



KfK 3093
Dezember 1980

Die Entwicklung eines supraleitenden 13.5 T-Magnetsystems für Mößbauer-Experimente

P. Turowski, N. Brünner, S. Förster, E. Seibt, W. Specking
Institut für Technische Physik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Technische Physik

KfK 3093

Die Entwicklung eines supraleitenden 13.5 T-Magnet-
systems für Mößbauer-Experimente

P. Turowski, N. Brünner, S. Förster,
E. Seibt, W. Specking

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung:

Das 13.5 T Magnetsystem besteht aus einem NbTi-Außenmagneten und zwei Nb₃Sn-Einsatzmagneten, die aus einem Nb₃Sn-Multifilamentleiter in der "wind-and react" Technik hergestellt wurden. Die Probleme im Zusammenhang mit der Reaktionsglühung der Nb₃Sn-Spulen bei 700 °C, z. B. die der Windungsisololation, wurden zufriedenstellend gelöst. Die Überbrückung der in Serie betriebenen Teilspulen mit Parallelwiderständen limitierte die in Quenchfall hohen Spannungen zwischen den Teilspulen und paßte die Zeitkonstanten in den Teilkreisen den Bedingungen für eine interne, zugelassene Temperatur von 100 K an. Die Nb₃Sn-Spulen erreichten ohne Training ca. 85 % des kritischen Stromes. Das gesamte in Serie geschaltete Magnetsystem erreichte ein zentrales Quenchfeld von 13.9 T und hatte damit genügend Abstand zum Betriebsfeld von 13.5 T. Das System ließ sich in mindestens 5 Minuten bis zum Sollfeld erregen. Mit einer Abschirmspule auf der Achse, 12,7 cm vom Magnetmittelpunkt entfernt, konnte für die Mößbauer-Quelle das örtliche Magnetfeld in einem Zylindervolumen von 13 mm Durchmesser und 5 mm Länge auf Feldwerte < 0.1 T kompensiert werden.

Abstract:

The Development of a Superconducting 13.5 T Magnetsystem for Mößbauer Experiments

The 13.5 T magnet system consists of an outer NbTi magnet and of two Nb₃Sn insert coils build from Nb₃Sn multifilamentary conductors by the wind and react technique. The problems in context with the heat treatment of the Nb₃Sn coils at 700 °C, e.g. the insulation of the windings, were solved in a satisfactory way. The shunting of the coil system by resistors limited the high voltages in case of a quench between the partial coils and matched the time constants of the different circuits to fulfil the boundary conditions of an admitted internal temperature of 100 K. The Nb₃Sn coils achieved about 85 % of the critical current without training. The total in series connected magnet system achieved a maximum central quench field of 13.9 T and the difference to the running field of 13.5 T was consequently sufficient. The system could be excited up to the nominal field in at least 5 minutes. With a compensating coil on the axis, 12.7 cm from the magnet center, the local magnetic field could be cancelled down to < 0.10 for a Mößbauer source in a cylindrical volume of 13 mm diameter and 5 mm length.

I. Einleitung

Vom Benutzer dieses Magnetsystems waren ein Magnetfeld von wenigstens 13 T in einer Bohrung von 50 mm Durchmesser mit einer Genauigkeit von 1 - 2 % in einem Zylindervolumen 28 mm Durchmesser und 5 mm Länge gefordert. Besondere Anforderungen an das Spulensystem von den Experimenten her bestanden darin, daß erstens an der inneren Wand der Spule möglichst kein Eisen vorhanden sein sollte und zweitens in 12,7 cm vom Zentrum für die Mößbauer-Quellen ein zylindrischer Raum mit 13 mm Durchmesser und 5 mm Länge mit einem Feld kleiner als 0,1 T geschaffen werden mußte. Eine kurze Auferregungszeit des Magneten in etwa 5 Minuten war wegen der kurzen Lebensdauer der aktivierten Präparate notwendig. Eine Realisierung der genannten Forderungen schien mit einem NbTi-Nb₃Sn-Hybridsolenoiden möglich zu sein, wobei wegen der kurzen Auferregungszeit Nb₃Sn nur in Form von Nb₃Sn Multifilamentdrähten in Bronzematrix zur Debatte stand. Wegen der kleinen Krümmungsdurchmesser in der Magnetspule kam für die Nb₃Sn-Spulen nur die bekannte "wind-and-react" Technik infrage¹⁾.

Das Feld bis etwa 7 T sollte von einem NbTi-Außenteil erzeugt werden, während weitere 6 T von zwei Nb₃Sn Einsatzmagneten beigetragen werden mußten. Der feldfreie Raum sollte durch eine kleine NbTi-Spule mit entgegengesetzt gepoltem Feld geschaffen werden.

II. Aufbau des Magnetsystems

Die Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau des gesamten Magnetsystems mit den drei Teilspulen und der Abschirmspule auf der Achse in 12,7 cm Entfernung vom Zentrum. In Abb. 2 ist eine Ansicht des fertigen Solenoidsystems zu sehen. Um den Supraleiter möglichst effektiv einzusetzen, wurden die Stromdichten abgestuft, und zwar dreimal im NbTi-Teil und ebenfalls dreimal im Nb₃Sn-Teil, wobei die innere Einsatzspule eine konstante Stromdichte hatte. Eine rechnerische Analyse in Verbin-

dung mit den I_c -B Werten der eingesetzten Supraleiter (s. Abb. 3 und 4) ergab dann die genaue räumliche Aufteilung der Stromdichten. Die Aussparungen an den äußeren Rändern der NbTi-Spule wurden gemacht, um hier ein Überschreiten des kritischen Stromes im Rückflußfeld zu vermeiden. Der stufenförmige Wickelquerschnitt der Abschirmspule ergab nach der Computerstudie das beste Resultat hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung des auf Null kompensierten Feldes. Um die Forderung nach Eisenfreiheit zu erfüllen, wurde der Spulenkörper der inneren Einsatzspule aus einer Kupfer-Zinn-Bronze angefertigt.

Das Solenoidsystem wird in Serienschaltung betrieben, um den Betriebsaufwand an Stromversorgung und den Wärmeeinstrom durch Stromzuführungen klein zu halten. Nur die Abschirmspule wird mit einem separaten Netzgerät versorgt. In Tabelle I sind die Parameter des Solenoidsystems aufgelistet.

III Der Spulenaufbau

a) NbTi-Teilspule

Der Spulenkörper besteht aus Edelstahl. Der obere Flansch ist so ausgebildet, daß an ihm die Abschirmspule befestigt wird und die abstoßende Kraft von ca. $1,1 \cdot 10^4$ N aufgenommen wird. Der Wickelzug des supraleitenden Drahtes ist so abgestuft, daß unter Berücksichtigung der Kompression des Spulenrohres alle Windungen des Wickelpaketes noch eine leichte Vorspannung haben. Damit die Kompressibilität des Spulenrohres beim Wickeln nicht zu einer Kompression der unteren Lagen führt, wurde das Spulenrohr zunächst bei einer Wandstärke von 10 mm gelassen. Nachdem die Wicklung fertiggestellt war, wurde das Innenrohr dann auf das Sollmaß, z. B. hier auf 150 mm, ausgedreht und dadurch die Wandstärke auf 2 mm reduziert. In ähnlicher Weise wurde auch bei den anderen Spulen vorgegangen, um nach dem Wickeln nur noch die unbedingt notwendige Wandstärke zu haben. Die NbTi-Supraleiterdrähte hatten rechteckigen Querschnitt,

waren lackisoliert und hatten eine Kupfermatrix mit einem Cu/SL Verhältnis α von 1,6 bzw. 2. Die Wicklung war naß gewickelt mit einem Epoxydharz, das nach verschiedenen Wickelabschnitten ausgehärtet wurde. Zwischen den Spulenflanschen und der Wicklung befand sich eine dünne Teflonfolie, um ein Verkleben und damit ein Abreißen der Wicklung unter den magnetischen Kräften zu verhindern. Trotz dieser Maßnahmen zeigte die NbTi-Spule ein ausgeprägtes Training, das bei ca. 50 % des Maximalfeldes einsetzte und mit ca. 40 Schritten das Maximalfeld beim Kurzprobenwert erreichte.

Tabelle I:

Magnetfeld gesamt B_0	13.55 T ($B_0 = 6,95 \cdot 10^{-2} I_{(A)}$)
Betriebsstrom I	195 A
Induktivität L	11,2 H
Magnetfeldenergie E	213 K Joule

NbTi:

Feldbeitrag ΔB_1	7,43 T ($\Delta B_1 = 3,81 \cdot 10^{-2} I_{(A)}$)
Stromdichten $\langle j_1 \rangle$, $\langle j_2 \rangle$, $\langle j_3 \rangle$	$\langle 1,88 \cdot 10^4 \rangle$, $\langle 2,9 \cdot 10^4 \rangle$, $\langle 3,98 \cdot 10^4 \rangle \text{ Acm}^2$
Spulenlänge l_1	20 cm
Außendurchmesser d_a	21 cm
Innendurchmesser d_i	15.4 cm
Induktivität L_1	7,22 H

Nb₃Sn:

I. Feldbeitrag ΔB_2	3,76T ($\Delta B_2 = 1,93 \cdot 10^{-2} \cdot I_{(A)}$)
Stromdichten $\langle j_1 \rangle$, $\langle j_2 \rangle$	$\langle 1,46 \cdot 10^4 \rangle$, $\langle 2,2 \cdot 10^4 \rangle \text{ A/cm}^2$
Spulenlänge l_2	15,6 cm
Außendurchmesser	14,73 cm

Innendurchmesser d_i	10,32 cm
Induktivität L_2	0,61 H
II. Feldbeitrag ΔB_3	$2,36 T (\Delta B_3 = 1,21 \cdot 10^{-2} I_{(A)})$
Stromdichte $\langle j \rangle$	10,0 kA/cm ²
Spulenlänge	10,4 cm
Außendurchmesser d_a	10,1 cm
Innendurchmesser d_i	5,44 cm
Induktivität	$5,2 \cdot 10^{-2} H$

Abschirmspule

Maximalfeld B_{\max}	5,48 T ($B = 1,43 \cdot 10^{-1} I_{(A)}$)
Betriebsstrom	38,3 A
Innendurchmesser d_i	16/22 mm
Außendurchmesser d_a	50 mm
Länge l	40 mm
Stromdichte $\langle j \rangle$	28,4 kA/cm ²

b) Nb₃Sn-Spulen:

Von den beiden Nb₃Sn-Einsatzspulen besteht der Spulenkörper der Mittelfeldspule aus Edelstahl und der der Hochfeldspule aus den eingangs erwähnten Gründen aus einer Kupfer-Zinn-Bronze. Als hitzebeständige Isolation zwischen Spulenkörper und Wicklung wurde eine 0,1 mm dicke Al₂O₃-Schicht im Plasmaspray-Verfahren auf die inneren Spulenflächen aufgetragen^{+) .}

^{+) Fa. Robert Bosch GmbH, Stuttgart}

Die elektrischen Kontakte bestehen aus Kupferplatten mit einem eingefrästen Schlitz, in den der Nb_3Sn -Leiter vor der Glühbehandlung hineingelegt wurde. Sie sind gegen den metallischen Spulenkörper durch Keramikplatten isoliert und wurden mitgeglüht. Der eigentliche elektrische Kontakt mit dem Supraleiter wurde nach dem Glühen durch Verlöten hergestellt.

Für die Hochfeldspule wurde ein Matrix-Leiter mit 1,3 mm Durchmesser benutzt, dessen CuSn-Bronze-Kern mit ca. 10^4 Nb-Filamenten außen von einem Kupfermantel (ca. 35 %) eingehüllt war, der durch eine Ta-Diffusionsbarriere gegen Zinn Verunreinigung geschützt war ⁺⁾ . Isoliert war der Draht mit einer Glasseidenumsponnung. Er wurde mit mäßigem Wickelzug auf die Spule gewickelt. Besondere Bedingungen bestanden hier nicht, da nach dem Glühen ohnehin alle mechanischen Spannungen beseitigt waren. Hohlräume z. B. an den Drahtübergängen von Lage zu Lage oder an den Drahtdurchführungen durch die Flansche wurden mit Asbest ausgestopft. In der Wicklung wurde eine Packungsdichte von $\lambda = 0,68$ erreicht.

Die Reaktionsglühung dieser Spule wurde bei 700 °C und 72 Std unter Heliumschutzgas (strömend) durchgeführt. Um beim Glühen eine Veränderung der Wicklung in den äußeren Abmessungen zu vermeiden, wurde die Spule in eine äußere Edelstahlbandage eingefast, die später entfernt wurde. Da sich die auf der Glasseidenisolation befindende Schlichte (im wesentlichen Stärkederivate) beim Glühen in Schutzgas in Kohlenstoff umwandelte und damit zu einem stark verminderten Isolationswiderstand führte, wurde die Schlichte durch eine Vorbehandlung der fertigen Spule sozusagen abgebrannt. Dazu wurde die Spule in normaler Atmosphäre bei 370 °C fünf Stunden geglüht. Durch diesen Prozeß wurde zwar ein hoher Isolationswiderstand erreicht, aber die Vorbehandlung führte bei der eigentlichen Reaktionsglühung dazu, daß die Glasfäden miteinander verschmolzen und eine spröde, glasige Struktur an-

⁺⁾ Geliefert durch Fa. IMI, Birmingham

nahmen. Möglicherweise haben Metalloxyde den Schmelzpunkt des Glases herabgesetzt. Nach der Glühbehandlung war ein Verguß mit Epoxydharz notwendig, um die versprödete Glasisolation bei thermomechanischen und magnetomechanischen Verlagerungen in der Wicklung nicht zu zerstören.

Die Mittelfeldspule, die schließlich zum Einsatz kam, enthielt einige entscheidende Änderungen, die die Isolation und den Verguß betrafen.

Der Aufbau des benutzten Nb/Bronze-Leiters war zunächst gleich, d. h. zentraler CuSn-Bronze Kern mit ca. 10^4 Nb-Filamenten eingehüllt in einen Kupfermantel (~ 30 - 35 %), der mit einer Ta-Diffusionsbarriere geschützt war. Es wurden zwei Leiterabmessungen benutzt, 0,91 mm und 1,08 mm Durchmesser⁺). Die Leiter waren mit einem dünnen Glasseidengeflecht (~ 70 µm) isoliert. In der Spule ergab sich eine Packungsdichte von 0,72.

Die Reaktionsglühung der Mittelfeldspule wurde bei 700 °C und 60 Std durchgeführt, was den in Vorversuchen ermittelten optimalen Glühbedingungen entsprach. Eine äußere Edelstahlbandage verhinderte auch hier eine Verlagerung von Windungen beim Glühen. Es gab keine Vorbehandlung, und die Glühung wurde unmittelbar in strömendem He-Schutzgas durchgeführt, um die Faserstruktur der Glasseide zu erhalten. Um den Isolationswiderstand dann wieder auf einen ausreichenden Wert zu bringen, wurde während des Abkühlvorganges nach der Reaktionsglühung bei 400 °C reiner Sauerstoff in das Glühgefäß für 15 min eingelassen. Dabei konnte der Isolationswiderstand entscheidend verbessert werden, teils durch Oxydation des auf den Glasfasern angelagerten Kohlenstoffs aber doch zu einem wesentlichen Teil durch Bildung von Kupferoxyd an der Leiteroberfläche. Zur Reduktion von Training wurde diese Spule mit Wachs vergossen, was wegen der intakten Glasfaserstruktur der Isolation möglich war. Zum Schutz gegen mechanische Beschädigung der Wicklung und zur Fixierung des Wicklungsendes wurde die Spule nach dem Wachsverguß mit einer epoxydharzgetränkten mehrlagigen Glasseidenbandage versehen.

⁺) Lieferfirma Vacuumschmelze, Hanau

IV. Die Schutzschaltung des Solenoidsystems:

Das Spulensystem ist durch parallel geschaltete Widerstände geschützt, s. Abb. 5. Der Edelstahlwiderstandsdraht ist in Spulenform in einen GFK-Körper eingelassen und umschließt außen die Magnetspule, d. h. die Widerstände befinden sich auch im flüssigem Helium. Durch diese Widerstandsbrücke ist das Magnet-system im Falle eines unvorhergesehenen Normalüberganges im Supraleiter stets passiv geschützt, auch wenn das Netzgerät und damit seine Freilaufdiode abgekoppelt sind.

Wie Untersuchungen an der NbTi-Spule gezeigt haben²⁾, breitet sich der Innenwiderstand im Quenchfalle durch Wirbelstrom (\dot{B})-Effekte so schnell über die gesamte Spule aus, daß eine Auskopplung der gespeicherten Energie nicht möglich ist. Der Innenwiderstand erreicht in weniger als 0,5 s Werte um 30Ω . Da wegen der Stromdichteabstufungen auch verschiedene Leiterquerschnitte in den einzelnen Spulenabschnitten benutzt werden, führt diese inhomogene Widerstandsverteilung im Wickelquerschnitt zu hohen inneren Spannungen (~ 800 V) im Falle eines Quenches. Eine Überbrückung der Teilabschnitte in der Spule mit Widerständen zur Spannungsbegrenzung war daher notwendig. Für die Beschaltung des gesamten Spulensystems mit Parallelwiderständen waren die möglichen hohen Spannungen an den Nb₃Sn-Spulen mit deren hohen Matrixwiderständen ausschlaggebend.

Ein Nachteil dieser Schaltungsart ist, daß das Magnetsystem zu einem gekoppelten Spulensystem wird, in dem je nach Widerstand in den einzelnen Kreisen Stromüberhöhungen möglich sind, siehe Abb. 6. Die Abklingzeit in der NbTi-Spule lag mit etwa 0,5 s fest und die Widerstände in den beiden anderen Teilkreisen wurden so ausgelegt, daß die Zeitkonstanten möglichst kleiner als 0,5 s waren, aber auch die Teilspannungen nicht zu hoch wurden. Eine Berechnung der Koppelströme³⁾ in einem Kreis gemäß Abb. 5 mit Diode ist in Abb. 7 gezeigt. Mit $R_2 = 2 \Omega$ sind Stromüberhöhungen bis zu einem Faktor 1,8 in der Mittelfeldspule zu erwarten, wenn

die NbTi-Spule als erste in die Normalleitung übergeht und die Nb₃Sn-Teilspulen supraleitend bleiben. Stromüberhöhungen sind bis zum kritischen Stromwert möglich, da wegen des hohen Matrixwiderstandes kaum eine Wirbelstromaufheizung stattfindet. Ohne äußeren Kurzschluß des Spulenkreises durch die Freilaufdiode des Netzgerätes ergeben sich etwas kleinere Stromüberhöhungen in beiden Nb₃Sn-Spulen. Eine unbekannte Größe bei diesen Überlegungen ist die Entwicklung des Innenwiderstandes in den Nb₃Sn-Spulen, der zu kleineren Stromüberhöhungen in diesen Spulen führen würde.

Die Ausbreitung des inneren Widerstandes wird von der longitudinalen Quenchausbreitung, der transversalen Ausbreitung über die Wärmeleitfähigkeit von Lage zu Lage und durch Wirbelstromaufheizung bestimmt. Der Effekt der Wirbelstromaufheizung ist in Verbindung mit Nb₃Sn-Multifilamentleitern wegen der hohen Resistivität der Matrix zu vernachlässigen. Die longitudinale Quenchausbreitung liegt bei den vorliegenden Stromdichten zwischen 1 und 10 ms⁻¹ 4). Es muß damit gerechnet werden, daß die Nb₃Sn-Spulen nur teilweise normalleitend werden und die gespeicherte Energie in diesem Teil in Wärme umgewandelt wird.

"Hot spot"-Abschätzungen für den im wesentlichen aus Kupfer und Bronze bestehenden Nb₃Sn-Leiter basieren auf dem Integralausdruck

$$j^2 \cdot \Delta t = v \cdot \left\{ \alpha_1 \int_0^T \frac{c}{\rho_1} dT + \alpha_2 \int_0^T \frac{c}{\rho_2} dT \right\}$$

wobei α_1 , α_2 der volumenmäßige Bronze- bzw. Kupferanteile, v das spezifische Gewicht und j die Stromdichte im Leiter sind. Für eine Grenztemperatur $T = 100$ K ergibt sich eine zulässige Zeitkonstante $\tau = 2\Delta t \approx 0,7$ s. Aus Quenchexperimenten an der Mittelfeldspule läßt sich abschätzen, daß der Innenwiderstand in dieser Spule in 150 ms auf ca. 1 Ω angestiegen ist, wobei der Strom in dieser Zeit von 224 A auf 153 A abgefallen ist.

Das bedeutet, daß zusammen mit dem externen Widerstand von $1,25 \Omega$ mit Sicherheit die obigen Zeitbedingungen erfüllt werden. Es läßt sich abschätzen, daß in 150 ms der heißeste Punkt in der Spule etwa 50 K erreicht hat. Damit besteht in der Spule eine beachtliche Temperaturinhomogenität, die eine inhomogene Widerstandsverteilung und demzufolge interne Spannungen mit sich bringt. Die Untersuchungen sind auf diesem Gebiet noch nicht abgeschlossen. Die Quenchausbreitung in Nb_3Sn -Spulen ist von großer Bedeutung insbesondere im Hinblick auf größere Spulen.

V. Spulentests:

Die NbTi-Außenspule wurde bis zum Erreichen des kritischen Stromwertes I_C ausgetestet. Da die Spulentests in einem Kryostaten mit Refrigeratoranschluß durchgeführt wurden, in dem das Heliumbad unter einem leichten Überdruck stand, war der I_C -Wert unter den Testbedingungen von 4,5 K um ca. 5 % kleiner als für die Betriebstemperatur von 4,2 K. Nach ca. 40 Trainingsschritten wurde ein Stromendwert von $I = 195 \text{ A}$ erreicht, was einem Feld am Supraleiter von $B_{\text{max}} = 8,25 \text{ T}$ entsprach. Entsprechend früheren Untersuchungen war auch hier jeder vorzeitige Normalübergang von einem Schallsignal begleitet (im 3 - 5 kHz Bereich), das beim Erreichen des kritischen Stromwertes dann nicht mehr auftrat. Die Häufigkeit der Schallsignale und deren Intensität nahm im Laufe des Trainings ab. Es ist aber ein gewisser Schallemissionsuntergrund geblieben. Überraschenderweise zeigte diese NbTi-Außenspule mit Feldern nahe dem maximalen Außenfeld von $B_C = 7,5 \text{ T}$ ein erneutes Training, als die mittlere Nb_3Sn -Einsatzspule in diesem Feld separat erregt wurde. Das äußerte sich darin, daß die Außenspule als erste in die Normalleitung ging und dann die Einsatzspule mitriß. Offenbar haben die geringfügigen Änderungen in der Feldverteilung und die damit verbundenen Veränderungen in den Kraftverhältnissen zu neuen Spannungsfreisetzungsführungen geführt. Erst nach einigen solchen Trainingsschritten konnte das Außenfeld in voller Höhe benutzt werden. Inter-

essanterweise zeigte eine andere NbTi-Spule von gleichen Abmessungen, aber ohne jeglichen Verguß, praktisch kein Training und insbesondere auch keine Beeinflussung durch Einsatzspulen.

Die Nb₃Sn-Einsatzspulen wurden beim ersten Betrieb im Außenmagneten aus separaten Stromversorgungsgeräten gespeist und hatten auch ihre eigenen Schutzkreise mit Schalter und Parallelwiderstand. Dabei ließen sich dann die induktiven Einkopplungsströme beobachten, wenn verschiedene Teilspulen in die Normalleitung übergingen. Als der ungünstigste Fall erwies sich der, wenn der Außenmagnet quencht, da er wegen seines schnellen Feldabfalles in den Einsatzmagneten Ströme bis zum kritischen Stromwert induzierte.

Die Nb₃Sn-Mittelfeldspule erreichte im Außenfeld von 7,3 T mit 223 A ein zentrales Quenchfeld von 11,6 T und ein max. Feld am Supraleiter von 12,3 T ohne Training. Damit wurden 85 % des kritischen Stromwertes des Supraleiters erreicht. Die Nb₃Sn-Hochfeld-einsatzspule hat z. B. bei 13,2 T am Supraleiter 83 % des kritischen Stromwertes der Kurzprobe ohne Training erreicht.

Ursachen für die beobachteten Degradationen sind nicht bekannt. Es mögen viele Gründe für die Degradation verantwortlich sein, vom nicht genauen Einhalten der Reaktionsbedingungen über das gesamte Spulenvolumen bis zu möglichen Inhomogenitäten längs des Leiters.

Das Magnetsystem wurde in Serienschaltung bei 4,5 K getestet und erreichte ohne Training einen Quenchstrom von 200 A, was einem Zentralfeld von 13,9 T und einem Maximalfeld am Leiter von 14,16 T entsprach. Damit hat das Betriebsfeld von 13,5 T bei 195 A einen ausreichenden Abstand zum Quenchfeld. In Abb. 8 sind die Feldbeiträge der Teilspulen im Vergleich zu den I_c-Werten der Supraleiter in den Hochfeldbereichen der Teilspulen gegeben. Der magnetische Rückfluß der Einsatzspulen, der zu einer gewissen Felderniedrigung in den äußeren Spulen führt und damit hier die Höchst-

feldbedingungen entschärft, ist in der obigen Darstellung nicht berücksichtigt worden. Die Maximalfeldwerte gelten also immer ohne die nächst folgende Einsatzspule.

Das Feld von 13,5 T läßt sich mindestens mit einer Erregerspannung von 7,5 V anfahren, d. h. in ca. 5 Minuten. Wegen der Schutzwiderstände und der damit festgelegten Zeitkonstanten von ca. drei Sekunden für das Magnetsystem stellt sich das stationäre Magnetfeld erst etwa 10 Sekunden nach Erreichen des Sollstromes ein. Entladen läßt sich das Magnetsystem mit einer Zeitkonstanten von mindestens 80 sec vom Sollstrom (195 A) an, ohne daß dabei den Magneten in den normalleitenden Zustand durch interne Wirbelstromaufheizung gebracht wird.

Mit der Abschirmspule ließ sich das Feld am Ort der Mößbauerquelle im Rahmen der Meßgenauigkeit auf Null kompensieren. Dabei stimmten der zu erwartende Strom in der Abschirmspule mit dem gemessenen bis auf 2 % überein. Eine Messung der Feldverteilung am Ort der Quelle wurde nicht gemacht. Am Ort der Quelle (12,7 cm vom Zentrum des Magnetsystems) gilt für das Magnetfeld auf der Achse

$$B_{(12,7)} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot I_{(A)} \text{ [T]}.$$

In Verbindung mit der Spulenkonstanten der Abschirmspule läßt sich daraus eine Zuordnung von Magnetstrom I und Abschirmstrom I_A ermitteln.

$$I_A = 0,14 \cdot I_{(A)}.$$

Eine Feldkompensation mit höherer Genauigkeit ist dann nur noch mit örtlicher Feldmessung möglich.

Das Magnetsystem sollte für den Quenchfall mit dem Kurzschluß über die Freilaufdiode eines Netzgerätes betrieben werden, um Spannungen von fast 800 Volt am Gesamtsystem zu vermeiden. Für eine schnelle Entladung (80 s) empfiehlt sich ein Serienwiderstand von 0,14 Ω mit einem Überbrückungsschalter für Aufladung.

VI. Schluß:

Der Bau der Nb₃Sn-Spulen in der "wind and react" Technik bedurfte einiger Entwicklungsarbeit, um mit den aus der Reaktionsbedingung von 700 °C resultierenden Anforderungen an die Materialien fertig zu werden. Rein vom mechanischen Aufbau mußte z. B. dafür gesorgt werden, daß keine Verlagerungen von Windungen aufgrund von verschiedenen thermischen Ausdehnungen auftraten, da nach dem Glühprozeß keine Korrektur mehr möglich war. Ein besonderes Problem stellte die Windungsisolation dar, die wegen der hohen Temperaturbelastung aus Glas- oder Quarzgewebe bestehen mußte und deren Verarbeitungsschlichte sich unter Schutzgas in elektrisch leitfähigen Kohlenstoff umwandelte, über den Isolationswiderstand reduzierte. Insgesamt läßt sich sagen, daß für alle anstehenden Probleme praktikable Lösungen gefunden wurden, die in der vorangehenden Arbeit dargestellt wurden.

Es soll auch nicht unerwähnt bleiben, daß die jetzige Mittelfeldspule eine Vorgängerin hatte, die schließlich wegen einer fortschreitenden Degradation ausgetauscht werden mußte. Diese Spule war mit einem Epoxydharz vergossen und zeigte ein ausgeprägtes Training. Dieses Training führte nicht wie üblich zu einer asymptotischen Annäherung an einen Maximalwert, sondern lief über einen Maximalwert. Mit zunehmender Anzahl von Quenchen im Magnetsystem wurde die Leistung der Mittelfeldspule immer schlechter. Dieses Verhalten ist nach unseren Erfahrungen typisch für einen z. B. durch Spannungsüberschlag entstandenen Kurzschluß, bei dem die örtliche Schädigung am Leiter durch Wärmeentwicklung bei weiteren Normalübergängen immer gravierender wird. Das Problem der Schlichte auf der Glasseidenisolation war in diesem Falle dadurch gelöst worden, daß diese sozusagen in einer Vorbehandlung der gewickelten Spule verbrannt wurde. Wie schon vorher erwähnt war die Glasseidenisolation dann nach der eigentlichen Reaktionsglühung verglast und ziemlich versprödet. Die Ermittlung der Ursachen für die zunehmende Degradation ist noch nicht abgeschlossen.

Referenzen:

1. Larbalestier, D.C., V.W. Edwards, J.A. Lee, C.A. Scott,
M.N. Wilson, IEEE Trans. on Magnetics MAG-11, 555 (1975)
2. Turowski, P.
IEEE Trans. on Mag. MAG-15, 864 (1979)
3. Maurer, W., P. Turowski,
1978, unveröffentlicht
4. Isernhagen, R.,
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1980
5. Turowski, P.,
Int. Conf. on Magnet Technology, Bratislava MT-6,
648 (1977)

Abbildungsunterschriften

- Abb. 1: Schematischer Aufbau des 13 T-Magnetsystems
- Abb. 2: Ansicht des fertigen Solenoidsystems mit dem außen angebrachten spulenförmigen Schutzwiderstand.
- Abb. 3: Die kritischen Stromwerte I_c in Abhängigkeit vom Magnetfeld B für die NbTi-Leiter (Messungen durch VAC).
- Abb. 4: Die kritischen Stromwerte I_c in Abhängigkeit vom Magnetfeld B für die Nb₃Sn-Multifilamentleiter.
- Abb. 5: Ersatzschaltbild für die Schutzschaltung des Magnetsystems.
- Abb. 6: Der vom Oszillographen aufgezeichnete zeitliche Verlauf der Ströme in den Nb₃Sn-Spulen beim Quench der Nb₃Sn-Spule I. Spur A. Nb₃Sn-Spule I und Spur B. Nb₃Sn-Spule II. Der Einfluß der in die Normalleitung überführten NbTi-Außenspule ist z. B. an dem zweiten Strommaximum von Spur B zu sehen. Äußerer Kurzschluß über die Freilaufdiode des Netzgerätes.
- Abb. 7: Der berechnete Stromverlauf in den Teilspulen in Abhängigkeit von der Zeit beim Quench in der NbTi-Spule und Erhaltung der Supraleitung in den Nb₃Sn Teilspulen.
- Abb. 8: Die Erregungskennlinie des Magnetsystems für das zentrale Magnetfeld B_0 und die Feldbeiträge zum Maximalfeld an den Teilspulen unter Vernachlässigung des magnetischen Rückflusses mit den I_c -B Werten der entsprechenden Supraleiter zum Vergleich. Die mit ⊗ gekennzeichneten Werte sind in den fertigen Spulen erreichte Maximalwerte.

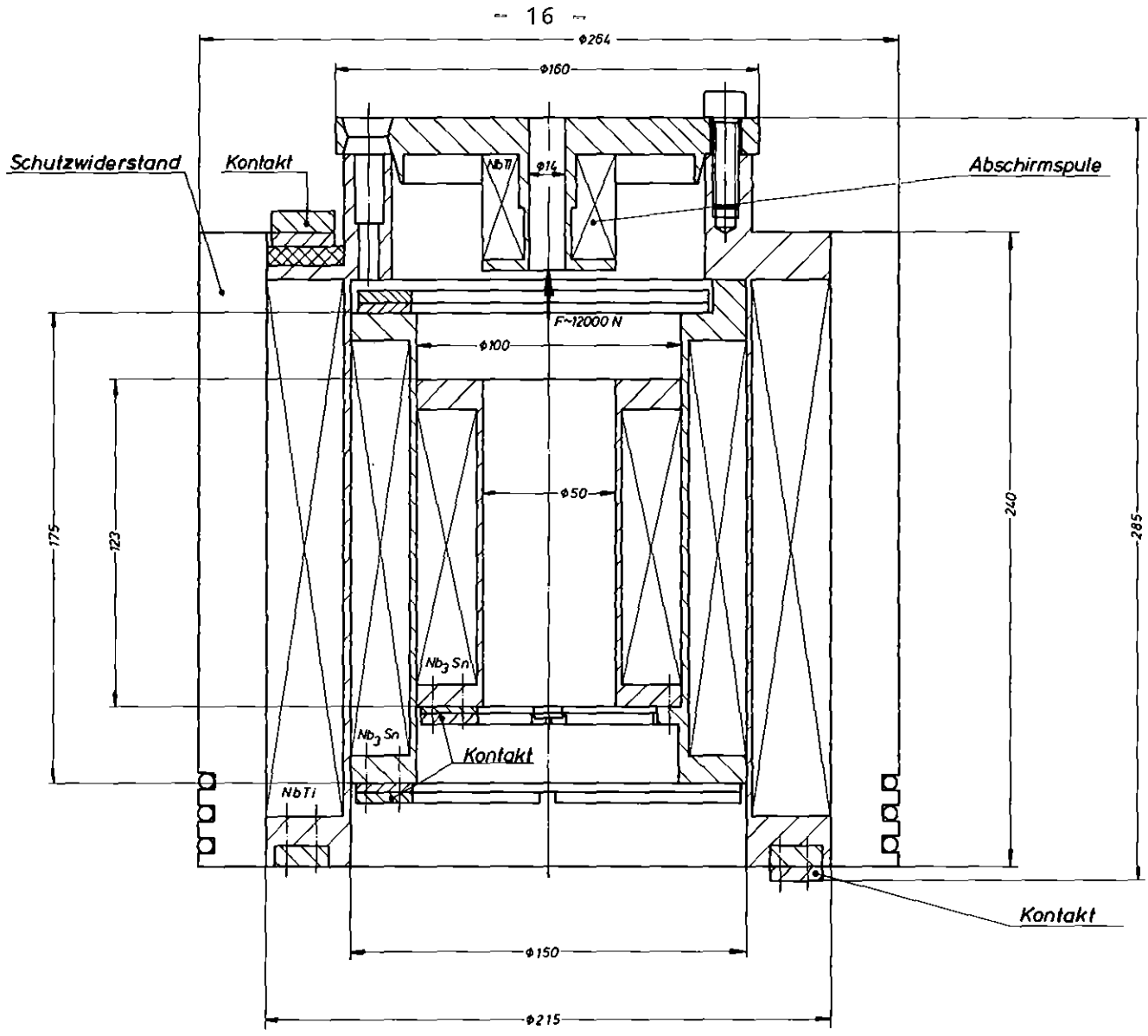


Abb.1

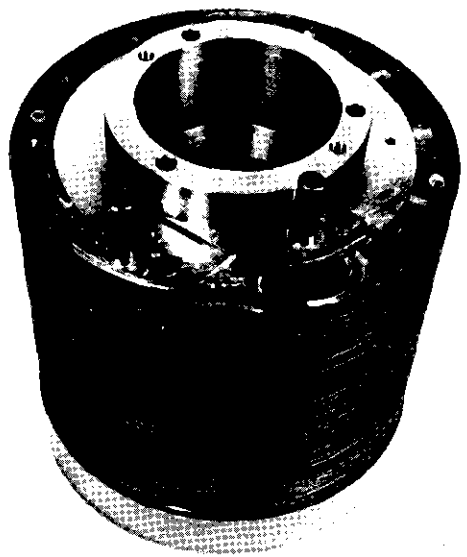


Abb. 2

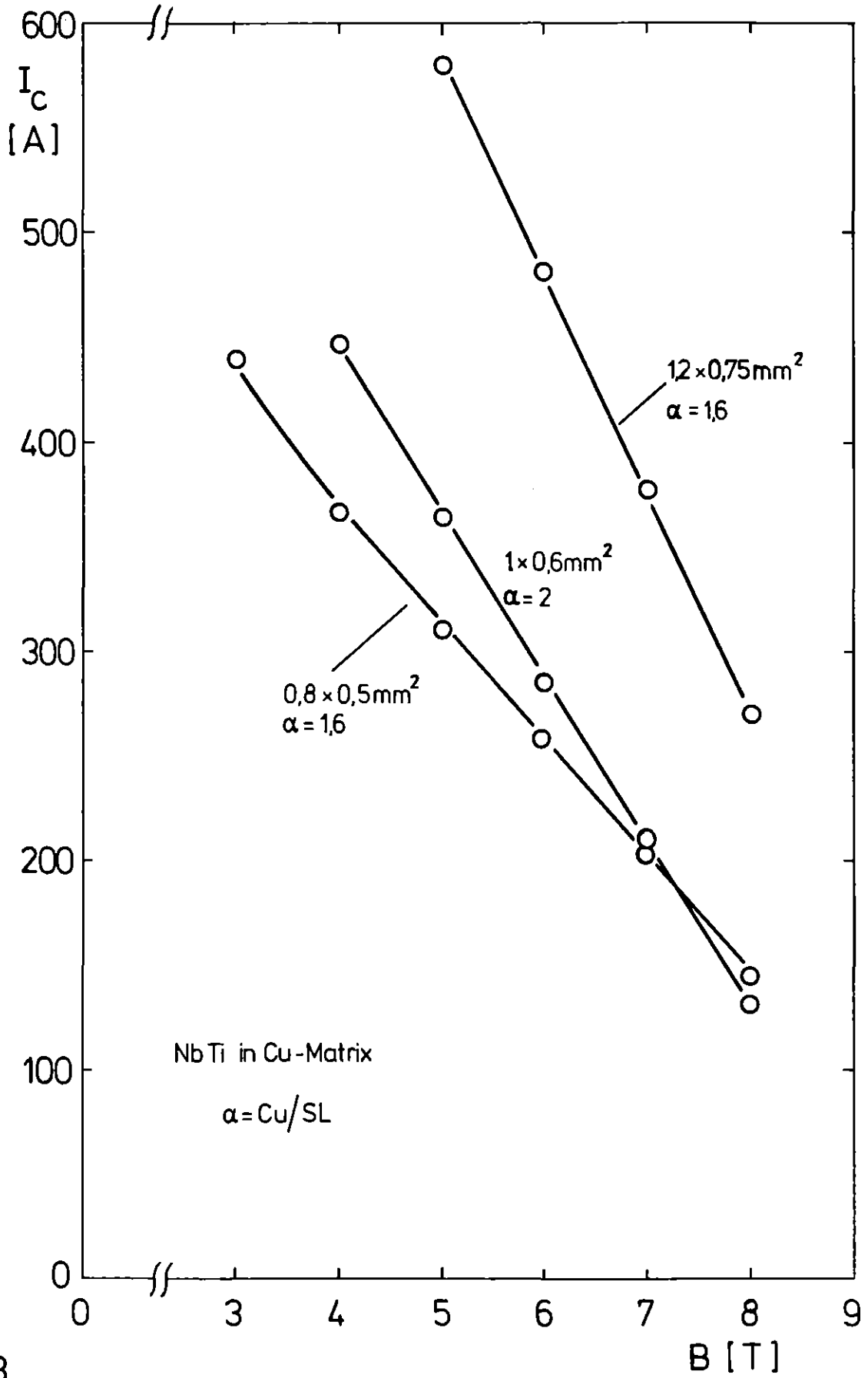


Abb. 3

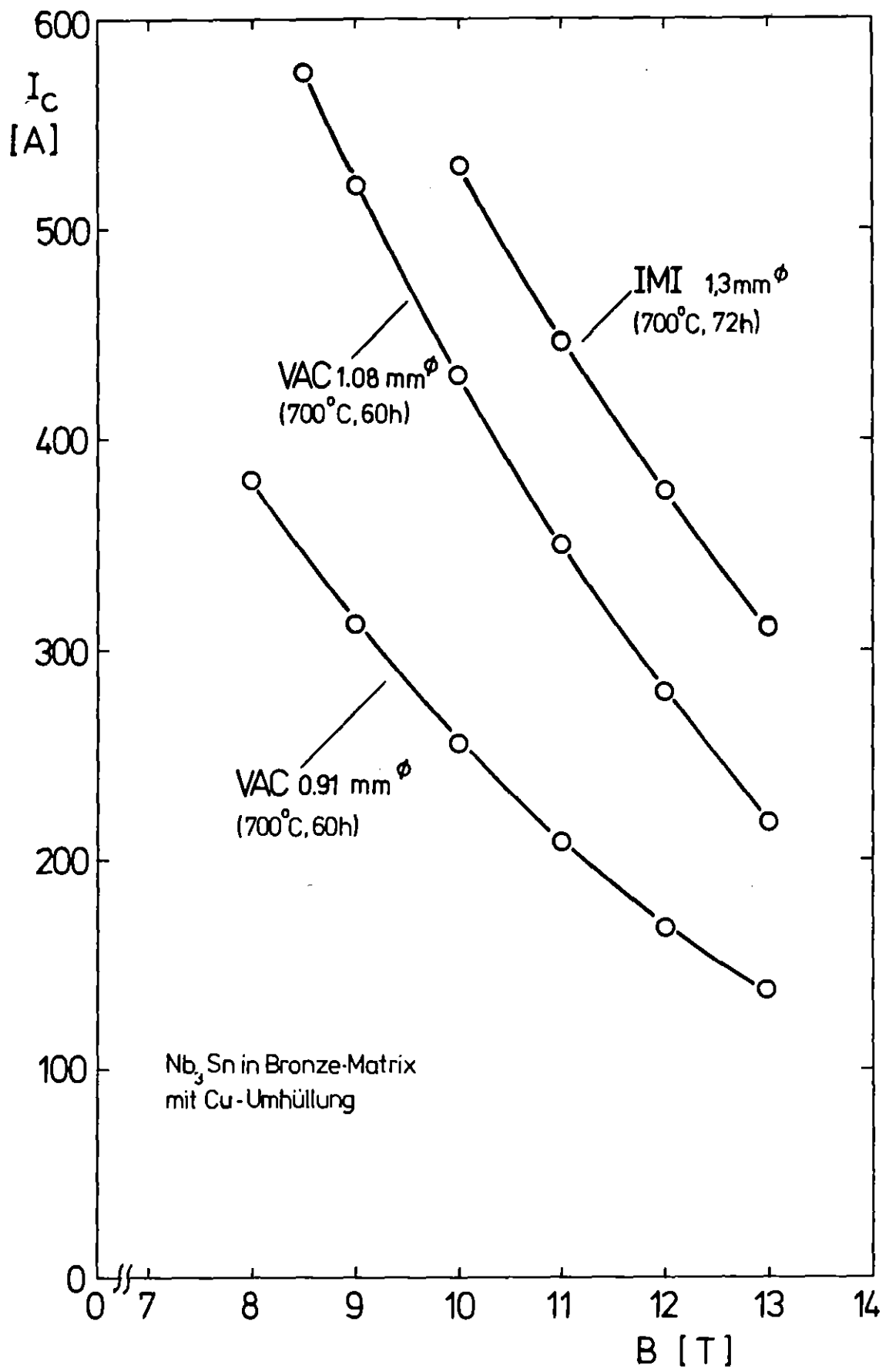
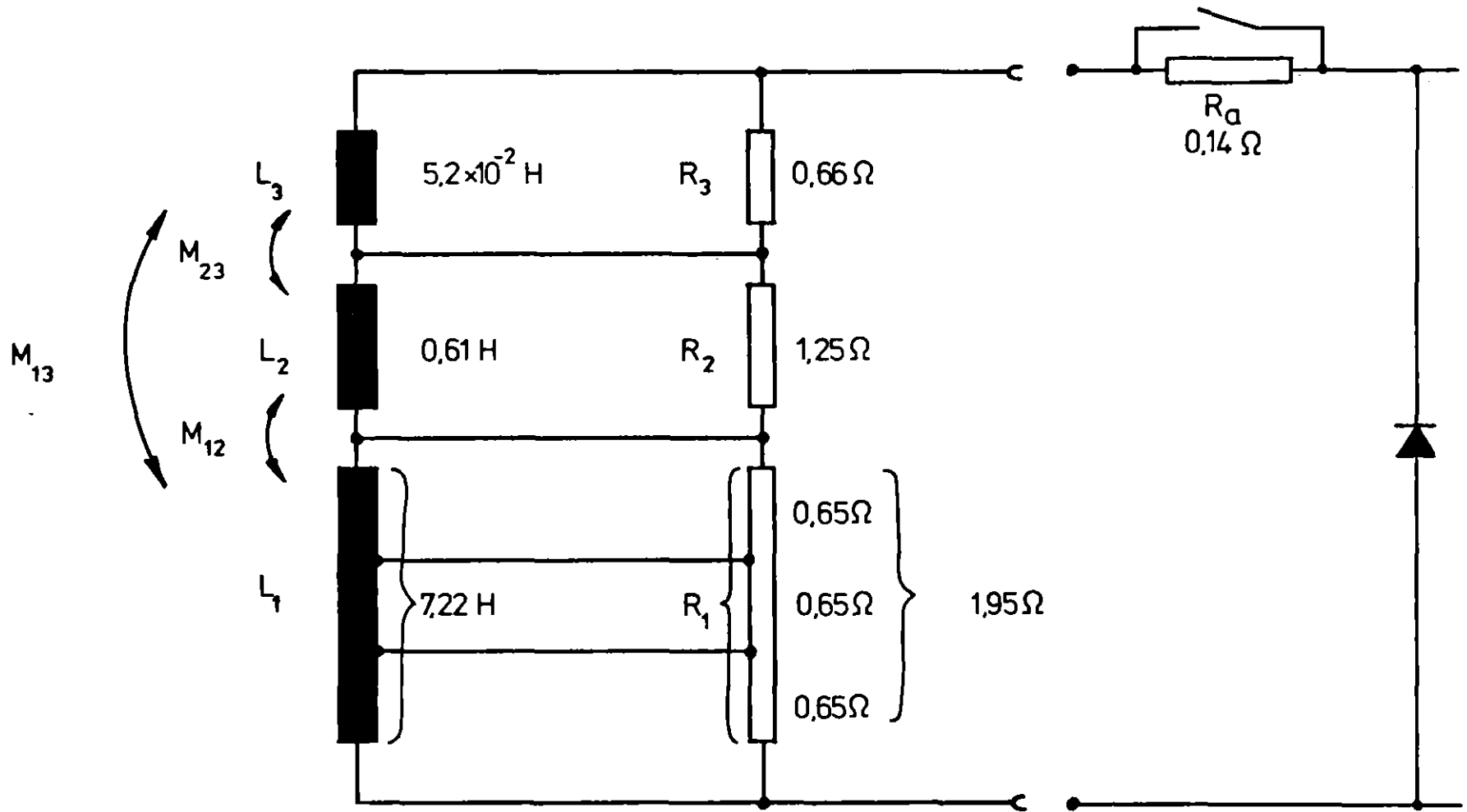


Abb. 4



$$M_{12} = 1,31 \text{ H}$$

$$M_{13} = 0,202 \text{ H}$$

$$M_{23} = 0,102 \text{ H}$$

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + 2(M_{12} + M_{13} + M_{23}) = 11,1 \text{ H}$$

Abb. 5

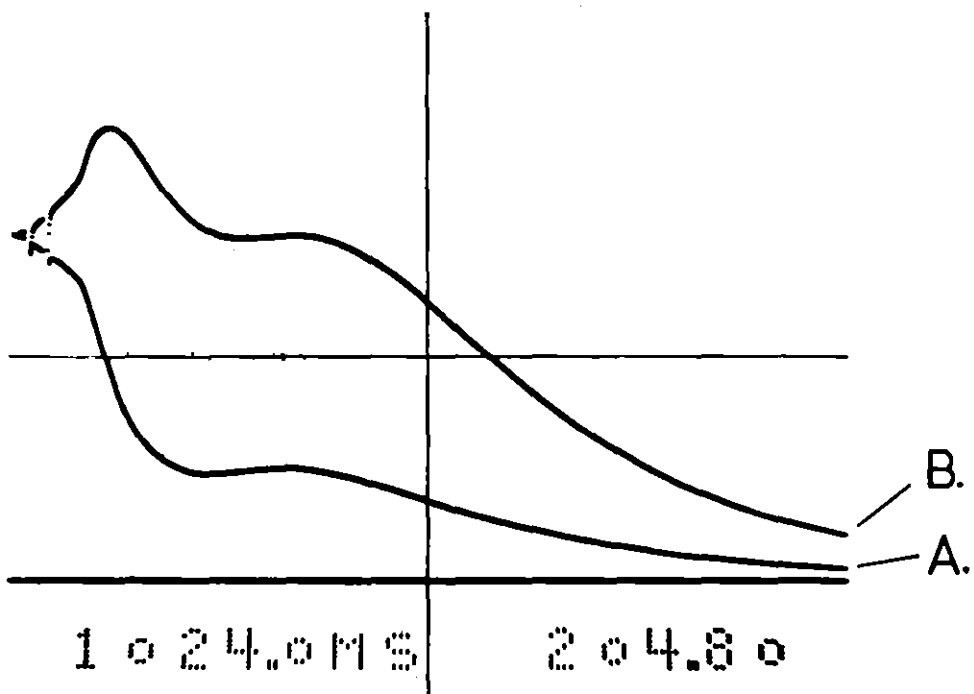


Abb. 6

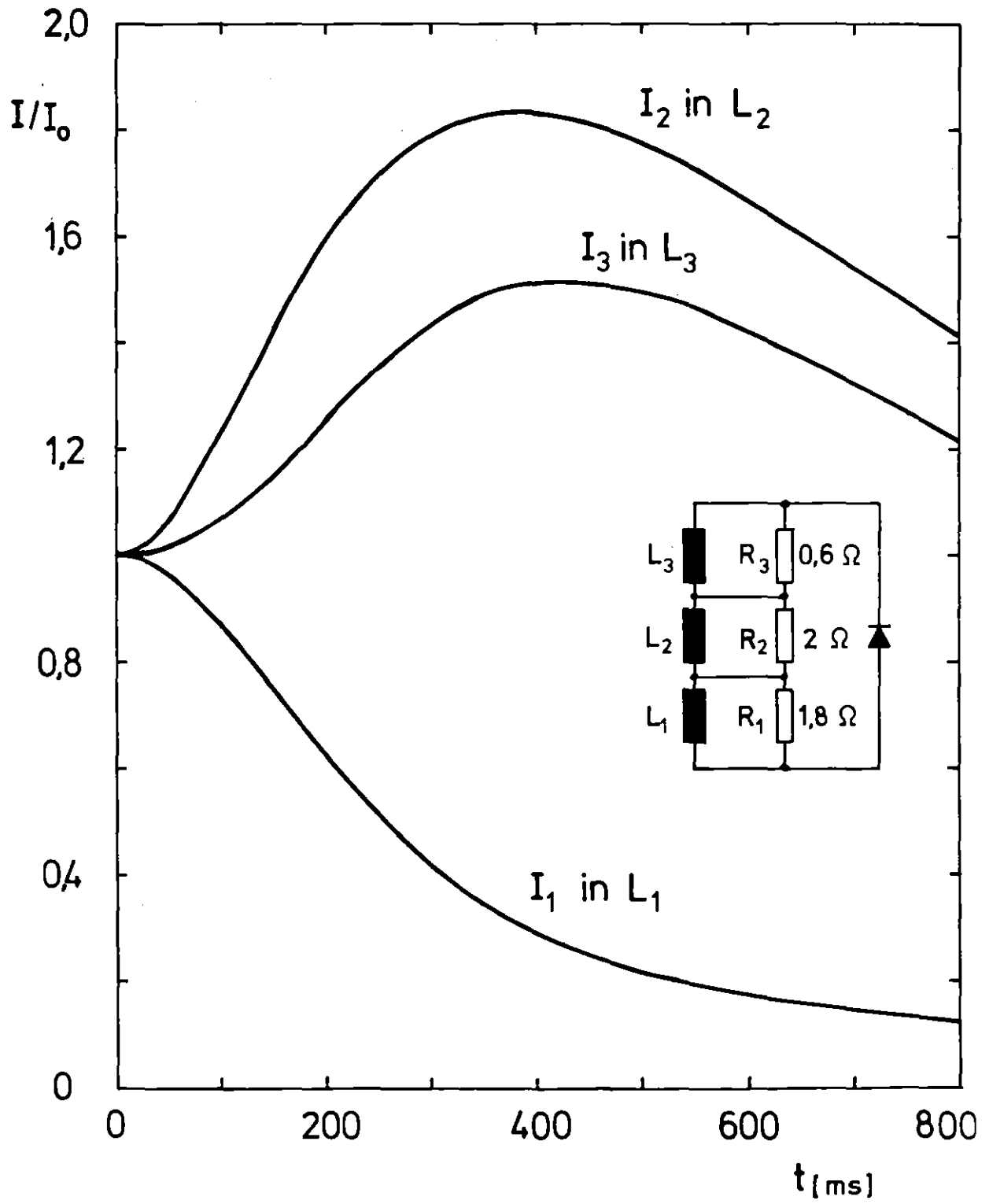


Abb.7

