

Die Anwendung von tiefgekühlten Leitern und Supraleitern in der Forschung

Autor(en): **Grütter, F.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **57 (1966)**

Heft 20

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-916637>

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.

Die Anwendung von tiefgekühlten Leitern und Supraleitern in der Forschung

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV am 17. und 18. Mai 1966 in Zürich,
von F. Grütter, Baden

537.312.62

Tiefgekühlte Leiter aus reinstem Material und Supraleiter finden in zunehmendem Masse Verwendung beim Bau von Hochfeld-Magnetspulen. Hohe magnetische Felder sind von grösster Bedeutung einerseits bei der Erforschung der elektrischen, magnetischen, thermischen und optischen Eigenschaften der Materie und andererseits bei experimentellen Einrichtungen der Atomkern- und Elementarteilchen-Forschung, sowie der Plasma-Physik. Vorteile tiefgekühlter und supraleitender Spulen gegenüber konventionellen Magneten sind: kleinerer Raumbedarf und kleineres Gewicht, kleinerer Leistungsbedarf und niedrigere Betriebskosten für das ganze System: Magnet, Speisequelle und Kühleinrichtung. Es werden Anwendungsmöglichkeiten solcher Spulen in der Forschung kurz besprochen. Im weiteren wird hingewiesen, auf die Anwendung von Supraleitern bei Hohlraumresonatoren, welche in der Teilchenphysik eine zunehmende Bedeutung erhalten.

Des conducteurs refroidis à basse température, constitués par le matériel le plus pur et des supraconducteurs sont de plus en plus appliqués à la construction de bobines d'électro-aimants à champ intense. Des champs magnétiques élevés présentent la plus haute importance, d'une part lors de l'exploration des propriétés électriques, magnétiques, thermiques et optiques de la matière, et d'autre part dans les dispositifs expérimentaux servant aux recherches se rapportant au noyau de l'atome et aux particules élémentaires, ainsi qu'à la physique du plasma. Par rapport aux aimants conventionnels, les bobines refroidies à basse température et supraconductrices présentent les avantages suivants: encombrement et poids plus restreints, puissance nécessaire plus faible et frais d'exploitation plus réduits pour le système complet, soit: aimant, source d'alimentation et dispositif de réfrigération. L'article mentionne les possibilités d'application de telles bobines à la recherche scientifique et indique en outre l'application de supraconducteurs aux cavités résonnantes, revêtant dans la physique des particules une importance croissante.

1. Einleitung

Bei der Entwicklung und dem Bau von Apparaten und Instrumenten für die Forschung spielten wirtschaftliche Gesichtspunkte bis vor kurzem eine weit geringere Rolle als bei Erzeugnissen für die Industrie. Nachdem aber heute in einzelnen Forschungszweigen Anlagen von bis zu mehreren Kilometern Länge und Einrichtungen mit Gewichten von Zehntausenden von Tonnen und einem Leistungsbedarf von mehreren 100 MW benötigt werden, so müssen auch auf diesem Gebiet mehr und mehr raum-, gewichts- und kostensparende Lösungen gesucht werden.

Geht man der Frage auf den Grund, welche Einrichtungen in der modernen physikalischen Forschung am häufigsten verwendet werden und in grossen Laboratorien — insbesondere der Teilchen- und der Plasmaforschung — einen wesentlichen Einfluss auf die Anlage- und Betriebskosten haben, so findet man, dass dies Magnete sind. Seit einiger Zeit sind deshalb Bestrebungen im Gange, Magnete kleiner, leichter und mit kleineren Verlusten zu bauen. Eine interessante Möglichkeit hiezu bildet die Verwendung von tiefgekühlten Leitern und Supraleitern.

Neben Magneten erhalten in einzelnen Forschungszweigen — insbesondere in der Teilchenphysik — Hohlraumresonatoren eine zunehmende Bedeutung. Da dabei in vielen Fällen sehr hohe Plusleistungen benötigt werden, so ist man bestrebt, auch Hohlraumresonatoren aus supraleitendem Material herzustellen. Auf diese Anwendung wird am Schluss nur kurz hingewiesen, da die damit zusammenhängenden Fragen in einem der folgenden Aufsätze ausführlicher behandelt werden.

2. Magnete

2.1 Grundsätzliche Betrachtungen

Die weite Anwendung, welche magnetische Felder in der Forschung gefunden haben, beruht auf zwei ihnen innewohnenden Eigenschaften, nämlich:

1. Ausrichtung magnetischer Dipole;
2. Ablenkung bewegter elektrischer Ladungen.

Die erste Eigenschaft ist von grösster Bedeutung bei der experimentellen Erforschung der elektrischen, magnetischen, thermischen und optischen Eigenschaften der Materie. Die

zweite findet eine ausgedehnte Anwendung bei experimentellen Einrichtungen der Atomkern- und Elementarteilchen-Forschung, sowie in der an Bedeutung stets zunehmenden Plasma-Physik.

Bauart und Ausführung der zur Erzeugung von magnetischen Feldern dienenden Einrichtungen werden wesentlich beeinflusst durch die erforderliche Stärke sowie durch den räumlichen und zeitlichen Verlauf des zu erzeugenden Feldes. Auf die Projektierung von Magneten haben ferner eine Reihe von Nebenbedingungen, wie räumliche Verhältnisse, Zugänglichkeit, Gewicht, Stromversorgungsmöglichkeiten, Kühlung u. a. m., einen wesentlichen Einfluss. Bei den folgenden Betrachtungen ist es deshalb wichtig, nicht nur den felderzeugenden Magneten, sondern das ganze System Magnet—Speisequelle—Kühlung—und zusätzliche Einrichtungen zu betrachten. Da einerseits bei bestimmten Hochfeldmagneten die Stromversorgungs- und Kühlanlagen um mehrere Grössenordnungen mehr Raum benötigen als der Magnet, und andererseits in vielen Fällen das praktisch höchstmögliche Magnetfeld die Grösse und das Gewicht eines Apparates bestimmen, dem der Magnet dient, so müssen evtl. sogar die Gebäudekosten in die Betrachtungen einbezogen werden. Der Entwurf grosser und starker Magnete führt deshalb in den meisten Fällen zunächst auf ein Optimierungs-Problem, in welches eine ganze Anzahl von Grössen eingehen. Ein wichtiger Parameter ist dabei das Spulenmaterial, da die gesamte der Erregerwicklung zugeführte Leistung in Wärme umgewandelt wird, welche dem Magneten wieder entzogen werden muss.

Die Verluste, und damit die Erwärmung der Magnete, können vermindert werden, wenn diese gepulst werden. In einzelnen Fällen braucht man gepulste Felder auch aus anderen Gründen. Ein gepulster Betrieb stellt aber höhere Anforderungen sowohl in mechanischer wie elektrischer Beziehung sowohl an den Magneten als auch an die Energieversorgungsanlage. Bei grossen Leistungen ist im allgemeinen zusätzlich ein Energiespeicher notwendig, um unzulässige Spannungsschwankungen im speisenden Netz zu verhindern. Bei schnellen Änderungen des Erregerstromes müssen die Wirbelströme berücksichtigt werden, was bei Magneten mit

Eisen im allgemeinen eine Lamellierung notwendig macht.

Eine andere Möglichkeit, die Verluste in den Spulen zu verringern, liegt in der Verwendung von tiefgekühlten Leitern aus reinstem Material oder von Supraleitern. Der Vorteil solcher Leiter für Magnetspulen wurde schon vor langer Zeit erkannt. Ihrer praktischen Anwendung standen aber eine Reihe von Schwierigkeiten entgegen, insbesondere:

- a) Wirtschaftliche Herstellung und Aufrechterhaltung tiefer Temperaturen in grösseren Volumem;
- b) Herstellung genügender Mengen geeigneter Leitermaterialien auf industrieller Basis;
- c) Herstellung von Spulen für höhere Feldstärken mit supraleitenden Materialien.

Diese Schwierigkeiten konnten in den letzten Jahren weitgehend behoben werden.

Es soll nun auf einige Punkte von grundsätzlicher Bedeutung bei tiefgekühlten und supraleitenden Spulen kurz hingewiesen werden.

2.2 Magnete mit tiefgekühlten Spulen

Anfänglich wurden Spulen von kleinerem Volumen aus normalleitendem Kupfer in flüssigen Stickstoff getaucht, um den Widerstand und damit den Leistungsbedarf zu vermindern. Es ergab sich auf diese Weise eine Reduktion der notwendigen Erregerleistung um etwa einen Faktor 5, was schon eine bedeutende Verkleinerung der Energiequelle oder eine Erhöhung des Feldes bei einer vorliegenden Energiequelle ermöglichte [1] 1).

Durch die Verwendung von hochreinem Leitermaterial bei noch tieferen Temperaturen können Reduktionsfaktoren von mehreren Grössenordnungen erreicht werden [2; 3]. Bei der Wahl eines Materials spielen verschiedene Faktoren eine Rolle, wie:

- a) Spezifischer Widerstand bei tiefen Temperaturen;
- b) Erhältlichkeit;
- c) Mechanische Eigenschaften;
- d) Kosten.

Der spezifische Widerstand setzt sich zusammen aus einem temperaturabhängigen Anteil des vollkommen reinen Metalls, aus einem von der Menge und der Art der Verunreinigungen verursachten Anteil und aus einem vom Magnetfeld abhängigen Anteil. Die beiden letzten Anteile spielen eine bedeutende Rolle bei tiefen Temperaturen. Kupfer und Zinn, obwohl leicht erhältlich mit der gewünschten hohen Reinheit, sind ungünstig wegen eines hohen magnetfeldabhängigen Widerstandes. Aluminium und Natrium haben einen niedrigen Magnetfeld-Widerstand, welcher überdies mit zunehmendem Feld einem Grenzwert zustrebt. Beide Metalle kommen in grossen Mengen vor. Aluminium lässt sich durch elektrolytische Raffination, Natrium durch Vakuumdestillation auf hohe Reinheit bringen. Aluminium hat gegenüber Natrium einige Vorteile [4]:

- a) Seine günstigste Betriebstemperatur liegt bei 17 °K (etwas unterhalb dem Siedepunkt des Wasserstoffes), während diese bei Natrium nur etwa 10 °K beträgt;
- b) Aluminium ist chemisch beständiger;
- c) Es kann leicht in der benötigten Form hergestellt werden;
- d) Es hat günstigere mechanische Eigenschaften.

Aluminium wird deshalb als günstigstes Leitermaterial in der Nähe der Temperatur des flüssigen Wasserstoffes betrachtet.

1) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

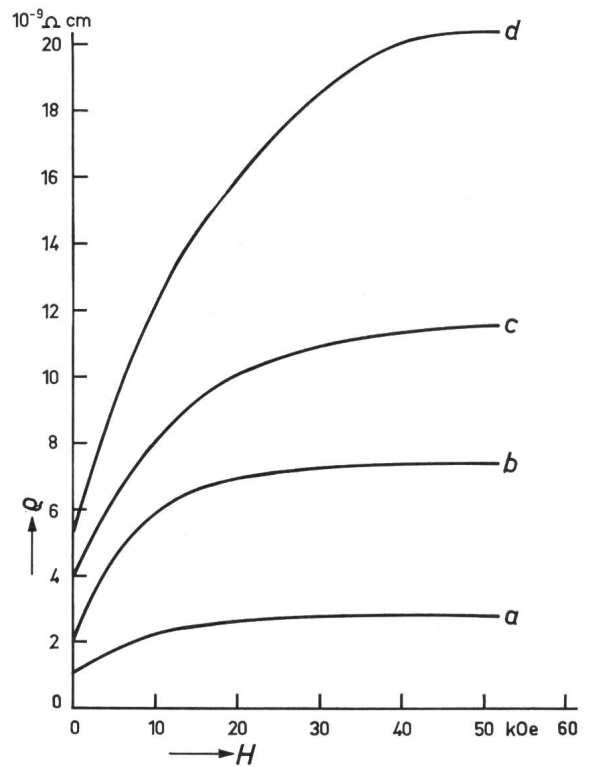


Fig. 1
 Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes ρ von der Stärke des Magnetfeldes bei Aluminium (Reinheit 99,999 %) a bei 4 °K; b bei 20 °K; c bei 25 °K; d bei 30 °K
 Bei Aluminium nähert sich der spezifische Widerstand, im Gegensatz zu Kupfer, mit zunehmendem Feld asymptotisch einem Endwert, welcher um so eher erreicht wird, je tiefer die Temperatur ist

Tabelle I zeigt die starke Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes des Aluminiums von der Reinheit. Zur leichteren Veranschaulichung ist das Verhältnis des Widerstandes bei Raumtemperatur zum Widerstand bei 20,3 °K (Siedepunkt des Wasserstoffes bei Atmosphärendruck) angegeben.

Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes ρ von der Reinheit bei Aluminium [3]

Tabelle I

Reinheit in %	$\rho_{293} / \rho_{20,3}^{\circ K}$
99,992	500
99,9975	1100
99,9982	1500
99,9992	2400

Fig. 1 zeigt die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Stärke des Magnetfeldes.

Durch die mit hochreinem Leitermaterial bei tiefer Temperatur erzielbaren Leistungsersparnisse wird die Energieversorgungsanlage ganz bedeutend kleiner und einfacher. Andererseits sind aber nicht zu vernachlässigende Leistungen aufzuwenden für die Tieftemperaturanlage.

Die für tiefgekühlte Spulen bei konstanter Erregung im gesamten aufzuwendende Leistung ergibt sich angenähert zu:

$$P = I^2 R \left(1 + \frac{T_U - T_S}{T_S} \cdot \frac{1}{\eta_k} \right)$$

worin

- I Erregerstrom;
- R Spulenwiderstand;
- T_U Umgebungstemperatur;
- T_S Betriebstemperatur der Spule;
- η_k Wirkungsgrad der Kältemaschine, bezogen auf den entsprechenden Carnot-Wirkungsgrad.

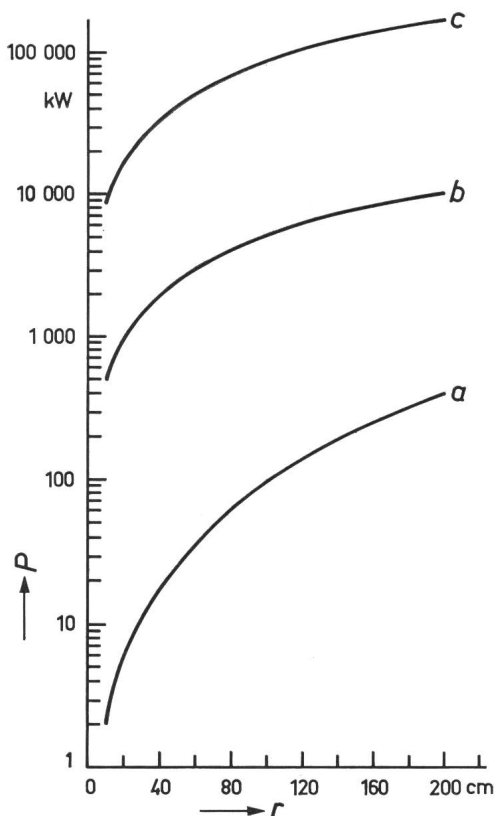


Fig. 2

Für Magnetspulen von 100 kOe benötigte Leistung P , einschliesslich Kühlung bzw. Kälteanlage, in Abhängigkeit des Spulenradius r

a) supraleitende Spule aus Nb-Zr bei 4,2 °K; b) Spule aus reinstem Aluminium bei 20 °K; c) Kupferspule bei Raumtemperatur

Für reines Aluminium und Natrium geben Taylor und Post [5] für $n_k = 0,3$ die in Tabelle II angegebenen Faktoren für die gesamte Leistungseinsparung gegenüber normalleitenden Spulen.

Optimale Betriebstemperatur und mögliche Leistungsreduktionsfaktoren bei tiefgekühlten Spulen aus Aluminium und Natrium
Tabelle II

Material	Feld kOe	Optimale Betriebstemperatur °K	Leistungsreduktionsfaktor
Aluminium	0	16	25
	20	17	12
	50	17	10
	100	17	9
Natrium	0	6	17
	20	8	10
	50	8	9
	100	10	7

Fig. 2 zeigt die für verschiedene Spulentypen benötigte Leistung, einschliesslich Kühlung bzw. Kälteanlage.

Da die den Rechnungen zugrundeliegenden Daten noch etwas unsicher sind, insbesondere für grosse Spulen aus tiefgekühltem reinem oder supraleitendem Material, so sind die Kurven nur als qualitativ zu werten.

2.3 Magnete aus supraleitendem Material

Die ersten Versuche, supraleitende Spulen zu bauen, liegen fast so weit zurück wie die Entdeckung der Supraleitfähigkeit selbst (Kamerlingh Onnes, 1911). Diese Versuche waren nicht erfolgreich, weil die Supraleitfähigkeit bei den

damals bekannten Materialien schon bei relativ schwachen Feldern zerstört wurde. Aber auch Versuche von Mendelsohn am Anfang der dreissiger Jahre mit neuen Materialien mit hohen kritischen Feldern waren enttäuschend, weil die Spulen wegen des Degradationseffektes schon bei niedrigerem Feld als erwartet in den normalleitenden Zustand übertraten [6]. Erst in den letzten Jahren wurde es möglich, auf Grund neuer Erkenntnisse von Kunzler und Mitarbeitern [7] und andern [8] Spulen für höhere Felder zu bauen.

Die Eignung eines supraleitenden Materials für die Spulherstellung hängt von zwei wesentlichen Eigenschaften ab:

1. Vom maximalen Feld, bis zu welchem das Material supraleitend bleibt;
2. Von der kritischen Stromdichte.

Das maximale Feld ist begrenzt auf etwa 70 kOe bei Niob-Zirkon, 120 kOe bei Niob-Titan und 220 kOe bei Niob-Zinn (Nb_3Sn). Bei aus diesen Materialien hergestellten Spulen liegen die Grenzen allerdings noch etwas tiefer.

Die kritische Stromdichte bestimmt die Menge des Drahtmaterials und hat deshalb einen wesentlichen Einfluss auf die Herstellungskosten der Spulen. Andere Faktoren, welche bei der Spulherstellung eine Rolle spielen, werden in einem späteren Aufsatz besprochen.

Als Hauptvorteile supraleitender Spulen können genannt werden:

1. Geringere Spulenabmessungen als bei Verwendung von normalleitenden Kupferspulen.
2. Kleineres Gewicht als bei normalleitenden oder tiefgekühlten Spulen.
3. Verlustlosigkeit im Normalbetrieb.
4. Kleinere Betriebskosten als bei konventionellen Magneten oder tiefgekühlten Spulen.

Nachteilig sind:

1. Die hohe Zeitkonstante, welche nur relativ langsame Felderhöhungen und -erniedrigungen zulässt.
2. Die relativ aufwendigen Wärmeisoliereinrichtungen und die Kälteanlage.

In Bezug auf Einzelheiten soll auch hier wieder auf spätere Aufsätze hingewiesen werden.

2.4 Anwendungen

Mit der Verwendung tiefgekühlter oder supraleitender Spulen werden ein oder mehrere der folgenden Vorteile angestrebt:

- a) Minimale Abmessungen des Magneten und Erhöhung der Zugänglichkeit;
- b) Verminderung des Gewichtes des Magneten oder des ganzen Systems Magnet—Speiseeinrichtung—Kälteanlage;
- c) Verminderung der Verluste, bzw. des Leistungsbedarfes;
- d) Geringere Kosten.

Ein kleines Volumen ist von Bedeutung, wenn ein hohes Feld in einem kleinen Raum erzeugt werden muss. Das Gewicht spielt eine ausschlaggebende Rolle, wenn hohe Felder für Forschungsaufgaben in sehr grossen Höhen (z. B. mittels Ballonen) durchgeführt werden müssen. Ein kleiner Leistungsbedarf kann bei grossen Anlagen eine wesentliche Verminderung der Betriebskosten bringen und erleichtert überdies den Betrieb, wenn Magnete samt Energieversorgung und Rückkühlleinrichtungen von Zeit zu Zeit verschoben werden müssen, wie z. B. auf langen Experimentierarealen bei der Teilchenforschung.

Es soll hier noch eine Bemerkung zu den Kosten gemacht werden. Es ist im gegenwärtigen Zeitpunkt etwas schwer,

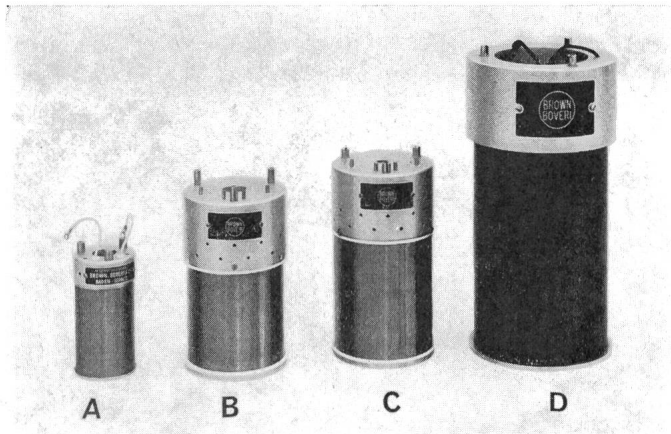


Fig. 3

Supraleitende Spulen für allgemeine Forschungszwecke

Daten der Spulen:	A ¹⁾	B	C	D
lichte Weite	25	25	12,5	100 mm
maximales Feld im Zentrum	32	59	75	34 kOe

¹⁾ kompensierte Spule für hohe Feldhomogenität.

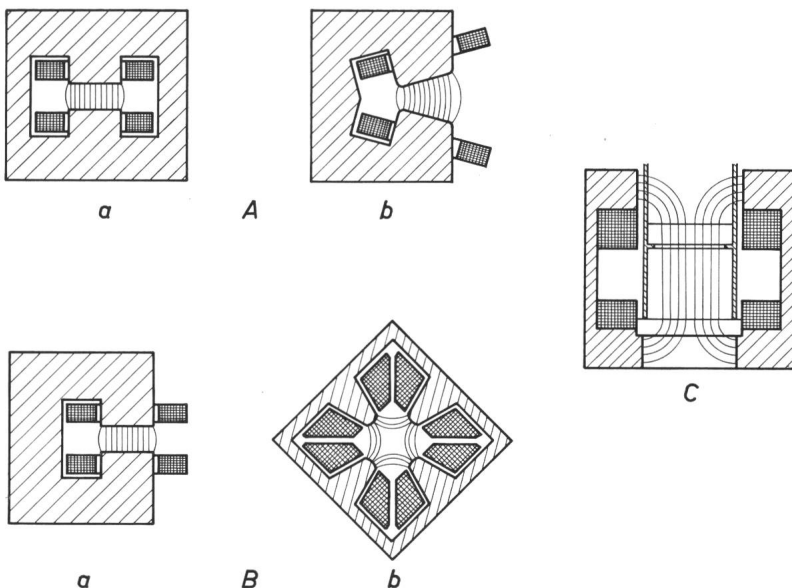
zuverlässige Kostenvergleiche mit konventionellen Magneten anzustellen, insbesondere für grosse Einheiten. Aus verschiedenen Untersuchungen geht hervor, dass die Investitionskosten für die Gesamtanlage (Magnet, Energieversorgung, Kühlung) nicht wesentlich verschieden sind. Hingegen sind für tiefgekühlte und supraleitende Magnete bedeutend niedrigere Betriebskosten zu erwarten. Dies soll später an einem Beispiel gezeigt werden.

Es ist auch nicht leicht, allgemeine Regeln über die Anwendungsgebiete und die gegenseitige Abgrenzung für die einzelnen Magnettypen anzugeben.

a) Supraleitende Magnete sind von Vorteil, wenn das ganze System: Magnet—Stromversorgung—Kühlung möglichst kompakt und leicht sein muss. Sie sind auch besonders geeignet für die Erzeugung räumlich homogener und zeitlich hochkonstanter Felder. Für schnellen Pulsbetrieb sind sie grundsätzlich nicht geeignet.

b) Magnete mit tiefgekühlten Spulen kommen in Frage für die Erzeugung sehr hoher Felder in grössern Volumen und insbesondere wenn relativ schneller Pulsbetrieb mit Stromanstiegszeiten ≤ 1 s erforderlich ist.

c) Für höchste und sehr schnell gepulste Felder werden immer noch mit Vorteil Kupferspulen bei gewöhnlicher Temperatur verwendet.



2.4.1 Anwendung kleinerer supraleitender Magnete für Laboratorien

Supraleitende Magnete mit Innendurchmessern bis etwa 10 cm sind heute handelsüblich und werden schon in grösserer Anzahl für die verschiedensten Forschungsaufgaben verwendet, z. B. für Untersuchungen über Spinresonanz bei hohen Feldern, Mössbauereffekt, Suszeptibilitätsuntersuchungen bei tiefen Temperaturen, Bindung in intermetallischen Verbindungen, magnetfeldabhängiger Widerstand bei tiefen Temperaturen u. a.

Fig. 3 zeigt einige ausgeführte Hochfeldspulen für Forschungszwecke.

2.4.2 Anwendung in der Teilchenphysik

Die Teilchenphysik ist das weitaus grösste Anwendungsgebiet für alle möglichen Magnettypen. Nach ihrer Anwendung kann man sie einteilen in

- a) Beschleuniger-Magnete;
- b) Speicherring-Magnete;
- c) Strahltransport-Magnete;
- d) Magnete für physikalische Apparate (Experimentier-Magnete);
- e) Spezial-Magnete für verschiedene Zwecke wie Korrektur-Magnete, Magnete für Strahlauslenkung, Target-Magnete u. a.

Fig. 4 zeigt verschiedene Magnetfeldanordnungen der Teilchenphysik. Die Beschleuniger-Magnete dienen zur Führung und Fokussierung der Teilchen. Sie können konstant erregt (Zyklotron) oder gepulst (Synchrotron) werden.

Bei den Strahltransport-Magneten unterscheidet man Ablenk-magnete und Fokussier-Magnete (Quadrupole). Diese können ebenfalls konstant erregt oder gepulst werden.

Die wichtigsten Instrumente des Teilchen-Physikers, welche magnetische Felder benötigen, sind Blaskammern und Funkenkammern. Die verwendeten Magnete sind meist konstant erregt, können aber auch gepulst werden.

Eine Besonderheit aller in der Teilchenphysik verwendeten Magnete ist eine sehr hohe Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und Konstanz des Feldes (10^{-3} ... 10^{-4} oder besser).

Fig. 5 zeigt schematisch eine Synchrotron-Anlage für sehr hohe Energien. Tabelle III zeigt eindrücklich, welche Bedeutung den Magneten in einer solchen Anlage zukommt und welche Leistung für ihre Erregung aufzuwenden ist unter der Voraussetzung, dass alle Magnete von konventioneller Bauart sind.

Der Radius eines Synchrotrons ist gegeben durch die Teilchenenergie oder den Impuls und das Magnetfeld:

$$R = \frac{mv}{e} \cdot \frac{1}{B}$$

Darin bedeuten

- m Teilchenmasse;
- v Geschwindigkeit;
- e Ladung der Teilchen;
- B Induktion im Luftspalt des Magneten.

Bei Magneten mit Eisen ist die maximal mögliche Induktion auf der Teilchen-Mittelbahn auf 12...14 kG beschränkt. Damit ergeben sich bei

Fig. 4
Magnetanordnungen der Teilchenphysik
A Akzeleratormagnete
a Zyklotronmagnet; b Synchrotronmagnet
B Strahltransportmagnete
a Ablenk-magnet; b Fokussiermagnet
C Blaskammermagnet

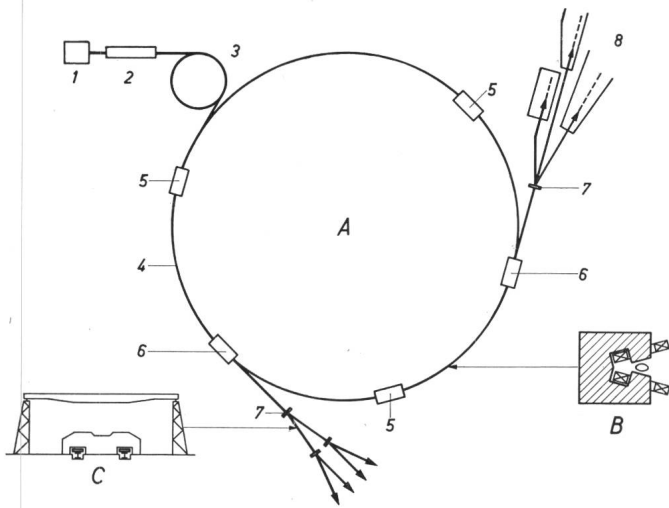


Fig. 5

Schematische Darstellung einer Synchrotron-Anlage für sehr hohe Teilchenenergien

- A Anlage
 1 Ionenquelle; 2 Linearakzelerator; 3 Injektor-Synchrotron; 4 Haupt-synchrotron; 5 Beschleunigungsstationen; 6 Strahlauslenkstationen; 7 Targets; 8 Experimentierareale;
 B Querschnitt durch den Führungsmagneten mit Beschleunigungs-kammer;
 C Querschnitt durch zwei Teilchenkanäle

Protonen-Synchrotronen für Teilchenenergien von mehreren 100 GeV, wie sie heute im Studium sind, Radien von bis zu mehreren Kilometern. Da zwischen den Führungsmagneten feldfreie Strecken für die Hochfrequenz-Beschleunigungs-Stationen, für Korrektur-Magnete, Vakuumpumpen, Strahlauslenk- und andere Einrichtungen vorgesehen werden müssen, so vergrößert sich der mittlere Radius noch einmal um einen beträchtlichen Betrag. Es ist daher naheliegend, zu versuchen, die Führungsmagnete mit tiefgekühlten oder supraleitenden Spulen für bedeutend höhere Feldstärken zu bauen, was eine wesentliche Verringerung des Durchmessers des Akzelerators und damit der Länge des Führungs-Magneten ermöglichen würde [9; 10]. Dies ist um so mehr von Bedeutung, als neben den Kosten des Magneten, der Energieversorgungs- und der Rückkühl-Anlagen auch die Kosten für das Vakuumsystem des Beschleunigers, und vor allem das Ringgebäude, wesentlich in die Rechnung eingehen. Die Gebäudekosten sind hier sehr hoch, weil wegen dem Strahlenschutz Erdüberdeckungen von 10 m oder sogar noch mehr notwendig sind.

Obwohl tiefgekühlte oder supraleitende Spulen bei Beschleuniger-Magneten wesentliche Vorteile bringen würden, so scheint es doch verfrüht, an die Anwendung solcher Spulen

Totalgewicht, Erregerleistung und Energiekosten der Magnete eines 200-GeV-Teilchenforschungslaboratoriums

Tabelle III

	Totalgewicht t	Maximale Leistung ¹⁾ kW	Energiekosten Mill. Fr. / Jahr
Synchrotron-Magnete			
Injektor-Synchrotron	1 200	4 000	1,2
Haupt-Synchrotron	45 000	30 000	8,0
Strahltransport-Magnete	8 000	100 000	18,0
Experimentier-Magnete	20 000	80 000	10,0
Total	74 200	214 000	37,2

¹⁾ maximale Verlustleistung im Magneten und der Energieversorgung sowie der Kühlanlage.

für so grosse Projekte zu denken. Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass sie in der ferneren Zukunft für diesen Zweck zur Verwendung kommen werden.

Bei den Speicherringen handelt es sich um Doppelring-Systeme, in welche Teilchen aus einem Akzelerator in gegenläufigem Sinn eingeschossen und angereichert werden. In einem geeigneten Moment werden die Teilchenpakete aufeinander geschossen. Bei einem solchen Zusammenstoss wird für die Erzeugung neuer Teilchen bedeutend mehr Energie frei als beim Stoss bewegter Teilchen auf feststehende Targets.

Da solche Speicherring-Systeme noch grössere Durchmesser erhalten als die Akzeleratoren, welche die Teilchen beschleunigen, so ist es offensichtlich, dass auch für diese tiefgekühlte oder supraleitende Spulen in Betracht gezogen werden [10].

Supraleitende Spulen haben gute Aussichten, schon in allernächster Zeit bei Strahltransportelementen verwendet zu werden. Bei diesen Elementen handelt es sich einerseits um Ablenkmagnete, welche den Teilchen eine andere Richtung geben, und andererseits um Quadrupol-Magnete für die Fokussierung der Teilchenstrahlen. In den Experimentieranlagen eines Laboratoriums für Teilchenenergien von 200...300 GeV werden mehrere 100 solcher Magnete mit Einzelgewichten bis zu 50 t und Gesamtgewichten von 5...10 000 t zum Einsatz kommen. Die gesamte Erregerleistung kann über 200 MW betragen. Tiefgekühlte oder supraleitende Magnete würden hier eine Reihe von Vorteilen bringen:

1. Kleineres Gewicht und damit höhere Beweglichkeit.

Teilchenstrahlen-Kanäle müssen von Zeit zu Zeit umgebaut werden, was eine Verschiebung einer grösseren Zahl von Magneten und ihrer Energieversorgungen, sowie Änderungen in den Rückkühlanlagen bedingt.

2. Höhere Felder ergeben grössere Strahlenablenkwinkel, und höhere Quadrupolfelder verkürzen die Brennweiten.

Dies ermöglicht wesentliche Einsparungen in der Länge der Strahlengänge und damit der Experimentier-Anlagen.

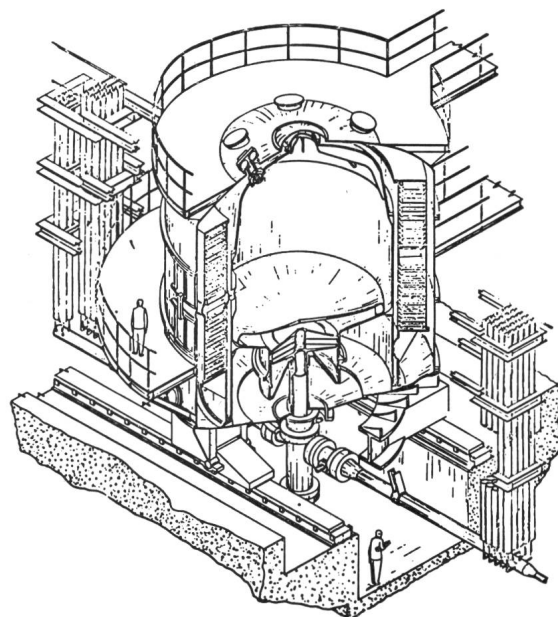


Fig. 6

Projektzeichnung einer grossen Blaskammer

Die Kammer ist teilweise aufgeschnitten. Im Schnitt sind die beiden supraleitenden Spulenpaare von ca. 4 m Innendurchmesser ersichtlich

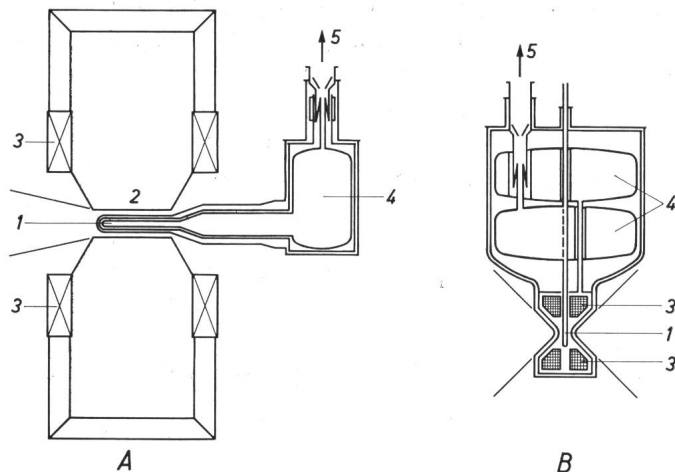


Fig. 7

Vergleich zwischen einem konventionellen Magneten mit einem supraleitenden Spulenpaar für ein polarisiertes Target

A konventioneller Magnet mit Kupferspulen; B Magnet mit supraleitenden Spulen; 1 Target; 2 Magnetpole; 3 Spulen; 4 Heliumbehälter; 5 Vakuumpumpenanschluss

3. Verminderung des Leistungs- und Energiebedarfs.

Eine mögliche Verminderung um einen Faktor von etwa 10 ermöglicht für ein 300-GeV-Laboratorium jährliche Einsparungen von bis zu 25 Millionen Franken einzig für den Strahltransport.

Verschiedene Quadrupol-Modelle mit Öffnungen bis zu 3 cm und Feldgradienten von 10 kG/cm (gegenüber 1...3 kG/cm bei konventionellen Quadrupolen) wurden geprüft und durchgemessen [11]. Grössere Magnete sind im Bau [11; 12]. Es ist anzunehmen, dass sie bald zum praktischen Einsatz kommen werden.

Grosse Experimentier-Einrichtungen, wie z. B. Blasen-kammern für hohe Teilchenenergien, benötigen Einzel-magnete mit Gewichten bis zu 10 000 t und Erregerleistungen von 10...15 MW. Blasen-kammern dienen zum Nachweis von Teilchenreaktionen und Zerfallsprozessen. Sie sind meist mit flüssigem Wasserstoff oder Helium gefüllt, arbeiten also bei sehr tiefen Temperaturen. Es ist deshalb naheliegend, die Spulen von Blasen-kammer-Magneten aus supraleitendem Material herzustellen.

Die erste Blasen-kammer von 25 cm Durchmesser mit supraleitenden Spulen ist im Argonne National Laboratory im praktischen Betrieb bei einem teilchenphysikalischen Experiment.

Fig. 6 zeigt eine Projektzeichnung einer grossen Kammer. Kammern mit Spuleninnendurchmessern von bis zu 5 m befinden sich gegenwärtig in mehreren Laboratorien in Europa und in den USA im Projekt-Stadium [13; 14].

Tabelle IV gibt einige Daten für den Magneten einer Kammer von 3,5 m Durchmesser, welche gegenwärtig vom CERN untersucht wird.

Magnetdaten einer 3,5-m-Blasen-kammer (Projektstudie CERN)

Tabelle IV

Feld	40 kOe
Zahl der Spulen	2
Innerer Spulendurchmesser	4,6 m
Äusserer Spulendurchmesser	5,2 m
Spulenabstand	1,2 m
Strom	5 kA
Gespeicherte Energie500 MJ
Spulengewicht2,2 t

Magnet mit Kupferspulen		Magnet mit supraleitenden Spulen	
	x1000 \$		x1000 \$
Eisenjoch (1900 t)	1000	Eisenjoch	1000
Kupferspulen (90 t)	540	Supraleitende Spulen	300
Zusammenbau	180	Kryostat und zusätzliches Material	510
Energieversorgung (12 MW)	300	Zusammenbau	180
Elektrische Verbindungen	70	Energieversorgung	30
Steuerung und Verschiedenes	150	Heliumverflüssiger	200
Rückkühlanlage (12 MW)	140	Totale Anlagekosten	2220
Totale Anlagekosten	2380		
Elektrische Energie während 10 Jahren bei einem Lastfaktor von 0,5 und \$ 0.008/kWh	4150	Elektrische Energie während 10 Jahren (1MW für den Heliumverflüssiger)	400
Totale Kosten für 10 Jahre	\$ 6530 (ohne Verzinsung)	Totale Kosten für 10 Jahre	\$ 2620

Tabelle V zeigt einen Kostenvergleich zwischen einem Magneten mit normalleitenden Kupferspulen und mit supraleitenden Spulen für eine grosse Blasen-kammer, einschliesslich der Energieversorgung und der Kühleinrichtungen [15]. Für beide Fälle wurde ein Eisenrückschlussjoch vorgesehen.

Fig. 7 zeigt einen Vergleich zwischen einem konventionellen Magneten und einem supraleitenden Spulenpaar für die Erzeugung eines sehr homogenen Feldes von 18...25 kOe für ein polarisiertes Target [16]. Das supraleitende System benötigt bedeutend weniger Raum, eine kleinere Magnetstromversorgung, und die Zugänglichkeit zum Target ist erhöht.

2.4.3 Anwendungen in der Plasma-Physik

Es soll hier nur kurz auf die mögliche Anwendung von tiefgekühlten und supraleitenden Spulen auf zwei Gebieten hingewiesen werden, welche einmal von grosser technischer Bedeutung werden können.

Magneto-Hydrodynamischer (MHD) Generator. Der MHD-Generator ist eine Einrichtung zur direkten Umwandlung von Wärme in Elektrizität. Das Prinzip ist in Fig. 8 dargestellt. Ein heisses Gas, dessen Leitfähigkeit durch zu-

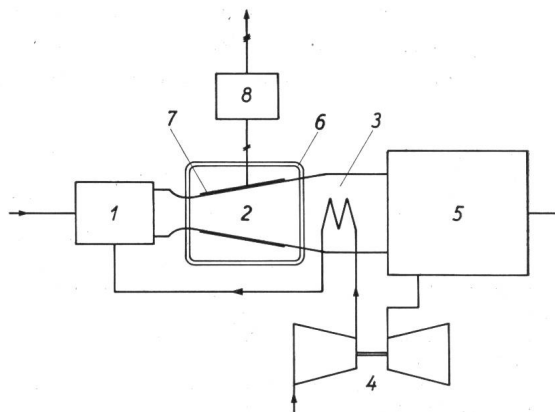


Fig. 8

Prinzip des MHD-Generators

1 Brennkammer; 2 Kanal; 3 Vorwärmer; 4 Kompressor; 5 konventionelles thermisches Kraftwerk; 6 Magnet; 7 Elektroden; 8 Wechselrichter

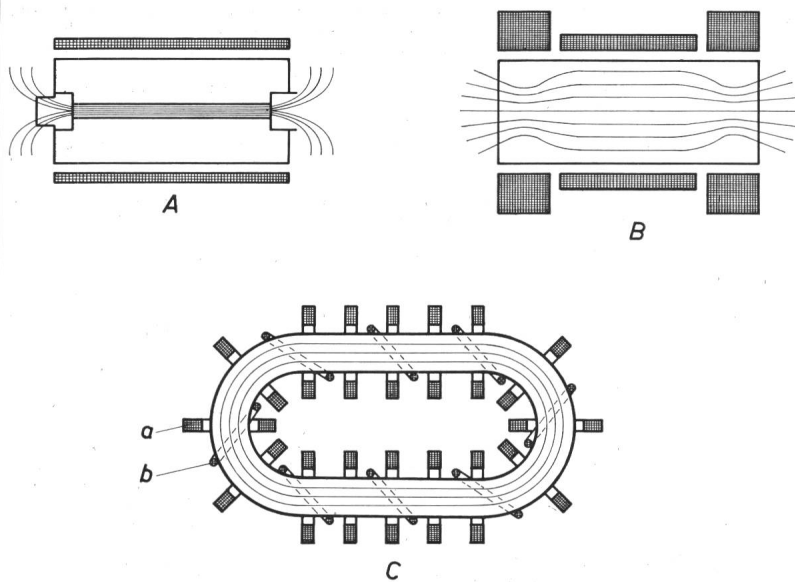


Fig. 9
Magnetfeldanordnungen für die Kernfusionsforschung
A lineare Theta-Pinch-Anordnung;
B Spiegelsystem;
C Stellarator-Anordnung
a Feldspulen für die Plasmaeinschliessung,
b Stabilisierungsspulen

sätzliche Mittel erhöht werden kann, bewegt sich durch ein Magnetfeld senkrecht zu dessen Bewegungsrichtung. Die geladenen Teilchen werden dadurch abgelenkt und auf einem Elektrodenpaar aufgefangen. Dadurch wird eine Gleichspannung erzeugt, welche in einem statischen Stromrichter in eine Wechselspannung umgeformt wird.

Der MHD-Generator, kombiniert mit einem konventionellen thermischen Kraftwerk, verspricht thermische Wirkungsgrade von über 50 %, während diese bei einer konventionellen Anlage nur etwa 40 % betragen.

Bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen über den MHD-Generator spielt der Magnet eine bedeutende Rolle. Es ist verschiedentlich gezeigt worden, insbesondere von Reichert [17], dass ein Magnet mit Kupferspulen bei Normaltemperatur nicht wirtschaftlich sein kann. Einzig mögliche Lösungen sind Magnete mit tiefgekühlten Leitern oder Supraleitern. Es handelt sich hier um Magnetspulen von mehreren Metern Länge. Wie aus kürzlichen Berichten aus den USA hervorgeht, ist die Realisierung so grosser Spulen schon weit fortgeschritten.

Kernfusions-Forschung. Bei der gesteuerten Kernfusion ist eines der schwierigsten Probleme die Einschliessung des Plasmas, dessen Energieverteilung einer Temperatur von mehreren 100 Millionen °C entspricht. Eine Abwanderung der Plasmateilchen an die Gefässwände kann praktisch nur durch hohe magnetische Felder verhindert werden. Es sind hierzu eine Reihe von Anordnungen entwickelt worden [18; 19]; drei der wichtigsten sind in Fig. 9 schematisch dargestellt.

Dass es sich auch hier wieder um bedeutende Anlagen handelt, zeigt das Beispiel des C-Stellarators in Princeton (N.J., USA). Für die Erzeugung des grossvolumigen Feldes von 50 kOe mittels normalen Kupferspulen ist eine Erreger Spitzenleistung von 200 MW erforderlich.

Es bestehen deshalb auch auf dem Gebiet der Plasma-Einschliessung Projekte, grosse Spulen aus tiefgekühltem hochreinem oder supraleitendem Material zu bauen. Fig. 10 zeigt ein Beispiel einer kleineren ausgeführten Spule.

2.4.4 Andere Anwendungen

Energiespeicherung. In der Forschung müssen gelegentlich sehr grosse Energiemengen gespeichert werden, insbesondere für das Pulsen grosser Magnete. Es kommen hierzu

mechanische, chemische, magnetische und elektrische Speicher in Frage [21]. Es ist naheliegend, für eine magnetische Speicherung verlustlose Ringspulen aus hochreinem oder supraleitendem Material in Betracht zu ziehen [22]. Der Ausführbarkeit eines solchen Speichers stehen keine prinzipiellen Schwierigkeiten im Wege, hingegen ist ein schneller Energieentzug bei supraleitenden Spulen nicht einfach zu realisieren.

Diese Art der Speicherung ist natürlich nur interessant, wenn sie gegenüber anderen Methoden Vorteile wie kleinerer Raumbedarf, kleineres Gewicht, geringere Verluste oder kleinere Kosten bringt. Bei sehr hohen zu speichernden Energien können supraleitende Spulen billiger sein als Kondensatoren, aber beide Methoden sind wie *Montgomery* [23] gezeigt hat, erheblich teurer als eine mechanische Speicherung in einem Schwungrad. Bei solchen Kostenvergleichen ist es allerdings wichtig, die allfällig notwendige Umwandlung der gespeicherten Energie in eine andere Energieform mitzuberücksichtigen. Kürzlich hat *Arp* [4] einen interessanten Mega-Joule-Speicher mit tiefgekühlten Spulen beschrieben.

Magnetische Schirme. Da Magnetfelder in bestimmte Supraleiter nicht eindringen (ausser in eine dünne Randschicht), so können diese als magnetische Schirme und zur Führung von Magnetfeldern benützt werden [24]. Interessante Anwendungen ergeben sich bei magnetischen Linsen in der Elektronen-Optik und -Mikroskopie.

Im weiteren hat es sich gezeigt, dass in Raumfahrzeugen elektronische Steuereinrichtungen und Menschen nur durch supraleitende Spulen wirksam vor starker oder länger-

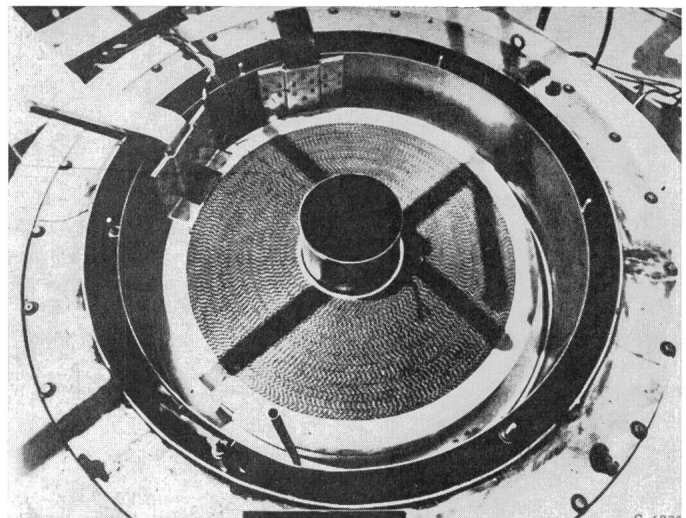


Fig. 10
Tiefgekühlte Spule aus reinem Aluminium mit Kryostat
Diese Spule für 80 kOe bei einem innern Durchmesser von 30,5 cm wurde vom Lewis Research Center der NASA in Cleveland (Ohio) gebaut [20]

dauernder Strahlung im Weltraum geschützt werden können [25]. Entsprechende Spulen von 1,8 m Durchmesser aus Niob-Zirkon-Draht für ein Feld von 14 kOe, samt den dazugehörigen torusförmigen Kryostaten, sind schon gebaut worden [26].

3. Hohlraum-Resonatoren

Eine Anwendung anderer Art von supraleitenden Materialien findet man in neuerer Zeit bei Hohlraumresonatoren. Diese werden in der Forschung in zunehmendem Masse verwendet bei Linear-Akzeleratoren und HF-Teilchenseparatoren. Welche Bedeutung eine Verminderung der Verluste bei grossen Anlagen haben könnte, ersieht man am besten aus dem Leistungsbedarf eines Grossakzelerators. Die 3,2 km lange Maschine der Stanford University in Kalifornien wird im Endausbau Elektronen auf eine Energie von 40 GeV beschleunigen. Dazu ist eine Spitzen-Pulsleistung von 23 000 MW erforderlich.

Es ist verschiedentlich gezeigt worden, insbesondere von *Septier* [27], dass die HF-Verluste in den Wänden von Hohlraumresonatoren bei Verwendung von supraleitendem Material gegenüber Kupfer bei Raumtemperatur um mehrere Grössenordnungen reduziert werden könnten. Andererseits sind aber auch hier bedeutende Leistungen für die Kältemaschine aufzuwenden. Trotzdem erscheint die Anwendung der Supraleiter-Technik auch für Hohlraumresonatoren interessant.

Literatur

- [1] *J. J. Fritz* and *H. L. Johnston*: Design and Operation of Liquid Nitrogen Cooled Solenoid Magnets. *Rev. Sci. Instrum.* 21(1950)5, S. 416...420.
- [2] *P. Vachet* et *J. Bonmarin*: Emploi de l'aluminium raffiné dans les cryomachines. *Rev. gén. électr.* 74(1965)6, S. 555...560.
- [3] *V. Arp*: Cryogenic Coil for Megajoule Energy Storage. *Proc. Internat. Symposium Magnet Technology, Stanford (California), 1965*, S. 625...629.
- [4] *C. E. Taylor* and *R. F. Post*: Cryogenic Coils. *High Magnetic Fields*. MIT Press and John Wiley New York 1962.
- [5] *K. Mendelssohn*: Patterns of Superconductivity. *Cryogenics* 3(1963)3, S. 129...140.
- [6] *J. E. Kunzler* et al: Superconductivity in Nb₃Sn at High Current Density in a Magnetic Field of 88 kG. *Phys. Rev. Letters* 6(1961)3, S. 89...91.
- [7] *Z. J. Stekly* and *J. L. Zar*: Stable Superconducting Coils. *Trans. IEEE Nuclear Science NS-12(1965)3*, S. 367...372.
- [8] *J.-P. Pouillange*: Application des métaux purs à la réalisation de champs magnétiques de grand volume continus et pulsés (accélérateurs de particules). *Rev. gén. électr.* 74(1965)7/8, S. 629...630.
- [9] *J. B. Blewett* et al: FFAG Accelerator with Superconducting Air Core Magnets. Brookhaven National Laboratory, BNL 772(1962)T-290, S. 162...169.
- [10] *P. G. Kruger, W. B. Sampson* and *R. B. Britton*: A Superconducting Quadrupolar Lens. Bericht der Intermag-Tagung, Stuttgart 1966.
- [11] *A. Septier, J. C. Mouza* and *L. Donadieu*: Construction of an Iron-Free Superconducting Quadrupolar Lens. Bericht der Intermag-Tagung, Stuttgart 1966.
- [12] *R. P. Shutt*: Some Proposals for Large Bubble Chambers. Hearings before the Subcommittee on Research, Development and Radiation of the Joint Committee on Atomic Energy. Congress of the United States 1965, S. 291...309.
- [13] *R. Florent*: Technique associant le vide et la cryogénie. Applications aux grandes chambres à bulles. *Le Vide* 20(1965)119, S. 371...375.
- [14] *G. Laverick*: Superconducting Magnets. *Nucleonics* 24(1966)1, S. 46...53.
- [15] *H. Desportes* and *B. Tsai*: A high Homogenous Field Superconducting Magnet for a Polarized Proton Target. *Proc. Internat. Symposium Magnet Technology, Stanford(California), 1965*, S. 509...516.
- [16] *K. Reichert*: Magnetspulen für MHD-Generatoren und stabilisierte supraleitende Spulen. *ETZ-A* 87(1966)4, S. 132...137.
- [17] *S. Glasstone* and *R. H. Lovberg*: Kontrollierte thermonukleare Reaktionen. Thieme München 1964.
- [18] *B. Oswald*: Hohe Magnetfelder und ihre Anwendung in der Plasmaphysik. *ETZ-A* 86(1965)2, S. 40...47.
- [19] *J. C. Laurence* and *W. D. Coles*: Design, Construction and Performance of Cryogenically Cooled and Superconducting Electromagnets. *Proc. Internat. Symposium Magnet Technology, Stanford(California), 1965*, S. 574...587.
- [20] *R. Carruthers*: The Storage and Transfer of Energy. *High Magnetic Fields*. MIT Press and John Wiley New York 1962.
- [21] *P. R. Wiederhold* and *D. L. Ameen*: Energy Storage in High Magnetic Fields Using Superconductors. *High Magnetic Field Conference, Oxford 1963*.
- [22] *D. B. Montgomery*: Superconducting Magnets. *IEEE Spectrum* 1(1964)2, S. 103...113.
- [23] *P. P. Cioffi*: Approach to the Ideal Magnetic Circuit Concept Through Superconductivity. *J. appl. Phys.* 33(1962)3, S. 875...879.
- [24] *G. V. Brown*: Magnetic Radiation Shielding. *High Magnetic Fields*. MIT Press and John Wiley New York 1962.
- [25] *S. R. Hawkins*: A six-foot Laboratory Superconducting Magnet System for Magnetic Orbital Satellite Shielding. *Internat. Advances in Cryogenic Engineering* 10(1965)-, S. 124...136.
- [26] *A. Septier*: Possibilités d'application des supraconducteurs aux accélérateurs de particules. *Le Vide* 20(1961)119, S. 328...342.

Adresse des Autors:

F. Grüter, Assistent der Technischen Direktion, AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.

Commission Internationale de Réglementation en vue de l'Approbation de l'Equipement Electrique (CEE)

Tagung in Wien vom 9. bis 19. Mai 1966

Die CEE hielt auf Einladung des österreichischen Komitees ihre Frühjahrstagung 1966 vom 9. bis 19. Mai in Wien ab. Die Tagung verzeichnete mit über 200 Delegierten zweifellos eine Rekordbeteiligung. Von den 18 Mitgliedsländern entsandte einzig Griechenland keinen Delegierten. Von den Ländern, die der CEE nur als Beobachter angehören, waren Vertreter von den USA und Kanada zugegen. Es ist unverkennbar, wie gerade diese Länder in den letzten Jahren ein steigendes Interesse an der CEE-Arbeit bekunden. Das CES, als schweizerisches Nationalkomitee der CEE, wies auch diesmal eine erfreulich starke Delegation auf, die sich wie gewohnt aus Vertretern der Industrie und der Institutionen des SEV zusammensetzte. Das Tagungsprogramm umfasste Sitzungen der Technischen Komitees für Fehlerstromschutzschalter, Isolierte Leiter, Temperaturregler, Motorapparate und Wärmeapparate. Ferner hielt auch das Zulassungsbüro¹⁾ eine Sitzung ab. Die Tagung wurde wie üblich mit einer Sitzung der Plenarversammlung abgeschlossen.

C. Bacchetta

Technisches Komitee für Fehlerstromschutzschalter (CT 227)

Das CT 227 trat am 9. und am Vormittag des 10. Mai 1966 unter dem Vorsitz von G. Biegelmeier (Oesterreich) zu seiner zweiten Sitzung zusammen. Nachdem in einer internationalen Vorbesprechung und in der ersten Sitzung des Technischen Komitees grundsätzliche wichtige Einzelfragen erörtert worden

¹⁾ Dieser Bericht wird später veröffentlicht.

waren, konnte diesmal zur Lesung des ersten Vorschriftenentwurfes für Fehlerstromschutzschalter geschritten werden. Für die Verwendungstemperatur wurde der Bereich von -5 bis 40 °C festgelegt; hinsichtlich Wasserschutz soll nur noch zwischen gewöhnlichen und spritzwassersicheren Schaltern unterschieden werden. Zu den normalen Nennstromstärken wurden noch in Klammern die Werte 6, 10 und 32 A hinzugefügt. Nach dem Abschnitt über Anschlussklemmen, dessen Behandlung bis zur Angleichung des Entwurfes an die CEE-Empfehlung REC 2 zurückgestellt werden soll, wurden nur noch die beiden umstrittenen Abschnitte über Erwärmung und Zuverlässigkeit behandelt. Die zulässige Erwärmung an den Anschlussklemmen bei erhöhten Prüfströmen wurde nach langer Diskussion auf 65 °C festgelegt. Für die Prüfung der Zuverlässigkeit wurde die bei der CEI eingeführte beschleunigte Wechselklima-Prüfung gewählt, wie sie auch in der schweizerischen Stellungnahme befürwortet war. Das Sekretariat wurde gebeten, einen neuen Entwurf unter Berücksichtigung der gefassten Beschlüsse und der noch nicht beratenen schriftlichen Stellungnahmen der Länder aufzustellen, der anlässlich der Frühjahrssitzung 1967 der CEE durchberaten werden soll.

A. Tschalär

Technisches Komitee für isolierte Leiter (CT 10)

Das CT 10 trat am 10. und 11. Mai unter dem Vorsitz seines Präsidenten, G. Selis (Niederlande), zu zwei halbtägigen Sitzungen