

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

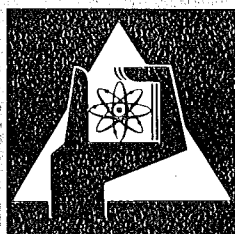
Oktober 1975

KFK 2102

Institut für Experimentelle Kernphysik

Pulsbarer supraleitender 28 kJ-Solenoidmagnet

K.P. Jüngst, G. Obermaier



**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 2102

Institut für Experimentelle Kernphysik

Pulsbarer supraleitender
28 kJ-Solenoidmagnet⁺)

K.P. JÜNGST und G. OBERMAIER

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

⁺) Diese Arbeit wurde mit Mitteln des "Bundesministerium für Forschung und Technologie" gefördert.

Z U S A M M E N F A S S U N G

Der Bau und der Test eines pulsbaeren supraleitenden Solenoid-Magneten ("PUSSY") wird beschrieben.

Der Magnet hat eine zugängliche Bohrung von 80 mm Durchmesser und erreicht ein Zentralfeld von $B_z = 4,75$ T, nachdem nur anfänglich ein geringes Training zu beobachten war.

Die Feldhomogenität liegt bei 0,1% in einer Kugel von 30 mm Durchmesser und bei 1 % in einer Kugel von 60 mm Durchmesser. Die Besonderheiten dieses Solenoids liegen in der Verwendung eines voll isolierten Braids, das aus 32 Multifilamentdrahnten besteht, als Leiter und in der Anwendung von Kupfermatten zur Kühlung des Magneten.

Der Magnet erwies sich als gut pulsbar mit einer Feldänderungsgeschwindigkeit von etwa 2 T/s oder 630 A/s, ohne daß eine bedeutende Degradation gegenüber dem Gleichstrombetrieb zu beobachten war.

PULSABLE SUPERCONDUCTING 28 kJOULES-SOLENOID

A B S T R A C T

The construction and test of a pulsable superconducting solenoid magnet ("PUSSY") is described. The magnet has a cold bore of 80 mm diameter, and it reached a central field of 4.75 T after little training in the first run.

The field homogeneity is 0.1 % in 30 mm dsv and 1 % in 60 mm dsv. The peculiarities of this solenoid are the fully insulated braid conductor, consisting of 32 multifilament wires with 206 NbTi filaments each, and the application of copper heat drains for the cooling of the magnet windings.

The magnet reached a rate of field change of 2 T/s or 630 A/s without significant degradation with respect to dc operation.

I n h a l t

1. Einleitung

2. Konzeption

2.1 Magnet-Geometrie

2.2 Leiter

2.3 Stromzuführung

2.4 Verluste und Kühlung

2.5 Harz-Verguß

3. Fertigung

3.1 Leiter

3.2 Stromzuführung

3.3 Magnet

4. Testergebnisse und Diskussion

4.1 Leiter

4.1.1. Stromtragfähigkeit

4.1.2. Verluste

4.2 Magnet

4.2.1. Feld

4.2.2. Verluste

4.2.3. Training

1. EINLEITUNG

Ziel dieser Arbeit war es, ein pulsbares homogenes Magnetfeld in einem großen Arbeitsvolumen für Messungen der frequenzabhängigen Verluste in technischen Supraleitern zur Verfügung zu stellen.

Die Flußdichte sollte bei einer Betriebstemperatur von 4,2 K größer als 4 T sein.

Das Magnetfeld sollte in etwa demselben Rahmen pulsbar sein, wie es bei supraleitenden Ringbeschleunigern der Fall ist, d.h. bis zu $\dot{B} \approx 1 \text{ T/s}$.

2. KONZEPTION

2.1 Magnet-Geometrie

Prinzipiell stehen mehrere Magnetkonzeptionen zur Erzeugung des erwünschten Feldes zur Verfügung, wie Solenoid- und Dipolkonzepte.

Am wenigsten aufwendig erschien es uns, ein Solenoid zu bauen, obwohl hier eine relativ große Bohrung zu wählen ist, da bei den zu untersuchenden technischen Supraleitern, die i.a. in Draht- oder Kabelform vorliegen, minimale Krümmungsradien zu beachten sind, unterhalb derer der Leiter beschädigt wird.

Daraus resultierte eine kalte Bohrung des Magneten von 80 mm Durchmesser.

Über den gesamten Bohrungsdurchmesser und möglichst weit in Achsrichtung des Magneten war ein auf besser als 1 % homogener Feldbereich gefordert. Das Bestreben jedoch, die Leitermenge und damit die Magnetlänge aus Kostengründen klein zu halten, würde eine Verengung des homogenen Bereiches bedeuten. Daher mußte das Solenoid endkorrigiert werden¹⁾, d.h. Zusatzwicklungen an den Enden des Magneten sorgen für eine Streckung des homogenen Bereiches (Fig. 1).

Die Berechnungen erfolgten mit einem von G. RIES²⁾ geschriebenen Rechenprogramm.

2.2 Leiter

Um einen derartigen Magneten mit der geforderten Geschwindigkeit

Eingereicht am 24. Juni 1975

von mindestens 1 T/s pulsen zu können, sind entsprechend ausgerüstete Stromversorgungen erforderlich.

Bei der Konzeption des Leiters steht man damit vor der Frage, ob man höhere Spannungen und niedrige Ströme oder aber niedrige Spannungen und höhere Ströme im Magneten bevorzugen soll.

Diese Frage wurde in unserem Fall dadurch entschieden, daß Stromversorgungen des letzteren Typs im Institut vorhanden waren und auch ausreichende Zeit zur Verfügung gestellt werden konnten. Es galt daher, einen Leiter mit hoher Stromtragfähigkeit (≥ 1000 A) zu verwenden.

Daneben sind die beim Pulsen des Magneten im Leiter auftretenden Verluste klein zu halten. Die Hysterese-Verluste im Supraleiter verringern sich mit abnehmendem Durchmesser der supraleitenden NbTi-Filamente. Induktionsströme, die zwischen den Filamenten über die normalleitende Matrix fließen und Verluste verursachen, lassen sich durch Verwendung einer bereichsweise hochohmigen Misch-Matrix (Cu/CuNi) weitgehend unterdrücken. Da aber die beiden genannten Maßnahmen die Kosten für den Leiter beträchtlich erhöhen, wurde der Filamentdurchmesser mit ≥ 15 μm festgelegt, eine Kupfermatrix gewählt und eine scharfe Verdrillung (Twist) des Multifilamentleiters gefordert. Die gewünschte hohe Stromstärke von mehr als 1000 A bei einem Magnetfeld von 5 T ließ sich mit einem Flechtleiter verwirklichen. Es bestand die Möglichkeit, einen derartigen Flechtleiter aus Multifilamentdrähten auf der institutseigenen Flechtmaschine (Fig. 2) selbst herzustellen. Dabei waren isolierte Multifilamentdrähte zu verwenden, um die Verluste gering zu halten. Ein solcher Flechtleiter ist einem Massiv-Leiter aus Gründen der Verluste und der Eigenfeldinstabilitäten vorzuziehen.

2.3 Stromzuführung

Um unkontrollierbare Induktionseffekte sowie stark variierende Übergangswiderstände an den Übergängen vom Magneten zur Stromzuführung zu vermeiden, wurde eine 32-adrige Tieftemperatur-Stromzuführung konzipiert, die die Adern des Flechtleiters getrennt aus dem Kryostaten führt. Eine entsprechende Anzahl von Widerständen wurde zur Messung des Stroms in jeder Ader

in den Schaltkreis eingefügt. Diese Widerstände sorgen gleichzeitig für eine gleichmäßige Stromaufteilung.

2.4 Verluste und Kühlung

Der Supraleiter in einem gepulsten Magneten muß geeignet gekühlt werden, da er sich sonst aufgrund der im Leiter entstehenden Verluste unzulässig erwärmen würde.

Um auf der anderen Seite eine mechanisch feste, kompakte Wicklung zu erzeugen, wurden keine Kühlkanäle verwendet.

Die entstandene Wärme sollte über Matten aus isolierten Kupferdrähten mittels Wärmeleitung ins Heliumbad abgeführt werden.⁴⁾

Eine Abschätzung der entstehenden Verluste (ohne frequenzabhängige Anteile) läßt sich mit der Beziehung (1) durchführen,⁵⁾ die für einen halben Feldzyklus $B = 0 \rightarrow B_{\max}$ gilt:

$$\Delta E_{\text{Magnet}} \text{ [Joule]} = \frac{1}{4} V d J_o B_o \left[\ln \frac{B_M + B_o}{B_1 + B_o} \right]_{\text{mittel}} \quad (1)$$

Dabei ist V [m³] das Supraleitervolumen, d [m] der Filamentdurchmesser, B_1 [T] das Magnetfeld des vollständigen Flußeindringens (typisch 0,1 T), B_m [T] das örtlich in den Wicklungen variierende Maximalfeld, und J_o [A/m²] und B_o [T] sind Parameter der Stromdichte-Magnetfeld-Beziehung

$$J_{C,SL} = J_o H_o (B_o + B)^{-1} \quad (2)$$

die dem jeweils verwendeten Supraleiter angepaßt wird. Der logarithmische Term ist über das Volumen zu mitteln.

Für einen Magnetfeld-Zyklus $0 \rightarrow B_{\max} = 4 \text{ T} \rightarrow 0$ wird danach ΔE_{Magnet} zu 22,8 [Joule/Zyklus] abgeschätzt. Für $\dot{B} = 1 \text{ T/s}$ entspricht dies einer Leistung von 2,85 [W], wobei die frequenzabhängigen Anteile nicht berücksichtigt sind (vgl. Fig. 10).

2.5 Harzverguß

Zur mechanischen Festlegung des Leiters im Magneten wurde ein Vakuum-Verguß mit Epoxydharz vorgesehen. Die expandierenden magnetischen Kräfte sollten zusätzlich durch eine Glasband-Bandage aufgefangen werden.

Um nicht eine aufwendige vollständige Kokille herstellen zu müssen, wurde die Glasband-Bandage mit zur Abdichtung der Wicklung verwendet. Damit wurde der Aufwand auf die Fertigung von bei verschiedenen Magneten nutzbaren Deckeln reduziert (Fig. 3).

3. F E R T I G U N G

3.1 LEITER

Entsprechend den in Abschnitt 2 entwickelten Vorstellungen wurde ein supraleitender Multifilamentleiter ausgesucht, der sich für die Verflechtung auf der institutseigenen Flechtmaschine eignete.

Es handelt sich um einen Draht von 0,345 mm Durchmesser (ohne Isolation) mit 206 NbTi-Filamenten à 16 µm Durchmesser in einer Kupfermatrix. Der Draht ist getwistet mit einer Twistlänge von 3,6 mm und ist mit einer 15-20 µm dicken Lackschicht isoliert.

Aus 32 dieser Drähte wurde ein Flechtleiter (Braid) mit den Abmessungen $2,3 \times 4,6 \text{ mm}^2$ (ohne Glasband-Isolation) hergestellt (Fig. 5). Zur besseren Windungs- und Lagenisolation wurde der Leiter mit einem 0,2 mm starken und 10 mm breiten Glasband umbündelt.

3.2 Stromzuführung

Aus den o.a. Gründen wurde der Übergang der Stromzuleitung zum Magneten von Zimmertemperatur auf die Temperatur des flüssigen Heliums mit einer speziellen 32-adrigen Tieftemperatur-Stromzuführung hergestellt.

32 durch Abstandshalter isoliert geführte Kupferstäbe, die zur besseren Kühlung in einem von kaltem Heliumgas durchströmten Rohr angeordnet wurden, bildeten jeweils einen Pol.

Erst auf Zimmertemperatur wurden die Adern zusammengeführt. Es wurde technisches Kupfer verwendet, da dies aufgrund seines niedrigen Restwiderstandsverhältnisses bei dem beabsichtigten intermittierenden Betrieb den geringsten mittleren Heliumverbrauch erwarten ließ.⁶⁾

Die supraleitenden Adern wurden mit den Kupferstangen durch Lötkontakte fest verbunden. Auf der anderen Seite kann die Tieftemperatur-Stromzuführung trotz der großen Zahl von Adern leicht über Steckkontakte mit den auf Zimmertemperatur herangeführten Stromzuleitungen verbunden werden.

3.3 Magnet

Der Spulenkörper zur Aufnahme der Wicklung wurde aus Glasfaserkunststoff gefertigt. In die Flansche des Spulenkörpers sind mehrere Lochkränze gebohrt worden, um das Vergießen der Wicklung mit Epoxydharz und das vorhergehende Evakuieren zu ermöglichen. Für die Ein- und Ausführung des Leiters wurden in einen Flansch des Spulenkörpers Nuten eingefräßt.

Der Flechtleiter wurde unter einem konstanten Zug von 120 N auf den Spulenkörper gewickelt. Im Hochfeldteil des Magneten, d.h. im Bereich höherer Verluste, wurde nach jeder Leiterlage eine Lage Kupfermatten aus isolierten Kupferdrähten (0,3 mm Durchmesser) eingelegt, deren Enden aus dem Magneten herausgeführt wurden. Im Niederfeldteil folgten die Kupfermatten nach jeweils 2 Lagen.

Eine ca. 14 mm starke Bandage wurde aus Glasband auf die äußersten Windungen gewickelt. Die Bandage wurde dann mit Epoxydharz luftdicht abgeschlossen. Nach Aufsetzen der Deckel (s. Fig. 3) auf die Flansche des Spulenkörpers wurde die Wicklung bis auf $5 \cdot 10^{-2}$ Torr ausgepumpt und anschließend mit entgastem, erwärmten Epoxydharz vergossen. In einem Modellversuch mit einem Kupfer-Flechtleiter war zuvor nachgewiesen worden, daß das Harz alle Hohlräume füllt.

Der fertig montierte Magnet ist in Fig. 6 abgebildet.

4. TESTERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 Leiter

4.1.1 Stromtragfähigkeit

An Kurzproben des verwendeten Supraleitermaterials wurde die magnetfeldabhängige kritische Stromstärke bestimmt.

Die Ergebnisse für eine Ader des Flechtleiters, d.h. für den Multifilamentdraht, sind in Fig. 7 und Fig. 8 dargestellt.

Fig. 7 zeigt die Magnetfeldabhängigkeit des kritischen Stroms für eine Spannungsmeßempfindlichkeit von $1,5 \cdot 10^{-8}$ V/cm.

Aus den Meßgrößen Spannung und Strom sowie aus dem Supraleiterquerschnitt und der Probenlänge wird ein "spezifischer Widerstand" $\rho = U \cdot A / (I \cdot l) = E / j$ gebildet, dessen Angabe in vielen Fällen die verwendete Meßempfindlichkeit besser beschreibt als die elektrische Feldstärke U/l allein.

Wegen des stark nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Strom und Spannung ist es zweckmäßig die Funktion $\rho(j)$ im doppelt-logarithmischen Maßstab darzustellen (Fig. 8).

Als kritische Stromdichte wird dann häufig der $\rho = 10^{-12} \Omega \text{ cm}$ entsprechende Stromdichtewert definiert. Bei guten Leitern mit geringfügigen Inhomogenitäten ist aber der kritische Strom nur wenig von der Definition abhängig.

Falls der Flechtvorgang die Stromtragfähigkeit nicht beeinflusst, ist für den Flechtleiter das 32-fache des Draht- Kurzprobenwertes zu erwarten.

Der experimentell an einer Flechtleiter-Kurzprobe festgestellte kritische Strom liegt jedoch um 10 % darunter.

Der Grund hierfür ist in der beim Verflechten erfolgten örtlich variierenden Kaltverformung des Supraleiters zu suchen, die sich je nach metallurgischer Vorbehandlung in einer lokalen Erniedrigung der kritischen Stromdichte äußern kann. Damit verringert sich die Steigung der $\rho(j)$ -Kurven und der Spannungsanstieg beginnt bei kleineren Stromwerten.

4.1.2 Verluste

Die Verluste des Flechtleiters wurden durch Messung der Magnetisierung in Abhängigkeit von Magnetfeld und Pulsfrequenz bestimmt.

Fig. 9 zeigt die Hysterese-Schleife bei einer Zykluszeit von 200 s. Der Flächeninhalt ergibt die Verluste zu $166 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$, bezogen auf das Supraleiter-Volumen. Die ermittelte Frequenzabhängigkeit ist in Fig. 10 dargestellt.

Die frequenzabhängigen Anteile an den Gesamtverlusten sind relativ gering. Mit Hilfe dieser Daten ließen sich die Verluste des Magneten gut bestimmen, wenn man die Magnetfeldvariation über dem Leitervolumen berücksichtigt. Eine entsprechende Mittlung ergibt als Magnetverluste $2/3$ der Leiterverluste bei Maximalfeld:

$$\Delta E_{\text{Magnet}} = \frac{2}{3} \frac{\Delta E}{V_{\text{SL}}} \Big|_{B=B_{\text{max}}} \cdot V_{\text{SL, gesamt}} \quad (3)$$

wobei $\frac{\Delta E}{V_{\text{SL}}} \Big|_{B=B_{\text{max}}}$ aus den Magnetisierungsmessungen entnommen wird.

4.2 Magnet

4.2.1 Feld

Zunächst wurde mittels eines Gaußmeters mit rotierenden Spulen die Beziehung zwischen Strom und zentralem Magnetfeld hergestellt, d.h. die "load line" des Magneten bestimmt (s. Fig. 11, in der zudem die Kurzprobencharakteristik des Flechtleiters eingetragen ist). Der maximale Zentralfeldwert liegt bei 4,75 T.

Der gestrichelte Bereich stellt den Quenchbereich des Magneten dar, d.h. den Bereich, in dem der Magnet normalleitend wurde und sich dabei ständig verbesserte (Training). Die verbleibende Degradation gegenüber dem Kurzprobenwert liegt bei 8 %. Auf die Prüfungen der errechneten Homogenität über NMR-Messungen konnte verzichtet werden.

4.2.2 Verluste

Die Verluste des Magneten bei Pulsbetrieb sind mit einer Hall-Multiplikator-Methode bestimmt worden. Sie betragen 16,1 Joule/Zykl. für $\dot{B} = 0,15 \text{ T/s}$ bei einseitigem Feldpuls (keine Feldumkehr) und liegen damit um 29% unter den in Abschnitt 2 nach Beziehung (1) abgeschätzten Verlusten in Höhe von 22,8 Joule/Zyklus. Die Abschätzung nach Beziehung (3) ergibt mit $\Delta E/V_{SL} |_{4 \text{ T}} = 76 \text{ kJoule/m}^3$ für einseitigen Feldpuls einen Wert von 19,1 Joule/Zyklus.

4.2.3 Training

Das "Training" des Magneten ist in Fig. 12 dargestellt; Übergänge in die Normalleitung, die bei Pulsbetrieb zustande kamen, sind hierbei entsprechend gekennzeichnet. Es wird deutlich, daß zum einen das Training des Magneten erfreulich kurz ist, zum andern bei Pulsgeschwindigkeiten bis zu 1T/s nahezu die Gleichstromwerte erreicht wurden.

Die Kühlung über Kupfermatten ist offenbar ausreichend.

Die Ursache für das, wenn auch geringe Training des Magneten ist noch nicht geklärt.

Die nach dem Training noch verbleibende Differenz zwischen Kurzprobenwerten und den Magnetdaten könnte auf ungenügende Fixierung der Wicklung durch die Glasband-Bandagen zurückgeführt werden, da diese Bandagen aufgrund der Glasfaserrichtung bei Abkühlung weniger schrumpfen als die Wicklung.

Es wurden jedoch die geforderten Daten des Magneten voll erreicht bzw. übertroffen. Nach diesen Ergebnissen wurde der Magnet zunächst seiner Bestimmung zugeführt. Weitere Tests sind für einen späteren Zeitpunkt in Aussicht genommen.

Tabelle 1 gibt eine Zusammenfassung der wichtigsten Daten des Magneten.

Tab. 1 Magnetdaten

Zentralfeld	$B_Z = 4,75 \text{ T}$
Maximalfeld an der supraleitenden Wicklung	$B_{\max} = 5,10 \text{ T}$
Homogenität über Kugel von 30 mm Durchmesser	$\frac{\Delta B}{B} \leq 0,1 \%$
60 mm Durchmesser	$\frac{\Delta B}{B} \leq 1 \%$
Betriebsstrom bei 4,75 T	$I = 1498 \text{ A}$
Induktivität	$L = 25 \text{ mHy}$
gespeicherte Energie bei 4,75 T	$E = 28 \text{ kJoule}$
Verluste bei einseitigem Feldpuls bis 4 T und $\dot{B} = 0,15 \text{ T/s}$	$\Delta E = 16,1 \text{ Joule/Zyklus}$
und $\dot{B} = 1,5 \text{ T/s}$	$\Delta E = 17,8 \text{ Joule/Zyklus}$
zugängliche Bohrung	$D_i = 80 \text{ mm}$
Feldreduktion bei $\dot{B} = 2 \text{ T/s}$	$\frac{\Delta B}{B_Z} = 0,08$

Die Autoren danken N. Brünner und seinen Mitarbeitern für die hilfreiche Unterstützung bei der Fertigung des Flechtleiters und des Magneten.

Die Messungen des kritischen Stromes an Draht-Kurzproben wurden von Fr. A. Reichert durchgeführt.

Literatur

- ¹ D.B. MONTGOMERY, Solenoid Magnet Design, Wiley-Interscience 1969.
- ² G. RIES, KFZ Karlsruhe, IEKP, unveröffentlicht.
- ³ J.L. DUCHATEAU und B. TURCK, Cryogenics, Oct. 1974, 545.
- ⁴ P. BRAUNS et al., 4th Intern. Cryogenic Eng. Conf., Eindhoven, 1972, 270
- ⁵ M.N. WILSON et al., Rutherford Lab., RPP/A73 (1969)., Paper I
- ⁶ J.M. LOCK, Cryogenics, Dec. 1969, 438.

Abbildungen

- Fig. 1: Querschnittsskizze des Magneten mit Homogenitätsbereichen $\Delta B/B < 0,1 \%$ bzw. $< 1\%$
- Fig. 2: Flechtmaschine zur Herstellung von supraleitenden Flechtleitern mit 32 Adern
- Fig. 3: Teile-Zusammenstellung für den Harzverguß: 1,2) Spulenkörper aus glasfaserverstärktem Kunststoff, 3) Harzkanäle 4) Kupfermatten (schematisch), 5) Vergießdeckel, 6) Dichtung, 7) Abdichtung der Kupfermatten mit Silikonkautschuk, 8) harzgetränkte Glasbandlagen zum luftdichten Abschluß, 9) Glasband-Bandage, 10) Wicklungen
- Fig. 4: entfällt
- Fig. 5: Ansicht des Flechtleiters aus 32 Multifilamentdrähten
- Fig. 6: Pulsbares supraleitendes Solenoid, "PUSSY". Erkennbar die herausstehenden Kupfermatten für die Kühlung
- Fig. 7: Kritischer Strom des verwendeten Multifilamentdrahtes in Abhängigkeit vom externen transversalen Magnetfeld bei der Temperatur 4,2 K. Die Meßempfindlichkeit für die Bestimmung des kritischen Stromes lag bei $1,5 \cdot 10^{-8}$ V pro 1 cm Leiterlänge.
- Fig. 8: Spezifischer Widerstand oberhalb des kritischen Stromes in Abhängigkeit von der Stromdichte (Mittelwert über den gesamten Leiterquerschnitt) und vom externen Magnetfeld
- Fig. 9: Magnetisierung des supraleitenden Flechtleiters im transversalen externen Magnetfeld

Fig. 10: Verluste des Flechtleiters in Abhängigkeit von der Feldänderungsgeschwindigkeit (maximales Feld 4 T). Die Abweichung von der gestrichelten Geraden ist verhältnismäßig gering, d.h. die Verluste aufgrund von Filamentkoppelung sind klein.

Fig. 11: Strom-Feld-Zusammenhang für den Flechtleiter und Lade-Kennlinie des Magneten für Zentral- und Maximalfeld. Der gestrichelte Bereich ist in Fig. 12 aufgelöst. Der punktierte Bereich stellt die Degradation gegenüber dem Kurzprobenwert dar.

Fig. 12: "Training" des Magneten durch fortlaufende Übergänge vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand beim Laden des Magneten.

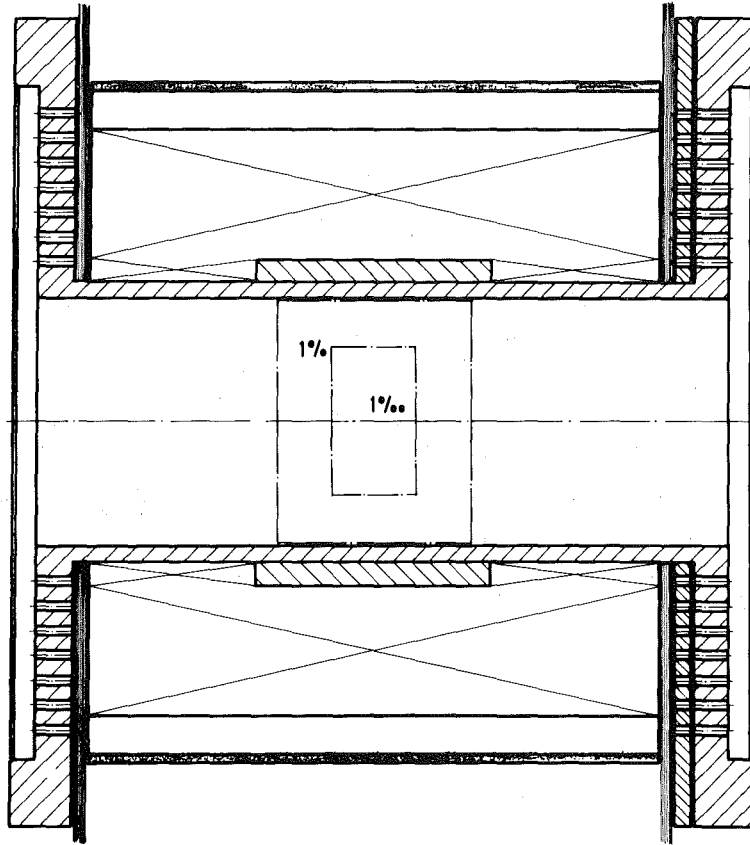


Fig. 1

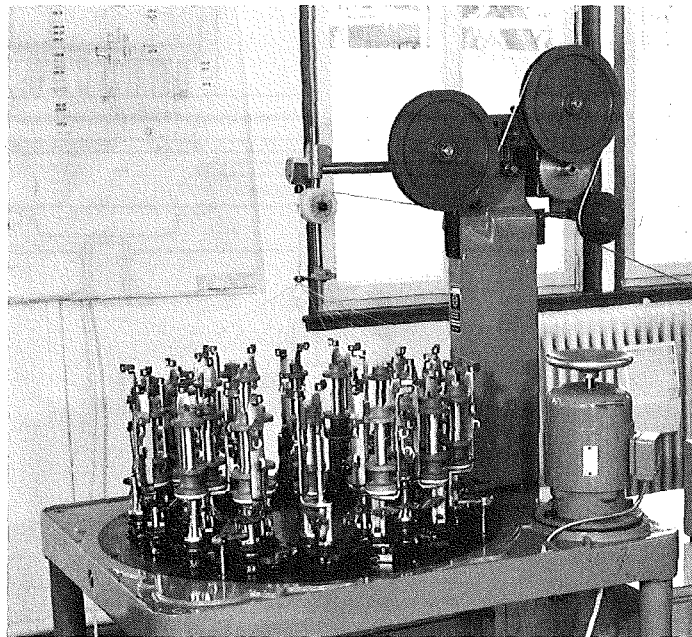


Fig. 2

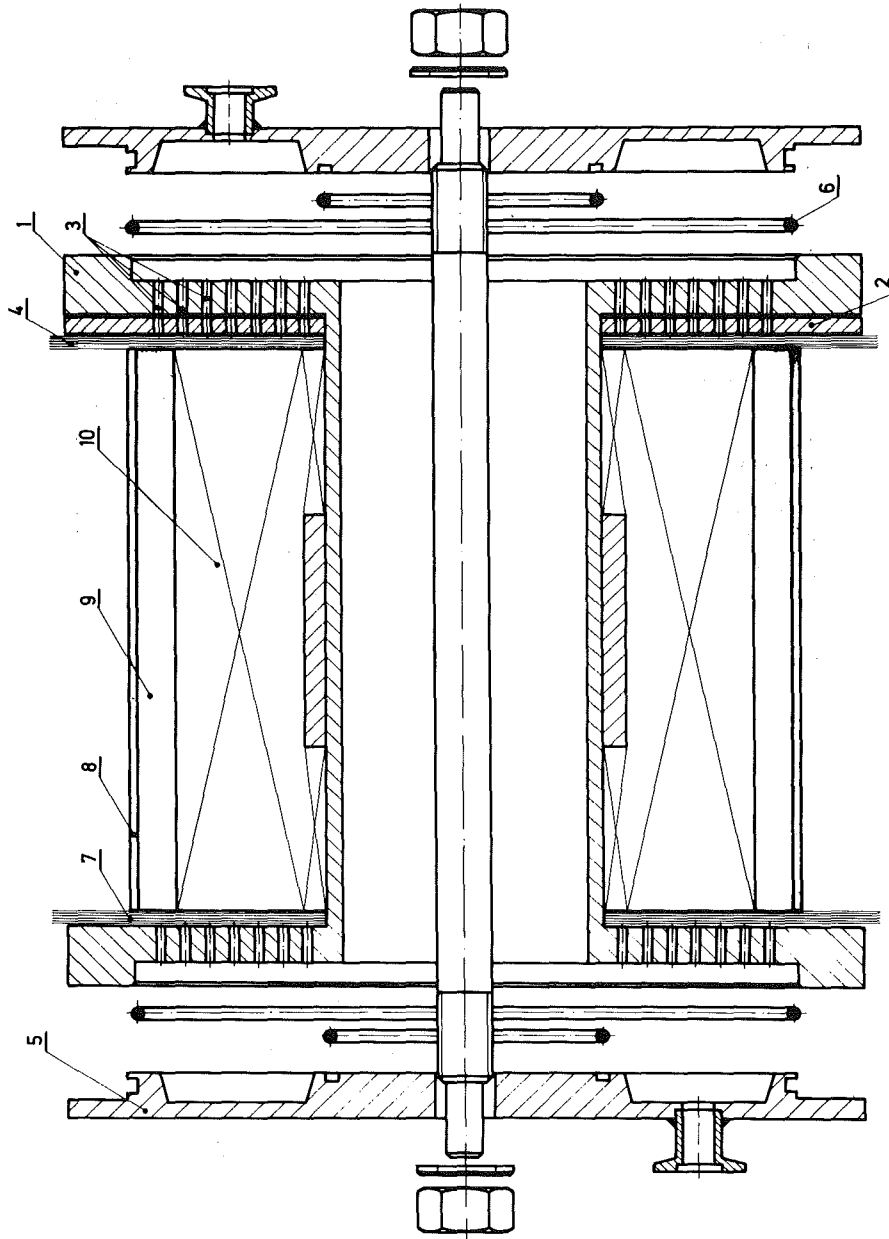


Fig. 3

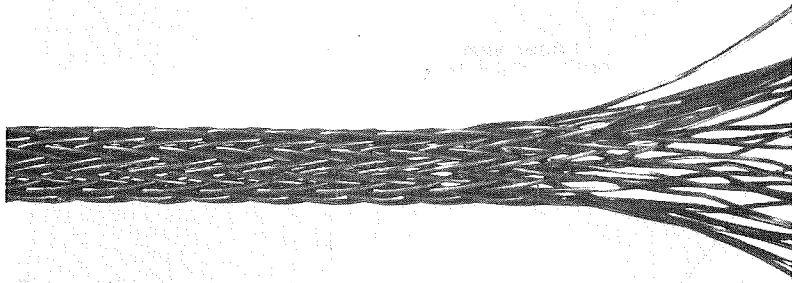


Fig. 5



Fig. 6

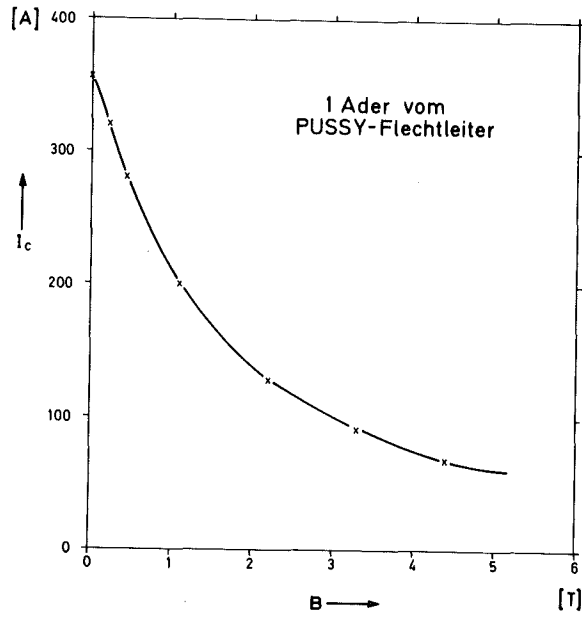


Fig. 7

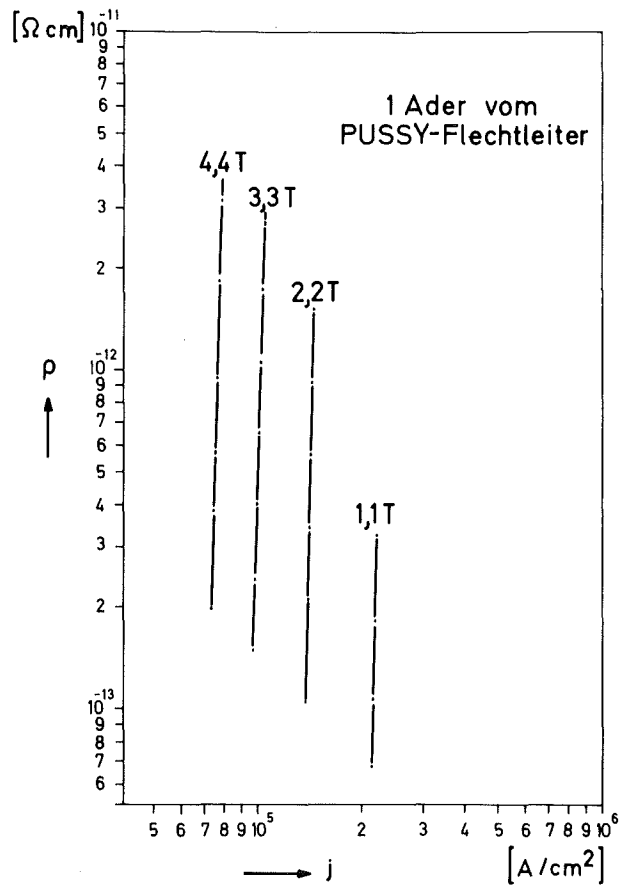


Fig. 8

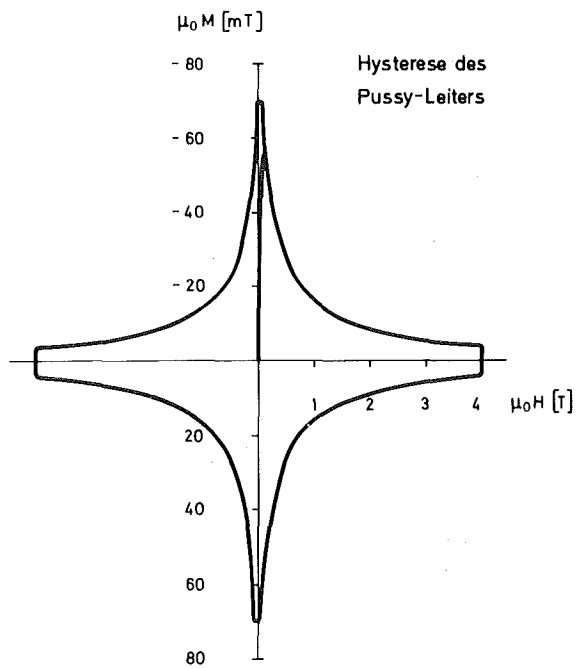


Fig. 9

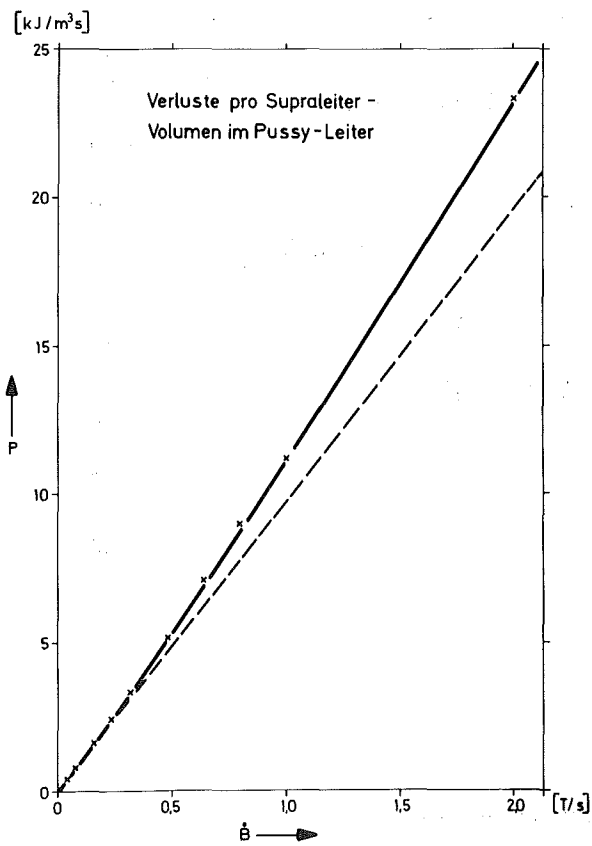


Fig. 10

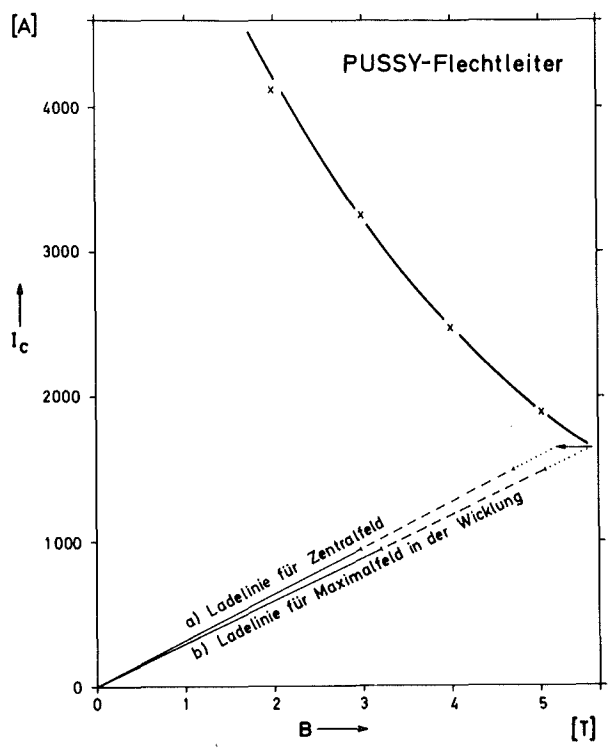


Fig. 11

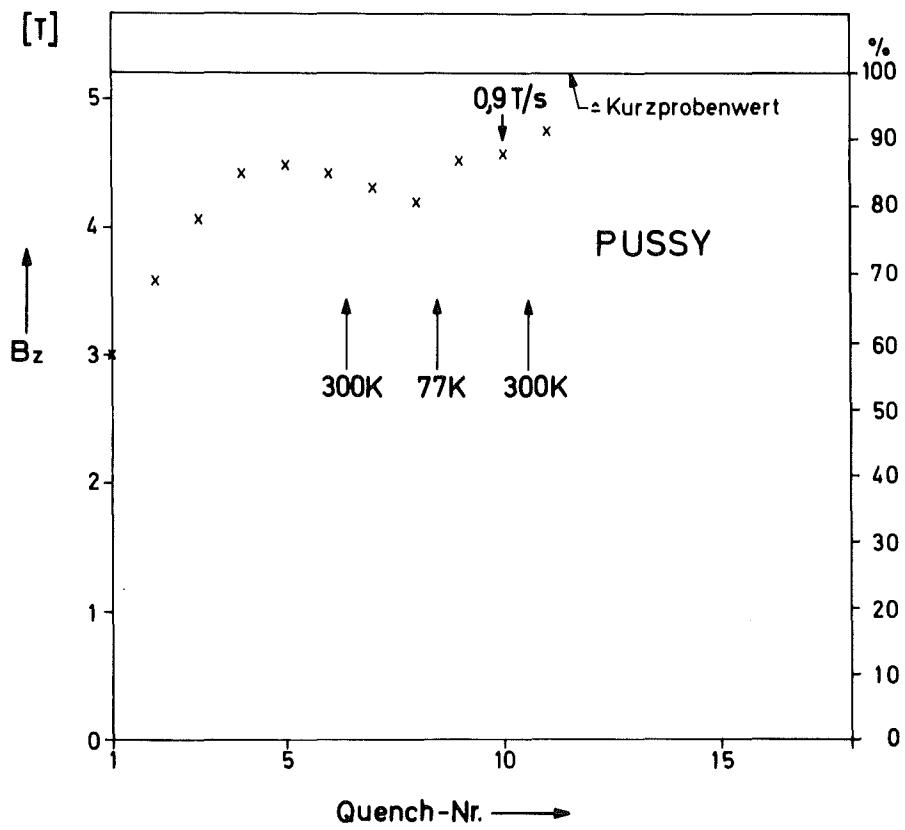


Fig. 12