

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

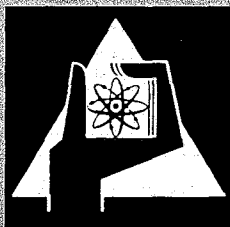
Juni 1971

KFK 1347

Institut für Experimentelle Kernphysik

Messung der thermischen Leitfähigkeit  
supraleitender Spulenwicklungen zwischen 4 K und 10 K

G. Krafft



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Juni 1971

KFK 1347

---

Institut für Experimentelle Kernphysik

Messung der thermischen Leitfähigkeit supraleitender  
Spulenwicklungen zwischen 4 K und 10 K

G. Krafft

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe



## Zusammenfassung:

Es wird über Messungen der thermischen Leitfähigkeit verschiedener supraleitender Spulenwicklungen und Epoxydharze bei Temperaturen zwischen 4K und 10K berichtet.

Eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit des Epoxydharzes von  $3.5 \times 10^{-4}$  Watt/cm·K auf  $1.5 \times 10^{-3}$  Watt/cm·K bei  $T = 4.2$  K, d.h. um rund das Fünffache, konnte durch Zusatz von  $Al_2O_3$ - und Cu-Pulver (bei einem Mischungsverhältnis von Harz:Pulver = 1:2) erreicht werden.

Spulen aus supraleitendem Multifilamentdraht mit einer CuNi-Matrix und Epoxydharz als Bindemittel hatten im Vergleich zu Spulen mit Draht aus reiner Cu-Matrix die niedrigste Leitfähigkeit von rund  $9 \times 10^{-4}$  Watt/cm·K bei  $T = 4.2$  K.

## Abstract

Thermal conductivity measurements of different superconducting coil windings and epoxy resins between 4K and 10K are described.

By admixture of  $Al_2O_3$ - or Cu-powder the thermal conductivity of epoxy resin could be improved by a factor of five from  $3.5 \times 10^{-4}$  Watt/cm·K to  $1.5 \times 10^{-3}$  Watt/cm·K.

With regard to coils fabricated of wires with pure Cu-matrix, coils made of superconducting multicore-wire with a CuNi-matrix potted with epoxy resin had the worst conductivity of about  $9 \times 10^{-4}$  Watt/cm·K at  $T = 4.2$  K.

## 1. Einführung

Gepulste Supraleitungsmagnete sollen als Führungsmagnete in großen Beschleunigern Verwendung finden.<sup>1)</sup>

Aufgrund von dissipativen Effekte, die zur Wärmeentwicklung führen, müssen die Magnetspulen entsprechend gekühlt werden. Dies geschieht im allgemeinen durch Unterteilung des Magneten in einzelne, durch Kühlkanäle getrennte Spulenpakete. Das Kühlmedium ist flüssiges Helium mit einer Temperatur von 4.2 K.

Um im gepulsten Magneten bei einer Feldstärke von etwa 6 T noch eine kritische Stromdichte zu erreichen, die noch rund 90-95% des Gleichstromwertes beträgt, muß die Temperaturerhöhung in den Spulenwindungen auf rund 0.2 K begrenzt sein.

Der Betrag der in den Wicklungspaketen erzeugten und an das Helium abzuführenden Wärme ist bei vorgegebener Temperaturdifferenz eine Funktion der thermischen Leitfähigkeit und Dicke der Spulenwindungen. Um z.B. für eine maximal zulässige Temperaturdifferenz zwischen Kühlmedium und Wicklung die notwendige Dicke der einzelnen Spulenpakete berechnen zu können, ist es notwendig, die thermische Leitfähigkeit dieser supraleitenden Spulenwicklungen bei der Temperatur des flüssigen Heliums zu kennen.

Deshalb wurde die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Spulenwicklungen und mehrerer Epoxyd-Harze gemessen. Die Epoxyd-Harze dienen als Bindemittel zur Erreichung der notwendigen mechanischen Festigkeit bei den einzelnen Spulenpaketen, die aus wenigen Millimeter dicken Vielkernleitern (mit bis zu rund 1000 Supraleiterkernen aus Niob-Titan von nur einigen  $\mu$  Durchmesser gewickelt werden.

## 2. Experimenteller Aufbau und Meßmethode

Zur Leitfähigkeitsmessung wurde die Methode des stationären Wärmeflusses angewandt, die darin besteht, in einer langen zylinderförmigen Probe einen stationären Wärmefluß zu erzeugen und den daraus resultierenden Temperaturgradienten zu messen.

Die Temperatur wurde mit Hilfe von geeichten Kohlewiderständen gemessen, der Widerstand mit einer Wechselstrommeßbrücke. Der Meßgenauigkeit der Brücke von rund 1% entspricht bei 4K einem Temperaturfehler von ungefähr  $\pm 0.02$  K.

Die Proben befanden sich in einem evakuierten Stahlzylinder in gutem Kontakt mit dessen Boden. Das Vakuum betrug während der Messungen  $\sim 5 \times 10^{-5}$  Torr.

Zur Erzeugung des Temperaturgradienten längs der Materialprobe wurde an deren oberen Ende eine Heizung angebracht.

Durch Variation des Stromes in der Heizung konnten verschiedene Heiz-Leistungen ( $P = R \cdot I^2$ ; R: Widerstand des Heizdrahtes; I: Strom) und damit unterschiedliche Temperaturgradienten hervorgerufen werden.

Die Proben wurden durch Eintauchen des Vakuumtanks in ein Heliumbad gekühlt.

Durch diesen experimentellen Aufbau war es möglich, die thermische Leitfähigkeit in einem gewissen Temperaturbereich oberhalb der Siedetemperatur des Heliumflüssigkeitsbades zu messen.

Die Resultate wurden nach der Beziehung

$$\lambda_{\tau} = \frac{P \cdot \Delta Z}{F \cdot \Delta T} \quad (2.1)$$

berechnet, wobei P die Heizleistung ist; F die Querschnittsfläche der Probe;  $\Delta Z$  der Abstand der zwei Temperaturkontrollpunkte in der Probe;  $\Delta T$  die gemessene Temperaturdifferenz und  $\tau$  die mittlere Probentemperatur.

Wärmeverluste (Strahlung) durch die Oberfläche der Probe können nicht ausgeschaltet werden. Sie sind aber, wie eine Abschätzung zeigt, um einige Größenordnungen kleiner, als die in der Probe gemessenen.

Die Wärmeverluste durch die Zuführungen (Kupferdrähte mit einem Radius von  $3 \times 10^{-3}$  cm) wurden bestimmt und bei der Berechnung der mittleren thermischen Leitfähigkeit berücksichtigt.

Bei Einschluß aller Fehler ergibt sich die Genauigkeit der folgenden Resultate zu rund 10-15%.

### 3. Materialproben

Da die integrale Wärmeleitfähigkeit von Spulenwicklungen bestimmt werden sollte, wurden alle Materialproben als Solenoide gebaut. Diese haben einen inneren Durchmesser von 1 cm, einen äußeren von 2 cm und eine Länge von 10 cm (Abb.1), sowie 10 Drahtlagen und rund 2000 Windungen mit einer Gesamtdrahtlänge von etwa 90 m.

Nur die Proben mit den Kennbuchstaben  $A_1$  und  $A_2$  sind Materialproben des Bindemittels in der Form von Hohlzylindern mit den gleichen Dimensionen wie die Solenoide (Typ I in Abb.1).

Eine genaue Beschreibung und Kennzeichnung der einzelnen Proben sowie der getesteten Bindematerialien ist in der Tabelle am Schluß angegeben. Die Aushärtung aller Proben wurde bei Raumtemperatur durchgeführt.

Da bei der vorgesehenen Wickel- und Kühlkonzeption von supraleitenden Dipolmagneten<sup>1)</sup> die integrale Wärmeleitfähigkeit der Spulenpakete senkrecht zu den einzelnen Drähten bekannt sein muß, ist es wichtig, bei den Messungen einen Wärmefluß längs der Drähte zu vermeiden. Zu diesem Zwecke wurden die Solenoide in der in Abb.1 angedeuteten Weise aufgeschnitten (Typ II). Dieser longitudinale Schnitt verhindert eine Ausbreitung der Wärme längs des Drahtes und garantiert einen nur achsialen Wärmefluß.



Zu Vergleichszwecken wurden aber ebenfalls Messungen an nicht aufgeschnittenen Proben (Typ I in Abb. 1) durchgeführt.

Diese Proben sind in den Abbildungen und der Tabelle mit einem Stern (\*) gekennzeichnet.

Da die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer nicht sehr wesentlich von der supraleitender Vielkerndrähte abweicht, und außerdem die integrale Wärmeleitfähigkeit der Spulenpakete senkrecht zu den Drähten hauptsächlich durch die Leitfähigkeit des Bindemittels und der Isolation bestimmt wird (Abschnitt 4, Gl. 4.3 + 4.4) konnte bei der Herstellung der Proben (mit jeweils rund 90 m Draht) Kupferdraht verwendet und auf das kostspielige Supraleitungsmaterial verzichtet werden.

Die Ausnahme bildet die Probe E, die aus einem Supraleiter mit einer Kupfer-Nickel-Matrix angefertigt wurde, d.h. mit einem Matrixmaterial, dessen thermische Leitfähigkeit bei tiefen Temperaturen um Größenordnungen unter der des Kupfers liegt<sup>2)</sup>.

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

Für die in Abb.2a dargestellte Form einer Spulenwicklung mit quadratischen Drähten ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zum Draht zu:

$$\lambda_W = \frac{(\bar{b} + \bar{d}) \cdot \lambda_B \cdot \lambda_D}{\bar{d} \cdot \lambda_B + \bar{b} \cdot \lambda_D} \quad (4.1)$$

In (4.1) bedeuten:

$\lambda_W$  : mittlerer thermische Leitfähigkeit der  
Wicklung

$\lambda_D, \lambda_B$  : Wärmeleitfähigkeit des Drahtes, bzw.  
des Bindemittels

$\bar{d}$  : Drahtdicke

$\bar{b}$  : Dicke des Bindemittels zwischen den  
Drähten

Für die in Abb.2a gezeigte Wicklung mit runden Drähten (Durchmesser:d, Abstand:b) ergibt sich mit der Bedingung eines konstanten Umfangs beider Drähte:

$$U = \pi d = \bar{U} = 4 \bar{d} \quad , \quad (4.2)$$

nach (4.1) die Wärmeleitfähigkeit zu:

$$\lambda_W = \frac{(d + b) \lambda_B \cdot \lambda_D}{\frac{\pi}{4} \cdot d \cdot \lambda_B + \left[ b + \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) d \right] \cdot \lambda_D} \quad (4.3)$$

Die thermische Leitfähigkeit eines supraleitenden Multifilamentdrahtes ergibt sich nach dem in Abb.2c gezeichneten Modell zu:

$$\lambda_D = \lambda_M \left[ \frac{\beta - 1}{\beta} + \frac{\lambda_{SL}}{(\beta - 1) \lambda_{SL} + \lambda_M} \right] \quad , \quad (4.4)$$

mit

$\lambda_{SL}$ ,  $\lambda_M$ : Leitfähigkeit des Supraleiters, bzw.  
des Matrixmaterials

$$\beta = \sqrt{1 + \alpha}$$

$\alpha$  = Volumen der Matrix/Volumen des Supraleiters

Ist die Wärmeleitfähigkeit des Drahtes sehr viel größer als die des Bindemittels,  $\lambda_D \gg \lambda_B$ , ergibt sich nach Gl.(4.3), daß die Wärmeleitfähigkeit des Spulenpaketes hauptsächlich durch die Leitfähigkeit des Bindemittels bestimmt wird:  $\lambda_W \approx \lambda_B$ .

Die gemessene Wärmeleitfähigkeit von reinem Epoxydharz (Abb.3, Probe A<sub>1</sub>) ist mit rund  $3 \times 10^{-4}$  Watt/cm·K bei T = 4.2 K sehr klein.

Zusammen mit den Werten für<sup>2)</sup>

$\lambda_{\text{Niob-Titan}}$ :  $10^{-3}$  Watt/cm K

$\lambda_{\text{Kupfer-Nickel}}$ :  $10^{-2}$  Watt/cm K

$\lambda_{\text{Kupfer}}$ : 4 Watt/cm K

ergibt sich eine äußerst geringe integrale Wärmeleitfähigkeit der Spulenpakete in der Größenordnung von  $10^{-3}$  W/cm K.

Für die Spulen (besonders für Wicklungen aus Drähten mit Kupfer als Matrixmaterial) erhöht sich damit die Möglichkeit eines Wärmetransportes entlang der Drähte.

Um ein Maß für den Beitrag des Wärmeflusses entlang der Drähte zur Gesamtwärmeleitfähigkeit eines Spulenpaketes zu erhalten, wurden vergleichende Messungen an aufgeschnittenen und nicht aufgeschnittenen Proben (Abb.1) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb.4 aufgetragen: die Wärmeleitfähigkeit verdoppelt sich, wenn ein Wärmefluß entlang der Drähte möglich ist.

Für die Spulen in einem supraleitenden Dipolmagneten sollten sich aber aufgrund der von den Solenoiden unterschiedlichen Wickelkonfigurationen<sup>1)</sup> kleinere Vergrößerungsfaktoren für Gesamtleitfähigkeit ergeben, denn die wesentlich größere Drahtlänge in diesen Spulenpaketen bewirkt eine um mindestens eine Größenordnung kleinere thermische Diffusion längs der Drähte.

Eine Möglichkeit zur Erhöhung der effektiven Wärmeleitfähigkeit in den Spulen liegt nach Gl.(4.3) in der Vergrößerung von  $\lambda_B$ , der Leitfähigkeit des Bindemittels. Dies kann z.B. durch Hinzufügen eines gut wärmeleitenden Materials in Pulverform zum Bindemittel geschehen.

So erhöht sich  $\lambda_B$  von reinem Epoxydharz auf den 5-6-fachen Wert (Abb.3), wenn man dem Epoxydharz im Verhältnis 1:2  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pulver beimischt.

Der Vergleich der verschiedenen Bindemittel in einer Wicklung zeigt nach Abb.5 aber nicht ein rund fünffach größeres  $\lambda_W$  der Probe  $B_2$  gegenüber der Probe  $B_1$ , wie man es nach Gleichung (4.3) erwarten würde, sondern nur eine etwa doppelt so große Leitfähigkeit.

Der Grund für die Diskrepanz zwischen der nach (4.3) erwarteten Verfünffachung der Leitfähigkeit und der experimentell gemessenen Verdopplung des  $\lambda_W$ -Wertes liegt in dem zu groben Näherungsmodell zur Berechnung der Leitfähigkeit nach (4.3).

Bei der Ableitung der Beziehung (4.3) wurde der Einfluß der (Draht)-Isolation auf die integrale Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_W$  einer Spulenwindung vernachlässigt.

Berücksichtigt man das Vorhandensein einer (Draht)-Isolationsschicht der Dicke  $l$  und mit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_L$ , so ergibt sich - analog der Ableitung von (4.3) - folgender Ausdruck für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_W$  einer Spulenwindung:

$$\lambda_W = \frac{(d+b+\frac{\pi}{2}l) \cdot \lambda_B \cdot \lambda_D \cdot \lambda_L}{\frac{\pi}{4} \cdot d \lambda_B \cdot \lambda_L + \left[ b + \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) d \right] \cdot \lambda_L \cdot \lambda_D + \frac{\pi}{2} \cdot l \cdot \lambda_D \cdot \lambda_B} \quad (4.5)$$

Während man nach (4.3) für den Fall  $\lambda_D \gg \lambda_B$  erwarten kann, daß die Wärmeleitfähigkeit des Spulenpaketes  $\lambda_W$  hauptsächlich durch die Leitfähigkeit des Bindemittels  $\lambda_B$  bestimmt wird:  $\lambda_W \approx \lambda_B$ , d.h. für  $\lambda_B^* \rightarrow 5\lambda_B$  ebenfalls  $\lambda_W^* \rightarrow 5\lambda_W$ , folgt aus (4.5) nicht diese lineare Proportionalität.

Unter Konstanthaltung aller übrigen Parameter ergibt z.B. die Rechnung nach (4.5) für ein  $\lambda_B^* = 5\lambda_B$  nur einen entsprechenden  $\lambda_W^*$ -Wert von rund  $\lambda_W^* = 2\lambda_W$ ; was mit den experimentell bestimmten Werten übereinstimmt.

Nach Abb.6 zeigt sich ebenfalls für ein mit Cu-Pulver vermischtes Bindemittel aus Epoxydharz eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit um einen Faktor 2.

Die Tendenz eines weniger starken Abfalls der thermischen Leitfähigkeit bei Annäherung an  $T = 4.2$  K, wie sie deutlich bei den Proben mit  $Al_2O_3$ -Pulver gegenüber denen ohne  $Al_2O_3$ -Beimengung zu beobachten ist (Abb.3 und 5), läßt sich nicht bei den Proben mit Cu-Pulver feststellen (Abb.6, Probe C<sub>2</sub>).

Da nach den Messungen von H. Denner<sup>3)</sup> die thermische Leitfähigkeit des Bindemittels DELTA BOND bei  $T = 4.2$  K ( $\lambda \sim 9 \times 10^{-4}$  Watt/cm K) etwa 2.5-fach so groß wie die des hier verwendeten Epoxydharzes ist, wurde ebenfalls eine Probe mit diesem Bindemittel vergossen, um die Leitfähigkeit zu messen.

Die Ergebnisse in Abb.7 und 9 zeigen, daß auch in diesem Fall keine Erhöhung des  $\lambda_W$ -Wertes um 2.5 erreicht werden kann, sondern nur eine um einen Faktor von rund 1.25 gegenüber den Proben mit Epoxydharz als Bindemittel.

Der steile Abfall der Leitfähigkeit bei  $T \rightarrow 4.2$  K, wie er an Delta Bond schon in Ref.3 beobachtet wurde, konnte ebenfalls bei den Messungen an der Probe D (Abb.7 und 9) festgestellt werden.

Den weitaus niedrigsten  $\lambda_W$ -Wert von  $9 \times 10^{-4}$  W/cm K bei  $T = 4.2$  K ergab die Probe E aus supraleitendem Multifilamentdraht mit einer Kupfer-Nickel-Legierung als Matrixmaterial (Abb.8 und 9), der aber aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Kupfer-Nickel ( $\sim 10^{-2}$  W/cm K) nach den Gl.(4.3) und (4.4) zu erwarten war.

## 5. Schlußfolgerungen

Die in Abschnitt 4 dargelegten Meßergebnisse liefern nachstehende Schlußfolgerungen, welche den thermischen Aspekt der Konstruktion und des Baus der Spulenwicklungen in einem supraleitenden Magneten betreffen:

1. Kupfer-Nickel sollte nicht als Matrixmaterial in einem supraleitendem Multifilamentdraht verwendet werden. Aufgrund des schlechten  $\lambda_D$ -Wertes resultiert daraus eine zu geringe effektive Gesamtleitfähigkeit in der Spulenwicklung.
2. Zusätze von pulverförmigem Material hoher spezifischer thermischer Leitfähigkeit erhöhen den  $\lambda_W$ -Wert der Spulenwindung.
3. Wärmeübergangswiderstände zwischen den einzelnen Komponenten einer Windung müssen klein gehalten werden. Ein Mittel zur Erreichung eines besseren thermischen Kontaktes wäre der Verzicht auf die (Lack-)Isolation des Wicklungsdrahtes.

Tabelle der Meßproben

Kennzeichnung	Form und Abmessung	Material
A <sub>1</sub>	Hohlzylinder: äuß.Durchm.: 2cm inn.Durchm.: 1cm Länge : 10cm	Epoxydharz: Araldit CY 221 <sup>+)</sup> Härter HY 956 <sup>+)</sup> Mischungsverhältnis Araldit:Härter = 5:1
A <sub>2</sub>	wie A <sub>1</sub>	Epoxydharz (wie A <sub>1</sub> ) mit Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Pulver vermischt mittlerer Korngröße des Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 6·10 <sup>-3</sup> cm Mischungsverhältnis Harz:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 1:2
B <sub>1</sub>	Solenoid: äuß.Durchm.: 2cm inn.Durchm.: 1cm Länge : 10cm aufgeschnitten: Typ II der Abb.1 Anzahl der Lagen : ~10cm Anzahl der Windungen : ~2000	Draht: 0.5 mm Kupfer Bindemittel: Epoxydharz: wie A <sub>1</sub>
B <sub>1</sub> <sup>*</sup>	wie B <sub>1</sub> aber nicht aufgeschnitten: Typ I der Abb.1	Draht : wie B <sub>1</sub> Bindemittel: wie B <sub>1</sub>

B <sub>2</sub>	wie B <sub>1</sub> ; Typ II	Draht : wie B <sub>1</sub> Bindemittel: Epoxydharz mit Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Pulver: wie A <sub>2</sub>
C <sub>1</sub>	wie B <sub>1</sub> ; Typ II	Draht : 1.0 mm Kupfer Bindemittel : Epoxydharz: wie A <sub>1</sub>
C <sub>2</sub>	wie C <sub>1</sub> ; Typ II	Draht : wie C <sub>1</sub> Bindemittel : Epoxydharz (wie A <sub>1</sub> ) mit Cu-Pulver vermischt mittlere Korngröße des Cu: 10 <sup>-3</sup> cm Mischungsverhältnis Harz:Cu = 1:2
C <sub>2</sub> <sup>*</sup>	wie C <sub>2</sub> aber nicht aufgeschnitten; Typ I	Draht : wie C <sub>2</sub> Bindemittel : wie C <sub>2</sub>
D	wie C <sub>1</sub> ; Typ II	Draht : 1.0 mm Kupfer Bindemittel : DELTA BOND <sup>++</sup> )



E

wie D, Typ II

Draht : supraleitender Multifilament-  
Draht<sup>+++)</sup> :

0,5 mm Durchm.; 119 NbTi-

Filamente mit  $d = 24\mu$ ;

Matrixmaterial: Kupfer=Nickel

Verhältnis Matrix:SL = 2,7:1

Bindemittel :Epoxydharz : wie A<sub>1</sub>

+) Hersteller: CIBA, Basel, Schweiz

++) Hersteller: Wakefield Engineering, Inc.,  
Wakefield, Mass., USA

+++) Hersteller: Airco, Murray Hill, USA

## Literatur

- (1) F. Arendt u.a., KFK 1316, Nov.1970, Karlsruhe
- (2) V.J. Johnson, Ed., A Compendium of the Properties of Materials at Low Temperature; Wright-Patterson AFB, Ohio, 1960
- (3) H. Denner, Cryogenics, Aug. 1969, S.289

## Abbildungen

### 1.) Abmessungen der Versuchssolenoid

Typ I : nicht aufgeschnitten;

Typ II: aufgeschnitten

### 2.a) Darstellung einer Drahtlage im vergossenen Spulenpaket;

d: Drahtdurchmesser

b: Mittlerer Abstand der Drähte

(= Dicke der Bindemittelschicht)

### 2.b) Zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit angenommene Form einer Drahtlage mit gleichem Umfang der Drähte:

$$U = \pi d = \bar{U} = 4 \bar{d}$$

### 2.c) Idealisierte Darstellung eines supraleitenden Multifilamentdrahtes zur Berechnung der thermischen Leitfähigkeit.

### 3.) Wärmeleitfähigkeit von Epoxyd-Harz (Probe A<sub>1</sub>) und Epoxydharz mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pulver (Probe A<sub>2</sub>).

### 4.) Vergleich der thermischen Leitfähigkeit aufgeschnittener und nicht aufgeschnittener Spulen:

4.a) Probe B<sub>1</sub>\*: Solenoid aus 0.5 mm Cu-Draht; Bindemittel: Epoxyd-Harz; nicht aufgeschnitten (Typ I von Abb.1).

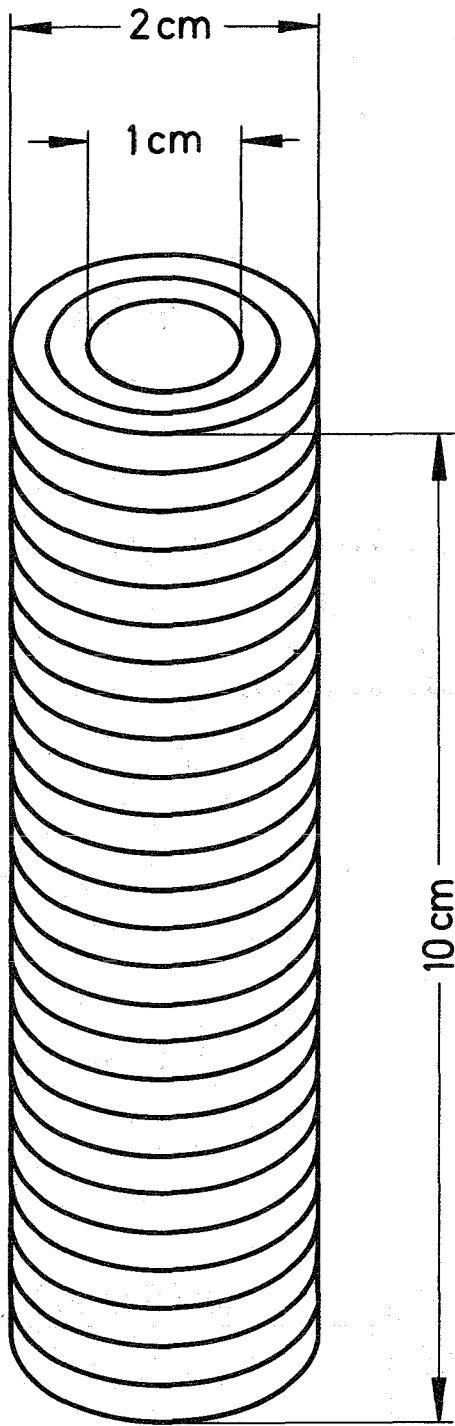
Probe B<sub>1</sub> : Wie Probe B<sub>1</sub>\*: aber aufgeschnitten (Typ II von Abb.1)

4.b) Probe C<sub>2</sub>\*: Typ I-Solenoid aus 1 mm Cu-Draht; Bindemittel: Epoxyd-Harz mit Cu-Pulver vermischt.

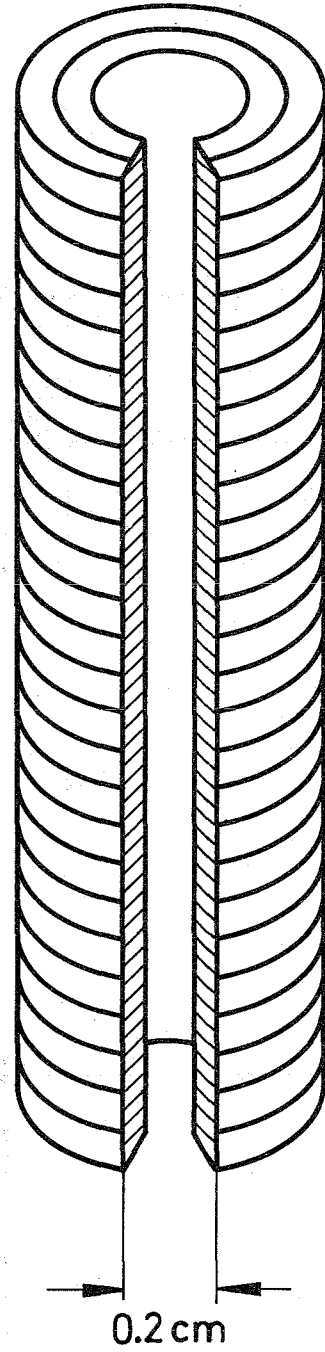
Probe C<sub>2</sub> : Wie Probe C<sub>2</sub>\*; aber Typ II-Solenoid

5.) Wärmeleitfähigkeit von Spulenwindungen (0.5 mm Cu-Draht) mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pulver als Zusatz im Epoxyd-Harz-Bindemittel (Probe B<sub>2</sub>) und ohne Zusatz (Probe B<sub>1</sub>); beide Proben Typ II-Solenoid.

- 6.) Wärmeleitfähigkeit von Spulenwindungen (1.0 mm Cu-Draht) mit Cu-Pulver als Zusatz im Epoxyd-Harz-Bindemittel (Probe C<sub>2</sub>) und ohne Zusatz (Probe C<sub>1</sub>); beide Proben Typ II-Solenoid.
- 7.) Thermische Leitfähigkeit des Probe-Solenoids D aus 1.0 mm Cu-Draht und DELTA-BOND als Bindemittel.
- 8.) Wärmeleitfähigkeit der Probe E; Solenoid aus 0.5 mm supraleitendem Vielkernleiter: 119 Niob-Titan-Filamente, Matrixmaterial: Kupfer-Nickel-Legierung.
- 9.) Vergleichende Übersicht der thermischen Leitfähigkeit verschiedener Spulenwicklungen.



TYP I



TYP II

FIG. 1

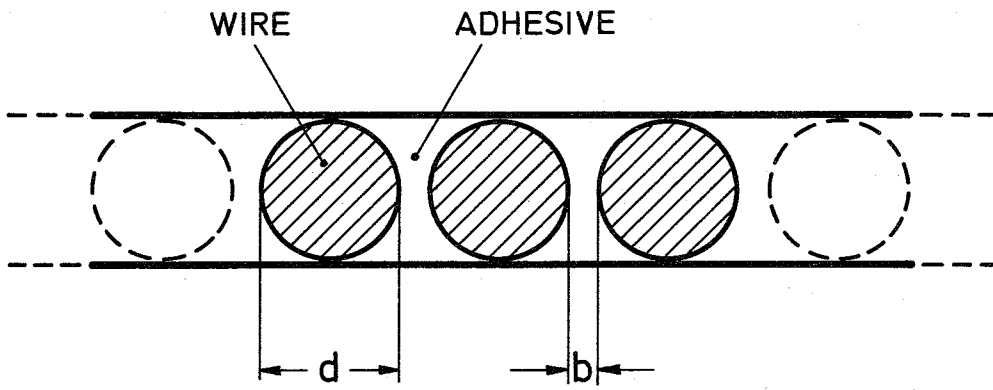
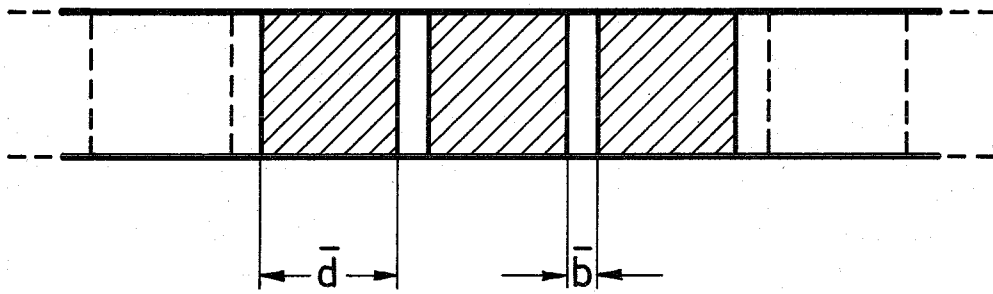


FIG. 2a



$$\bar{d} = \frac{\pi}{4} d$$

$$\bar{b} = b + \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) d$$

FIG. 2b

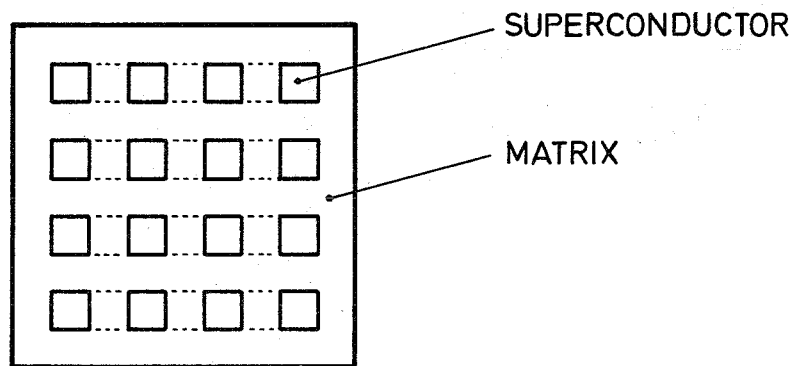


FIG. 2c

FIG. 2

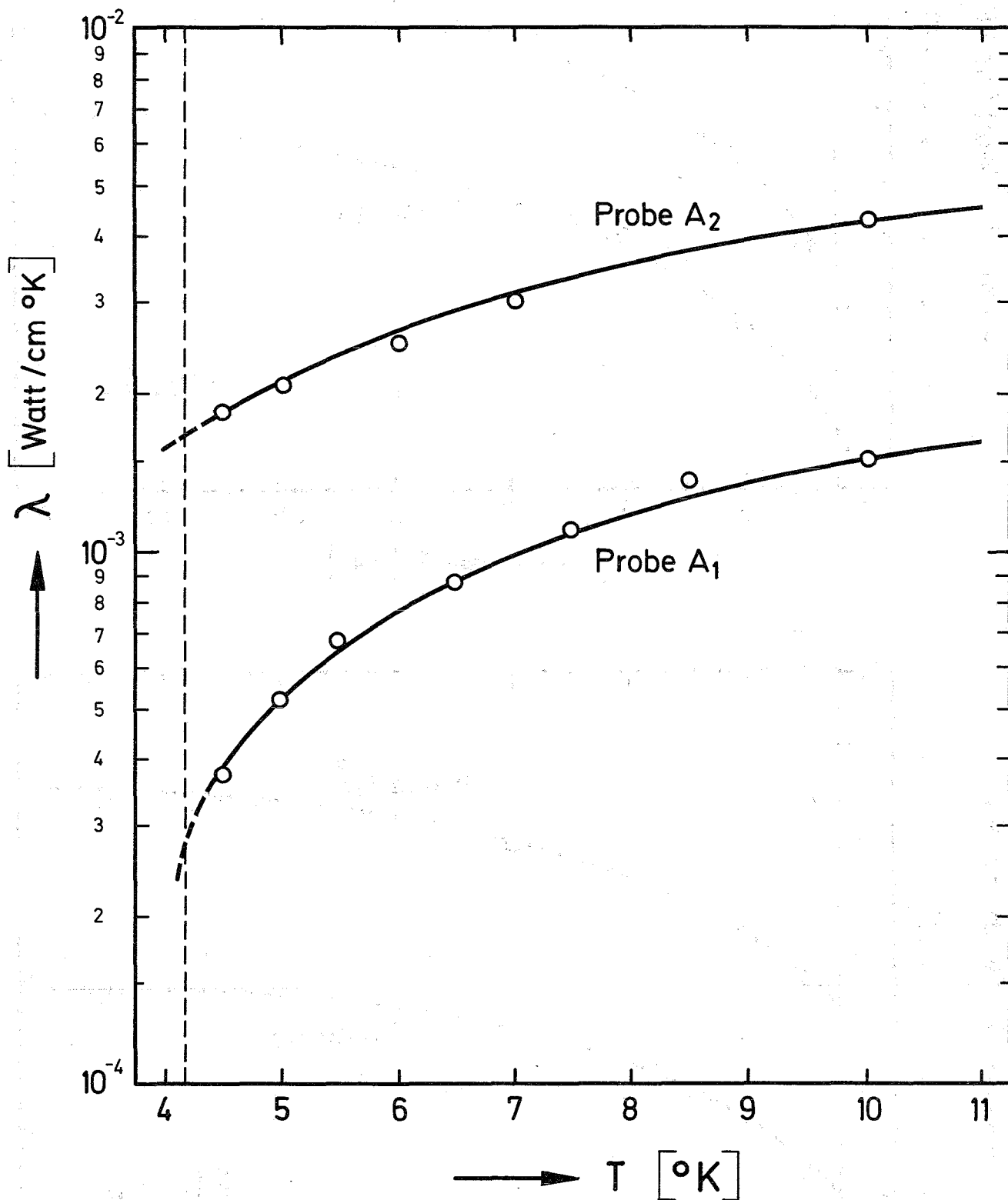


FIG. 3

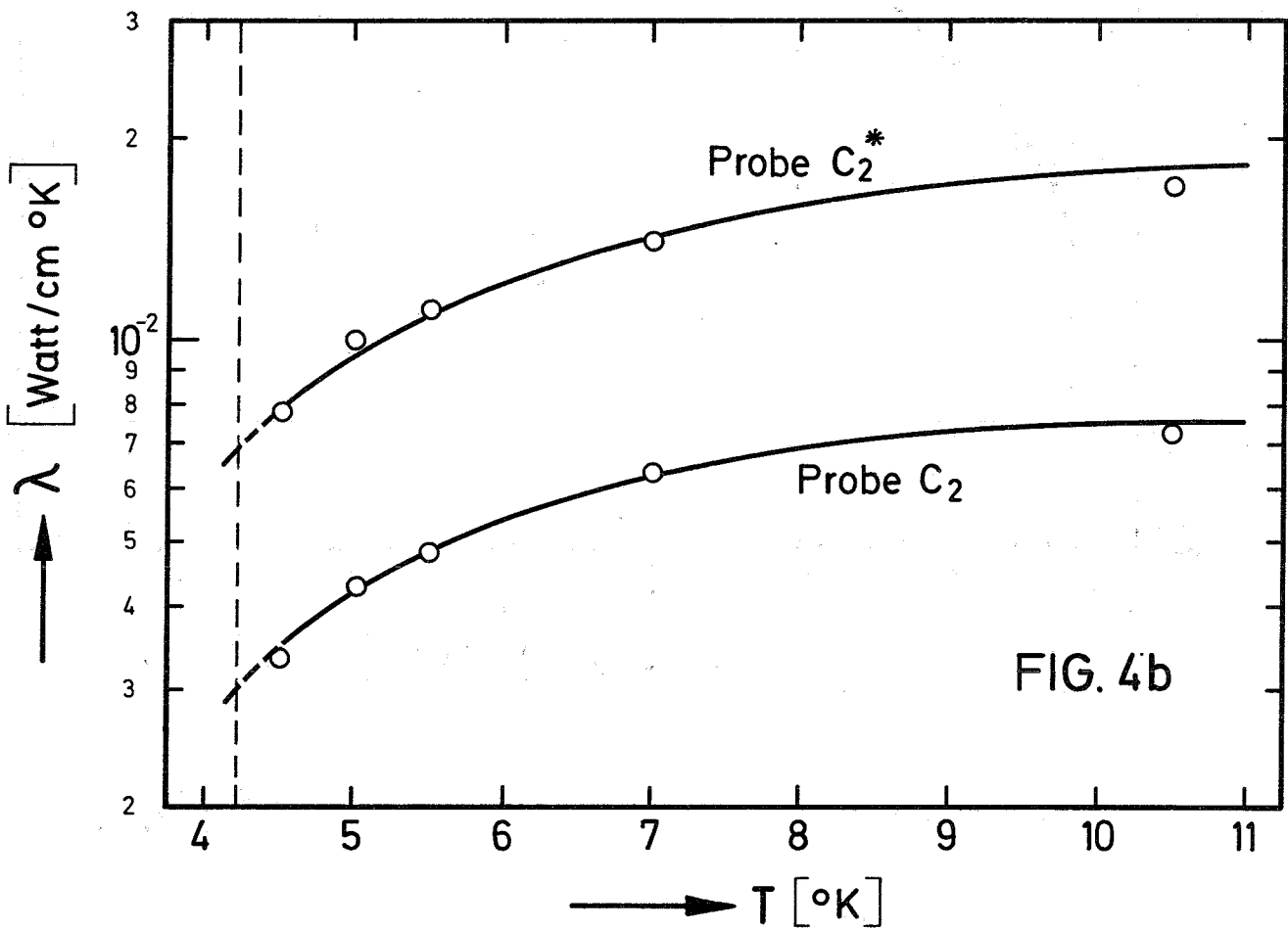
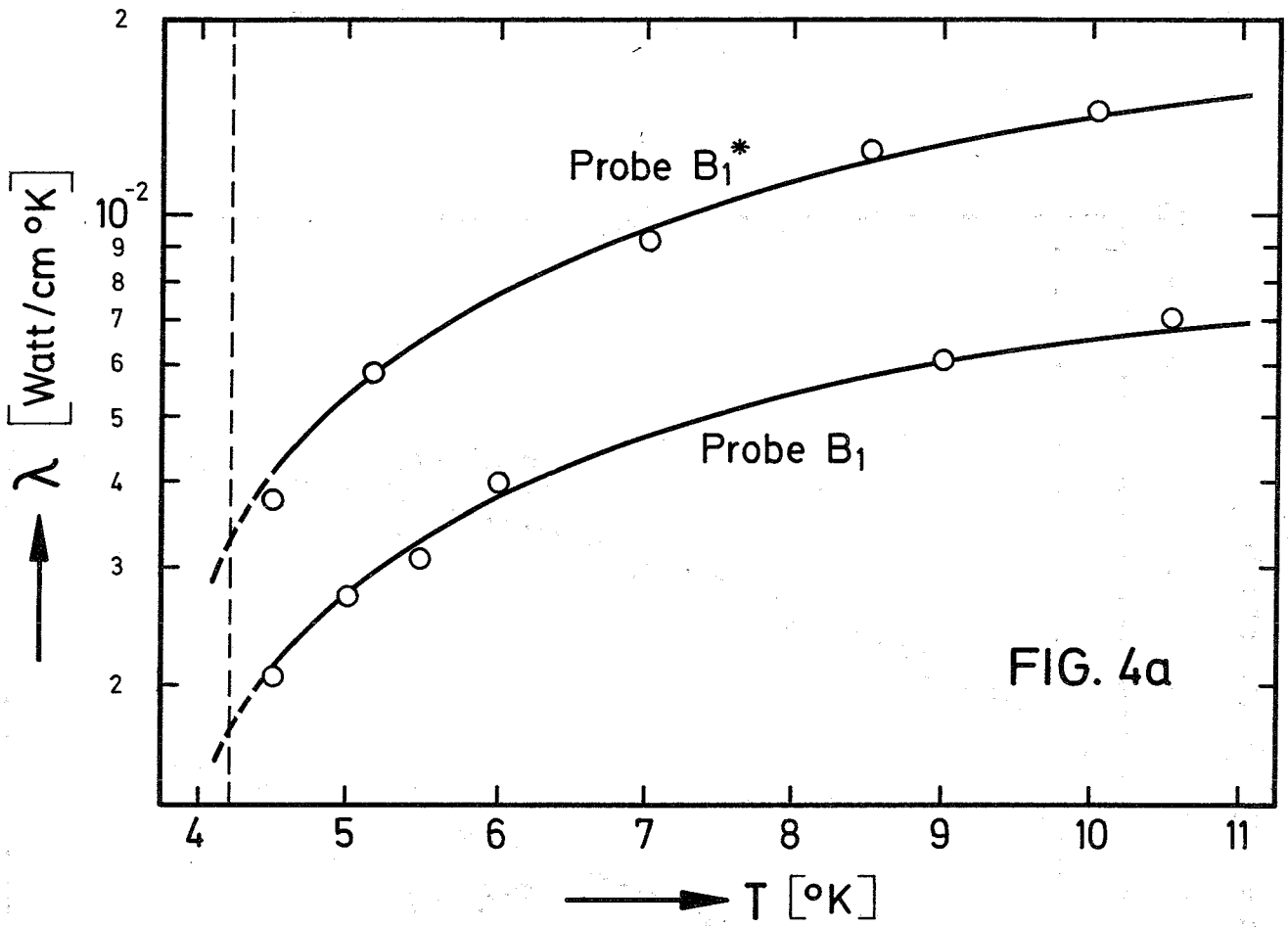


FIG. 4



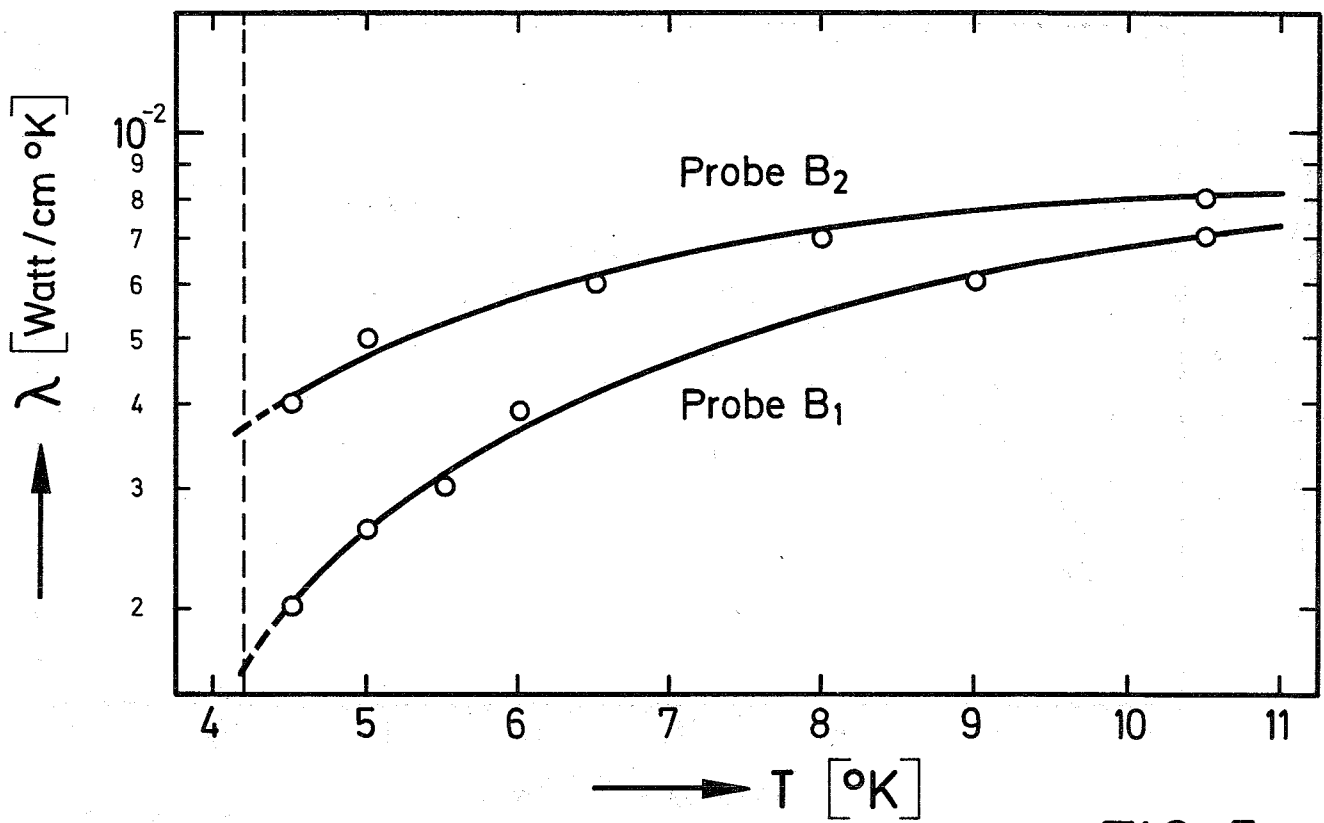


FIG. 5

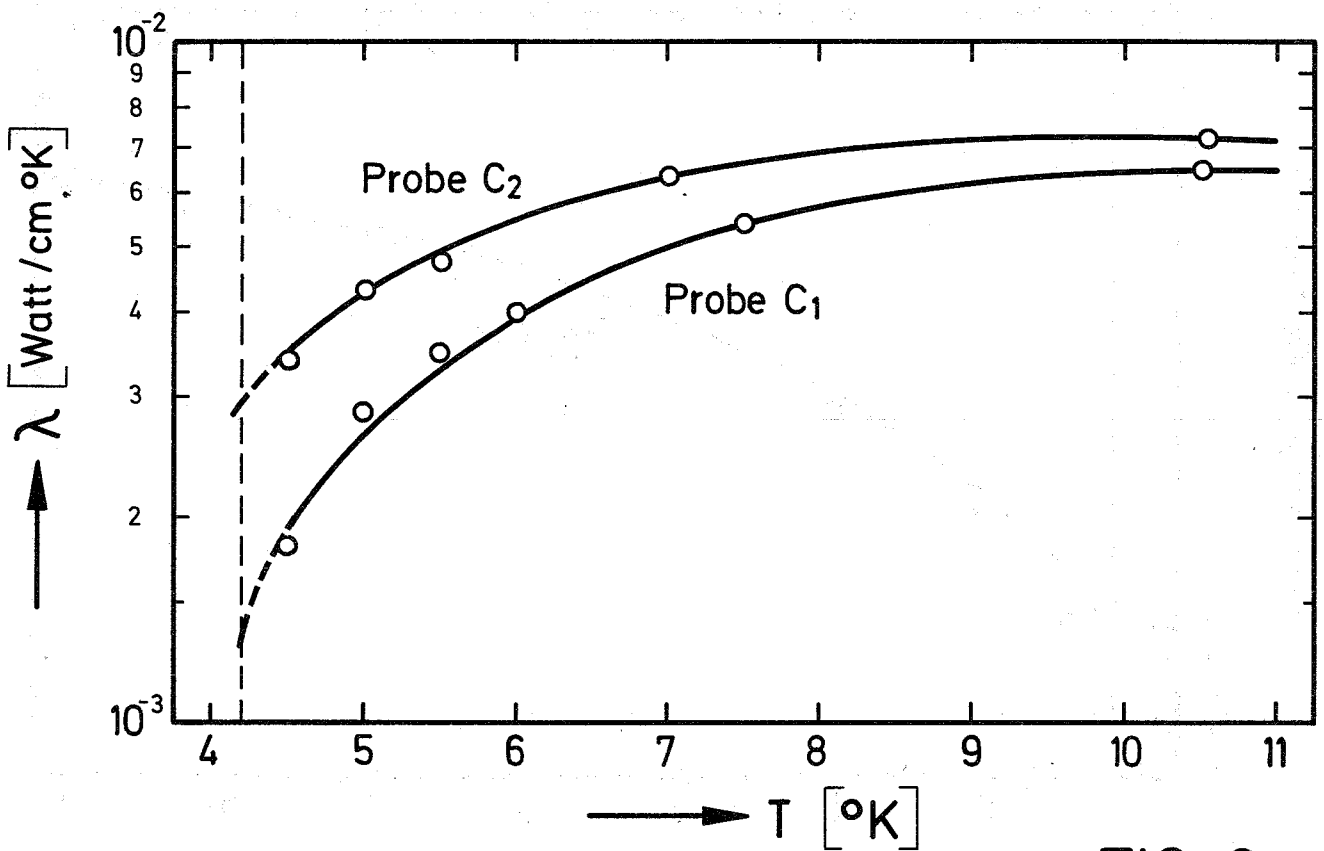


FIG. 6

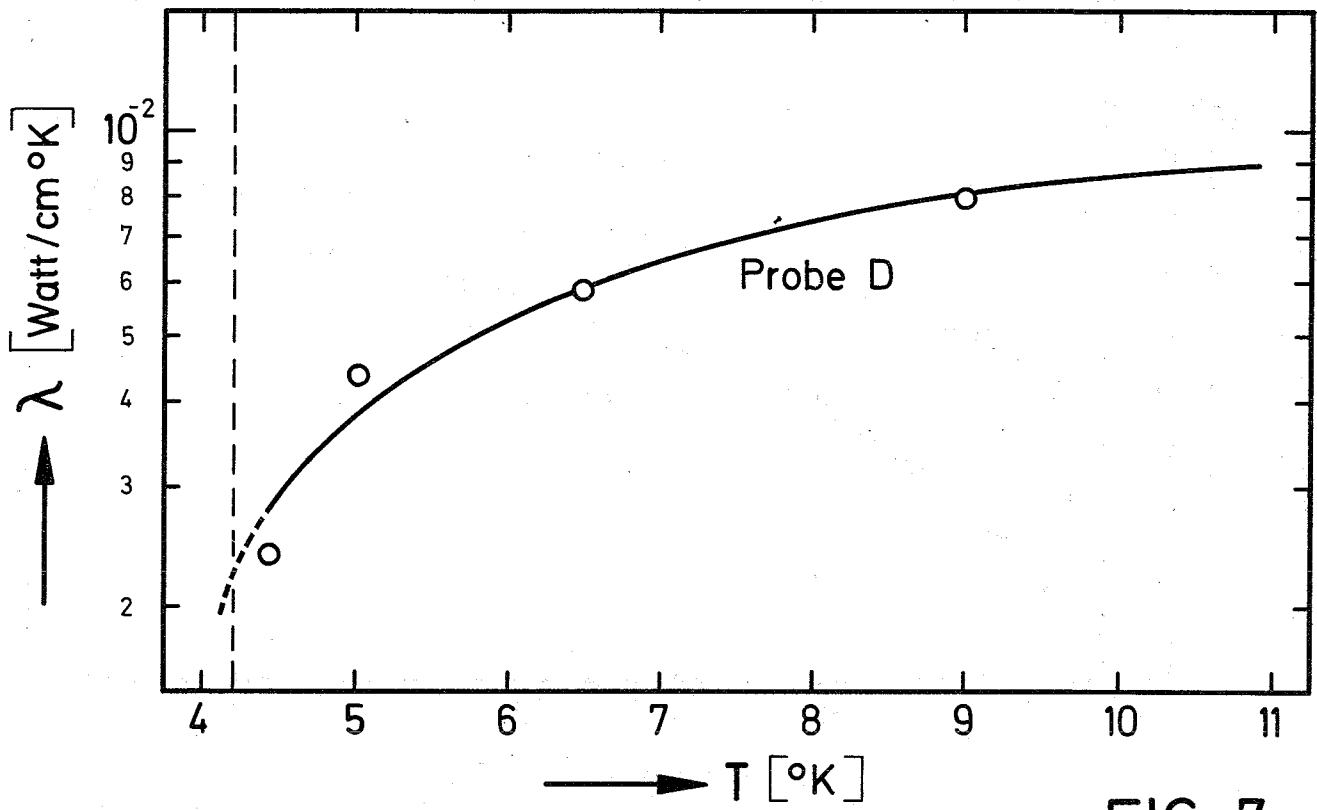


FIG. 7

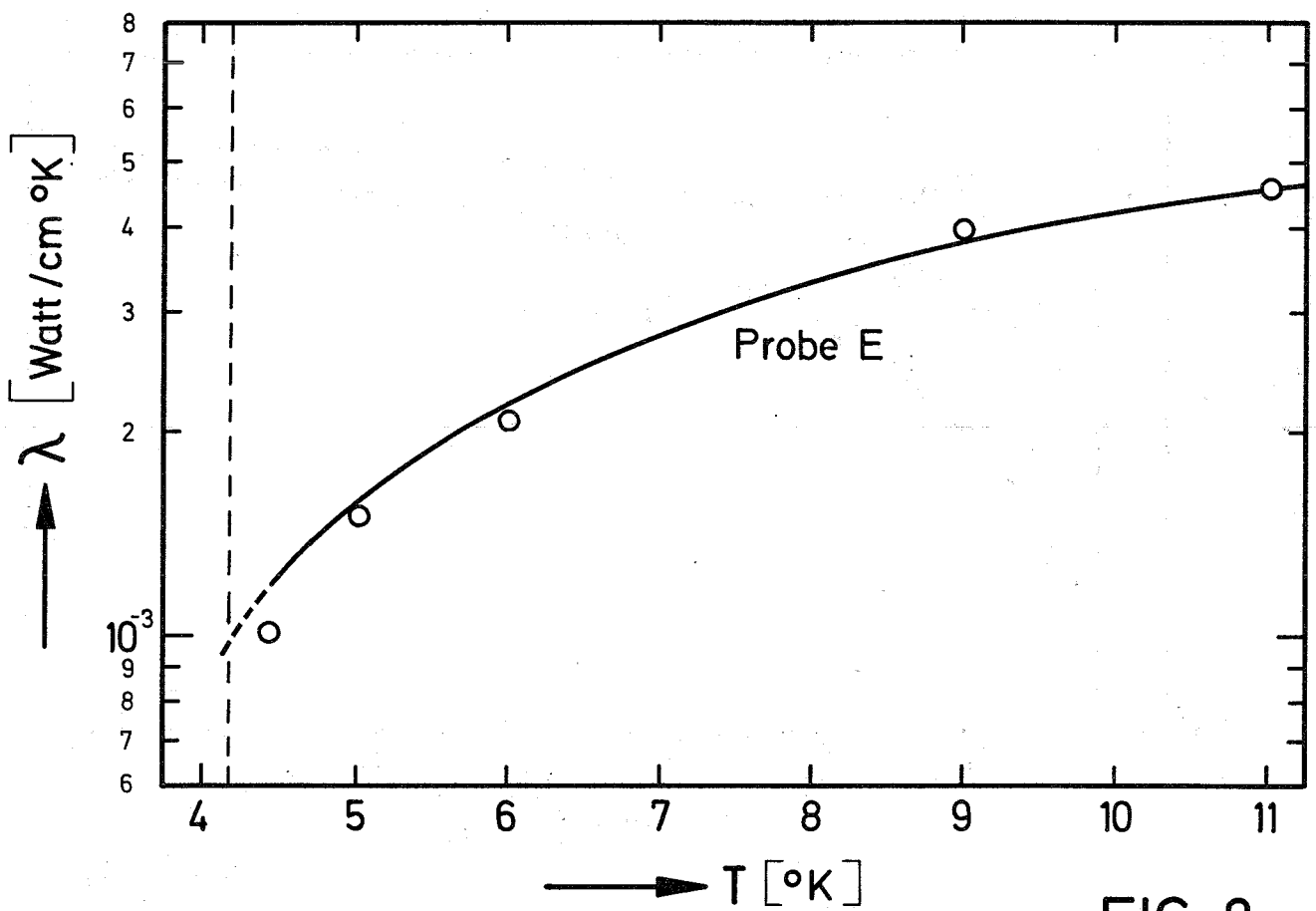


FIG. 8

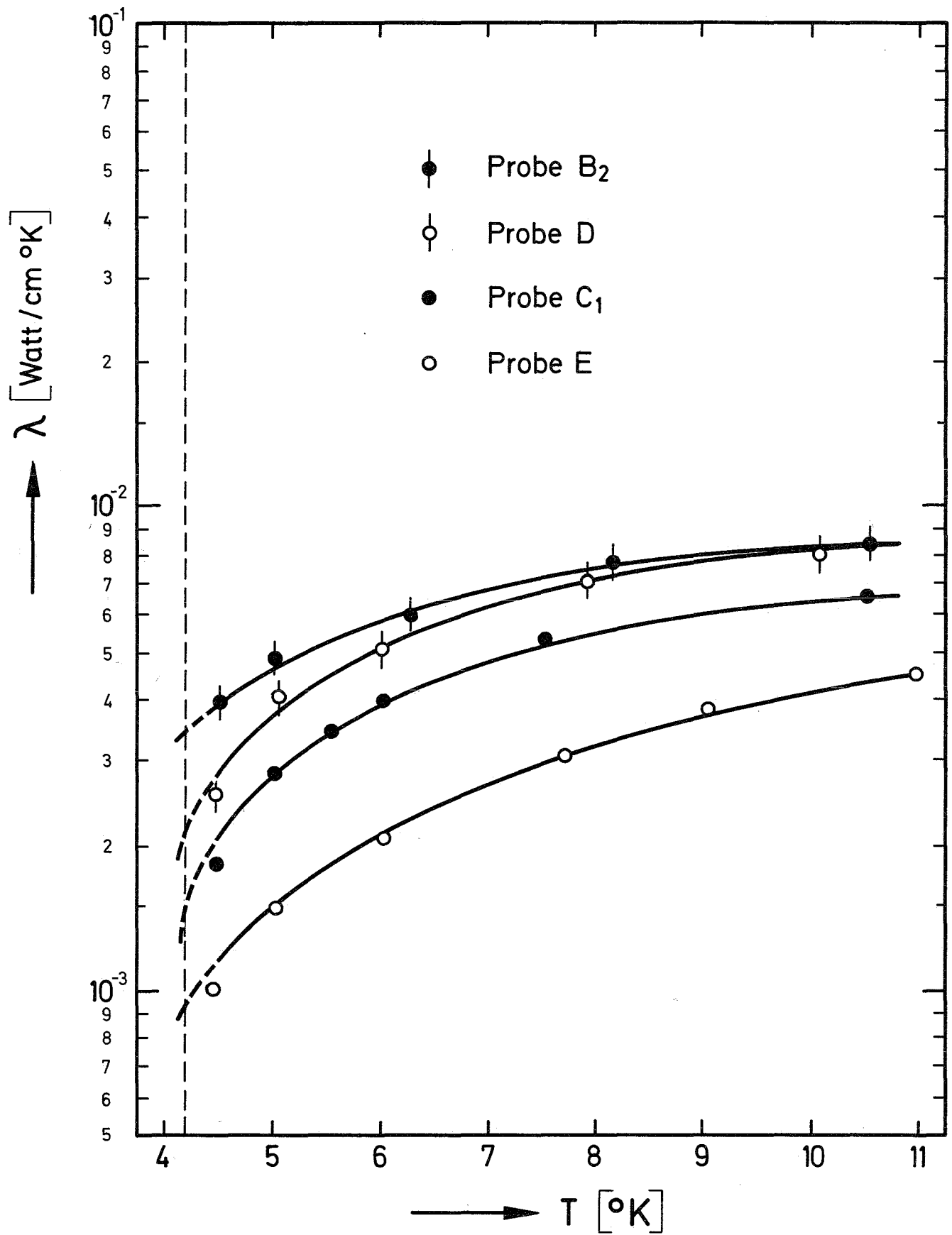


FIG. 9

