

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

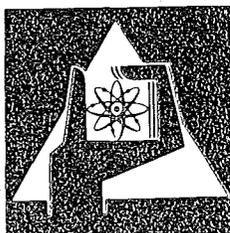
Dezember 1975

KFK 2239

Institut für Experimentelle Kernphysik

**Ein Tieftemperatur-Magnet mit Spulen aus
Reinstaluminium**

W. Schauer, W. Specking, P. Turowski



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2239

Institut für Experimentelle Kernphysik

Ein Tieftemperatur-Magnet mit Spulen aus
Reinstaluminium

W. Schauer, W. Specking, P. Turowski

Gesellschaft für Kernforschung mbH Karlsruhe

Mathematical Induction

1. Base Case

2. Inductive Step

3. Conclusion

4. Example

5. Summary

Zusammenfassung

Ein Kryomagnet mit Spulen aus Reinstaluminium in Bandform wurde gebaut und bei der Temperatur des flüssigen Helium (4,2 K) getestet. Der Bandleiter von $0,3 \times 6 \text{ mm}^2$ Querschnitt hat ein Restwiderstandsverhältnis von $r_t = 9200$, was einer "bulk"-Reinheit von $r_b = 15\ 000$ entspricht. Die geringe Banddicke wurde gewählt, um die Wirbelstrom-Verlustbeiträge im Pulsbetrieb zu reduzieren. Das Widerstandsverhältnis wird durch den Magnetowiderstand im Hochfeld-Sättigungsbereich bei 4,2 K auf etwa den halben Nullfeldwert herabgesetzt. Dennoch konnte ein Gewinnfaktor G von 20 gegenüber Raumtemperatur-Betrieb erreicht werden. - Der Magnet besteht aus zwei Paaren von abgebogenen "race-track"-Spulen, die in ein lamelliertes Eisenjoch eingepaßt sind. Er erreichte mit 4 Tesla bei 200 A Magnetstrom seine Sollwerte bei 4,2 K. Verlustmessungen wurden im Gleichstrom- und Pulsbetrieb durchgeführt. Das Feld- und Verlustverhalten bei höheren Temperaturen kann aus früheren Messungen an "pan-cake"-Spulen sowie anhand von Kurzproben-Untersuchungen extrapoliert werden. Im Vergleich zu Supraleitungsmagneten ist ein Aluminium-Kryomagnet im Temperaturbereich um 10 K bei Feldamplituden von $B \leq 4$ Tesla und Pulsfrequenzen von $f \geq 0.5$ Hz eine konkurrenzfähige Alternative.

Abstract

"A Cryomagnet with Coils wound of High Purity Aluminium"

A cryomagnet with coils wound of an aluminium tape conductor has been built and tested at liquid helium temperature (4.2 K). The tape conductor with a $0.3 \times 6 \text{ mm}^2$ cross section has a residual resistivity ratio of $r_t = 9200$ corresponding to a bulk purity of $r_b = 15\ 000$. The small tape thickness was chosen to reduce loss contributions due to eddy currents during pulse mode operation. The resistivity ratio is diminished to about half its zero field value if it is affected by the

magnetoresistance in the high field saturation region at 4.2 K. Nevertheless, a gain factor of 20 could be reached compared to room temperature operation. - The magnet consists of two pairs of race-track coils bent up at their ends, which fit into the gap of a window-frame iron yoke. Design values at 4.2 K were reached with 4 Tesla at 200 A. Loss measurements were performed during dc and triangular pulse mode operation. The field and loss behaviour at elevated temperature can be found by extrapolating previous results from pancake coils and short sample measurements. Compared to superconducting magnets, an aluminium cryomagnet may be regarded a competitive alternative if it is operated at about 10 K at field amplitudes $B \leq 4$ Tesla and frequencies $f \geq 0.5$ Hz.

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

=====

	Seite
Zusammenfassung/Abstract	
1. Einleitung	1
2. Bandleiter aus Reinstaluminium	3
3. Aluminium-Kryomagnet	7
4. Testergebnisse	8
5. Diskussion und Optimierungsfragen; Vergleich mit Supraleitungsmagneten	10
I Abbildungen	
II Literatur	

1. Einleitung

Die Erzeugung hoher Magnetfelder mit konventionellen Spulensystemen, die aus Drahtleitern gewickelt oder aus Scheibenleitern (BITTER-Spulen) aufgebaut sind, führt zu hohen OHM'schen Verlusten im Megawatt-Bereich. So liegen z.B. die Verluste für wassergekühlte BITTER-Magnete, wie sie an der Hochfeld-Magnetanlage in Braunschweig¹⁾ und am 'Service National des Champs Intenses' (S.N.C.I) in Grenoble²⁾ mit Feldern zwischen 10 und 15 Tesla in einem Nutzraum von 5 cm Durchmesser betrieben werden, im Bereich von 5 bis 10 MW.

Zwei Wege bieten sich beim derzeitigen Stand der Magnettechnologie an, die Verluste zu verringern. Dies ist einerseits der Einsatz supraleitender Magnete, mit denen man heute bei Verwendung von Supraleitern wie Nb₃Sn und V₃Ga Felder bis zu 18 Tesla bei Heliumtemperatur (4,2 K) erreicht, zum andern die Verwendung von Kryomagneten, bei denen ein auch bei tiefen Temperaturen normalleitendes Reinstmetall als Leitermaterial dient³⁾⁻⁶⁾. Hier profitiert man von der Widerstandsabnahme mit sinkender Temperatur, die bei reinen Metallen ein Faktor 10⁴ bis 10⁵ zwischen Raumtemperatur und 4,2 K betragen kann.

Das geeignete Leitermaterial für normalleitende Kryomagnete ist Aluminium; es läßt sich mit ökonomisch vertretbarem Aufwand durch Präparationsverfahren wie Organo-Elektrolyse und Zonenschmelzen mit hoher Reinheit herstellen. Als Reinheitsangabe dient das Verhältnis des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ von Raum- zu Heliumtemperatur, das Restwiderstandsverhältnis

$$r = \rho(273 \text{ K}) / \rho(4,2 \text{ K}).$$

Aluminium kann durch die zuvor erwähnten Verfahren in größeren Chargen (~ 100 kg) mit Reinheiten r von einigen 10⁴ produziert werden⁷⁾. Somit können bei kryogenen Temperaturen Magnetfelder mit erheblich geringeren JOULE'schen Verlusten erzeugt werden, andererseits können höhere Magnetfelder erreicht werden, ver-

glichen mit dem Betrieb bei Raumtemperatur. Kryomagnete sind gegenüber Supraleitermagneten nur im Wechselstrombetrieb konkurrenzfähig, wenn die OHM'schen und Wirbelstrom-Verluste des Normalleiters mit den Supraleiter-Wechselstromverlusten vergleichbar werden. Ferner werden kryogene, normaleitende Spulen eingesetzt, wenn sehr hohe Gleichfelder erzeugt werden sollen, die jenseits der Anwendungsgrenzen derzeitiger technischer Supraleiter liegen. Dies ist beispielsweise von Bedeutung für Hybridmagnete, bei denen eine normaleitende Hochfeld-Einsatzspule von einer Supraleiterspule umgeben wird. Die magneto-mechanischen Kräfte bei derart hohen Feldstärken sind allerdings so groß, daß hochreine Metalle selbst bei tiefen Temperaturen eine zu geringe Festigkeit haben, um verwendet werden zu können. Deshalb werden hier Legierungen mit besseren Festigkeitseigenschaften wie Kupfer-Beryllium oder Kupfer-Zirkon eingesetzt, aus denen Spulen vom Spiral-Typ oder BITTER-Typ gefertigt werden. Diese Materialien haben andererseits den Nachteil, daß sie nur ein geringes Restwiderstandsverhältnis haben, selten besser als $r = 10$, welches bereits bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs (77 K) weitgehend erreicht ist. Deshalb werden solche Spulen mit Wasser oder flüssigem Stickstoff gekühlt⁸⁾.

Im IEKP wurde ein Kryomagnet mit Spulen aus Reinstaluminium gebaut und bei 4,2 K getestet⁹⁾. Ziel dieser Arbeiten war zu zeigen, daß hochreines Aluminium bei entsprechender Handhabe zum Spulenbau geeignet ist und zu einem funktionstüchtigen Magneten hoher Feldstärke (4 Tesla) verwendet werden kann. Darüber hinaus sollte untersucht werden, ob das Verlustverhalten im Pulsbetrieb bei gewissen Betriebsbedingungen (Frequenz und Scheitelwert der Feldstärke, Betriebstemperatur) den Kryomagneten als konkurrenzfähige Alternative zum Supraleitungsmagneten ausweist. Beide Zielsetzungen wurden erreicht: (a) der Magnet wurde mit seinen Sollwerten in erfolgreichen Tests betrieben; (b) es können Betriebswerte und Leiterparameter angegeben werden, bei denen Supraleitungs- und Kryomagnete vergleichbare Verluste haben. Um diesen Vergleich durchzuführen, wurde der Kryomagnet nach seinem

Test mit Aluminiumspulen auch mit Supraleitungsspulen ausgerüstet und unter gleichen Bedingungen betrieben¹⁰⁾.

2. Bandleiter aus Reinstaluminium

Bei der Leiterauswahl für Kryomagnete sind die elektrischen und mechanischen Tieftemperatureigenschaften des Materials entscheidend. Kupfer als Leitermaterial zu wählen, ist ungünstig, da sich der Magnetowiderstand in hohen Feldern nicht sättigt, wie es demgegenüber bei Aluminium der Fall ist: für ein "kompensiertes" Metall mit gleicher Anzahl von elektronen- und lochartigen Leitungsträgern wie Kupfer steigt die relative Widerstandszunahme im Magnetfeld

$$\Delta\rho/\rho = (\rho(B) - \rho(0))/\rho(0)$$

quadratisch mit dem Feld B an, während der Magnetowiderstand $\Delta\rho/\rho$ für unkompensierte Metalle wie Aluminium bei hohen Feldern Sättigungstendenz zeigt. So nimmt das Widerstandsverhältnis eines Materials mit einer Reinheit $r = 7000$ im Feld von 3 T bei Aluminium um den Faktor 3,5 auf 2000 ab, bei Kupfer um den Faktor 41 auf 170. Aus diesem Grunde wird Aluminium als Leitermaterial für Kryomagnete mit Betriebstemperaturen im fl. Helium- fl. Wasserstoff-Bereich gewählt; hier wird der Leitfähigkeitsgewinn bei tiefer Temperatur in wesentlich geringerem Maße durch den Magnetowiderstand aufgezehrt. Andere unkompensierte Metalle wie Indium oder Natrium sind weniger geeignet als Leitermaterial für Magnete als das mit vergleichsweise geringem Aufwand herstellbare Reinstaluminium.

Parallel zum Spulenbau für einen Aluminium-Kryomagneten wurden umfangreiche Untersuchungen zum Widerstandsverhalten von Reinstaluminium an Bandkurzproben durchgeführt¹¹⁾. Widerstandsmessungen bei tiefen Temperaturen erfolgten in Abhängigkeit von Reinheitsgrad und Temperatur an polykristallinen Bandproben ($6 \times 0,3 \text{ mm}^2$ Querschnitt) im transversalen Magnetfeld bis 3,9 Tesla. Die Materialreinheit variierte zwischen $r = 2400$ und $r = 30\ 000$, der

Temperaturbereich von 4,2 K bis 32 K wurde kontinuierlich überstrichen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag beim Temperaturverhalten des Magnetowiderstandes. Im Hochfeldbereich wächst der Magnetowiderstand mit der Temperatur an und geht bei etwa 20 K über ein Maximum. Der Maximalwert nimmt mit der Reinheit zu und führt für die reinste Probe zu einem Widerstandszuwachs um einen Faktor von nahezu 7. - Das ungewöhnliche Temperaturverhalten des Widerstandes mit und ohne Magnetfeld bedeutet eine Verletzung der KOHLER und der MATTHIESSEN Regel. Eine Erklärungsmöglichkeit wird durch die anisotrope Elektron-Phonon Streuung gegeben. Das diesbezügliche theoretische Konzept von KAGAN¹²⁾¹³⁾ liefert eine qualitative Übereinstimmung mit unseren experimentellen Ergebnisse.

Das beschriebene Verhalten könnte die Vermutung nahe legen, daß sich aufwendige und kostspielige Materialreinigungsverfahren nicht lohnen, da der Gewinn an Leitfähigkeit durch die Widerstandszunahme im Magnetfeld zunichte gemacht wird. Dadurch würde jegliche technologische Anwendung von Reinstaluminium als Leitermaterial für den Magnetbau in Frage gestellt. Glücklicherweise trifft diese Vermutung nicht zu: die Kurzprobenmessungen an Aluminium-Bandleitern hatten das technologisch wichtige Ergebnis, daß im gesamten untersuchten Temperaturbereich von 4,2 K bis 32 K der Widerstand im Hochfeldfall mit zunehmender Reinheit abnimmt. Der Hochfeldfall ist erfüllt, wenn der Zyklotronradius R_c der Leitungselektronen kleiner als ihre freie Weglänge ist, eine Forderung, die sich für Aluminium in die Magnetfeld-Bedingung

$$B \gg B_0 = 300/r_b(T) \quad [\text{Tesla}]$$

umschreiben läßt. Hierbei ist $r_b(T) = \rho(293 \text{ K})/\rho_b(0, T, r)$ das "bulk"-Widerstandsverhältnis bei der Temperatur T und der Reinheit r im Nullfeld. Das aktuelle Widerstandsverhältnis $r(B, T) = \rho(293 \text{ K})/\rho(B, T, r)$ bzw. der aktuelle Widerstand $\rho(B, T, r)$

für den Hochfeldfall ($B = 3,9 \text{ T}$) und verschiedene Reinheiten ist in Abhängigkeit von der Temperatur in Abb. 1 wiedergegeben und zeigt das zuvor erwähnte Ergebnis.

Für die Spulen des Aluminium-Magneten haben wir einen Bandleiter mit $8 \times 0,3 \text{ mm}^2$ Querschnitt und einer mittleren Reinheit von $r_b = 15000$ gewählt. Der Bandleiter wurde von den vereinigten Aluminiumwerken, Bonn, im Rahmen eines vom BMFT geförderten Entwicklungsprogramms hergestellt. Die Reinheitsangabe bezieht sich auf das "bulk"-Material; sie wurde aus dem Meßwert am Bandleiter $r_t = 9200$ durch Anbringen der size-Effekt-Korrektur errechnet. Der size-Effekt führt zu einem erhöhten Widerstand und ist eine Folge von Oberflächenstreuprozessen bei Leiterdimensionen, die vergleichbar oder kleiner als die freie Weglänge der Leitungselektronen sind. Abb. 2 gibt eine Zuordnung von "bulk"-und "tape"-Reinheitswerten, die nach der FUCHS-SONDHEIMER-Theorie¹⁴⁾ für diffuse Oberflächenstreuung berechnet wurde. Diese Zuordnung $\rho_b \leftrightarrow \rho_t$ wird durch eine Funktion ϕ vermittelt, die vom Verhältnis $d/\ell = \text{Leiterdicke/freie Weglänge der Leitungselektronen}$ und dem Reflektionskoeffizienten p abhängt. Der Bruchteil p der Elektronen wird spiegelnd an der Oberfläche reflektiert, $p = 0$ bedeutet somit diffuse Oberflächenstreuung. Die Zuordnungsfunktion ϕ

$$\rho_t/\rho_b = \phi(d/\ell, p)/(d/\ell)$$

wurde mit einem Computerprogramm berechnet und tabelliert¹⁵⁾. Für die Grenzfälle $d \gg \ell$ und $d \ll \ell$ ergeben sich die Näherungsformeln^{16) 17)}

$$d \gg \ell: \rho_t/\rho_b = 1 + \frac{3}{8} (1 - p) \frac{\ell}{d}$$

$$d \ll \ell: \rho_t/\rho_b = \frac{4 (1-p) \ell}{3 (1+p) d \log(\ell/d)}$$

Im vorliegenden Fall mit $d = 0,3$ mm und $r_b = 15000$ ist die freie Weglänge λ bei 4,2 K nur geringfügig größer als die Banddicke d , deshalb wurde bei size-Effekt-Korrekturen die tabellierte Zuordnungsfunktion ϕ verwendet. Im Magnetfeld (Hochfeldfall: $\lambda \gg R_c$ bzw. $B \gg B_0$) wird der size-Effekt unterdrückt, sobald der Zyklotronradius R_c kleiner als die Leiterdicke d wird. Für $R_c \leq d = 0,3$ mm,

$$R_c = \hbar \cdot k_F / e \cdot B = 7,4 \cdot 10^{-4} / B$$

(B in Tesla, R_c in cm), findet man mit einem FERMI-Radius $k_F = 1,13 \cdot 10^{18} \text{ A}^{-1}$ für Aluminium die Feldbedingung $B \geq 25$ mT. Bei Heliumtemperatur (4,2 K) ist der Hochfeldfall oberhalb $B_0 = 20$ mT für den $r_b = 15000$ -Bandleiter realisiert. Somit ist der size-Effekt bei 4,2 K im interessierenden Feldbereich des Kryomagneten ohne Einfluß auf den Widerstand. Die geringe Leiterdicke wurde im Hinblick auf die d^2 proportionalen Wirbelstromverluste im Pulsbetrieb des Magneten gewählt.

Die Bandbreite ergab sich aus den inneren Abmessungen des Eisenjochs. Als Isolation wurde auf das Aluminiumband eine etwa 6 μm dicke Eloxalschicht aufgebracht. Die Isolationsschicht muß temperaturbeständig sein, da nach der Formgebung der Spulen (Wickeln, Abbiegen) ein Ausheilen der eingebrachten Defekte erforderlich wird. Ausheiluntersuchungen an Kurzproben, die bis zu 15% Elongation verformt waren, ergaben, daß bei 500°C während 1 bis 2 Stunden das ursprüngliche Restwiderstandsverhältnis wiedergewonnen wurde. Die Eloxalschicht zeigte hinreichend gute Isolationseigenschaften; selbst nach dem Biegen von Bandpaketen über die hohe Kante zeigten benachbarte Bänder bei 100 V Testspannung Isolationswiderstände größer als 100 k Ω . Obwohl die Eloxalschicht nachweislich Risse zeigte (Abb. 3), hielt sie offenbar die Windungen auf genügendem Abstand. Bei der gewählten Reinheit sind die Festigkeitseigenschaften des Aluminiumbandes ausreichend, um Spulenfertigung und -betrieb zu gewährleisten.

3. Aluminium-Kryomagnet

Der im IEKP gebaute Aluminium-Kryomagnet⁹⁾ ist vom "window-frame"-Typ. Er hat ein lamelliertes Eisenjoch von 40 cm Länge, in dessen Spalt ($4 \times 25 \text{ cm}^2$ Querschnitt) die Aluminium-Spulen liegen (Abb. 4,5,6). In der Apertur von $4 \times 5 \text{ cm}^2$ erzeugt der Magnet bei 4,2 K ein Zentralfeld von 4 Tesla. Der Magnetstrom beträgt hierbei 200 A, was einer Stromdichte von 80 A/mm^2 im Bandleiter entspricht. Bei dem maximal erreichten Feld von 4 Tesla ($2,5 \cdot 10^5$ Ampèrewindungen) wird auf die Spule im Magneten eine Kraft von 20 t ausgeübt, die das Eisenjoch aufnimmt. Der "window-frame"-Magnettyp wurde gewählt, da man durch das mit den Spulen zugleich abgekühlte Eisenjoch auch im Falle partieller Sättigung bei einem Zentralfeld von 4 Tesla gegenüber einer entsprechenden eisenfreien Spule noch ca. einen Faktor 2 an Magnetfeldstärke gewinnt.

Der eloxierte Aluminium-Bandleiter wurde bei geringer Zugspannung ($\sim 1 \text{ kp/mm}^2$) zu vier je 60 cm langen "race-track"-Spulen mit 5 cm lichter Weite und 9,5 cm Windungsdicke gewickelt. Die Spulen wurden in eine teflonverkleidete Aluminiumform eingebettet und ihre Enden mit Hilfe eines Biegestempels in einer Presse um 45° abgebogen (Biegeradius $\sim 11 \text{ cm}$). Durch die so entstehende schnabelförmige Öffnung von je zwei entgegengesetzt abgewinkelten Spulenpaaren erreicht man Zugang zum Magnetspalt von außen (Abb. 4). Nach dem Biegen wurden die Spulen eine Stunde lang bei 500°C zum Ausheilen der durch die mechanische Beanspruchung erzeugten Fehlstellen und Versetzungen getempert. Das Spulenpaket wurde anschließend mit einem Epoxydharz vergossen, um eine mechanisch stabile Konfiguration zu erhalten. Jede Spule wurde einseitig gekühlt; Teflon-Kühlstege von 1,5 mm Dicke bildeten die Kühlkanäle. Mit Distanzplatten aus Glasfaser-verstärktem Epoxydharz wurde das Spulenpaket in das Eisenjoch eingepaßt. -

Die Kontaktierung der Aluminium-Bandenden erfolgte über Kupferlaschen, der Übergangswiderstand lag unter $10 \mu\Omega$.

4. Testergebnisse

Der Aluminium-Kryomagnet wurde vertikal in einem Helium-Badkryostaten bei 4,2 K getestet (Abb. 6). Ein Betrieb bei höheren Temperaturen mit flüssigem Wasserstoff als Kühlmittel wurde aus Sicherheitsgründen ausgesetzt, nachdem frühere Messungen¹⁹⁾ die wir an "pan-cake"-Spulen aus Reinstaluminiumbändern im Wasserstoff-Bad bei 20,4 K durchgeführt hatten, das von den Kurzprobenmessungen her zu erwartende Temperaturverhalten des Magnetowiderstandes gezeigt hatten. Der Widerstand des Magneten bei 4,2 K in Abhängigkeit von zentralen Feld (Abb. 7) zeigt den für Aluminium typischen Verlauf mit Sättigungstendenz im Hochfeldfall; die Abweichung oberhalb 2,5 Tesla ist vermutlich durch eine Erwärmung der Spule verursacht. Vorausgegangene Messungen ergaben bis zu 10% unterschiedliche Widerstandswerte, was auf eine geringfügige mechanische Verformung in einen festeren Sitz innerhalb des Eisenjochs beim ersten Auferregen zurückzuführen sein dürfte. Feldmessungen wurden mit einer Induktionsspule (integrierendes Flußmeter) beim Hochlauf durchgeführt, Verlustmessungen durch Strom-Spannungs-Multiplikation mittels eines HALL-Generators. Die Ergebnisse sind in Abb. 8 zusammengestellt. Die berechneten Feldwerte weichen im Bereich partieller Eisensättigung oberhalb 2 Tesla von den experimentellen Werten ab, was auf einen dem benutzten Eisen nicht ganz entsprechenden Satz von μ -Werten zurückzuführen ist, der in die Rechnung eingesetzt worden war. Abb. 9 zeigt die Feldverteilung längs der Magnetachse für verschiedene Magnetströme, die Spulen- und Eisenkontur ist mit eingezeichnet. - Die Induktivität des Magneten beträgt 2,2 Hy, nimmt jedoch bei eintretender Eisensättigung mit zunehmendem Feld stetig ab, um schließlich in den Wert der eisenlosen Spulen (~ 0.5 Hy) einzumünden. Dieses Verhalten ist einleuchtend, da die Abnahme des Luftspaltfeldes bei

Eisensättigung als eine Zunahme der effektiven Luftspaltweite bei gleicher Ampèrewindungszahl interpretiert werden kann; die Induktivität ist der Luftspaltweite umgekehrt proportional. Der unterschiedliche Sättigungscharakter im Zentral- und Randfeldbereich wurde durch eine Differenzmessung der Signale zweier entsprechend angeordneter Induktionsspulen untersucht. Das Differenzsignal zeigt bis zum Eintreten der Eisensättigung bei 1,8 T ($\hat{=} 47$ A) eine konstante Verstimmung. Danach nimmt die Verstimmung deutlich zu, was dadurch hervorgerufen wird, daß das Zentralfeld bei linearem Stromanstieg wegen der Eisensättigung langsamer wächst als das Randfeld, wo sich wegen der Endkontur und der geringeren Magnetfeldstärke die Sättigung erst später bemerkbar macht. Bei hohen Feldern tritt wieder eine konstante Verstimmung ein, da Zentral- und Randfeld im Falle hoher Sättigung wie bei einer eisenfreien Spule nur noch lineare Funktionen des Stromes sind. Die in Abb. 8 wiedergegebenen Verlustmessungen wurden mit einem HALL-Multiplikator gewonnen:

die Hallspannung $U_H \sim B \cdot I_{st}$ ist eine multiplikative Größe und wird zu einem Maß für die elektrische Leistung, indem in einer geeigneten Schaltung, vgl. Abb. 10, das Magnetfeld B dem Magnetstrom und der Steuerstrom I_{st} der Spannung am Magneten proportional ist. Die Blindleistung des Magneten läßt sich durch Kompensation des induktiven Teils der Magnetspannung in einer Differenzschaltung weitgehend unterdrücken, wobei zur Anpassung der Impedanzen von Kompensationsanordnung und Hallgenerator eine Spannungs-Strom-Wandlung nötig ist. JOULE'sche Leistung und Blindleistung stehen in einem Verhältnis von etwa 1:300 bei einer Spulenspannung von maximal 260 Volt. Die Kompensationspule lag im Zentralfeld des Magneten und war in ihrer Windungsfläche (43 m^2 bei 35000 Windungen und 5 cm Durchmesser) so ausgelegt, daß ca. 65 % der Primärspannung kompensiert werden konnten. Der Blindenergieanteil ließ sich damit bis auf etwa 10 % unterdrücken. Bei der Integration über eine oder mehrere Perioden annullieren sich die restlichen Blindanteile und der verbleibende Anstieg im Integral ist ein Maß für die Verlustleistung. Das System wurde mit einer bekannten OHM'schen Last im Gleich-

stromfall geeicht: einem gewissen zeitlich linearen Anstieg der Integratorspannung wird hiermit eine bestimmte Verlustleistung zugeordnet.

Die obere Kurve in Abb. 8 zeigt die Verlustleistung für Gleichstrom, die untere Kurvenschar die Wirkleistung für einen dreiecksförmigen Pulsstrom in Abhängigkeit vom Scheitelwert für verschiedene Pulszeiten. Die Aufspaltung der Pulsleistungskurve ist auf frequenzabhängige Anteile in der Verlustleistung, wie Hystereseverluste im Eisen und Wirbelstromverluste im Aluminium und Eisen, zurückzuführen. Im Pulsbetrieb sollten die Verluste ein Drittel der Gleichstromleistung betragen. Der etwas kleinere experimentelle Wert hat seine Ursache im Magnetowiderstand des Aluminiums, der während eines Feldpulses seinen ganzen Variationsbereich bis zur Sättigung durchläuft. Bei einem Zentralfeld von 4 Tesla reduziert der Magnetowiderstand das Ausgangswiderstandsverhältnis des verwendeten Bandleiters bei 4,2 K etwa um einen Faktor 2.

5. Diskussion und Optimierungsfragen, Vergleich mit Supraleitungsmagneten

Frühere Messungen an "pancake"-Spulen aus Reinstaluminium bei 4,2 K und 20,4 K¹⁹⁾ und insbesondere die Kurzprobenuntersuchungen zum Verhalten des Widerstandes von Aluminium-Bandleitern in Abhängigkeit von Magnetfeld, Temperatur und Materialreinheit¹¹⁾ sind die Grundlage zur Optimierung eines Kryomagneten hinsichtlich seines Verlustverhaltens. Zum Betrieb des Magneten mit einem mittleren spezifischen Leiterwiderstand $\bar{\rho}(B, T, r)$ im Eigenfeld B bei der Temperatur T ist die Leistungsdichte

$$Q_o = j^2 \bar{\rho}(B, T, r)$$

aufzubringen, wenn der Leiter die Stromdichte j trägt. Diese Verlustleistung ist von der Kältemaschine abzuführen.

Nach dem ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ist hierfür eine Leistungsaufnahme N der Kältemaschine von

$$N = Q_0 \frac{T_1 - T}{T} \cdot \frac{1}{\eta}$$

erforderlich. Die Maschine arbeitet zwischen den Temperaturniveaus T_1 (Raumtemperatur) und T , bei dem die vom Magneten erzeugte Wärmeleistung Q_0 aufgenommen wird. Der Wirkungsgrad η berücksichtigt die durch irreversible Prozesse in der Kältemaschine auftretenden Verluste und kann im Bereich der betrachteten Betriebstemperaturen mit 0,3 abgeschätzt werden.

Bei Raumtemperatur T_1 würde der betrachtete Magnet die Leistungsdichte

$$Q_1 = j^2 \rho(T_1)$$

bei gleicher Stromdichte und somit gleichem Magnetfeld benötigen. Die Bedingung

$$Q = Q_0 + N < Q_1$$

ist zu erfüllen, um bei einem Kryomagneten eine Leistungseinsparung gegenüber Raumtemperaturbetrieb zu erzielen.

Der "Gewinnfaktor" $G = Q_1/Q$ dient als Maß für den Gewinn (=Ersparnis) von Leistung:

$$G = \frac{\rho(T_1)}{\bar{\rho}(B, T, r)} \cdot \left[1 + \frac{1}{\eta} \cdot \frac{T_1 - T}{T} \right]^{-1}$$

Abb. 11 zeigt den Gewinnfaktor G für die untersuchten Aluminium-Bandleiter bei 3,9 Tesla in Abhängigkeit von Betriebstemperatur T und Materialreinheit r . Der Gewinnfaktor wächst stets mit zunehmender Reinheit - trotz des gleichsinnig zunehmenden Magnetowiderstandes; je nach Materialreinheit geht G im Temperaturbereich von 7 bis 14 K über ein Maximum bei einer optimalen Arbeitstemperatur T_{opt} , dort also ist die Verlustbilanz am günstigsten: $G = G(T_{opt}) = G_{max}$.

Die vorliegende systematische Untersuchung des Widerstandsverhaltens von Reinstaluminium¹¹⁾ gestattet somit Aussagen über die optimale Betriebstemperatur eines Kryomagneten. Maximaler Gewinnfaktor bei verschiedenem Wirkungsgrad und optimaler Arbeitstemperatur sind in Abb. 12 als Funktion der Materialreinheit für den Hochfeldfall zusammengestellt. Beispielsweise beträgt für das reinste von uns untersuchte Material ($r_b = 30\ 000$) die optimale Betriebstemperatur 7 K mit einem Gewinnfaktor von 28 bei 20% Kältemaschinen-Wirkungsgrad.

Zum Vergleich von Aluminium-Kryomagnet und Supraleitungsmagnet wurden Supraleiterspulen aus einem NbTi-Kabel gefertigt und im selben Eisenjoch bei gleichen Betriebsbedingungen (Feldamplitude und -frequenz im Dreiecks-Pulsbetrieb) getestet¹⁰⁾. Abb. 13 zeigt einen Vergleich der Verlustleistung bei Feldamplituden von 2, 3 und 4 Tesla. Das Verhältnis der Verlustleistungen $P(\text{Al-Magn.})/P(\text{NbTi-Magn.})$ bei 4,2 K erreicht (und unterschreitet) den Wert 'eins' bei Frequenzen oberhalb 0,3 Hz. Nach Abb. 12 entspricht einem Band-Restwiderstandsverhältnis von $r_t = 9200$ eine optimale Betriebstemperatur von 8,6 K. Hätten wir diese Arbeitstemperatur statt 4,2 K für den Magnetbetrieb gewählt, so wäre das Verlustverhältnis entsprechend der zweitobersten Kurve in Abb. 14 reduziert worden und der Gewinnfaktor von $G_0 = 20,7$ auf 26,5 gestiegen. Ferner sind in Abb. 14 die Verlustverhältnisse eingezeichnet, die sich bei Verwendung eines Bandleiters mit $r_t = 13\ 900$ ($r_b = 30\ 000$) bei seiner optimalen Temperatur von 7 K ergeben hätten. Hierbei wurde nicht berücksichtigt, daß sich der Verlustbeitrag aufgrund von Wirbelströmen im Bandleiter entsprechend der erhöhten Leitfähigkeit vergrößert; bei 0,33 Hz Pulsfrequenz und 4 Tesla Feldamplitude tragen die vier Aluminiumspulen des Kryomagneten mit dem $r_t = 9200$ Material bereits etwa 7 Watt an Wirbelstromverlusten bei. Die Abb. 13 und 14 zeigen, daß für Pulsfelder im Bereich von 0,5 Hz oder schneller und Feldamplituden von 4 Tesla oder geringer ein Aluminium-Kryomagnet

durchaus konkurrenzfähig mit einer vergleichbaren supra-
leitenden Version ist: das Verlustverhältnis liegt bei
oder unterhalb'eins'. Hinsichtlich Feldanstiegszeit unter-
liegt der Normalleiter keinen stabilitätsbedingten Ein-
schränkungen wie der Supraleiter. Bei höheren Frequenzen
ist allerdings aufgrund der Wirbelstrombeiträge im hochreinen
Material wieder ein Anwachsen des Verlustverhältnisses zu
erwarten. Ohne die zweifellos anerkannte Überlegenheit des
Supraleitermagneten in Frage stellen zu wollen, soll doch
darauf hingewiesen werden, daß es Betriebsbedingungen gibt,
bei denen ein Aluminium-Kryomagnet eine vorteilhafte Alter-
native darstellt.

Für ihren tatkräftigen Einsatz bei Planung, Fertigung und
Test des Kryomagneten danken wir den Mitarbeitern Mechaniker-
meister B. Lott und G. Auer, sowie Elektromeister S. Stumpf.
Herrn Professor Dr. W. Heinz sind wir für sein förderndes
Interesse und zahlreiche Diskussionen zu Dank verbunden.

Literatur:

- 1) Mitt. der Techn. Univ. Braunschweig, J.VII, Heft III (1972)
- 2) H.J. Schneider-Muntau in "The Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics";
Int. Conf., Univ. Würzburg (Juli 1974)
- 3) J.R. Purcell und E.G. Payne, Rev. Sci, Instr. 34, 893 (1963)
- 4) G.T. Danby, J.E. Allinger und J.W. Jackson,
"Proceedings of the 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators", Brookhaven, p. 1115 (1968)
- 5) J. Allinger, G. Danby, J. Jackson, I. Polk und A. Podrell,
IEEE-Transact. NS-16, 728 (1969)
- 6) G.T. Danby, J.E. Allinger und J.W. Jackson, IEEE-Transact.
NS-18, 685 (1971)
- 7) W.D. Hannibal, G. Ibe, H. Pfundt, W. Reuter und G. Winkhaus,
Metall 27, 203 (1973)
- 8) H. Brechna in "The Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics";
Int. Conf., Univ. Würzburg (Juli 1974), Addendum (im Erscheinen)
- 9) B. Lott, W. Schauer, W. Specking, S. Stumpf und P. Turowski,
"Ein 40 cm langer Eisenjochmagnet mit Spulen aus Reinstaluminium bei 4,2 K" (1972), unveröffentlicht.
- 10) W. Schauer "Proceedings of the Fifth International Conference on Magnet Technology", Roma, p. 629 (1975)
P. Turowski und W. Specking, Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK-Bericht (in Vorbereitung)
- 11) B. Krevet, Frühjahrstagung DPG, Festkörperphysik,
Freudenstadt 1. - 5. April 1975, Verhandlungen der DPG,
R.6, Bd. 9 (1974), S. 841 - 842, siehe auch:
B. Krevet, W. Schauer, J. Appl. Phys. (eingereicht Okt. 1975)

- 12) Yu. Kagan und V.N. Flerov, Sov. Phys. JETP 39, 673 (1974)
- 13) Yu. Kagan und A.P. Zhernov, Sov. Phys. JETP 33, 990 (1971)
- 14) E.H. Sondheimer, Adv. Phys. 1, 1 (1952)
- 15) F. Dworschak, W. Sassin, J. Wick und J. Wurm, Report JÜL-575-FN, KFA Jülich (1969)
- 16) G.T. Meaden, "Electrical Resistance of Metals", Heywood Books, London (1966)
- 17) D.C. Larson, "Size-Dependent Electrical Conduction in Thin Metal Films and Wires" in M.H. Francombe und R.W. Hoffmann: "Physics of Thin Films", Academ. Press, New York (1971)
- 18) J. Feder and J. Lothe, Phil. Mag. 12, 107 (1965)
- 19) W. Schauer, W. Specking und P. Turowski, Proc. Internat. Conf. on Magnet Technology, Hamburg, S. 606 (1970)

Abbildungen:

- Abb. 1: Das aktuelle Widerstandsverhältnis im Hochfeldfall (3.9 Tesla) $r(B,T) = \rho(293 \text{ K})/\rho(B,T,r)$ bzw. der aktuelle spezifische Widerstand $\rho(B,T,r)$ als Funktion der Temperatur für verschiedene Reinheiten r_b .
- Abb. 2: Size-Effekt-Korrektur: Übergang 'bulk'-Widerstandsverhältnis \leftrightarrow Band (tape) - Widerstandsverhältnis bei 0,3 mm Banddicke für diffuse Oberflächenstreuung ($p=0$).
- Abb. 3: Risse in der Eloxal-Isolationsschicht des Aluminiumbandes nach dem Biegen (Vergrößerung a) 40x, b) 200x)
- Abb. 4: Aluminium-Kryomagnet mit abgehobener oberer Eisenjochhälfte. Auf die Aluminiumspulen sind Teflonstege geklebt, die die Kühlkanäle bilden.
- Abb. 5: Querschnitt durch das Eisenjoch des Aluminium-Kryomagneten.
- Abb. 6: Der Aluminium-Kryomagnet, am Kryostat-Deckelflansch hängend.
- Abb. 7: Das Widerstandsverhältnis des Aluminium-Kryomagneten bei 4,2 K im selbst erzeugten Magnetfeld. Spulenerwärmung führt zum Ansteigen der Widerstandskurve oberhalb 2,5 Tesla.
- Abb. 8: Strom-Feld-Charakteristik und Verlustverhalten des Aluminium-Kryomagneten.
- 1: Verluste im Gleichstrombetrieb
 - 2-4: im Pulsbetrieb mit
 - 2: 3 s
 - 3: 6 s
 - 4: 10 s
- } Pulsdauer (Dreiecksform)

- Abb. 9: Axiale Feldverteilung des Aluminium-Kryomagneten bei verschiedenen Erregerströmen. Die oberen Eisen- und Spulenkonturen sind eingezeichnet.
- Abb. 10: Prinzipschaltung der Leistungsmeßanordnung mit einem HALL-Multiplikator.
- Abb. 11: Gewinnfaktor G , berechnet für Reinstaluminium bei 3,9 Tesla in Abhängigkeit von der Temperatur.
- Abb. 12: Maximaler Gewinnfaktor und optimale Arbeitstemperatur für Aluminiumleiter als Funktion der Reinheit im Hochfeldfall.
- Abb. 13: Vergleich der Verlustleistung des Aluminium-Kryomagneten (DT-Al) und des Supraleitungsmagneten (DT-NbTi).
- Abb. 14: Vergleich der Verlustleistung des Aluminium-Kryomagneten (DT-Al) bei optimalen Betriebsbedingungen und des Supraleitungsmagneten (DT-NbTi).

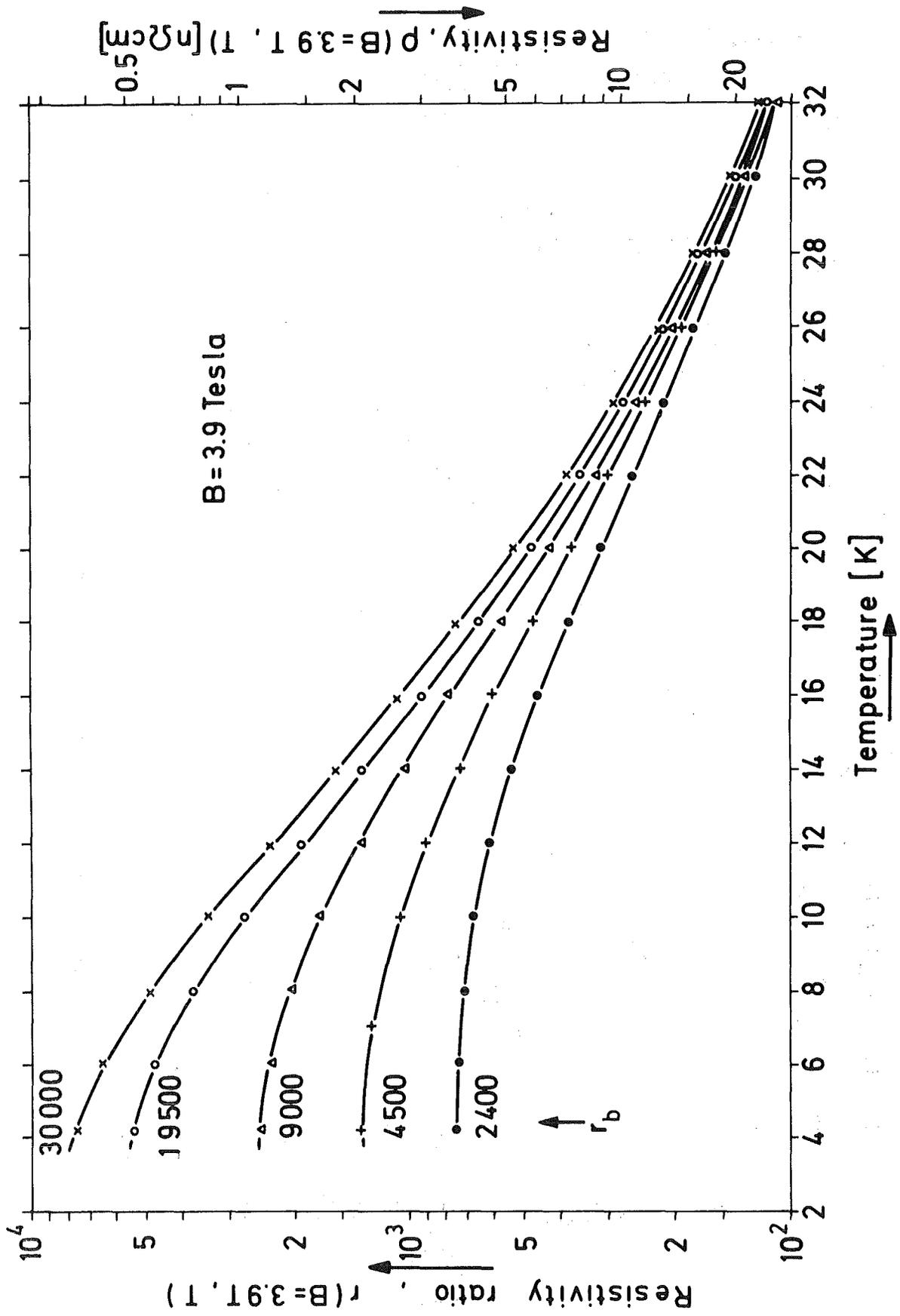


Abb. 1

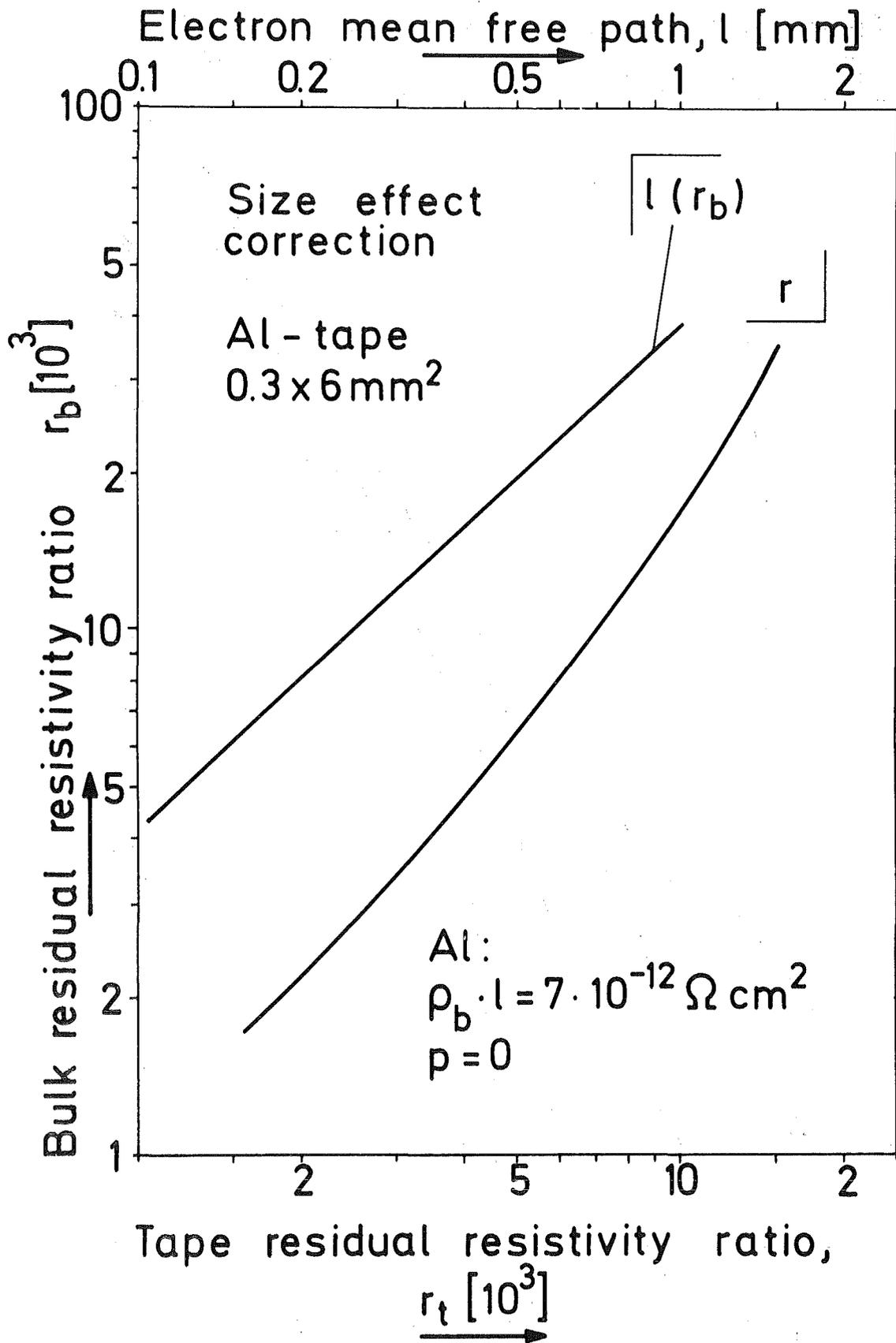
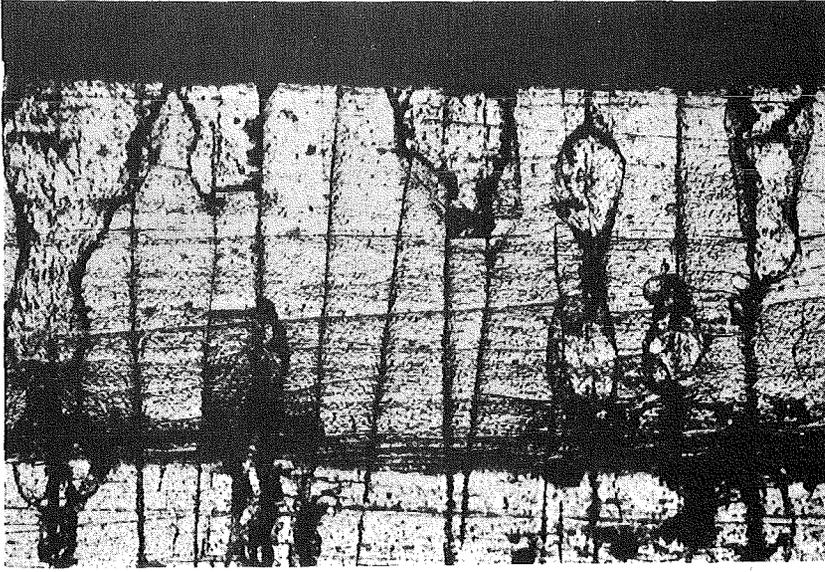
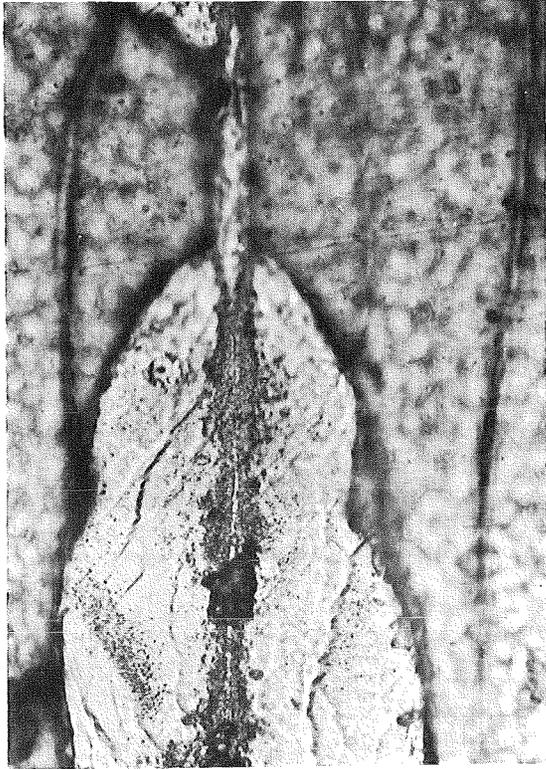


Abb. 2



40 x

Abb. 3a



200 x

Abb. 3b

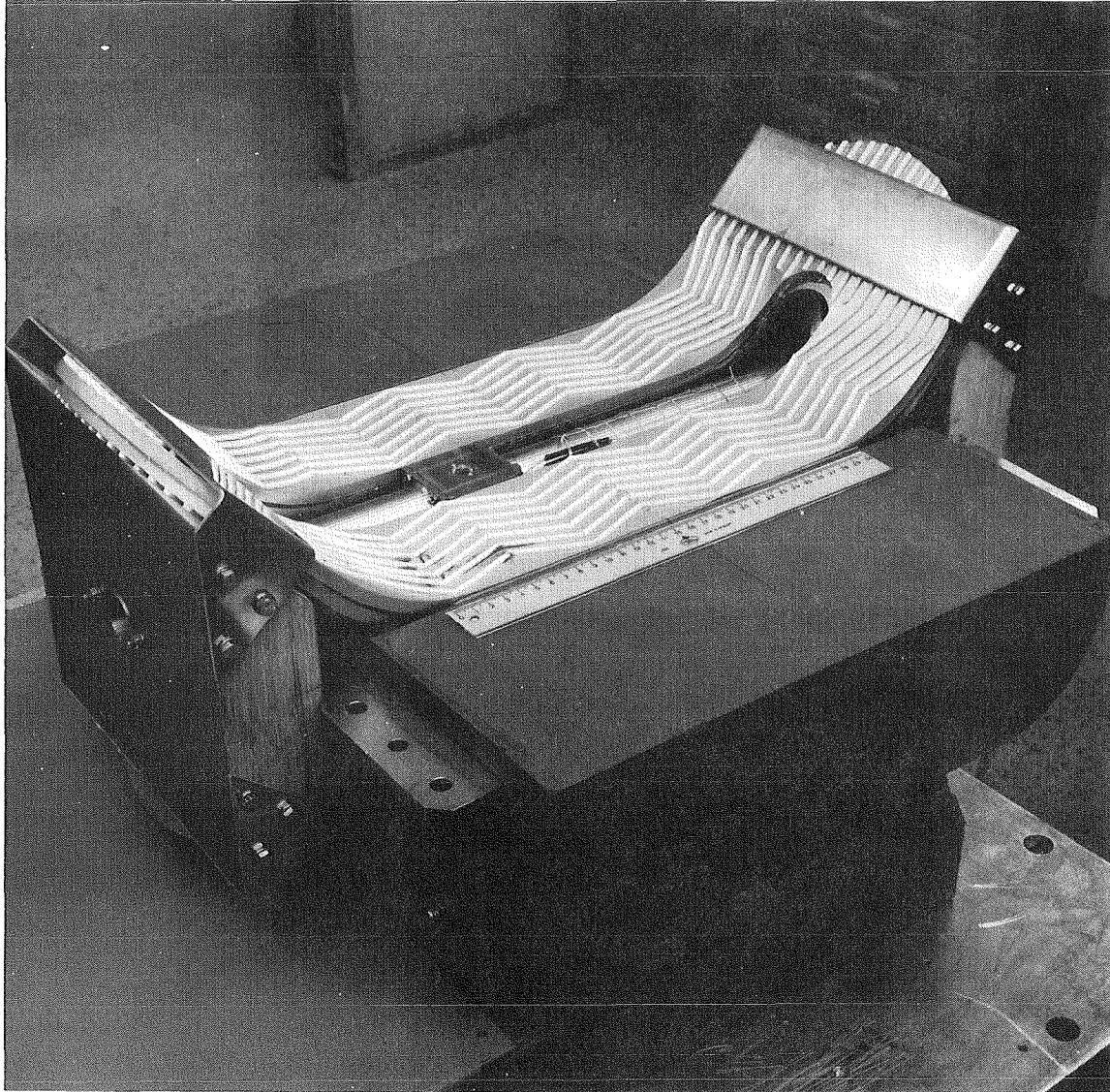


Abb. 4

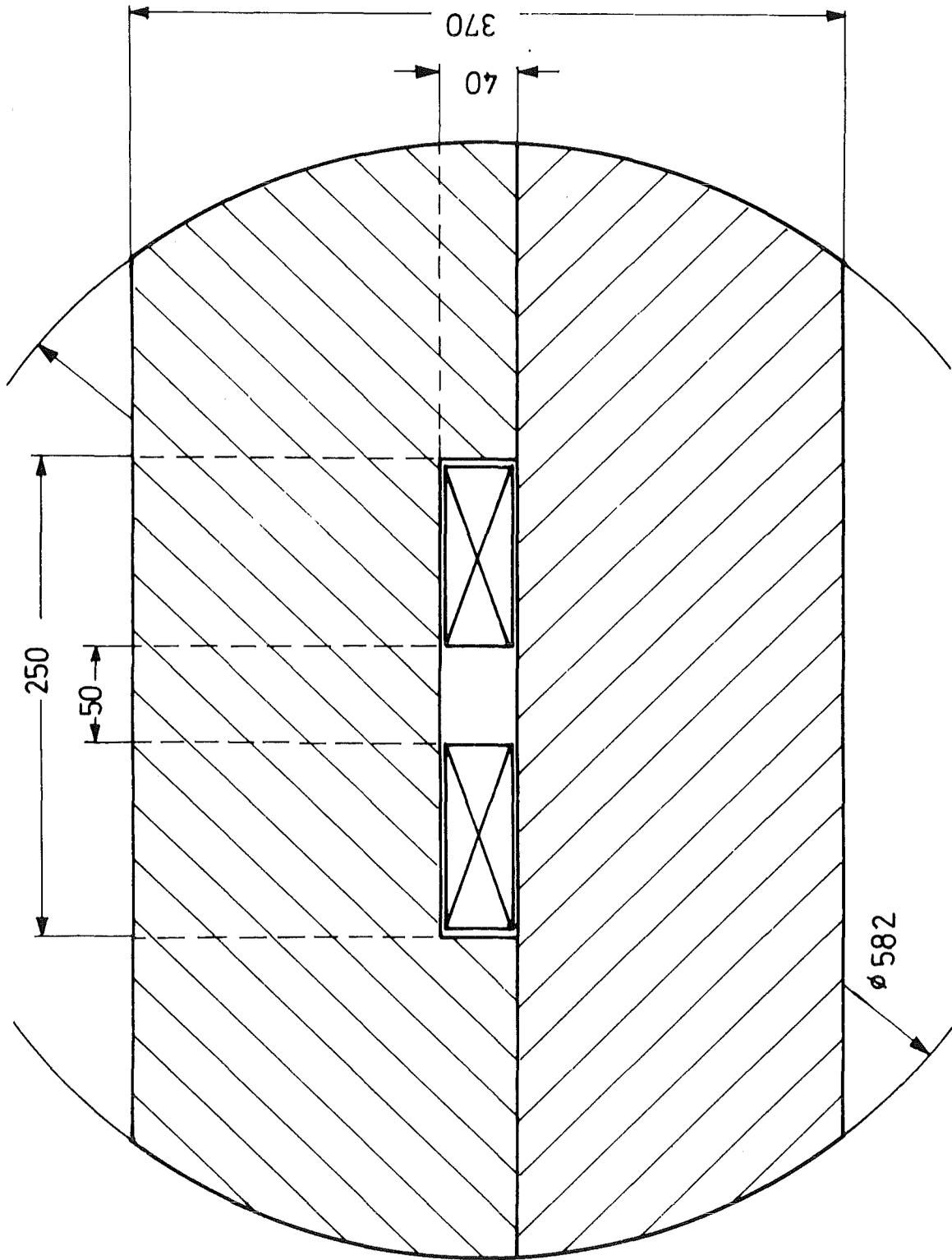


Abb. 5

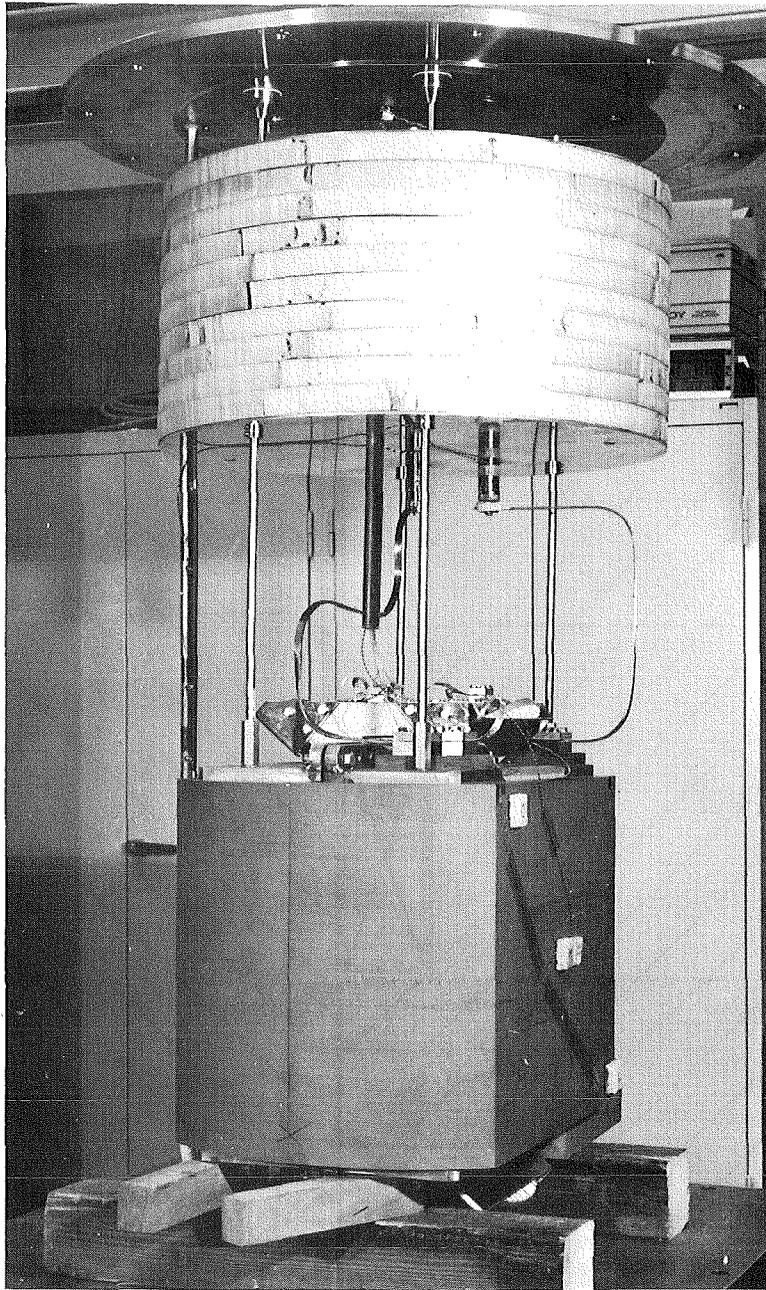


Abb. 6

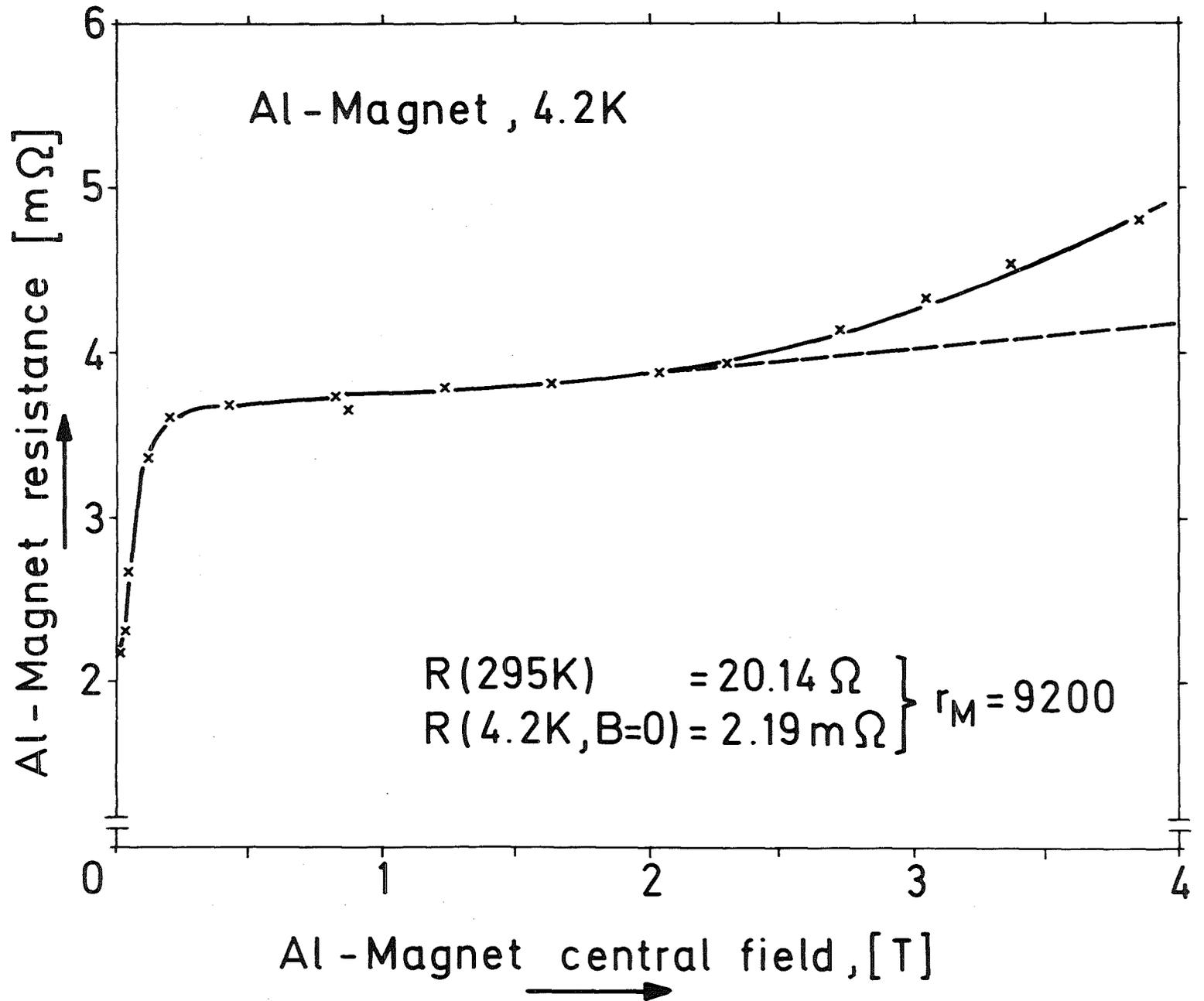


Abb. 7

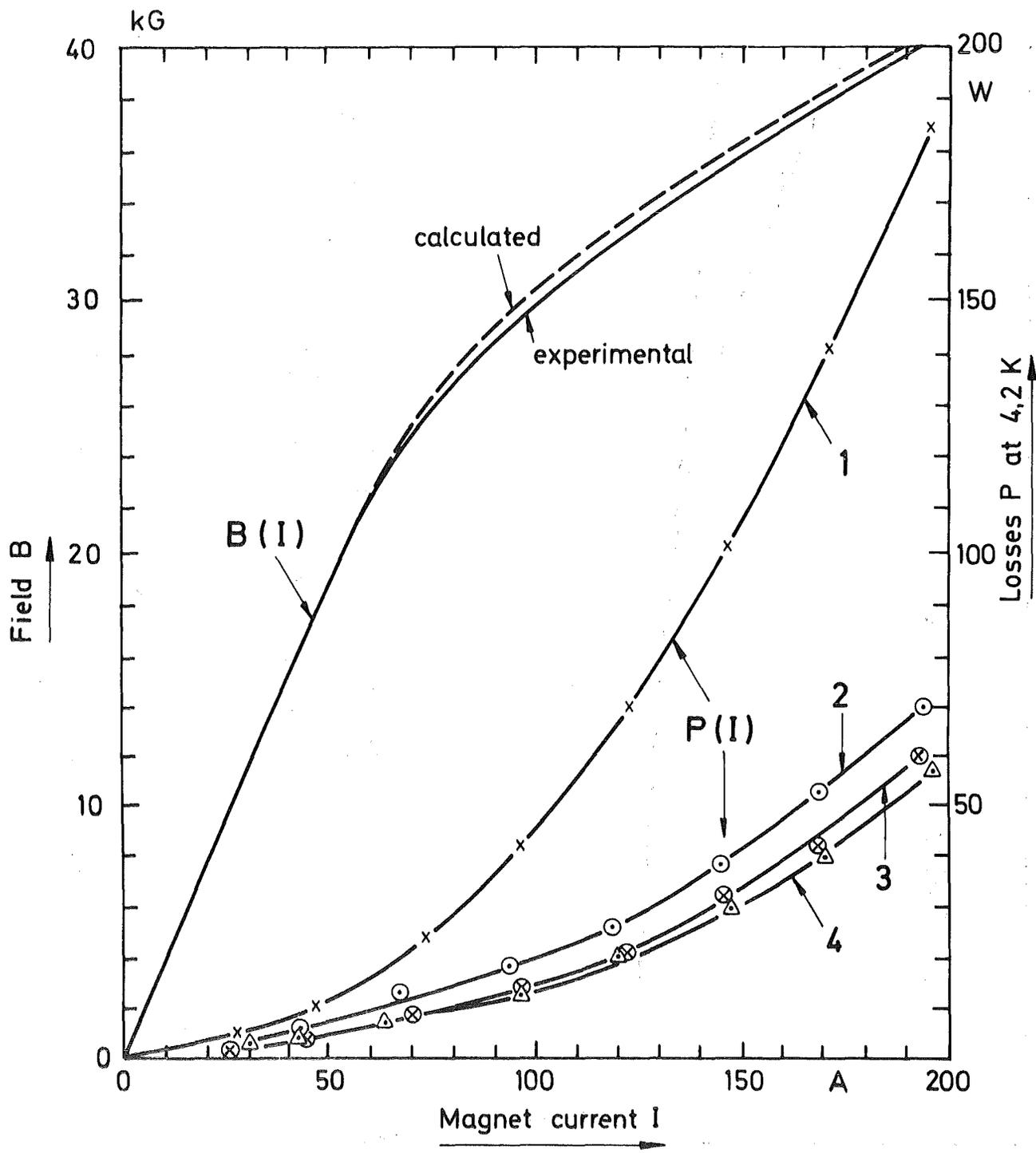


Abb. 8

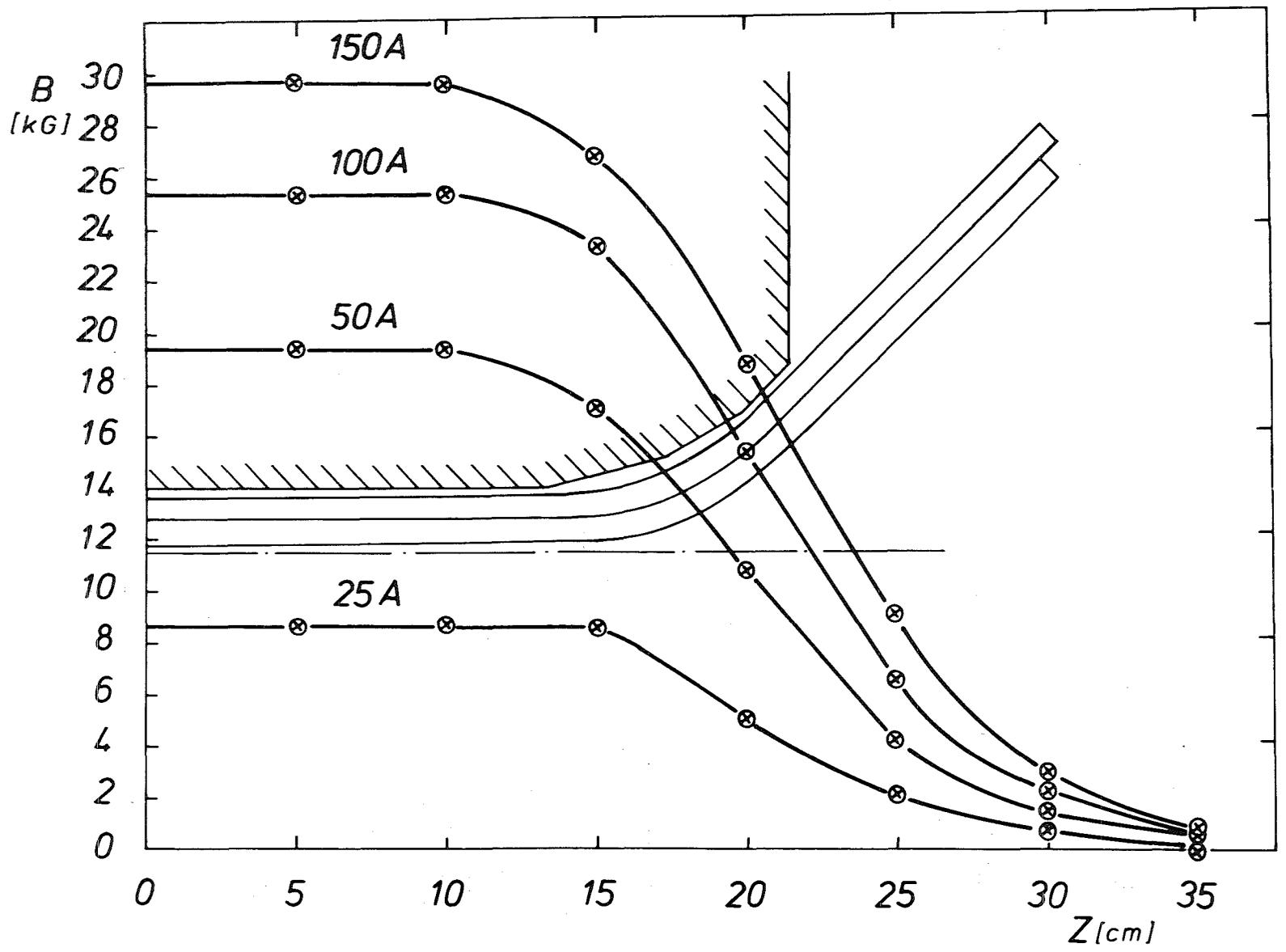


Abb. 9

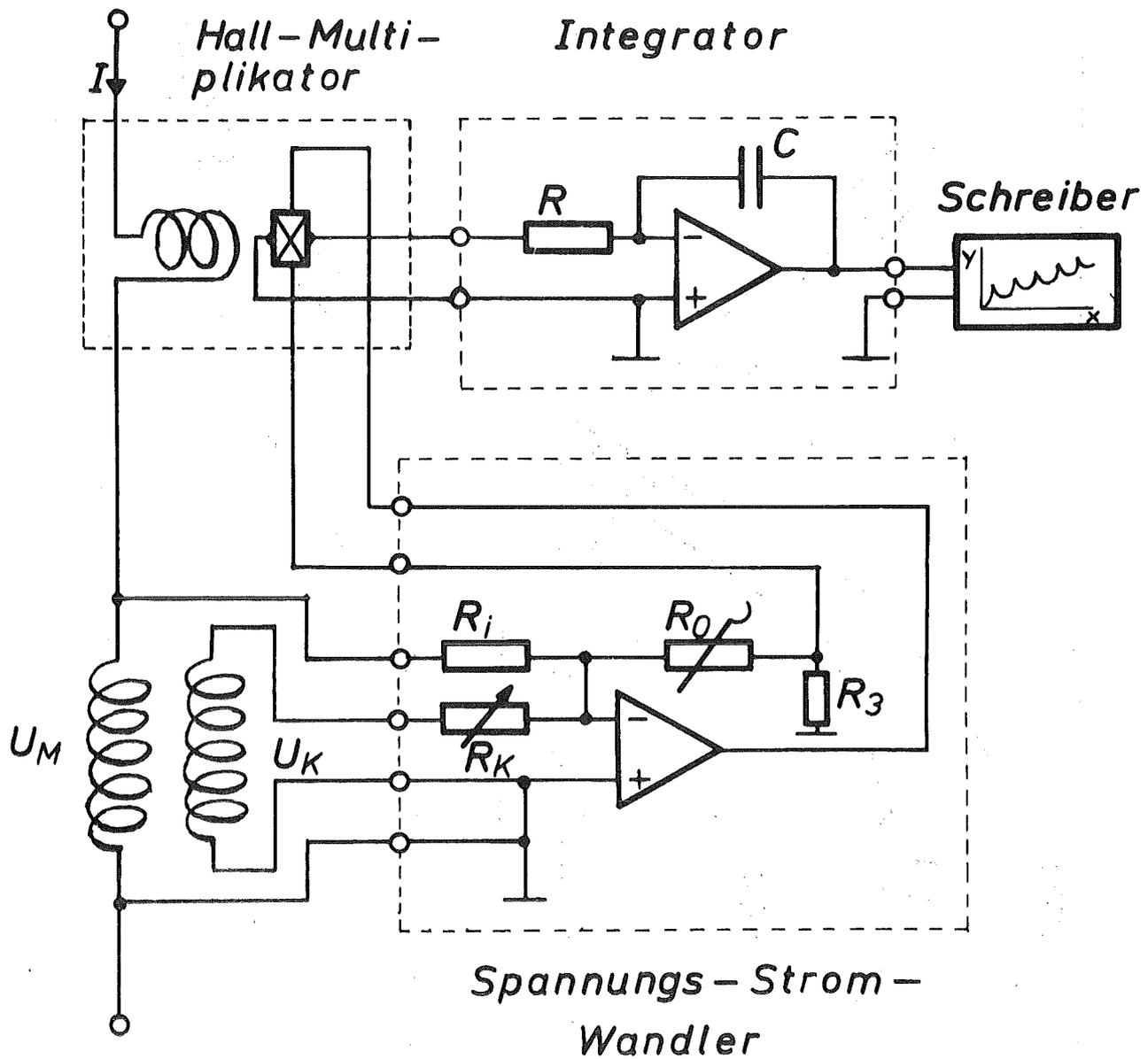
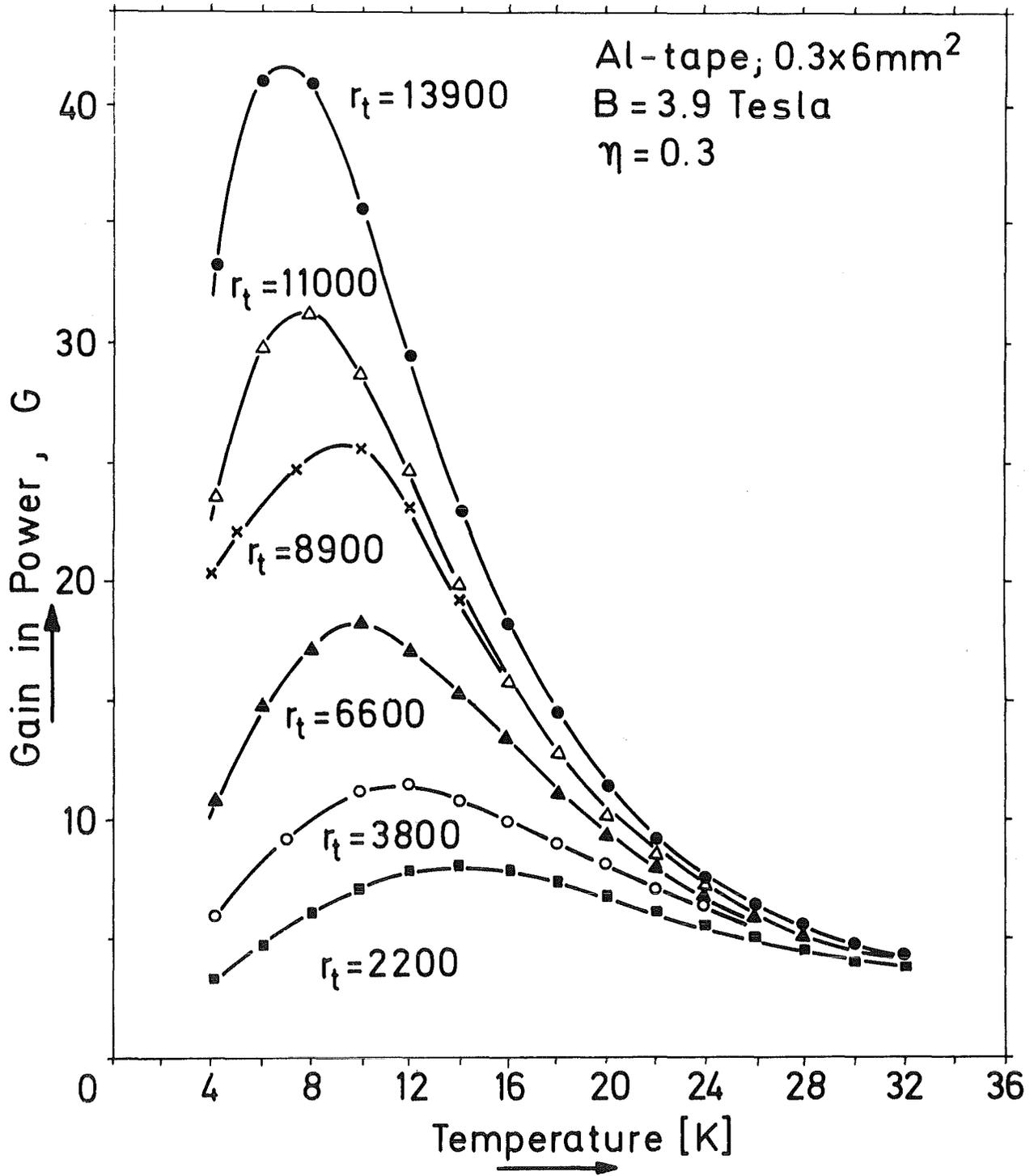


Abb. 10



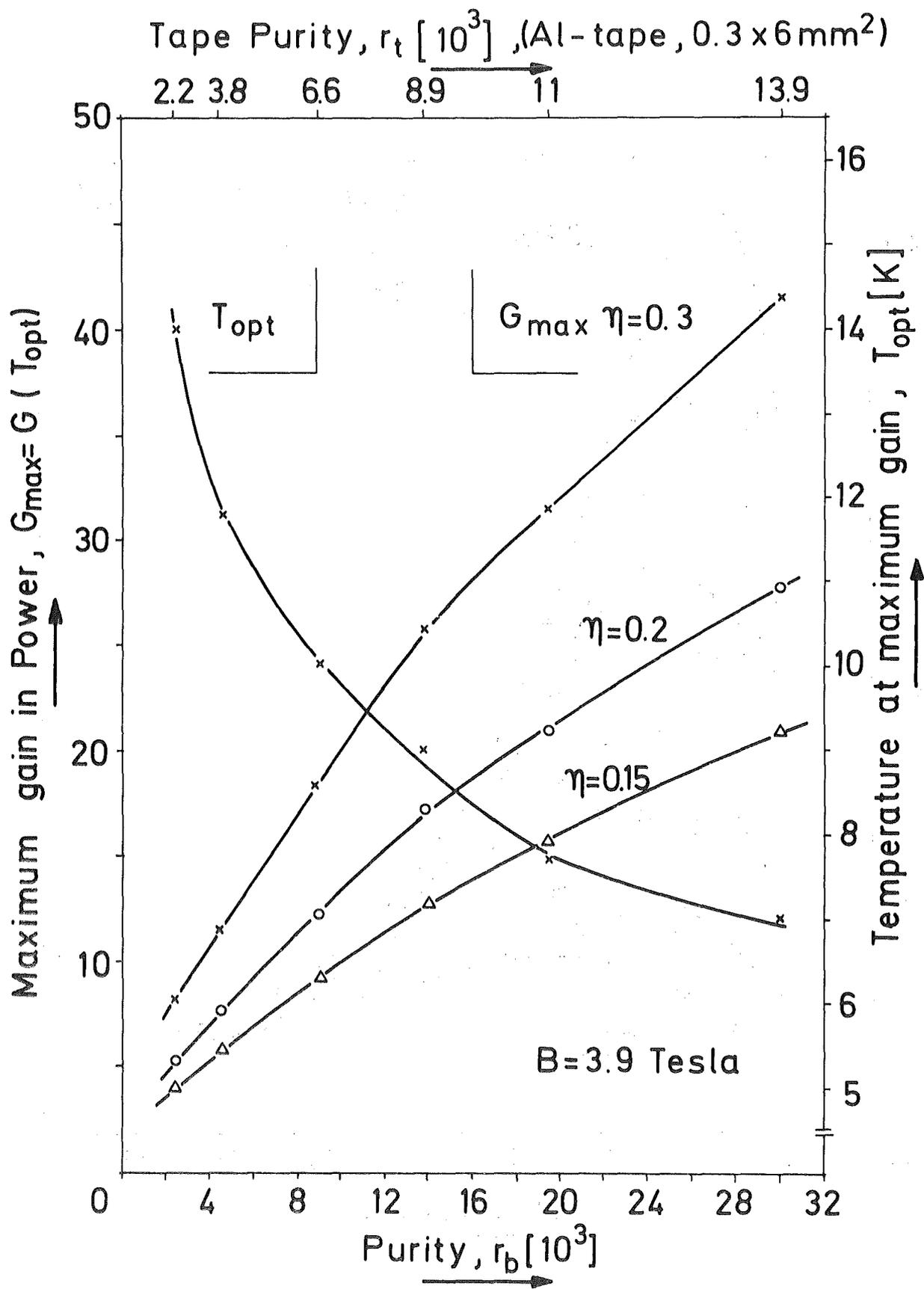
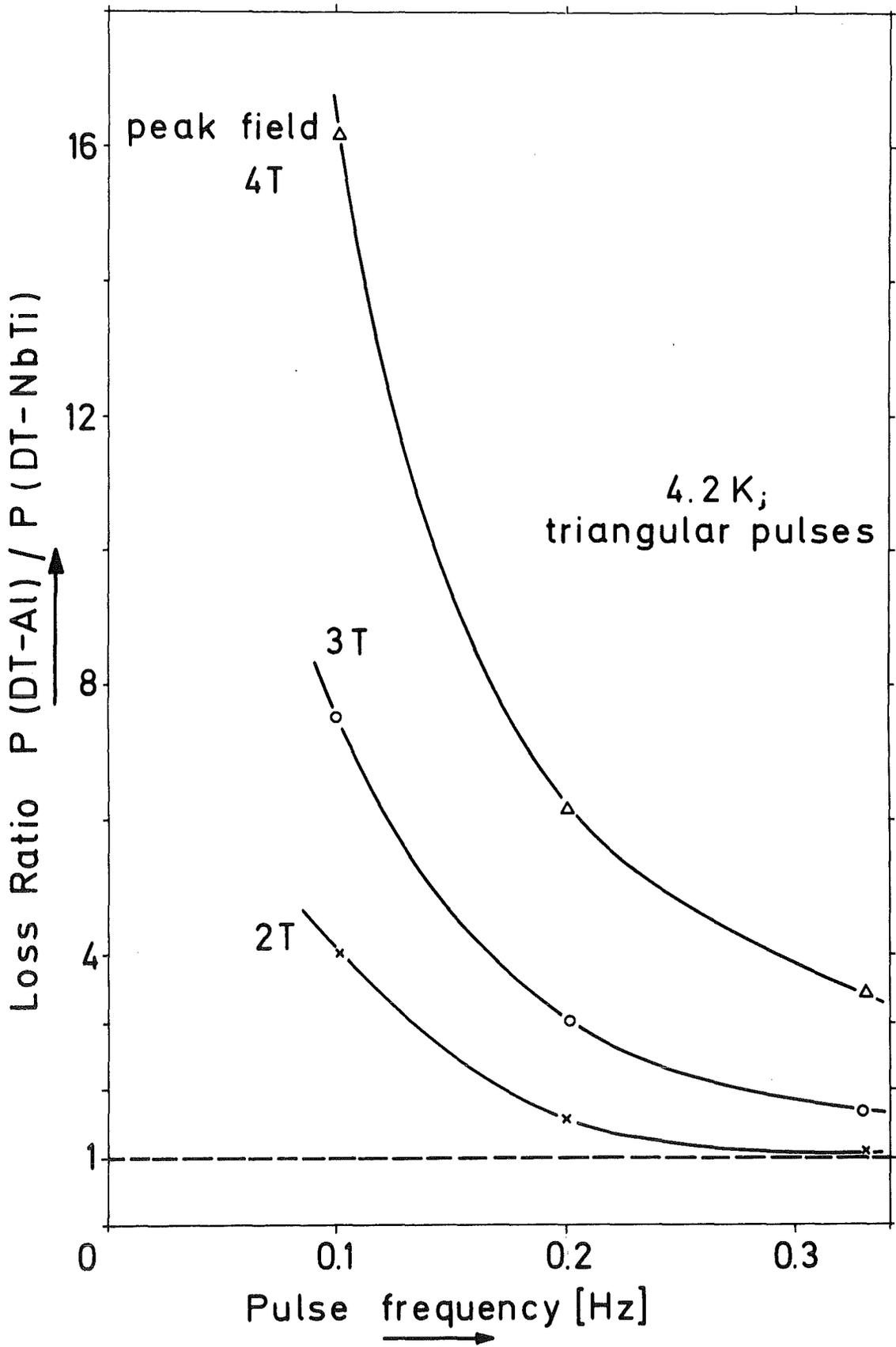


Abb. 12



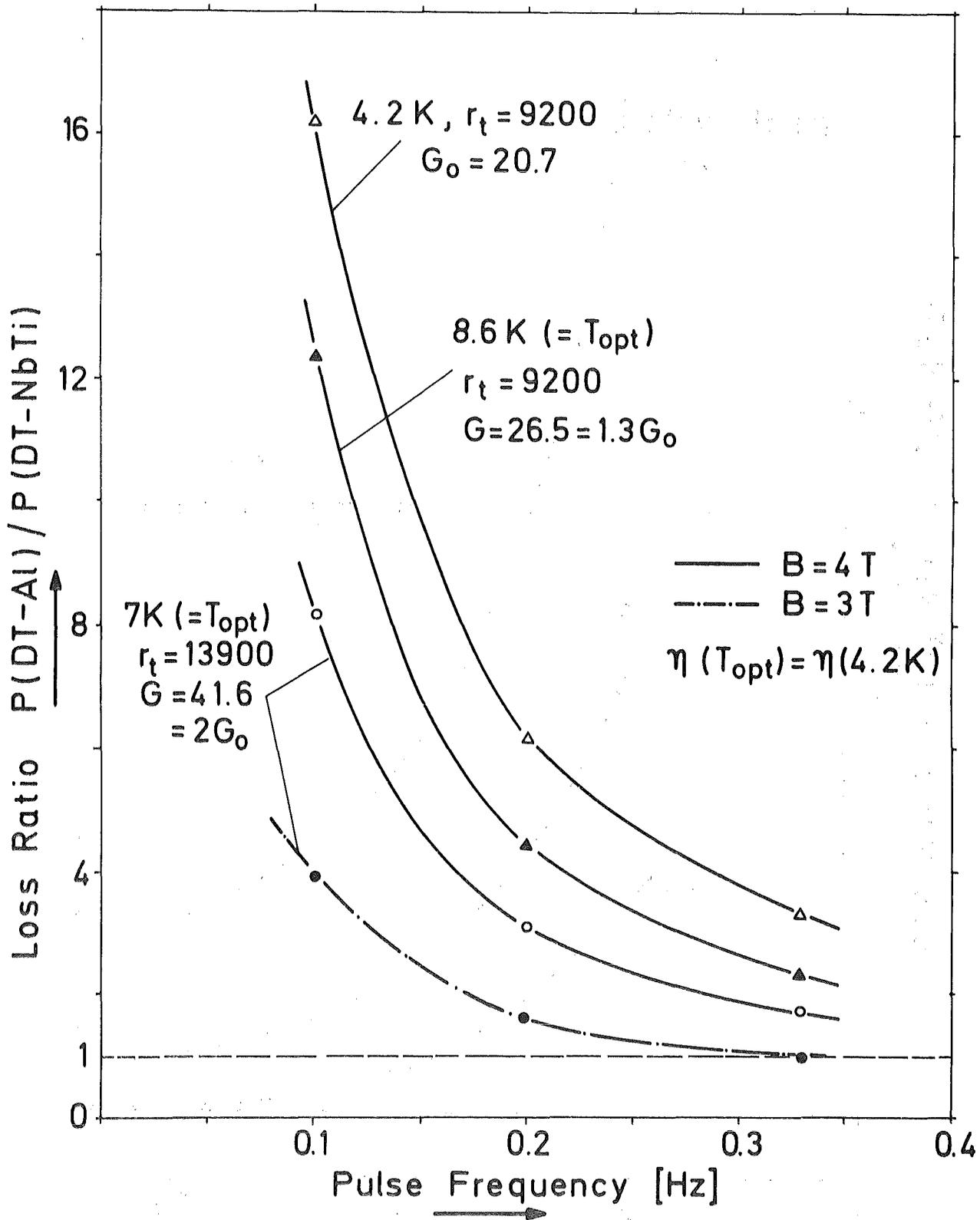


Abb. 14