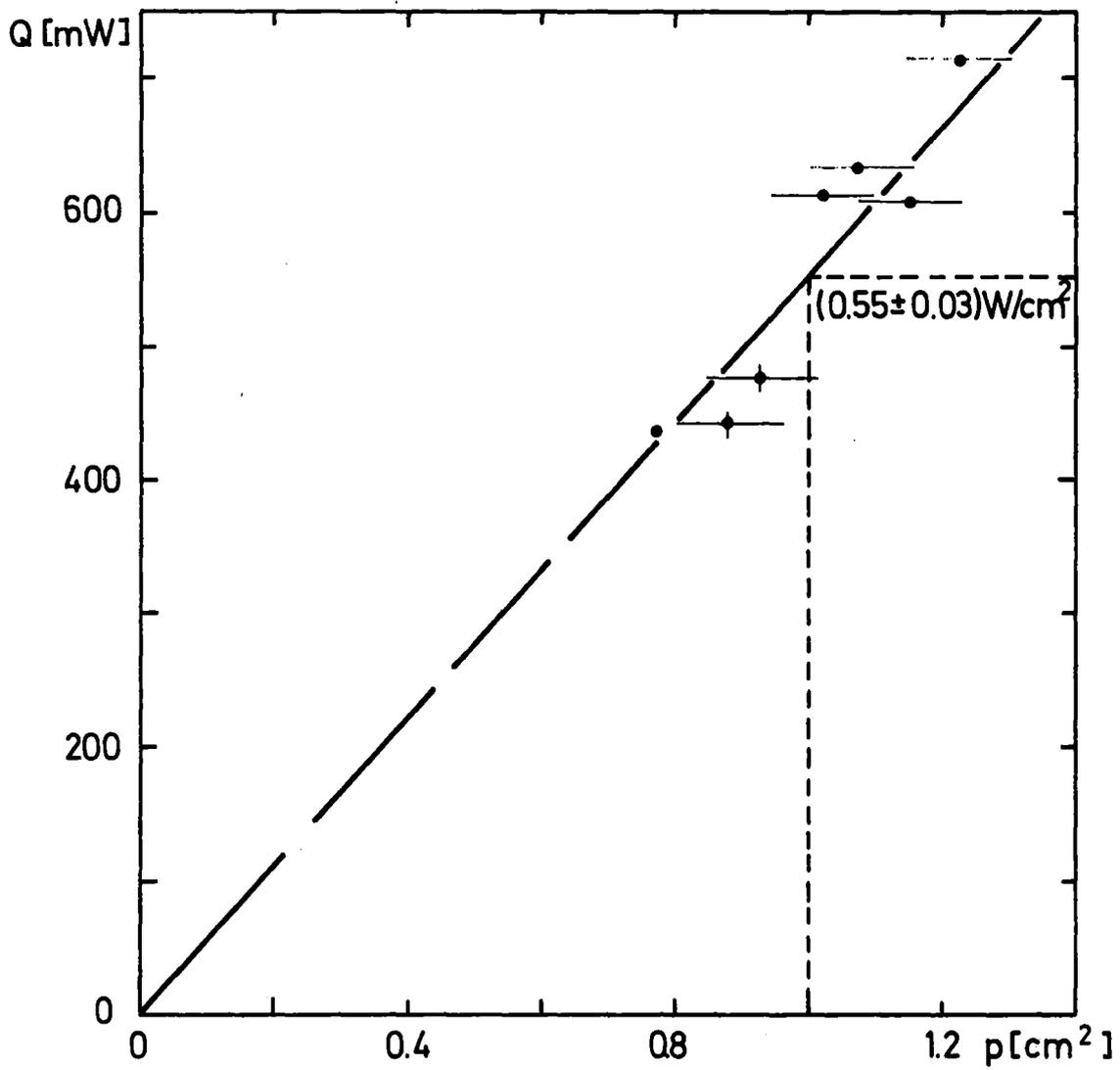


Abb. 17