

KfK 3501
April 1983

Elektrische Stabilisierung von NbTi-Supraleitern mit Kupfer und Aluminium

P. Turowski
Institut für Technische Physik

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Technische Physik

KfK 3501

Elektrische Stabilisierung von NbTi-Supraleitern
mit Kupfer und Aluminium

P. Turowski

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

EXTRAKT DER VERHANDLUNGS-PROTOKOLLE
DES
KERNFORSCHUNGSZENTRUMS KARLSRUHE
VOM 1. BIS 10. DEZEMBER 1971

VERHANDLUNGS-PROTOKOLLE
DES
KERNFORSCHUNGSZENTRUMS KARLSRUHE
VOM 1. BIS 10. DEZEMBER 1971

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Ein handelsüblicher NbTi-Supraleiter mit einem kleinen Cu/SL-Verhältnis von 1,9 wurde durch Anlöten eines Kupfer- bzw. eines Aluminium-Bandes zusätzlich elektrisch stabilisiert. Die Leiterproben wurden in ein Heliumbad eingetaucht und durch einen Wärmepuls bei verschiedenen Transportströmen und Magnetfeldern teilweise in den normalleitenden Zustand gebracht. Aus der anschließend einsetzenden Erholung des supraleitenden Zustandes konnte eine maximale effektive Wärmestromdichte pro Leiteroberfläche von $0,45 \text{ Watt/cm}^2$ ermittelt werden, die das angrenzende flüssige Helium abführen kann. Das Aluminium kommt mit seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit im Verbundleiter voll zur Geltung, indem bei gleicher Gesamtstromdichte ein deutlich höherer Erholungsstrom zu beobachten ist als bei reiner Kupfermatrix.

Abstract

The Electrical Stability of NbTi-Superconductors with Additional Copper and Aluminium

A commercial available NbTi-superconductor with a small Cu/SC ratio of 1.9 was additionally electrically stabilized by soldering a copper tape or an aluminium tape to the conductor, respectively. The conductor samples were immersed in liquid helium and then partially brought into the normal conducting state by a heater pulse at different transport currents and magnetic fields. From the following recovery of the superconducting state an effective heat flow rate of 0.45 Watt/cm^2 through the conductor surface into the liquid helium could be determined. The high electrical conductivity of aluminium contributes fully to the electrical stability of the composite conductor by leading to a considerable higher recovery current than in a pure copper matrix at the same overall current density.

Einleitung

Kupfer wird aus fertigungstechnischen Gründen im allgemeinen als Matrixmaterial bei der Herstellung von NbTi-Multifilamentleitern genommen. Um im Kupferverbund durch einen hohen Grad an Kaltverformung am NbTi die Stromdichte im NbTi möglichst groß zu machen, wird das Cu/SL-Verhältnis vorzugsweise zwischen eins und zwei gehalten. Ein so kleiner Kupferanteil ist aber nicht ausreichend, um in Leitern für große Magnete bei auftretenden Störungen eine genügende elektrische Stabilität im Supraleiter zu gewährleisten. Daher ist es durchaus üblich, einen optimierten NbTi-Supraleiter in zusätzliches Stabilisierungsmaterial nachträglich einzubetten. Neben Kupfer ist aus Gründen eines kleinen Magnetowiderstandseffektes¹⁾ und hoher Restwiderstandverhältnisse auch Aluminium ein geeigneter Kandidat, obwohl gewisse Vorbehalte aus Gründen der Verarbeitung und der mechanischen Festigkeit zu machen sind. In der folgenden Arbeit sollte an einfachen Modell-Leitern der Gewinn an elektrischer Stabilität durch Aluminium gegenüber einer Verwendung von Kupfer rein aus der Sicht Stabilisierung untersucht werden.

Versuchsanordnung

a. Modell-Leiter

Als Basisleiter für die beiden Verbundleiter mit Cu- und Al-Stabilisierung wurde ein NbTi-Leiter F 1100 von der Vacuumschmelze genommen. Die Parameter waren:

Querschnitt	1.5 x 0.9 mm ²
Filamente	1 000
$\alpha = \text{Cu/SL}$	1.6

Dieser Leiter wurde mit einem Kupfer- bzw. mit einem Aluminiumband weich zusammengelötet, wobei für das Löten des Aluminiums ein spezielles Flußmittel benutzt wurde. Das Kupferband hatte die Abmessungen 2.5 x 0.4 mm² mit einem Restwiderstandsverhältnis von 150. Das Aluminiumband hatte die Abmessungen 2.5 x 0.33 mm² und ein Restwiderstandsverhältnis von 1420. Damit ergab sich dann für den Cu-stabilisierten Leiter ein Cu-SL = $\alpha^* = 3.52$ und für den Al-stabilisierten Leiter ein Verhältnis von normaleitender Matrix zu Supraleiter von NL/SL = $\beta = 3.2$.

b. Probenanordnung

Für die Messungen der kritischen Ströme und für die Untersuchungen des Stabilitätsverhaltens der verschiedenen Leiterkonfigurationen wurden die Leiter auf einen 3 cm langen Spulenkörper mit 9 cm Durchmesser in Form einer einlagigen Spule aufgewickelt. Auf beiden Seiten dieser Lage befanden sich Kühlkanäle mit einem Querschnitt von 0.5 x 6.9 mm². Dadurch war der Leiter am Umfang zu 58% mit flüssigem Helium benetzt, S. Abb. 1. Da die Modell-Leiter keinen einfachen Rechteckquerschnitt hatten, mußten die genauen Benetzungsfaktoren η aus der Leitergeometrie und den durch die Abstandshalter (5 mm breit) abgedeckten Flächen berechnet werden.

Zur künstlichen Auslösung von Normalleitung war um den Leiter auf einer Länge von ca. 3 mm eine Heizung mit ca. 4 Ω bifilar gewickelt und zur thermischen Isolation unter den GFK-Abstandshaltern angeordnet. Die Heizenergie wurde pulsformig eingespeist.

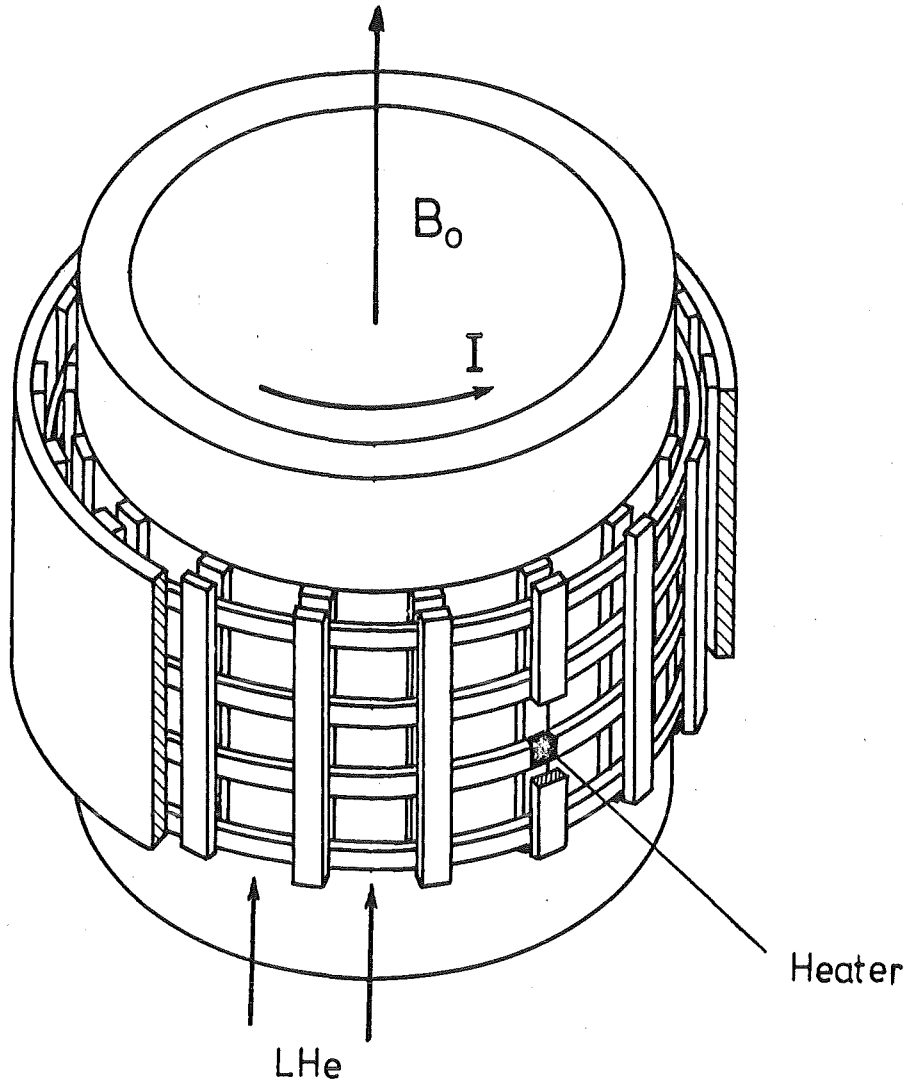


Abb. 1: Die Probenanordnung

Um das Ausbreiten und auch das Schrumpfen einer normalleitenden Zone zu beobachten, waren längs des Supraleiters Potentialabgriffe angeordnet, wobei die Potentialleitungen möglichst induktionsarm zurückgeführt wurden, um den Signalstörpegel möglichst klein zu halten.

Auslösung von Normalleitung und Recovery

Bei der Simulation einer Normalleitung auslösenden Störung durch einen Wärmepuls ist ein weites Spektrum hinsichtlich Dauer und Intensität möglich. Davon abhängig ist dann natürlich sowohl die Stromstärke, bei der noch eine Erholung des supraleitenden Zustands möglich ist, als auch der gesamte zeitliche Ablauf des Erholungsvorganges.

Die Störung durch einen lokalen Wärmepuls ist dadurch gekennzeichnet, daß mit der sich ausbreitenden Störenergie eine normalleitende Zone entsteht, in der Joule'sche Wärme produziert wird. Eine Wärmeabfuhr durch die Oberfläche des Supraleiters in das angrenzende flüssige Helium ermöglicht eine Rückkehr in den supraleitenden Zustand. Ohne auf die den Vorgang beschreibende Differentialgleichung²⁾ einzugehen, sei hier nur die aus der vereinfachten Lösung resultierende Beziehung für die zeitabhängige Ausdehnung der normalleitenden Zone angegeben

$$x_N = 2 \{4kt \left[\ln \frac{c}{\sqrt{t}} + (W-H)t - \ln \theta_c \right] \}^{1/2} \quad (1)$$

Die räumlichen Grenzen der Normalzone sind durch die kritische Temperatur θ_c des Supraleiters bestimmt. Die zeitliche Ausdehnung der Zone ist dann gegeben durch ein Wechselspiel zwischen Wärmeerzeugung W , der Kühlung H , der Störgröße c und schließlich noch durch die Wärmeleitung längs des Leiters, die sich im Parameter k ausdrückt. Mit dieser Formel läßt sich verstehen, daß durch die Größe der Störenergie die Ausdehnung der normalleitenden Zone bestimmt wird und daß es eine von der Störenergie unabhängige untere Grenze im Recovery-Strom bei $W = H$ gibt.

$$I_R^2 = \frac{h \cdot P \cdot \eta \cdot A (T_C - T_O)}{\rho(B)} \quad (2)$$

Bei den Untersuchungen des Stabilitätsverhaltens der Modell-Leiter wurde eine konstante Störenergie von 0.28 Joule am Leiter lokal mit einem Rechteckimpuls von 10 ms Dauer aufgeprägt. Die Versuche zeigten, daß sich zwischen einer Störung von 0.26 Joule und 0.1 Joule kein Unterschied im Recovery-Strom ergab. Nur der Zeitablauf des Erholungsvorganges und die Ausdehnung der Normalzone waren länger bzw. kürzer. Das steht in vollem Einklang mit der obigen Formel, wenn man davon ausgeht, daß sich Verlustleistung und Kühlleistung mit ihren Parametern W und H stationär kompensieren. Bei einer Normalzonenlänge von 24 cm und einer beobachteten Recoveryzeit von 900 ms ist die Annahme von Stationarität sicher gerechtfertigt. Erst bei ein bis zwei Größenordnungen kleineren Störungen waren die Recoveryzeiten kleiner als 20 ms. Dabei wurden dann auch Recovery-Ströme gefunden, die nahe am kritischen Stromwert lagen. Durch die bei schnellen Vorgängen mitbeteiligten Wärmekapazitäten des angrenzenden flüssigen Heliums, ergeben sich bei transienten Wärmeübergängen höhere Wärmeübergangszahlen und somit auch höhere Recovery-Ströme.

Die Versuchsparameter waren also so festgelegt, daß die Stabilitätsaussage für intensive Störungen mit Normalzonen von mehr als 10 cm gelten und damit den unteren Grenzbereich der Recovery-Ströme erfassen. Höhere Recovery-Ströme bei kleineren Störungen sind immer möglich.

Resultate

Zunächst wurden für die verschiedenen Leiterkonfigurationen die kritischen Ströme I_C für einen Spannungsabfall von 0.5 $\mu\text{V}/\text{cm}$ bestimmt. Da die Leiter den gleichen Basisleiter enthalten, sind die kritischen Ströme bis auf geringfügige Abweichungen, die in der Spannungsdefinition von I_C begründet sind, gleich.

Da die Recovery-Vorgänge unter den obigen Bedingungen im Bereich von etwa einer Sekunde lagen, ließen sich Exkursionen in die Normalleitung und Rückkehr in die Supraleitung mit einem geeigneten Schreiber verfolgen. Damit war also die Möglichkeit gegeben, die Recovery-Ströme mit Schreiberregistrierung zu bestimm-

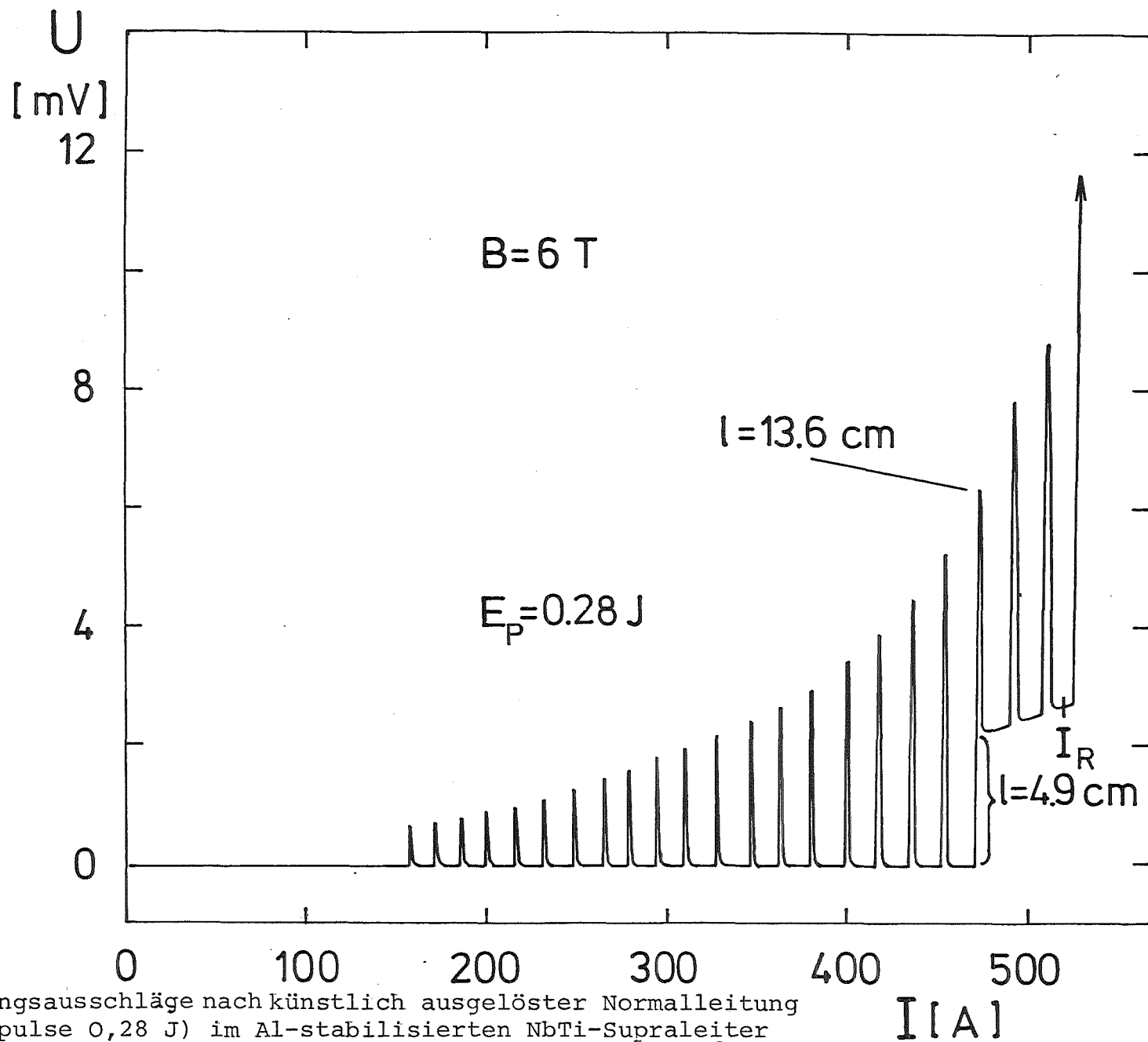


Abb. 2: Spannungsausschläge nach künstlich ausgelöster Normalleitung (Wärmpulse 0,28 J) im Al-stabilisierten NbTi-Supraleiter in Abhängigkeit vom Transportstrom bis Auslösung von fortschreitender Normalleitung. Auftreten einer stabilen normalleitenden Zone oberhalb von 470 A.

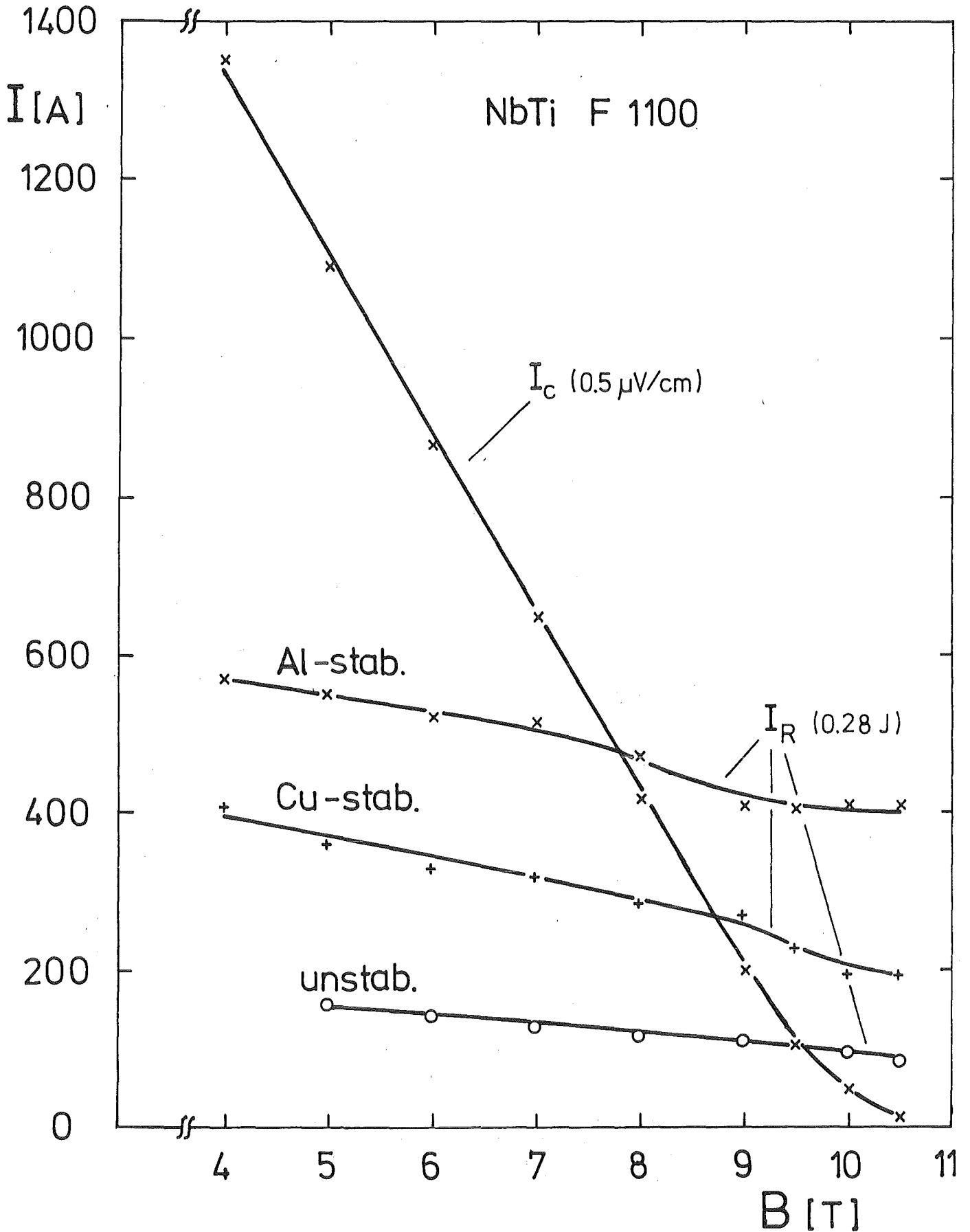


Abb. 3: Die kritischen Ströme I_c und die Recovery-Ströme I_R für eine lokale Pulsstörung mit $0,28 \text{ J}$ in Abhängigkeit vom Magnetfeld B für die drei Modelleiter (Al-stabilisiert, Cu-stabilisiert und unstabilisiert).

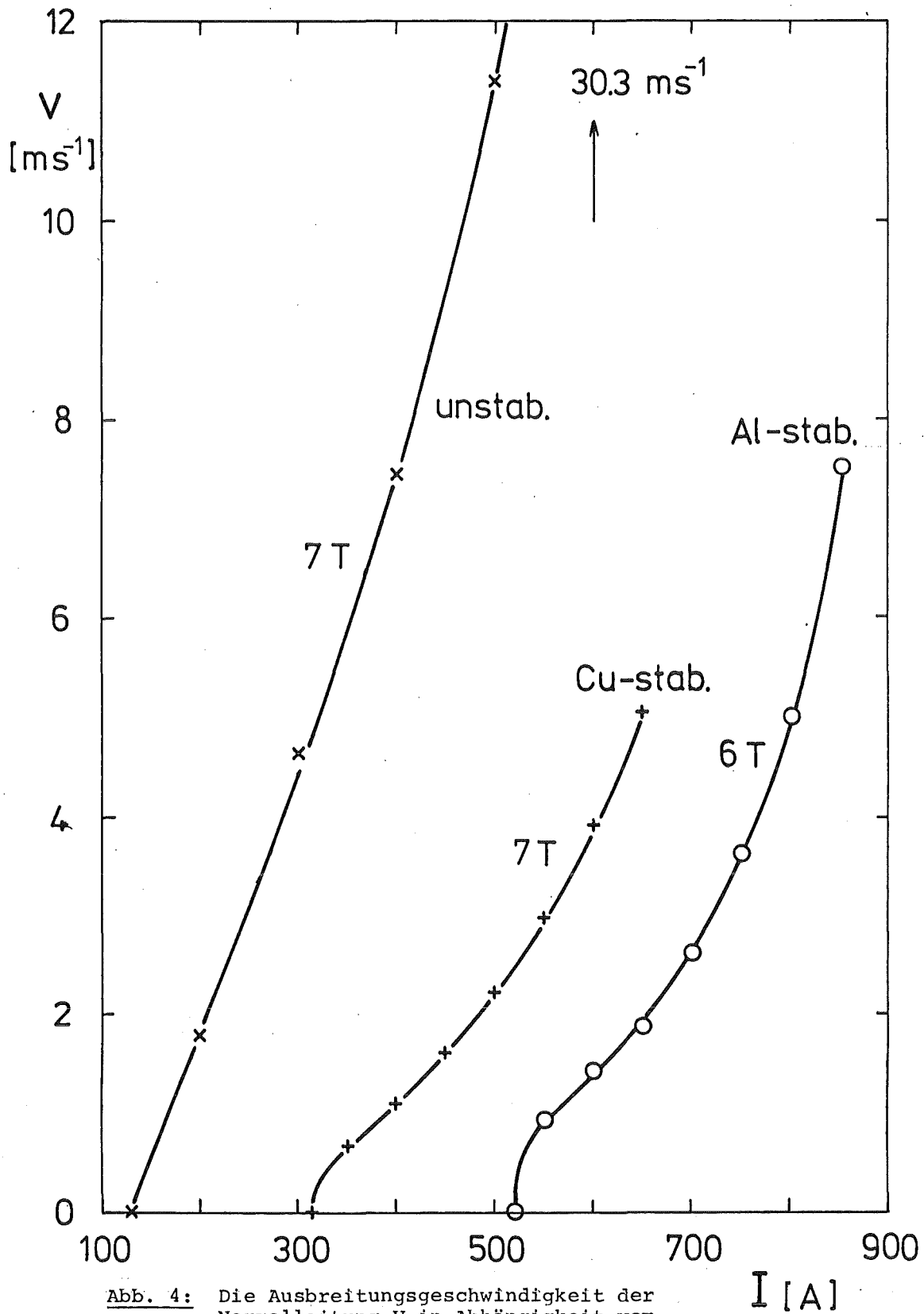


Abb. 4: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Normalleitung V in Abhängigkeit vom Transportstrom I für die drei Modelleiter bei einem Magnetfeld von 7 T bzw. 6 T.

men. Der Recovery-Strom ist als der Grenzstrom definiert, bei dem nach einer Exkursion in die Normalleitung gerade noch eine Rückkehr in die Supraleitung möglich ist. Die Abb. 2 zeigt eine solche Registrierkurve zur Bestimmung des Recovery-Stromes, bei der während des langsamen Stromanstiegs in Abständen Wärmepulse auf den Leiter gegeben wurden, bis schließlich keine Rückkehr in die Supraleitung mehr eintrat.

In Abb. 3 sind die kritischen Ströme I_C und die Recovery-Ströme I_R für den unstabilisierten, den Cu-stabilisierten und den Al-stabilisierten Leiter in Abhängigkeit vom Magnetfeld aufgetragen. Die Recovery-Ströme des Al-stabilisierten Leiters liegen wegen des kleinen Widerstands von Aluminium naturgemäß am höchsten. Daß auch jenseits der Kurve des kritischen Stromes noch Recovery zu finden ist, liegt an dem vom Stabilisierungsgrad abhängigen "current sharing" Bereich. Selbst im Grenzfall vollständiger Normalleitung trägt die Matrix stationär auch noch einen gewissen Strom.

In der vorliegenden Probenanordnung war es ohne Schwierigkeiten möglich, auch die Laufzeit der normalleitenden Front oszilloskopisch zwischen den Potentialabgriffen über eine Windungslänge von ca. 30 cm zu messen. Die sich daraus ergebende Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Normalleitung für ein Magnetfeld von 7 T ist in Abb. 4 aufgetragen. Für den Al-stabilisierten Leiter sind die Messungen in einem Feld von 6 T gemacht worden, um noch eine genügende Stromvariation zwischen Recovery- und kritischem Strom zu haben. Wie zu erwarten war, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit um so kleiner je kleiner die Joule'sche Wärme-erzeugung ist, sei es durch kleinere Stromdichte oder geringeren Matrixwiderstand, wie im Fall des Aluminiums. Die Meßwerte geben einen Eindruck von der Größenordnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bei unmittelbarem Kontakt des Supraleiters mit dem flüssigen Helium.

Für den Al-stabilisierten Leiter gilt eine Einschränkung im Stabilitätsverhalten, die möglicherweise nur bei nicht optimal verlöteten Verbundleitern auftritt: Bei Strömen, die noch unter dem oben definierten Recovery-Strom liegen, stellen sich nach einem Wärmepuls stabile normalleitende Zonen ein. So bleibt

z.B. bei 6 T und 470 A im Al-stabilisierten Leiter nach einem Wärmepuls mit einer Normalzonenausdehnung von ca. 14 cm Länge eine konstante Zone von ca. 5 cm Länge nach dem Erholungsvorgang zurück. Trotz dieser Zone stellt sich in den übrigen Bereichen auch bei höheren Strömen weiterhin nach einer Exkursion in die Normalleitung wieder Supraleitung ein. Erst oberhalb von 550 A tritt dann ein vollständiger Übergang in die Normalleitung ein. In gewissen Bereichen scheinen effektive Kühlleistung und/oder Joule'sche Verlustleistung inhomogen zu sein.

Die effektive Kühlleistung als Stabilisierungsparameter

Nach dem "equal area theorem" von Maddock³⁾ läßt sich die Stabilitätsgrenze durch eine effektive Kühlleistung q_e beschreiben

$$q_e = \frac{\bar{\rho}(B) \cdot I_R^2}{A \cdot \eta \cdot P} \quad (3)$$

Es ist eine geeignete Formel, um die Ergebnisse im Recovery-Verhalten der verschiedenen Leiterkonfigurationen zu vergleichen. Bei der Auswertung der Ergebnisse von Abb. 3 wurden die voneinander abweichenden Parameter in Matrixfläche A [cm²] (unstab.: $8.3 \cdot 10^{-3}$; Cu: $1.83 \cdot 10^{-2}$; Al: $1.66 \cdot 10^{-2}$) Benetzungsgrad η (unst.: 0.57; Cu: 0.75; Al: 0.744) und benetztem Umfang P [cm] (unstab.: 0.3; Cu: 0.686; Al: 0.672) berücksichtigt. Für den Fall des Al-stabilisierten Leiters wurde ein mittlerer spezifischer Widerstand $\bar{\rho}(B)$ ermittelt, der sich aus dem Flächenverhältnis und dem feldabhängigen spezifischen Widerstand der beiden Komponenten Aluminium und Kupfer ergab.

Das Resultat von Gl.(3) ist in Abb.5 dargestellt. Die effektiven Wärmeströme q_e liegen erwartungsgemäß nicht weit auseinander. Überraschend ist nur die Tendenz, daß die beiden Verbundleiter ein kleineres q_e haben als der monolithische Basisleiter. Möglicherweise kommt hier die unberücksichtigte Lotschicht zum Tragen, die doch einen nicht ganz vernachlässigbaren Beitrag zur örtlichen Verlustleistung liefert. Vom Aluminium hätte man wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit in Längsrichtung einen etwas höheren effekti-

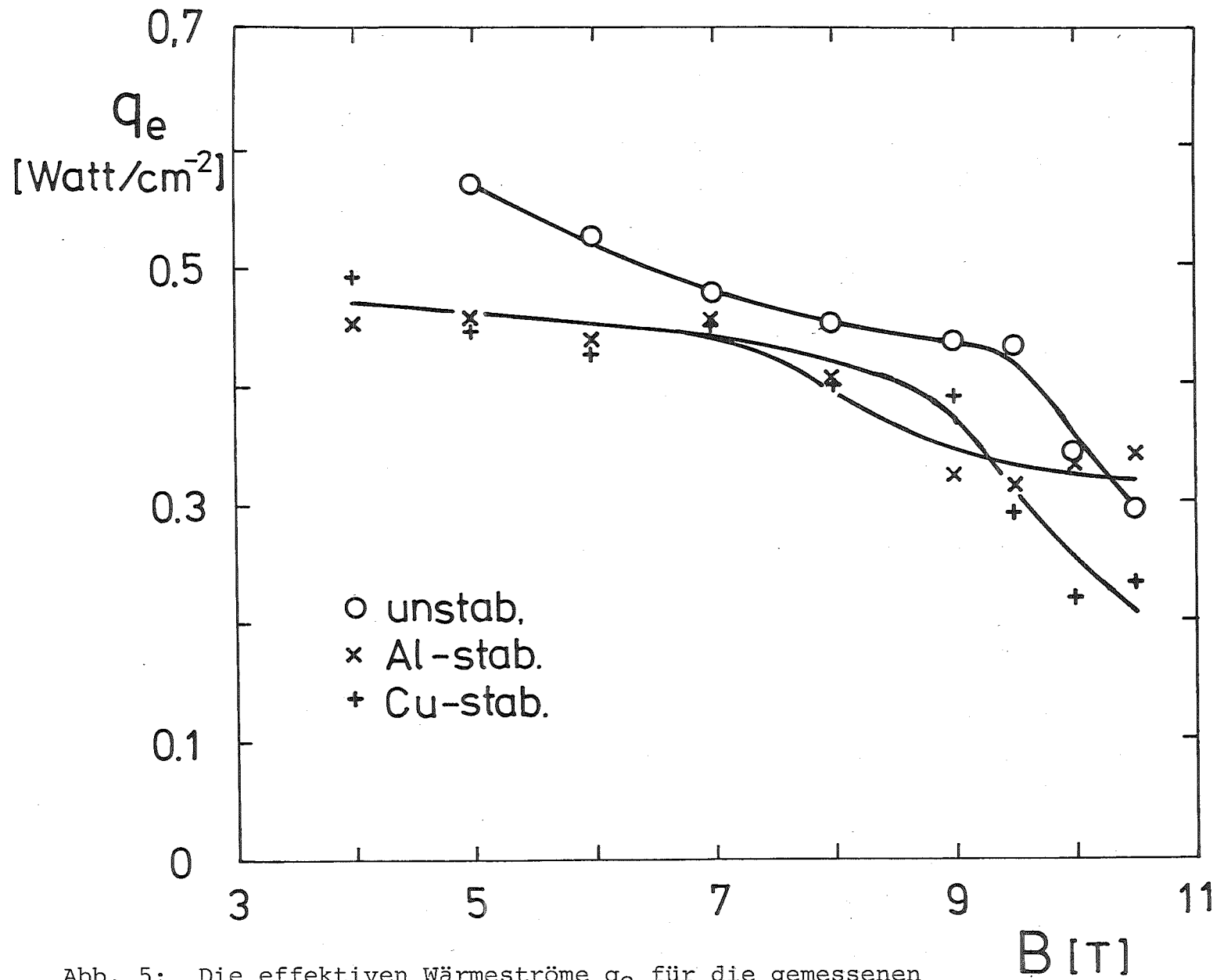


Abb. 5: Die effektiven Wärmeströme q_e für die gemessenen Recovery-Ströme I_R in den drei Modelleitern in Abhängigkeit vom Magnetfeld B .

ven Wärmestrom erwarten können. Der deutliche Knick im q_e fällt mit dem Übergang in den "current sharing" Bereich zusammen.

Schlußfolgerung:

Es hat sich gezeigt, daß die untersuchten NbTi-Leiterkonfigurationen elektrisch stabil sind bis zu einem praktisch gleichen effektiven Wärmestrom von $0,45 \text{ Watt/cm}^2$ bei 7 T mit geringen Abweichungen zu kleineren und höheren Feldern. Die hohe elektrische Leitfähigkeit des Aluminiums kommt also auch bei nachträglichen Maßnahmen zur elektrischen Stabilisierung voll zum Tragen. Sie kann ausgenutzt werden, um bei gleicher Gesamtstromdichte einen höheren Recovery-Strom als bei reiner Kupfermatrix zu erzielen oder bei vorgegebenem Recovery-Strom eine höhere Gesamtstromdichte zu erreichen. Obwohl das NbTi kein ausgesprochener Hochfeldleiter ist und der geringe Magnetowiderstandseffekt im Aluminium noch nicht voll zur Geltung kommt, sind die Vorteile des Aluminiums deutlich zu erkennen.

Herrn Ing. Brünner und Herrn Gauland danke ich für die sorgfältige Präparation der Probenanordnungen. Herrn L. Z. Lin schulde ich großen Dank für seinen unermüdlichen Einsatz bei den Messungen.

Literatur

- 1) Turowski, P., L.Z. Lin, E. Seibt:
IEEE Trans. Mag., Mag 17, 2047 (1981).
- 2) Turowski, P.:
Proc. Workshop on Stability of Superconductors, Paris,
Nov. 16, 1981, p. 151, Int. Institute of Refrigeration.
- 3) Maddock, B.J. et al.:
Cryogenics 9, 261 (1969).