Die neue supraleitende Quadrupollinse für den Strahltransport hochenergetischer Teilchen von mehreren 100 GeV der CERN

Autor(en): **Ašner, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **64 (1973)**

Heft 17

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915594

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die neue supraleitende Quadrupollinse für den Strahltransport hochenergetischer Teilchen von mehreren 100 GeV der CERN

Von *A. Ašner*

621.372.5:621.311.25:621.039

Nach Erläuterung der theoretischen Grundlagen und der sich ergebenden engen Toleranzen für eine erfolgreiche Konstruktion wird über die Entwicklung des 1 m langen supraleitenden, gleichstromerregten Quadrupols mit 50-T/m-Feldgradient in 9 cm warmer Bohrung berichtet.

Der Quadrupol ist nach 10monatiger Konstruktion im August 1972 erfolgreich erprobt worden: Bereits bei der ersten Abkühlung konnte der Magnet mit 90 % seines kritischen Stromes erregt werden. Die Gesamtverluste des Kryostaten mit 6 m langer Transferlinie betrugen weniger als 5 W.

1. Die Entwicklung von vollstabilisierten filamentierten supraleitenden Kompositen

Als die 1966–1970 durchgeführten grundlegenden theoretischen und experimentellen Arbeiten der von *Smith, Hancox, Wilson* u. a. [1][1] geführten Gruppe im Rutherford-Laboratorium zur Entwicklung von vollstabilisierten, sehr dünnen supraleitenden Nb-Ti-Filamenten in Kompositleitern geführt und die Kriterien für die Dimensionierung derartiger Kompositen für Gleichstrom- und gepulste Magnete bestimmt hatten, war man der Ansicht, dass der Weg zu ihrer erfolgreichen Realisierung nun offen sei.

Prüfergebnisse an einfachen Spulen (Solenoiden), die mit vollstabilisierten Kompositen gewickelt waren, schienen diese Erwartungen mehr oder weniger zu bestätigen.

Eine Ernüchterung setzte mit der Erprobung der ersten Dipol- und Quadrupolanordnungen ein, indem die erreichten Erregerströme und Magnetfelder unter den Berechnungswerten blieben und im Durchschnitt 50 % der gemessenen kritischen Stromdichte im Supraleiter nicht überschritten haben.

Nach welchen Kriterien sind filamentare Kompositenleiter aufgebaut, welche Vorteile können für die Konstruktion von supraleitenden Magneten erwartet werden, welche Einschränkungen und Probleme ergeben sich dabei?

Fig. 1 zeigt das dreidimensionale Diagramm eines Supraleiters des zweiten Typs, in unserem Falle eines Nb-Ti-Leiters. Der supraleitende Zustand ist nur innerhalb des durch die kritische Temperatur T_k [9,5 K], das kritische Magnetfeld B_k [12,2 T] und die kritische Stromdichte J_c begrenzten Raumes gewährleistet. Beim Überschreiten eines Parameters J_c, T_k oder B_k geht der Supraleiter in den Normalzustand über. Soll ein Maximalfeld in der Wicklung von 5 T erreicht werden, so sinkt T_k auf 6,5 K; bei der 4,2-K-Temperatur des flüssigen Heliums beträgt der für die Konstruktion des Magneten noch verfügbare Temperaturbereich etwa 2 K.

Vollstabilisierte supraleitende Filamente werden nun aus folgenden einfachen Überlegungen abgeleitet: Es sei eine Situation nach Fig. 2 gegeben; beim Eindringen des äusseren Magnetfeldes B_a in den Supraleiter werden in diesem Magnetisierungsströme der Dichte J_c [A/m²] über den ganzen Querschnitt hervorgerufen. Setzt eine Störung ein, z. B. eine Temperaturänderung ΔT_1 [K], so sinkt J_c um ΔJ_c und B_a dringt um Δx tiefer in den Supraleiter ein. Dabei wird die Wärme ΔQ [Ws] erzeugt, die eine adiabatische Temperaturerhöhung $\Delta T_2 = \Delta Q/S$ hervorruft (S in Ws/K).

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Für $\Delta T_2 < \Delta T_1$ ist der Vorgang stabil, die Quenchtendenz wird gedämpft. Aus dieser Bedingung kann der maximale Filamentendurchmesser zu $d <$ 80...100 µm abgeleitet werden.

Die Filamente sind in einer leitenden Matrix zumeist aus Cu oder Kupronickel (Cu-Ni) eingebettet. Um die bei veränderlichem $\dot{B}_a$ auftretenden Verluste und Erwärmung hervorrufenden Querströme durch die Matrix zu verhindern (Fig. 3), werden die Filamente mit einem bestimmten Schritt (engl. «Twistpitch») verdrillt. Da bei Erregung und Entregung von supraleitenden Gleichstrommagneten gleichfalls ein $\dot{B}_a$ auftritt, ist auch in diesem Fall eine Verdrillung vorzusehen. Die Schrittlänge (4 l) ist derart zu wählen, dass $l \ll l_c$ ist, wobei l_c die kritische Verdrillungslänge bedeutet:

$$l_c^2 = \frac{\varrho \cdot J_c \cdot d}{\dot{B}_a} \quad [\mathrm{m}^2] \tag{1}$$

bei welcher der gesamte, im Supraleiter fliessende Strom durch die Matrix abgeleitet wird (Fig. 3).

Als typische Werte für eine Cu-Matrix und Gleichstrommagnete mit (Erregungs-) $\dot{B}_a$ von 0,001...0,1 Ts^{-1} wählt man 4 $l \approx$ 2...3 cm und für gepulste Magnete mit $\dot{B}_a$ von 1...4 Ts^{-1} 4 $l \approx$ 1...3 mm.

Der Filamentendurchmesser in Kompositen für gepulste Magnete muss wesentlich geringer als 80...100 µm sein. Beim

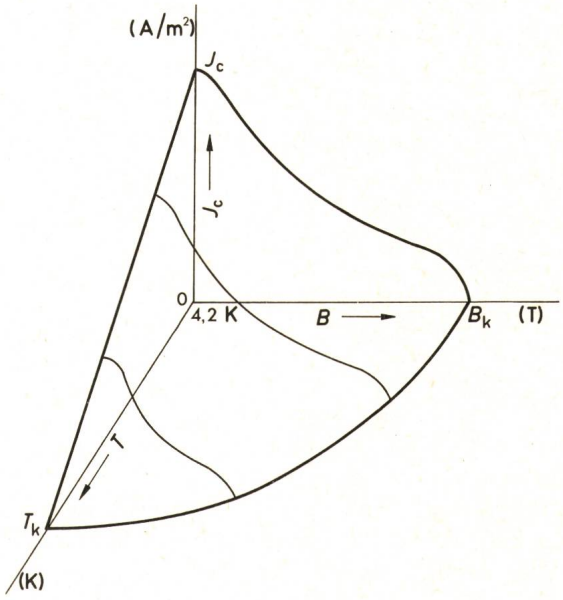

Fig. 1
Dreidimensionales Diagramm eines Supraleiters
Bezeichnungen siehe im Text

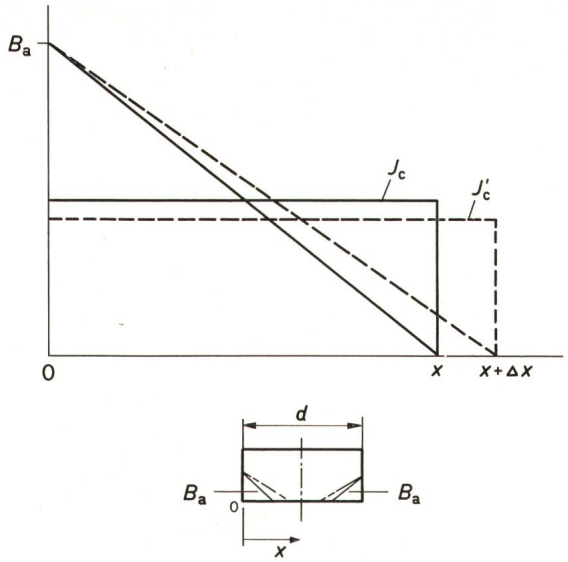

Fig. 2
Stabilisierung des Supraleiters
Bezeichnungen siehe im Text

Pulsen treten im Supraleiter mit dem Volumen V [m³] Verluste auf, die in guter Annäherung durch

$$P = \frac{\dot{B} J_c V d}{4} \text{ [W]} \qquad (2)$$

gegeben sind. Um diese Verluste auf technisch tragbare und für das Kühlmittel (flüssiges He) annehmbare Werte zu reduzieren, sind Filamentendurchmesser von 4...10 µm erforderlich.

Parallel zu den theoretischen Untersuchungen verliefen auch die Bemühungen, entsprechende supraleitende Kompositen herzustellen: Diese sind heute mit mehreren 100...10 000 Filamenten von 2...5 µm Durchmesser in Cu- oder kombinierter Cu...Cu-Ni-Matrix in Form von Rund- oder Rechteckleitern, geflochtenen und gepressten Litzebändern oder stark gepressten Kabelleitern für Ströme bis zu mehreren kA bei 5 T erhältlich.

2. Bisherige Erfahrungen und Ergebnisse

Was sagen nun die bisher erzielten praktischen Ergebnisse an gebauten und erprobten Solenoiden und Magneten aus (bei Begrenzung auf Gleichstrommagnete)?

Man kann die bisherigen Ergebnisse in drei Stufen einteilen:

a) Kontrollmessungen an Supraleitern (Kurzprobenmessungen);
b) Messungen von Solenoiden;
c) Messungen von supraleitenden Magnetmodellen und Magneten.

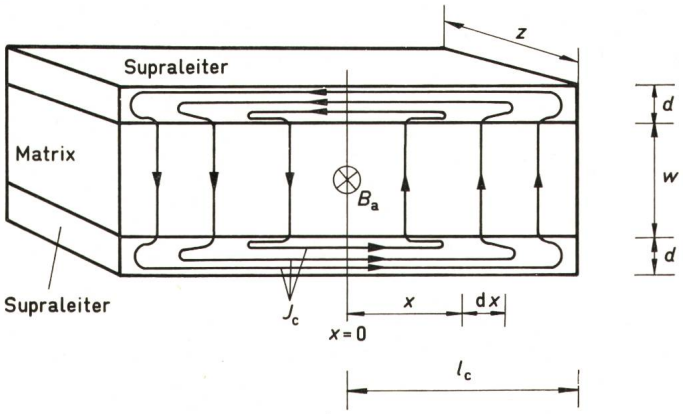

Fig. 3
Einbettung der supraleitenden Filamente
Bezeichnungen siehe im Text

a) Kontrollmessungen an Supraleitern

Messungen unter a) haben die theoretischen Ergebnisse gut bestätigt. Typische $J_c = f(B_a)$-Kurven (Fig. 4) werden je nach Herstellungsverfahren des Nb-Ti-Leiters innert eines Faktors 2 erhalten. Gewisse Abweichungen können sich bei sehr dünnen Filamenten unter 10 µm Durchmesser ergeben, indem der Summenstrom eines derartigen Kompositen unterhalb der Summe der einzelnen Filamentenströme verbleiben kann. Die Ursache hierfür kann metallurgischen Ursprunges sein – Filamentendurchmesserverzerrung bzw. -verminderung oder gar gebrochene Filamente; in gewissen Fällen ist auch ein sog. «Widerstandsphenomen» beobachtet worden. Es erscheint somit angebracht, die geometrische und elektrische Anordnung der J_c-Messung an Kurzproben von Supraleitern genauer als bisher zu definieren und womöglich eine einheitliche Messung zwecks sicherer Vergleichsmöglichkeiten anzustreben.

b) Messergebnisse von Solenoiden

Als wichtige Vorstufe für die Entwicklung von supraleitenden Magneten war es naheliegend, Solenoide zu bauen und auszumessen.

Solenoide können relativ einfach für gleiche Maximalfehler in vergleichbarer oder gleicher Bohrung gebaut werden. Spulenimprägnierung, He-Kühlanordnung, Stromzuführungen

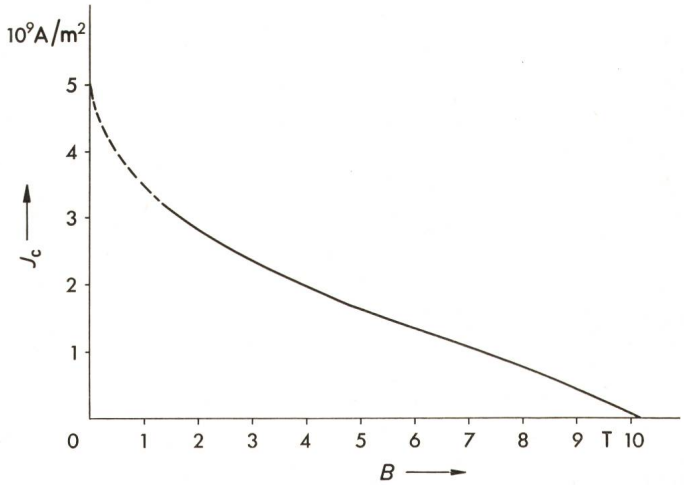

Fig. 4
Messergebnisse an Supraleitern

können weitgehend identisch wie bei den später herzustellenden Magneten sein. Folgende wesentliche Unterschiede zwischen Solenoid und Magnet dürfen jedoch nicht übersehen werden:

Bei Solenoiden wird das gleiche Maximalfeld in wesentlich geringerem Volumen, d. h. mit weniger Supraleitern, erzeugt. Als typisches Wicklungslängenverhältnis kann ein Faktor 10 angenommen werden.

Feld- und Kräfteverteilung in den Wicklungen von Solenoiden und Magneten unterscheiden sich wesentlich.

Es wird nicht genügend beachtet, dass ein Solenoid dank der konstanten Tangentialspannung im Draht ein wicklungstechnisch äusserst günstiges Gebilde darstellt. Auch Endeffekte können durch Rundflanschplatten einfach aufgefangen werden.

Wie bereits erwähnt, haben Messergebnisse an Solenoiden die Erwartungen bezüglich vollstabilisierter Komposition bestätigt, selbst dann, als die Kühlung der Wicklung mit Absicht weniger wirksam gemacht wurde, z. B. durch Imprägnierung der Spule in dicker Epoxydharzschicht.

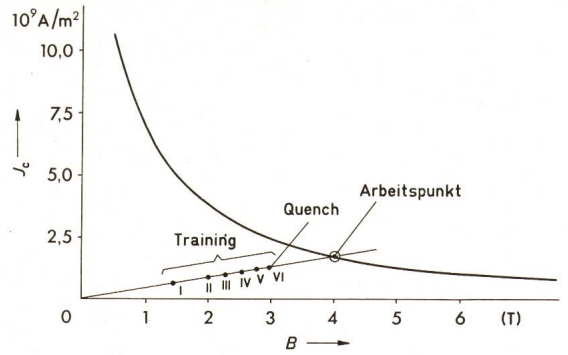

Fig. 5
Konditionierungseffekt

Bei der Erprobung von Solenoiden trat der «Training»- oder Konditionierungseffekt zum ersten Mal deutlich hervor. Wie Fig. 5 zeigt, versteht man darunter die stufenweise Erhöhung des Erregerstromes nach jedem der $(n + 1)$ Quenchvorgänge (Quench = Übergang des Supraleiters in den Normalzustand), wobei jeweils $I_{n+1} > I_n$ und, wie bei konvergierenden mathematischen Reihen, der Erregerstrom einem Grenzwert $I < I_c$ zustrebt. Der Trainingseffekt ist noch nicht abgeklärt: Es scheint, als würden die Quenchvorgänge durch Mikrobewegungen des Leiters an «schwachen» Wicklungsstellen hervorgerufen, bis der Leiter allmählich seine Endlage einnimmt. Bei einwandfrei gewickelten, imprägnierten und mechanisch befestigten Wicklungen arbeitet sich I bis nahe an I_c ($0{,}8\ I_c < I < 0{,}9\ I_c$) empor. Im Gegenfall wird der Grenzstrom schon bei wesentlich tieferen Strömen erreicht ($I \ll I_c$), wobei die oder mehrere schwache Wicklungsstellen jedesmal einen Quench hervorrufen.

c) Versuchsergebnisse an supraleitenden Magneten

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass nur sehr wenige der in den letzten 4...5 Jahren konstruierten Magneten erfolgreich waren. Bei etwa 80 % der Magneten – für Gleichstrom- oder Pulsbetrieb – sind nach längerem Training Erregerströme von $0{,}3\ I_c < I < 0{,}6\ I_c$ bei 4...5 T Maximalfeldern erreicht worden, oder es sind vorsichtigerweise derart niedrige Ströme als Nennstromwerte festgelegt worden.

Besonders niedrige Stromwerte sind bei Magneten mit Wicklungen, die in Epoxydharzschichten von mehreren mm oder gar cm vergossen waren, beobachtet worden.

Es soll nun versucht werden anhand einiger einfacher Berechnungen, die sich aus dem Tieftemperaturverhalten von im Magnetbau verwendeten Hauptmaterialien ergeben sowie aus einfachen Energiebilanzen, die äusserst strikten Konstruktionstoleranzen abzuleiten. Das Nichteinhalten dieser Toleranzen erklärt mit grosser Wahrscheinlichkeit die in vielen Fällen erhaltenen niedrigen Erregerströme.

Thermische Kontraktionskoeffizienten (ε) und Elastizitätsmodule (E) einiger Materialien

Tabelle I

	$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ K^{-1}	E $\frac{kp}{mm^2}$
Cu	$3{,}2 \cdot 10^{-3}$	10 000
Supraleiter Nb-Ti	$2{,}85 \cdot 10^{-3}$	9 500
Epoxydharz	$1{,}0 \cdot 10^{-2}$	600...800
Inox	$2{,}9 \cdot 10^{-3}$	20 000...40 000
Magneteisen	$2{,}4 \cdot 10^{-3}$	20 000

Die thermischen Kontraktionskoeffizienten bei 4,2 K und die Elastizitätsmodule für einige Materialien ergeben sich aus Tabelle I.

Daraus ergäbe sich z. B. für eine 1 m lange epoxydharzimprägnierte Wicklung eine Spannung im Harz von 68 kp/mm², die bestimmt zu Rissen und Brüchen führen würde, falls nicht Abhilfe durch Angleichen von ε_{Harz} an $\varepsilon_{S.L.}$ geschaffen wird.

In welchen Grenzen dürfen sich Leiterverschiebungen in Wicklungen von supraleitenden Magneten bewegen, wobei die Verschiebungen auf differentielle Kontraktionsspannungen, magnetische Kräfte, mechanische Anpassungstoleranzen zwischen Konstruktionselementen oder auf schwache Stellen in der Wicklung zurückgeführt werden können?

Als Beispiel ist auf Fig. 6 eine $\approx$ 4 cm breite Teilspule des 1 m langen supraleitenden Quadrupols des CERN dargestellt; tritt aus einem der oben erwähnten Gründe eine azimutale Leiterverschiebung um $\varrho\Delta\Phi \approx 5 \cdot 10^{-6}$ m (5 µm) ein, so entspricht dies einer Flussänderung von $2 \cdot 10^{-5}$ Vs/m bei einer Windungszeitkonstanten von 5 ms ($L = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ H; $R = 10^{-4}\ \Omega$) und einem mittleren Magnetfeld von 3,8 T. In der Cu-Matrix fliessen dann 40 A, die eine Erwärmung von $\Delta Q \approx 8 \cdot 10^{-3}$ Ws und eine Temperaturerhöhung von $\Delta T = \Delta Q/S \approx 0{,}5$ K hervorrufen würden.

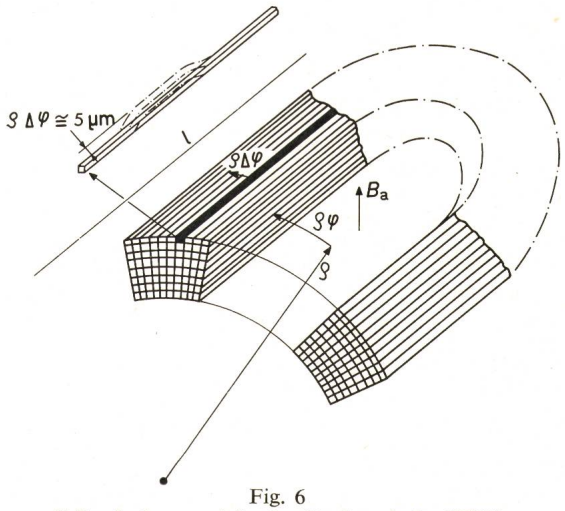

Fig. 6
Teilspule des supraleitenden Quadrupols der CERN

l	Spulenlänge	$\tau = 5$ ms
ϱ	Radius	
φ	Winkel	$\Delta\Phi \cong 2 \cdot 10^{-5}\ \frac{Vs}{m}$
B_a	Magnetfeld	
τ	Zeitkonstante	$I_{Cu} \cong 40$ A
Φ	Magnetfluss	
I_{Cu}	Strom im Kupfer	$\Delta Q_{Cu} \cong 8 \cdot 10^{-4}$ Ws
Q_{Cu}	Wärme im Kupfer	
T	Temperatur	$\Delta T \cong \frac{\Delta Q_{Cu}}{S} = 0{,}4...0{,}5$ K

Ein derartiges ΔT wird sehr wahrscheinlich einen Quench hervorrufen. In der Längsrichtung des Magneten würden 10...20 mal höhere Verschiebungen, d. h. 50 µm $< \Delta l <$ 100 µm, zu gleichen Ergebnissen führen. Freie radiale und azimutale Wicklungskräfte (20...100 t/m für 4...5-T-Quadrupol- und Dipolmagnete) würden unter Berücksichtigung des Elastizitätsmoduls der Wicklung zu vergleichbaren Verschiebungen von $\approx 5 \cdot 10^{-6}$ m führen.

Das Ergebnis dieser Überlegungen ist klar: Um supraleitende 4...5-T-Magnete mit Erfolg zu bauen, die mit $I \approx I_c$ erregt werden können, ist es erforderlich, azimutale und radiale Leiterbewegungen auf wenige µm und in der Längsrichtung auf 50...100 µm zu begrenzen.

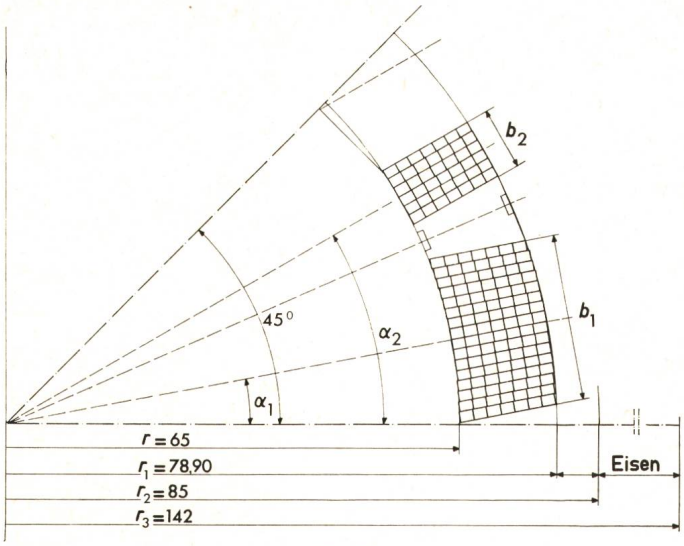

Fig. 7
Optimierte Wicklungsanordnung des 1-m-Quadrupols der CERN

Es ist somit auch bei Gleichstrommagneten für eine sorgfältig überlegte Kühlung der Wicklung Sorge zu tragen, damit bei etwa auftretenden Leiterverschiebungen die Temperaturerhöhung und der Abfall von J_c (Fig. 1) in betriebssicheren Grenzen verbleiben.

Es ist auch zu beachten, dass die Anwendung von vollstabilisierten Kompositen mit feinen Filamenten allein noch keinerlei Sicherheit gegen die soeben besprochenen Leiterverschiebungen gewährleistet.

3. Theorie und praktische Ausführung des supraleitenden Quadrupols der CERN

3.1 Festlegung der Wicklungskonfiguration; Anforderungen an die Feldlinearität und die daraus folgenden Toleranzen

Von den heute bekannten Wicklungs- bzw. Stromdichtenanordnungen zur Erzeugung von präzisen Dipol- und Quadrupolfeldern in einer vorgegebenen Bohrung hat man sich in der CERN seit Beginn für diejenige entschlossen, die am geeignetsten erschien, die engen Leiterbewegungstoleranzen einzuhalten: für eine koaxiale, zylindrische Anordnung von Wicklung, magnetischer Abschirmung und sämtlicher Kryostaten um eine kreisförmige Bohrung. Bekanntlich können präzise Dipol-, Quadrupol- und höhere Multipolfelder durch eine cos $n\Phi$-Verteilung der Stromdichte über die Öffnung oder durch entsprechende Anordnung von Wicklungssektoren konstanter Stromdichte erreicht werden.

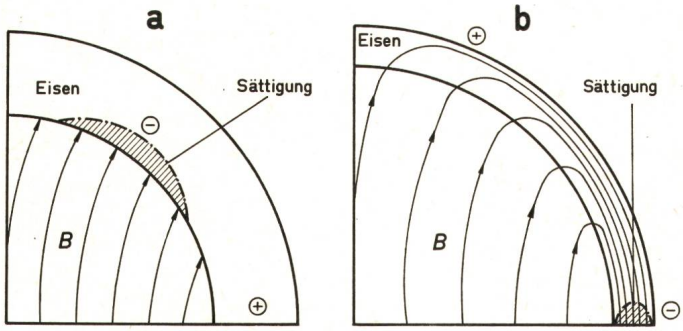

Fig. 8
Auftreten der «Sättigung» als dritte Harmonische
Bezeichnung siehe im Text

Die CERN hat sich für die zweite Variante entschlossen, die erlaubt, den gleichen Leiter für sämtliche Sektoren zu erhalten.

Das hochgesättigte Eisen ist konzentrisch um die Wicklung gelegt und trägt wesentlich (etwa 35 % bei 5-T-Maximalfeldern) zur Feldbildung in der Bohrung bei. Die Berechnung derartiger Sektorwicklungen ist ausführlich in [2] beschrieben.

Durch geschickte Wahl der Anzahl von Sektoren i und deren Winkel α_{1i}, α_{2i} können höhere harmonische Feldkomponenten, die zugleich Fehlerkomponenten sind, zu Null gemacht werden.

Fig. 7 zeigt nun die optimierte Wicklungsanordnung des 1-m-Quadrupols der CERN: Die Wicklung hat 2 Blöcke oder Sektoren pro Pol, die durch parallele Seiten zum Symmetriewinkel definiert und deren Höhe h und Breite b durch die Anzahl von Lagen bzw. Leitern pro Lage gegeben sind. Durch Variierung von α_{2i} und α_{1i} und der Sektorbreiten b_1, b_2 wurde eine optimale Anordnung mit verschwindenden 12-, 20- und 28-Pol-Komponenten im Magnetfeld erhalten.

Bei ungesättigtem oder schwach gesättigtem Eisen werden die gleichen Feldharmonischen erhalten. Mit zunehmender Sättigung tritt eine dritte Harmonische – bezogen auf den Dipol bzw. Quadrupol als Grundwelle – hervor, die anschaulich anhand eines Dipols erklärt werden kann.

Fig. 8 zeigt zwei Extremfälle: Wird der konzentrisch um die Wicklung gelegte Eisenring mit grosser Dicke oder Breite $\Delta\varrho$ ausgeführt, so wird die Sättigung nach Fig. 8a einen positiven

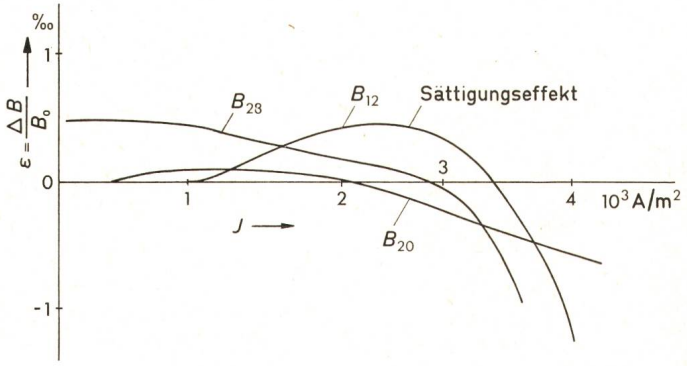

Fig. 9
Feldharmonische der Sättigung in der optimierten Eisenabschrimung des 1-m-Quadrupols

Sextupol hervorrufen. Bei geringer Dicke $\Delta\varrho$ wird hingegen das Eisen im horizontalen Schnitt am meisten gesättigt (Fig. 8b), die Verschiebung des magnetischen Potentials entlang des Eisens ruft einen negativen Sextupol hervor. Für derartige Magnete kann somit unter Berücksichtigung des Maximalfeldes eine optimale Eisendicke $\Delta\varrho$ gefunden werden, wobei wie beim supraleitenden 1-m-Quadrupol entsprechende Computerprogramme gebraucht werden.

Fig. 9 zeigt die Feldharmonischen der Sättigung in der optimierten Eisenabschirmung des 1-m-Quadrupols der CERN.

Magnete dieser Bauart weisen zwei weitere bedeutende Vorteile auf: Für ein gegebenes Magnetfeld $B_0(\varrho, \Phi)$ in der Bohrung ist die gespeicherte Energie und das Volumen des Supraleiters (bzw. der Erregerwicklung) ein Minimum.

Man gelangt nun zur Frage der Feldgüte in der Bohrung und der daraus sich ergebenden Wicklungstoleranzen. Da bei supraleitenden Magneten die Feldkonfiguration durch die Geometrie der Erregerwicklung bestimmt ist und nicht wie bei Magneten klassischer Bauart durch die Präzision des bearbei-

teten oder gestanzten Polkonturs, ist die gestellte Aufgabe wesentlich schwieriger. Die Anforderungen an die Feldqualität von supraleitenden Strahltransportmagneten in mehreren 100-GeV-Bereichen kann etwa wie folgt zusammengefasst werden:

Für Dipole:

$$\left(\frac{\sum_{n=1}^{N} \int_{-\infty}^{+\infty} B_n \, dl}{B_0 \, l_{eq}}\right)_{R=R_0} \leqq 0{,}001$$

Für Quadrupole:

$$\left(\frac{\sum_{n=1}^{N} \int_{-\infty}^{+\infty} B_{n\,R0} \cdot dl}{G_0 \, R_0 \, l_{eq}}\right) \leqq 0{,}002 \ldots 0{,}004$$

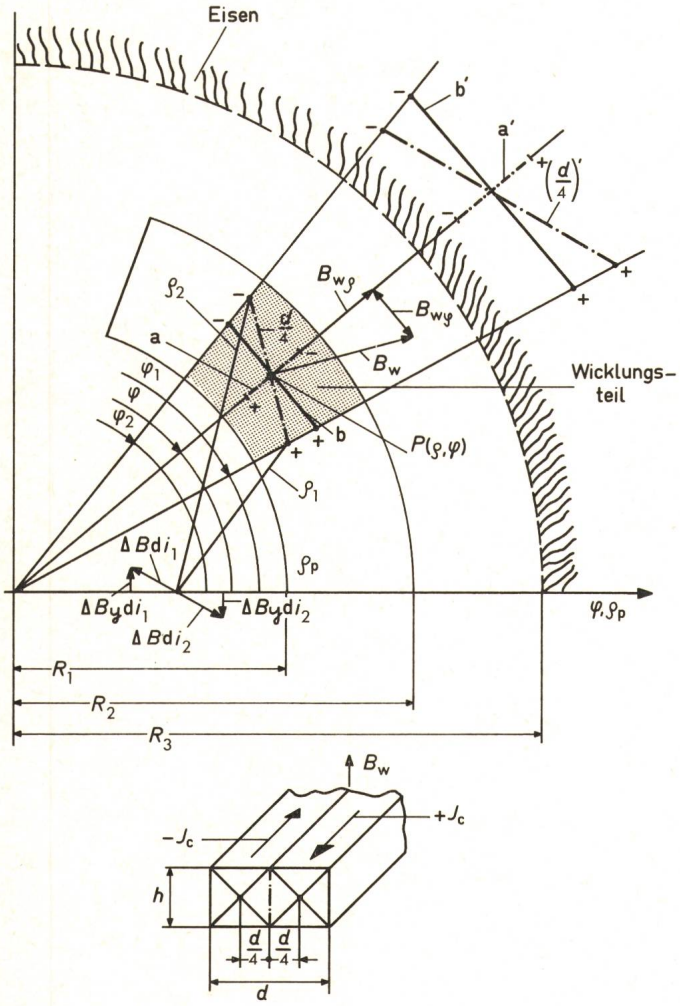

Fig. 10
Magnetisierungsströme vom Supraleiter

a	Projektion von $\frac{d}{4}$	a'	Projektion von $\frac{d'}{4}$
b	Projektion von $\frac{d}{4}$	b'	Projektion von $\frac{d'}{4}$
d	Supraleiterbreite	h	Höhe des Supraleiters
ΔBdi_1, ΔBdi_2	elementare Dipolfeldkomponenten		
R_1, R_2, R_s	Wicklungs- und Abschirmungsradius		
J_c	kritische Stromdichte	ϱ_1, ϱ_2	Radius-Vektor des elementaren Dipols
		B_w	Wicklungsfeld
		$B_{w\varrho}$	ϱ-Komponente von B_w

$B_{n\,R0}$ ist das Feld der n-ten Harmonischen, gemessen beim Bohrungsradius R_0.

Für bestimmte Anwendungen (Spektrometerdipole, Magnete für Speicherringe) ist es sogar erforderlich, die Dipol- und Quadrupolfehler auf einige 10^{-4} zu reduzieren.

Aus der Feldgüte ergeben sich folgende Wicklungstoleranzen:

a) Radiale und azimutale Toleranz der Wicklungsblöcke $\leqq$ 0,05 mm (quadratischer Mittelwert aus mehreren in der Längsrichtung des Magneten gemessenen Werten).
b) Längstoleranz der Wicklungsblöcke $\leqq$ 0,1...0,2 mm.
c) Exzentrizität zwischen Wicklung und Eisenabschirmung $\leqq$ 0,03 mm.

Sämtliche Toleranzen sollten auch in kaltem Zustand nach erfolgten Kontraktionen erhalten bleiben.

Die Feldgüte in supraleitenden Magneten wird ferner durch die Gestaltung der Wicklungsenden, d. h. durch die Endfeldkonfiguration und durch die Magnetisierungsströme im Supraleiter, beeinflusst. Diese Einflüsse müssen abgeklärt und auf tragbare Werte für die Feldgüte reduziert werden.

Bei Sektorwicklungen mit m Sektoren pro Pol können durch Optimierung der Längsabstände zwischen den einzelnen Sektoren $m - 1$ Endfeldharmonische kompensiert werden.

Fig. 10 zeigt nun die im Supraleiter fliessenden Magnetisierungsströme. Bekanntlich wird ein Supraleiter des Typs b) der Breite (oder des Durchmessers) d von entgegengesetzten Magnetisierungsströmen $\pm I_c = \pm J_c \, h \cdot d/2$ durchflossen.

Jedes supraleitende Filament stellt somit einen elementaren Dipol dar, dessen räumliche Orientierung vom Feldvektor B_w in diesem Punkt der Wicklung und kritische Stromdichte J_c vom Feldbetrag (Fig. 4) abhängen. Die elementaren Stromdipole erzeugen in der Bohrung ein Feld ΔB_{di}; durch Integration sämtlicher Dipoleffekte über die Wicklungsfläche und Berücksichtigung der dem örtlichen B_w entsprechenden kritischen J_c wird dann der Feldverlauf

$$B_{di}(B_w, \varrho, \Phi) = \sum_{i=1}^{n} \Delta B_{di}$$

erhalten.

Für den Fall $B_w = 0$ (entsprechende kritische Stromdichte in Supraleiter $5 \cdot 10^9$ A/m² $< J_{c0} < 10^{10}$ A/m²) werden für B_{di} auf der Symmetrieachse folgende Gleichungen für einen Dipol- bzw. Quadrupolmagneten erhalten:

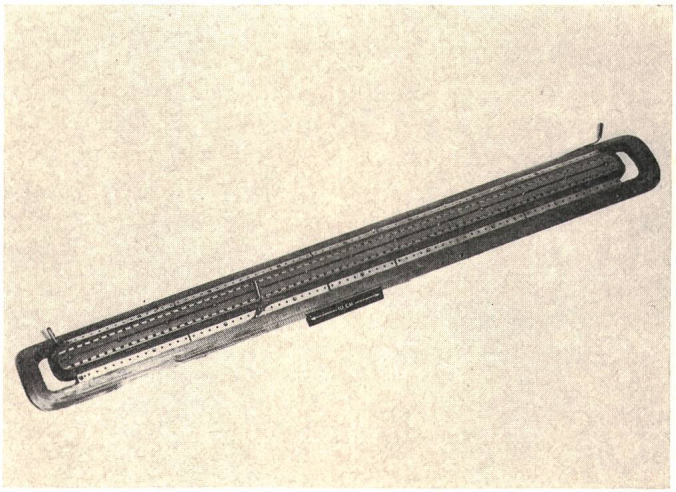

Fig. 11
2-Block-Polwicklung

$$B_{di} = \frac{4 J \mu_0 a \lambda}{\pi} \left\{ \left(ln \frac{R_2}{R_1} \right) (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) - \sum_{n=1}^{\infty} \varrho_p^{2n} \frac{1}{2n(2n+1)} \left(\frac{1}{R_2^{2n}} - \frac{1}{R_1^{2n}} \right) \cdot [\sin(2n+1)\varphi_2 - \sin(2n+1)\varphi_1] + \right.$$
$$\left. \underbrace{+ \varrho_p^{2n-2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_2^{2n} - R_1^{2n}}{R_s^{4n-2}} \cdot \frac{1}{2n(2n-1)} \cdot [\sin(2n-1)\varphi_2 - \sin(2n-1)\varphi_1]}_{\text{Eiseneinfluss}} \right\} \quad (3)$$

$$B_2 = \frac{8 J \mu_0 a \lambda}{\pi} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \varrho_p^{4n-3} \frac{1}{(4n-2)(4n-3)} \left(\frac{1}{R_1^{4n-3}} - \frac{1}{R_2^{4n-3}} \right) [\sin(4n-2)\varphi_2 - \sin(4n-2)\varphi_1] + \right.$$
$$\left. \underbrace{+ \sum_{n=1}^{\infty} \varrho_p^{4n-3} \frac{R_2^{4n-1} - R_1^{4n-1}}{(R_s^2)^{4n-2}} [\sin(4n-2)\varphi_2 - \sin(4n-2\varphi_1)]}_{\text{Eiseneinfluss}} \right\} \quad (4)$$

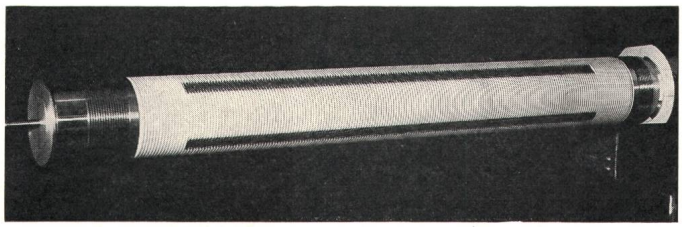

Fig. 12
Innenrohr mit Kühlkanälen

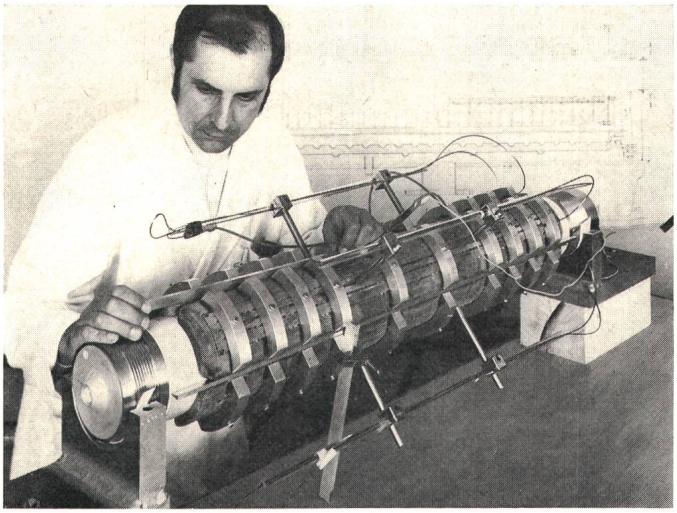

Fig. 13
Die vier Polwicklungen am Innenrohr

$2a$ ist die Projektion in ϱ-Richtung des Dipolabstandes $2 \cdot d/4$. Für den Fall des 1 m langen CERN-Quadrupols wird z. B. für $B_w = 0$ ein Quadrupolfeld von $B_{mag2} \approx 15$ G und ein etwa gleich grosser Zwölfpol B_{mag6} bei Bohrungsradius $R_0 = 4{,}5$ cm berechnet.

Soll der Einfluss der Magnetisierungsströme auf die Feldqualität des S.L.-Magneten reduziert werden, so sind selbst bei Gleichstrommagneten dünne Filamente von 20 µm Durchmesser und weniger vorzusehen.

3.2 Konstruktion des Quadrupols, der Kryostaten und des He-Transfersystems

Wie bereits gezeigt, hat der 1 m lange supraleitende Quadrupol, «Castor» genannt, eine ringförmige, um die Bohrung gelegte 2-Block-Wicklung pro Pol mit 6 × 7 und 16 × 7 Windungen pro Block. Der 1,3 × 1,8-mm²-Leiter enthält 361 × 53-µm-Durchmesser-Nb-Ti-Filamente, die sich in einer Cu-Matrix von $2 \cdot 10^{-10}$ mm Widerstand bei 4,2 K befinden. Die Filamente haben eine 2,5-cm-Verdrillung (Twistpitch). Der Supraleiter wurde von IMI Birmingham, England, geliefert. Der Kurzprobenstrom in transversalem Magnetfeld von 5 T ist zu 1000 A gemessen worden; die dabei aufgetretene Spannung betrug 10 µV. Auf die Wicklung von «Castor» angewandt, würde sich in der Blockmitte eine Temperaturerhöhung des Leiters um 0,2...0,3 K ergeben, so dass in diesem Fall ein Kurzprobenstrom von 900...950 A bei 5 T anzunehmen ist.

Der Leiter ist mit einer 80 µm dicken Kaptonfolie isoliert. Um die erforderliche Präzision der Wicklungsblöcke zu erhalten, hatte man keine Vakuumimprägnierung vorgenommen. Die jeweils gewickelten Lagen wurden mit sorgfältig geladenem Epoxydharz imprägniert, auf das genaueste gepresst und ausgehärtet.

Fig. 11 zeigt die 2-Block-Wicklung, Fig. 12 das die Wicklung tragende innere Inoxrohr mit den ringförmigen Kühlkanälen und Fig. 13 die vier zusammengebauten Polwicklungen. Die

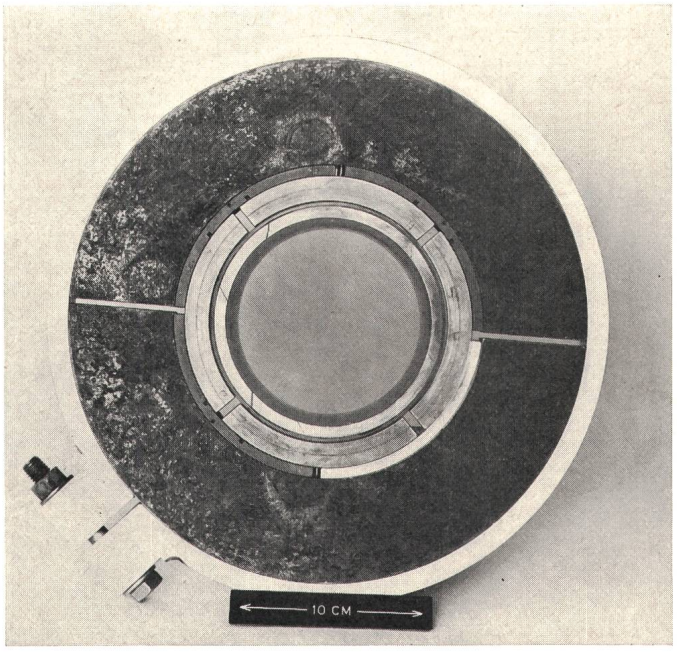

Fig. 14
Querschnitt eines Aktivteil-Modells 1:1 des supraleitenden Quadrupols «Castor»

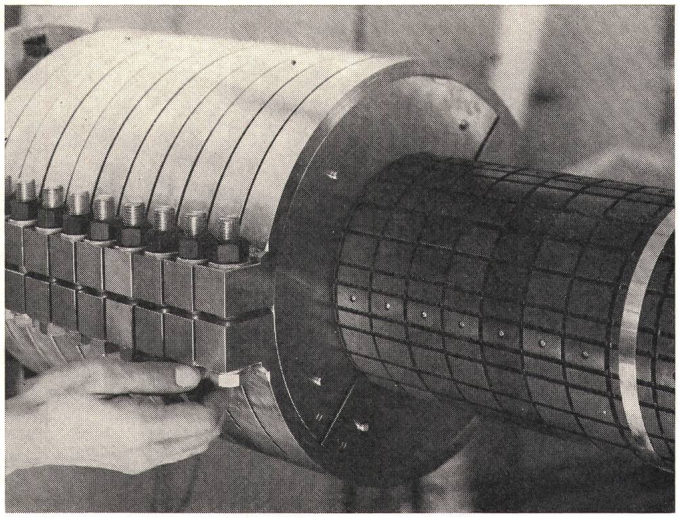

Fig. 15
Aktivteil-Modell des supraleitenden Quadrupols «Castor»
Äussere Kühlkanäle, Eisenbacken und Befestigungsringe

Epoxydharzschichten sind überall möglichst dünn gehalten worden. Die Wicklungen sind um die aus Kupferblöcken bearbeiteten Polhalterstücken gelegt und befestigt; eine Reihe von Löchern ermöglicht gute He-Zirkulation.

Dank der engen induktiven Kopplung zwischen Block und Wicklung wird bei Quenchvorgängen etwa 70 % der gespeicherten Energie in die Cu-Blöcke übertragen. Die Wärmeabgabe an das Helium wird hiedurch gegenüber einer direkten Übertragung von der Wicklung allein wesentlich verbessert.

Auf der Wicklungsaussenseite befinden sich die azimutal verlaufenden Kühlkanäle, die von einer Reihe von in zwei Teile gespalteten Eisenringen umgeben sind. Die Ringhälften sind von Befestigungsringen aus Inox umgeben, die den Magnetaktivteil, Eisen und Wicklung, entsprechend komprimieren. Ein entsprechendes Modell zeigt Fig. 14.

Durch zahlreiche Versuche bei Raumtemperatur und in flüssigem Stickstoff (N_2) sind sämtliche Polwicklungen, Aktivmodelle nach Fig. 14 und später der auf Fig. 15 gezeigte Aktivteil selbst mechanisch sorgfältig ausgemessen worden. Kontraktionen wurden ermittelt und der erforderliche Drehmoment für die Schrauben der Befestigungsringe bestimmt.

Die Quadrupol-Hauptparameter sind in Tabelle II angegeben.

Der Kryostat besteht aus dem He-Tank, dem N_2-Tank und dem Vakuumtank. Fig. 16 zeigt die Anordnung. Der innere H_2-Tank ist über Fiberglasringe am N_2-Ring befestigt, dieser über U-förmige Ringe aus gleichem Material auf dem Deckel des Vakuumtanks.

Ein separates N_2-Abkühlsystem, an der Eisenoberfläche angebracht, sorgt für gleichmässige Abkühlung des Aktivteiles auf die Temperatur des flüssigen Stickstoffes.

Fig. 17 zeigt die im He-Kryostaten angebrachte Frontplatte mit den Polverbindungen, Kontroll- und Signalkabeln der Niveausonden, Widerstandsthermometer, Bismuth- und Hallplattensonden, Potentialabgriffen usw. Die Verbindung zwischen Erregerwicklung und den beiden Stromzuführungen ist eine sorgfältig berechnete und erprobte Parallelanordnung von Nb-Ti-Supraleiter, Nb-Sn-supraleitenden Bändern und Kupfer zwecks optimaler Temperaturverteilung. Die Verbindung wird durch He-Gas wirksam gekühlt.

Fig. 18 zeigt den eingebauten Aktivteil vor der Verschweissung der Seitenflanschen. Sämtliche Kryostatenelemente sind sorgfältig mit Supraisolation (aluminisiertem Mylar) umwickelt. Die vertikalen Rohre im Vordergrund umgeben die He-Zufuhr mit Stromanschlüssen sowie sämtliche Kontroll- und Signalkabel; das zweite Rohr ist die Stickstoffzuführung.

Fig. 19 zeigt den völlig montierten supraleitenden Quadrupol «Castor» mit Stromanschlüssen, den He- und N_2-Anschlüssen und der Vakuumpumpgruppe (unten); letztere besteht aus Vorpumpe und einer Turbomolekularpumpe.

Als wesentlicher Bestandteil des Kryostaten ist eine 6 m lange Transferlinie mit He-Gas-Gegenstromkühlung entwickelt worden. Der He-Transfer wird vollautomatisch durch die He-Niveausonden geregelt. Ein Datenlogger überwacht sämtliche Parameter des Quadrupols.

3.3 Erste Versuchsergebnisse

Der Quadrupol «Castor» ist Ende August 1972 nach knapp 10monatiger Konstruktion und Montage mit Erfolg im Tieftemperaturlabor der CERN erprobt worden.

Nach einigen, in Fig. 20 gezeigten Quenchvorgängen ist ein Erregerstrom von 810 A, d. h. ≈ 90 % des kritischen Kurz-

Parameter des S.L.-Quadrupols «Castor»

Tabelle II

Radius der warmen Bohrung	R_0 (m)	0,045
Wicklungsinnenradius	R_1 (m)	0,065
Wicklungsaussenradius	R_2 (m)	0,079
Eiseninnenradius	R_{S1} (m)	0,085
Eisenaussenradius	R_{S2} (m)	0,142
Wicklungslänge	L_W (m)	0,9
Feldgradient bei 900 A	G_0 (Tm^{-1})	50
Maximalfeld in der Wicklung	B_{max} (T)	≈ 5,0
Stromdichte im Kompositen bei 900 A	J (Am^{-2})	$3{,}3 \cdot 10^8$
Gespeicherte Energie	A (kWs)	25
Totallänge von «Castor»	L (m)	1,35
Breite von «Castor»	W (m)	0,65

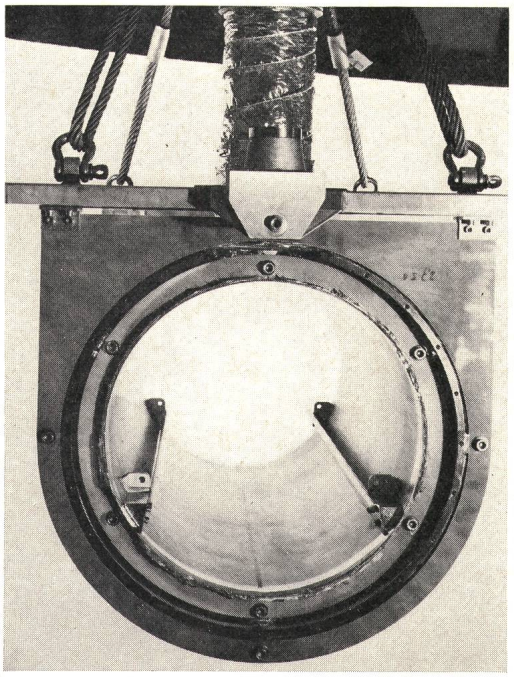

Fig. 16
He-, N_2- und Vakuumtank mit Isolierstoffträgern

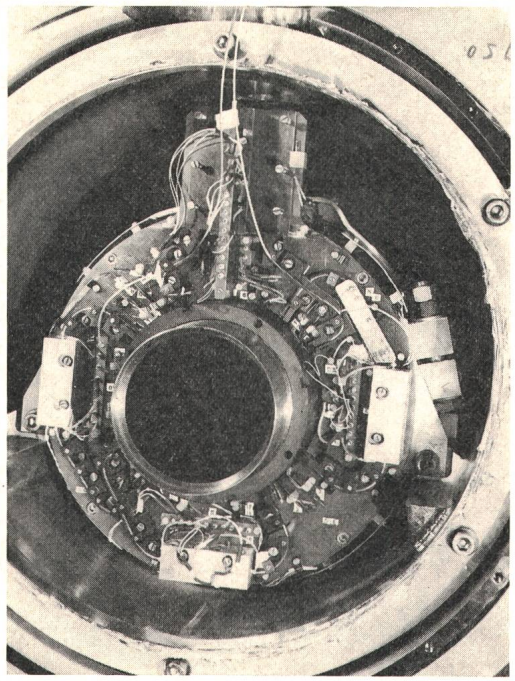

Fig. 17
Frontplatte mit Polverbindungen und Signaldrähten

probenstromes, erreicht worden. Die meisten Quenchs fanden im Pol 2 statt; dieser ist der zuerst gewickelte Pol; sämtliche Wickel- und Pressvorrichtungen sind während seiner Herstellung ergänzt und verfeinert worden. Die erste Polwicklung wies einige, nach unseren Gesichtspunkten nicht völlig zufriedenstellende «schwächere Stellen» auf.

Wie aus Fig. 20 ersichtlich, ist ein höherer Erregerstrom in der 900-A-Gegend und darüber wahrscheinlich und sollte bei der nächsten Versuchsreihe erreicht werden.

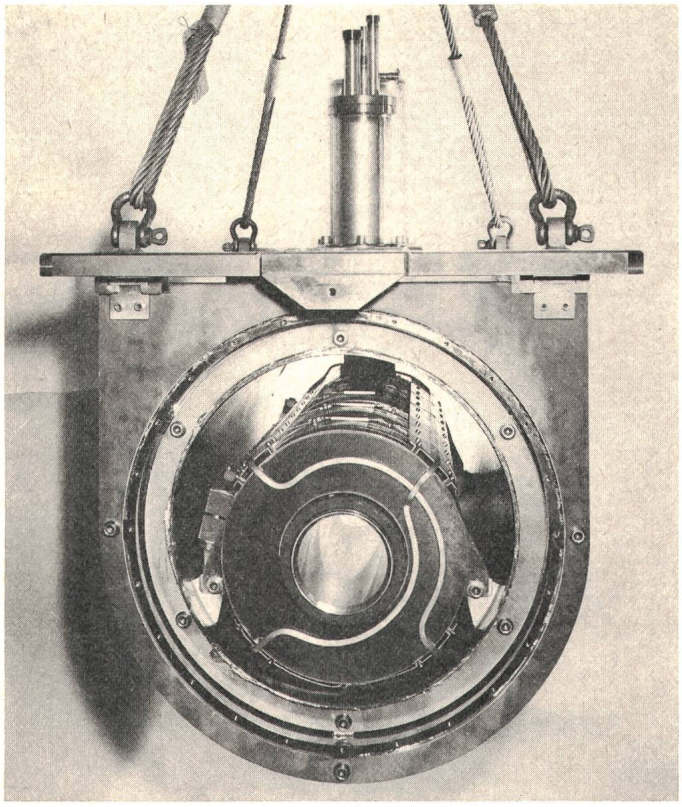

Fig. 18
Aktivteil im He-Tank

Fig. 21 zeigt das Ergebnis der ersten Messung des integrierten Feldgradienten $\int_{-\infty}^{+\infty} G \, dl$ bei etwa 500 A Erregerstrom: Der gemessene Fehler war $9 \cdot 10^{-4}$ bei $\varrho = 3{,}5$ cm. Das Messergebnis ist als Bestätigung für die präzise Ausführung des Aktivteils anzusehen.

Die sehr zufriedenstellenden Ergebnisse der Kryostatenkonstruktion sind auch hervorzuheben. Bei 810 A beliefen sich Magnet- und Transferlinienverluste auf weniger als 5 W (7 l He/h). Die Autonomie des Kryostaten ist 6...8 h, die He-Füllzeit 30 min (bei 4,2 K). Die Transferlinienverluste betrugen 0,2 W/m; ein sehr schönes Ergebnis verglichen zu den heute üblichen Werten von 1,5...2,0 W/m.

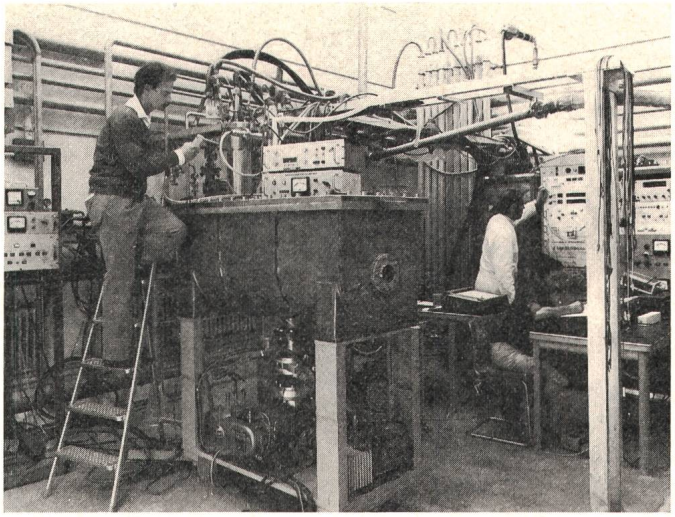

Fig. 19
Kompletter supraleitender Quadrupol «Castor» mit Warmbohrung im Tieftemperaturen-Versuchslokal der CERN

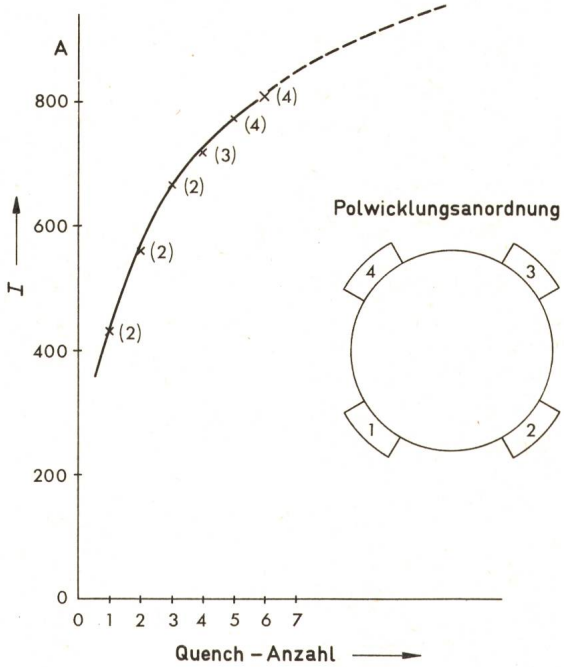

Fig. 20
Training in «Castor»

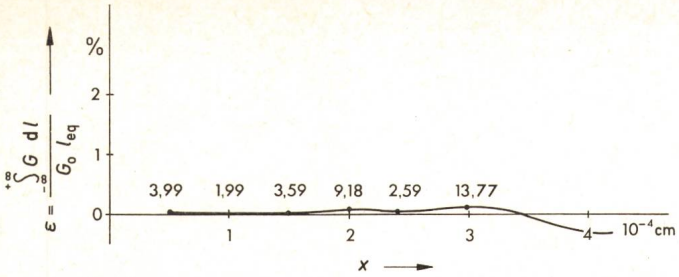

Fig. 21
Ergebnis der ersten Messungen des integrierten Feldgradienten

Die Zeitkonstante der Abkühlung auf N_2-Temperatur ist zu $\tau \approx 38$ h gemessen worden. Für die Kühlung von 70 K auf 4,2 K wurden 0,2 l He pro kg Aktivteil des Magneten gebraucht.

Der Autor möchte sämtlichen Mitarbeitern am Projekt «Castor», *H. Granier, Vuffray, Rieder, Magnani, Silvestri* und ganz besonders dipl. Ing. *D. Leroy,* seinen Dank und seine Anerkennung aussprechen.

Literatur

[1] *A. Ašner:* Berechnung und Anwendung von symmetrischen Multipolfeldern in zylindrischer Bohrung, erzeugt durch Sektorwicklungen konstanter Stromdichte. Bull. SEV 64(1973)7, S. 439...445.
[2] Experimental and theoretical studies of filamentary superconducting composites. Rutherford Laboratory Preprint RPP/A 73. Chilton Didcot, Berkshire, Rutherford High Energy Laboratory, 1969.

Adresse des Autors:
Dr. *A. Ašner,* Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN), 1211 Genève.

GASPARD-CLAIR-FRANÇOIS-MARIE DE PRONY

1755 — 1839

Prony wurde in Chamelet (Dép. Rhône) bei Lyon geboren. Er war Schüler der Ecole des Ponts et Chaussées. Mit 36 Jahren wurde er Chefingenieur, dann Direktor der für die Vermessungen zuständigen «Kataster-Bureaux». Für die Einführung des metrischen Systems hatte er neue Rechentafeln aufzustellen, wozu er arbeitslose Perückenmacher beschäftigte, da Puder und Perücken ausser Mode gekommen waren.

Nachdem er 1894 Professor der Mathematik an der Ecole Polytechnique in Paris geworden war, kehrte er vier Jahre später als Direktor an die Ecole des Ponts et Chaussées zurück. Noch im gleichen Jahr hätte er Napoleon nach Ägypten begleiten sollen, doch weigerte er sich, mitzuziehen. Von 1805 bis 1812 hatte er im Auftrage Napoleons Wasserbauten in Italien zu leiten, Korrektionsarbeiten am Po, Verbesserungen der Häfen von Genua, Ancona, Venedig und Pola. Schliesslich führte er Studien durch über die Trockenlegung der Pontinischen Sümpfe bei Rom.

Nach dem Sturz Napoleons, während der Restauration, wurde er 1825 von Charles X zum Baron und 10 Jahre später von Louis-Philippe zum Pair de France erhoben. In dieser Zeit amtete er noch als Examinator an der Ecole Polytechnique in Paris.

Prony veröffentlichte zahlreiche Arbeiten, so über Hydraulik, Erdmechanik, theoretische Strömungsuntersuchungen sowie über neue Methoden trigonometrischer Nivellements. Er ist der Erfinder des sog. Pronyschen Zaums, der dynamischen Bremse, mit der auch heute noch das Drehmoment bzw. die Leistung von Motoren direkt an der Welle gemessen wird. Dabei drückt ein mit dem Bremsklotz verbundener Hebel bekannter Länge auf eine Waage. Prony gilt auch als Erfinder der Schwimmerregulierung.

H. Wüger

«La Houille Blanche», Grenoble

Berichtigung. Nachstehend seien einige Richtigstellungen bzw. Ergänzungen zu den Kurzbiographien von H. Wüger gegeben:

a) Alexander Volta (s. Bull. SEV 61(1970)7, S. 318) starb im Jahre 1827 (statt wie angegeben 1837);
b) Das Giorgi-System (s. Bull. SEV 63(1927)7, S. 348) wurde bereits 1901 (nicht erst 1906) vorgeschlagen;
c) Das Bild von Anyos Jedlik (s. Bull. SEV 64(1973)10, S. 630) stammt aus der Akademie der Wissenschaften, Budapest;
d) Das Bild von Galileo Ferraris (s. Bull. SEV 64(1973)11, S. 707) stammt aus dem Istituto Galileo Ferraris, Torino;
e) Das Bild von Richard Theiler (s. Bull. SEV 64(1973)12, S. 763) stammt von der Landis & Gyr AG, Zug;
f) Das Bild von Oliver Joseph Lodge (s. Bull. SEV 64(1973)13, S. 817) stammt von der Union Internationale des Télécommunications.