Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 68 (1977)

Heft: 10

Artikel: Aspekte der Anwendung der Supraleitung in der Elektrotechnik in der Kernforschung

Autor: Schaetti, N.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915027

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Aspekte der Anwendung der Supraleitung in der Elektrotechnik und in der Kernforschung

Von N. Schaetti

537.312.62

Der raschen Verbreitung der Supraleitung in der Elektrotechnik, insbesondere der Energietechnik, stehen heute hauptsächlich die hohen Kosten der Anlagen und die mangelnde Erfahrung bezüglich Betriebssicherheit entgegen. Die Entwicklung der notwendigen Werkstoffe erfolgt zum Teil in enger internationaler Zusammenarbeit. Supraleitende Magnete für die Forschung sind in verschiedenen Kernforschungszentren in Betrieb oder im Bau. Einige Beispiele werden kurz beschrieben.

Ce qui entrave surtout un développement rapide de la supraconduction en électrotechnique, notamment en énergétique, ce sont actuellement le coût élevé des installations et une expérience insuffisante de la sécurité de fonctionnement. Le développement de matières supraconductrices a lieu en partie en étroite collaboration internationale. Des aimants supraconducteurs sont en service ou en aménagement dans plusieurs centres de recherche nucléaire. Quelques exemples sont brièvement décrits.

1. Einleitung

Während allgemein angenommen wird, dass die Supraleitung in der Zukunft in der Elektrotechnik eine bedeutende Rolle spielen wird, ist man zurzeit auf diesem Gebiet noch weit von einem Durchbruch entfernt. Potentielle Anwendungsmöglichkeiten werden ausser auf dem Gebiet der supraleitenden Magnete zur Erzeugung stationärer Magnetfelder in der Forschung zur Hauptsache auf folgenden Gebieten gesehen: Supraleitende Spulen für den magnetischen Plasmaeinschluss in der kontrollierten Kernfusion, supraleitende Generatoren, Motoren, gepulste Magnete für Teilchenbeschleuniger, supraleitende Energiespeicher, Magnete für Magnetkissenbahnen, Magnete für Hochfeldmagnetscheidung und schlussendlich Hochleistungskabel.

Bis heute sind erst supraleitende Magnete für die Forschung, sei es für höchste Magnetfelder in kleinem Volumen, sei es für die Erzeugung mittlerer Felder in einem sehr grossen Volumen verwirklicht worden. Was das Gebiet der supraleitenden Magnete für Beschleuniger – Ablenkmagnete und Fokussiermagnete – anbetrifft, so sind heute im *Fermi*-Laboratorium in Batavia (USA) die Vorbereitungen für den Bau eines supraleitenden Beschleunigers voll im Gange.

Während vor einigen Jahren die erzielbaren, noch ungenügenden Eigenschaften der verschiedenen supraleitenden Werkstoffe für das langsame Vordringen der Supraleitung in Richtung von Grossanwendungen in der Elektrotechnik verantwortlich waren, sind die inzwischen erzielten Fortschritte derart, dass die heutigen Supraleiter für viele anvisierten Anwendungen durchaus verwendbar wären. Diese Feststellung bezieht sich hauptsächlich auf verbesserte Stromdichten im Material, erhöhte Stabilität der Werkstoffe, Verringerung der Verluste bei Wechselfeldern und schlussendlich stark reduzierte Kosten für die Herstellung. Heute liegen die Gründe für das sehr langsame Vordringen der Supraleitung in die Elektrotechnik einerseits in den ausserordentlich hohen Grenzleistungen, die mit supraleitenden Maschinen und Einrichtungen erreicht werden müssen, damit diese neue Technik wirtschaftliche Vorteile bringt, anderseits in der noch nicht erbrachten Fiabilität solcher Anlagen. Die Hauptprobleme liegen damit

– in den sehr hohen Kosten für die Entwicklung und für die Herstellung von Prototyp-Maschinen und Prototyp-Anlagen,

– im hohen technischen Risiko,

– in der fehlenden Erfahrung über die Betriebssicherheit von kryogenischen Grossanlagen.

Infolge der sehr hohen Entwicklungskosten wäre bei der augenblicklichen allgemeinen Wirtschaftslage eine finanzielle Unterstützung der Industrie durch den Staat bei solchen Projekten sehr wichtig und erwünscht, was auch im Ausland zum Teil in grossem Ausmass erfolgt (z. B. BRD, USA und Grossbritannien). Seit einiger Zeit sind zusätzliche Hemmnisse hinzugekommen:

– die weltweite Rezession und damit verbunden die Verlangsamung der Zunahme des Energiekonsumes, weshalb kein unmittelbarer Bedarf für den Einsatz von elektrischen Maschinen und Anlagen mit höchsten Grenzleistungen besteht,

– die staatliche Festlegung der Höchstleistungen von Kernkraftwerken auf Werte, die mit konventionellen Maschinen erreicht werden (USA),

– die zunehmende Opposition gegen den Bau von Kernkraftwerken (z. B. in der BRD, in der Schweiz, und in den Niederlanden).

Die Aussichten für eine rasche Einführung der Supraleitung in die Elektrotechnik sind somit zurzeit nicht besonders günstig. Dessen ungeachtet soll im folgenden über einige Aspekte der Anwendung der Supraleitung in der Elektrotechnik berichtet werden, dies aus der Sicht der Tätigkeit des Tieftemperaturlaboratoriums von BBC.

2. Europäische Zusammenarbeit in der wissenschaftlichen und technischen Forschung

An der unter der Bezeichnung COST (Coopération dans le domaine de la recherche scientifique et technique) organisierten europäischen Zusammenarbeit auf dem Gebiete der wissenschaftlichen und technischen Forschung beteiligen sich zurzeit mit den europäischen Gemeinschaften 19 europäische Staaten nach dem Prinzip der koordinierten Arbeitsteilung und des gegenseitigen Austausches der Ergebnisse. In der Regel gestaltet sich die Zusammenarbeit in der flexiblen Weise der konzertierten Aktionen, an denen sich bei Übernahme der eigenen Kosten jeweils jene Staaten beteiligen, die einen Forschungsbeitrag liefern können.

Diese COST-Aktionen sind jüngeren Datums als andere bereits lange bestehende zwischenstaatliche Organisationen, wie die heute bereits über 20jährige Europäische Organisation für kernphysikalische Forschung (CERN), das Europäische Laboratorium für Molekularbiologie (LEBM) und die Europäische Raumfahrt-Agentur (ESA), welche 1975 die ESRO ablöste, sowie andere Forschungsausschüsse im Rahmen der OECD. 1974 schufen die EG ausserdem die Möglichkeit von Assoziationsvereinbarungen mit Drittstaaten beim Kernfusionsprogramm der EURATOM.

In gewissen Fällen begnügt man sich mit einer gemeinsamen Definition der Forschungsziele und dem Austausch der gewon-

nenen Ergebnisse, während die Finanzierung durch jeden Beteiligten autonom erfolgt und insbesondere auch die gewerblichen Schutzrechte gewahrt bleiben. Dies trifft für das neueste Übereinkommen über eine bilaterale Zusammenarbeit zwischen Österreich und der Schweiz auf dem Gebiet der Werkstoffe für supraleitende elektrische Maschinen zu, welches 1976 abgeschlossen worden ist. Die Arbeiten sind zu Beginn dieses Jahres angelaufen. In Österreich sind 4 Industriefirmen und ein Hochschulinstitut an der Mitwirkung an diesem Forschungsprogramm interessiert, in der Schweiz 5 Industriefirmen und 4 Hochschulinstitute. Das Programm basiert auf dem Forschungsprogramm der COST-Aktion 56 und hat zum Ziel, die Eigenschaften der Werkstoffe zu untersuchen, die für die Konstruktion supraleitender elektrischer Maschinen und Anlagen entwickelt werden müssen. Es weist insgesamt 17 verschiedene Programmpunkte auf, wie z. B.:

Supraleitende Werkstoffe:

- Entwicklung von industriellen Herstellungsverfahren für A15-Supraleiter in Filamentform [1] [1])
- Untersuchung über das Verhalten von Supraleitern bei Neutronenbestrahlung
- Untersuchung über das Verhalten von Supraleitern in zeitlich variablen Magnetfeldern und Verbesserung der Leitereigenschaften

Strukturwerkstoffe:

- Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften von metallischen Werkstoffen bei 4,2 K
- Messung der thermischen und elektrischen Leitfähigkeit von Werkstoffen bei tiefsten Temperaturen
- Durchführung von thermischen Zyklen zwischen Raumtemperatur und der Temperatur des flüssigen He (300 K...4,2 K)

Isolationswerkstoffe:

- Untersuchungen der mechanischen und elektrischen Eigenschaften von Isolationsmaterialien im Bereich 300 K...4,2 K
- Untersuchungen der Alterungserscheinungen bei 4,2 K

3. Die supraleitenden Werkstoffe

Im Hinblick auf die Anwendungen der Supraleitung in Magneten und Magnetspulen, wie sie in der Hochenergiephysik und inskünftig in der Kernfusion zur Anwendung kommen werden, sowie im supraleitenden Generator, ist die Erarbeitung industrieller Herstellungsverfahren für Filamentsupraleiter des Typs A15 [1] von ausschlaggebender Bedeutung.

Unter Filamentsupraleiter versteht man einen supraleitenden Draht, in welchem der supraleitende Werkstoff in feinste Filamente aufgelöst ist, die im Drahtmaterial, d. h. der Matrix eingebettet sind. Die Abmessungen der Drähte liegen normalerweise bei Durchmessern von 0,5...0,9 mm. Die Zahl der supraleitenden Filamente beträgt zwischen 100 und 1000 und die Durchmesser der Filamente zwischen 3 und 50 µm.

Diese feine Auflösung des supraleitenden Materials erfolgt mit den folgenden Zielsetzungen:

- bessere Kühlung der in Cu oder Al eingebetteten Filamente aus dem schlecht wärmeleitenden Material wie Nb-Ti, Nb_3Sn und V_3Ga
- Stabilisierung des Materials
- Verringerung der Verluste in Wechselfeldern

Zurzeit handelt es sich bei den A15-Supraleitern vornehmlich um die beiden intermetallischen Verbindungen Nb_3Sn und V_3Ga. Eine Gegenüberstellung der Grunddaten der heute allgemein eingesetzten Legierung Nb-Ti und derjenigen der A15-Verbindungen zeigt den Fortschritt beim Einsatz der zweiten Werkstoff-Gattung.

Tab. I gibt die Daten der kritischen Temperatur T_c, des kritischen Magnetfeldes H_{c2} [2] und für 3 Werkstoffe die kritischen Stromstärken bei einem äusseren Magnetfeld von 10 T und 4,2 K wieder. Als erster Werkstoff ist die Legierung Nb-Ti aufgeführt, sodann die Gruppe der intermetallischen Zweistoff-Verbindungen, geordnet nach steigender kritischer Temperatur und zuunterst die Vertreter der intermetallischen Mehrstoff-Verbindungen.

Nb-Ti ist der heute gebräuchlichste Supraleiter. Von den Zweistoff-Verbindungen sind Nb_3Sn und V_3Ga am besten untersucht, daher können auch für diese 3 Werkstoffe die kritischen Stromdichten angegeben werden. Die Vertreter der untersten Gruppe sind noch am wenigsten untersucht, und Methoden für eine Verarbeitung zu Drähten sind noch nicht bekannt.

Im Falle des supraleitenden Generators liegt das Hauptinteresse eines Überganges zu intermetallischen Verbindungen in der ganz wesentlichen Erhöhung von T_c und damit der Erhöhung des Temperaturbereiches für den Betrieb der Maschine. Bei einer Kühlung der Rotorwicklung auf 5 K steigt der Betriebsbereich von 2 K im Falle des Nb-Ti auf über 12 K bei Nb_3Sn, was die Betriebssicherheit einer solchen Maschine erst gewährleisten kann. Es wird daher allgemein die Ansicht vertreten, dass sich Nb-Ti für die Herstellung von Prototypen eignen kann, nicht aber für den Bau einsatzfähiger Grossmaschinen.

Im Falle der Hauptfeldspulen für die Kernverschmelzung interessiert neben dem erhöhten Temperaturbereich in erster Linie die Möglichkeit höhere Torus-Felder von 10...16 T verwirklichen zu können.

Den sehr interessanten Eigenschaften der intermetallischen Verbindungen stehen sehr grosse verarbeitungstechnische Schwierigkeiten gegenüber. Während Nb-Ti eine gut duktile Legierung ist, sich also ohne besondere Schwierigkeiten verpressen und zu Filamenten ziehen lässt, sind die intermetallischen Verbindungen sehr spröde und können nicht nach der bisherigen Technik verarbeitet werden.

Die Verarbeitung des Materials hat deshalb vor der Bildung der Verbindung zu geschehen. Im Falle des Nb_3Sn werden Nb-Stäbe in Cu oder Cu-Sn-Bronze eingesetzt, verpresst und bis zum gewünschten Draht-Enddurchmesser gezogen,

Grunddaten von Nb-Ti und A15-Supraleitern Tabelle I

Werkstoff *)	T_c für $H = 0$	H_{c2} bei 4,2 K	J_c bei 10 T und 4,2 K
Nb-Ti **)	9,7 K	12,0 T	90 A/mm²
V_3Ga ***)	14,5 K	28,0 T	750 A/mm²
V_3Si	16,9 K	22,0 T	
Nb_3Sn	18,0 K	24,0 T	550 A/mm²
Nb_3Ga	20,2 K	34,0 T	
Nb_3Ge	23,2 K	30,0 T	
$Sn_1Al_{0,8}Mo_{6,4}S_{0,8}$	14,2 K	60,0 T	
$Nb_3Al_{0,7}Ge_{0,2}$	20,7 K	41,0 T	

*) Al Aluminium, Ga Gallium, Ge Germanium, Mo Molybdän, Nb Niobium, S Schwefel, Si Silizium, Sn Zinn, Ti Titan, V Vanadium

**) Nb-Ti: T_c bei m = 5,0 T beträgt nur 6,9 K

***) Dieser und die fünf folgenden Werkstoffe weisen A15-Kristallstrukturen auf.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Supraleitende Detektormagnete Tabelle II

Institut	Detektortyp	Wicklung Ø i	Zentralfeld	Gespeicherte Energie	Betriebs-strom	Leiter-gewicht	Joch-gewicht	Inbetrieb-nahme
ANL	Blasenkammer	4,8 m	1,8 T	80 MJ	4900 A	45 t	1600 t	1969
BNL	Blasenkammer	2,4 m	2,5 T	72 MJ	6000 A		kein Joch	1969
NAL	Blasenkammer	4,3 m	3,0 T	396 MJ	5000 A			1969
CERN	Blasenkammer BEBC	4,5 m	3,5 T	830 MJ	5700 A	93 t	kein Joch	1973
CERN	Funkenkammer OMEGA	3,5 m	1,8 T	50 MJ	5000 A	24 t	1400 t	1972
DESY	Proportionalkammer	1,5 m	2,0 T	4 MJ	1260 A	2,9 t	120 t	1975

ANL Argonne National Laboratory USA
BNL Brookhaven National Laboratory USA
CERN Organisation Européene pour la Recherche Nucléaire
DESY Deutsches Elektronen-Synchrotron
NAL Fermi Laboratory

wobei die Nb-Filamentdurchmesser von der Grössenordnung von 3 μ sind. Bei diesem Enddurchmesser wird die intermetallische Verbindung durch eine Glühung gebildet. Der Draht mit den Filamenten, die aus einem Kern aus Nb und einer Nb_3Sn-Hülle bestehen, ist in diesem Zustand auf Biegung und Zug sehr empfindlich, denn die Filamente brechen bei einem zu geringen Biegeradius und zu hoher Zugbelastung.

Für die Bildung der Verbindung Nb_3Sn sind grundsätzlich zwei Verfahren anwendbar:

Interne Sn-Diffusion: Der Ausgangsdraht besteht aus Nb-Filamenten in einer Cu-Sn-Bronze als Matrix. Bei der Schlussglühung diffundiert das Sn von der Bronze in die Nb-Filamente.

Externe Diffusion: Der Ausgangsdraht besteht aus Nb-Filamenten in einer reinen Cu-Matrix. Der Draht wird mit einer einige μ dicken Sn-Schicht versehen. Bei der Schlussglühung diffundiert das Sn durch das Cu unter Bildung von Cu-Sn-Bronze in die Nb-Filamente, wo sich die Nb_3Sn-Schicht bildet.

Wie beim Nb-Ti sind die Filamentleiter auch im Falle des Nb_3Sn durch reines Cu zu stabilisieren. Die Cu-Sn-Bronze ist dafür infolge der schlechten elektrischen Leitfähigkeit nicht verwendbar. Es muss reines Cu in den Leiter eingebaut werden, was durch die Verwendung von mit Tantal (Ta) umhüllten Cu-Stäben in die Ausgangsbolzen erreicht werden kann. Ta bildet für das Sn eine Diffusionssperre und erlaubt die Beibehaltung des reinen Cu auch nach der Diffusionsglühung.

Die hohe Empfindlichkeit des A15-Materials beeinflusst auch die Wickeltechnik der Spulen. Hier werden wiederum zwei Wege beschritten:

Wickeln und Glühen: Die Spule wird mit dem unreagierten Leiter hergestellt, wobei ein neues temperaturbeständiges Isolationssystem notwendig ist. Nach dem Wickeln wird die Glühung durchgeführt und die reagierte Spule anschliessend vakuumimprägniert. Dieses Verfahren ist bei kleineren Spulen mit kleinen Leitern und kleinen Biegeradien vorzusehen, wie z.B. bei supraleitenden Dipolen und Quadrupolen.

Glühen und Wickeln: Die Wicklung wird mit reagiertem Leiter hergestellt, wenn es sich um Großspulen mit grossen Biegeradien und grossen Leitern handelt wie z.B. Spulen für grosse Funken- und Blasenkammern, Hauptfeldspulen für die kontrollierte Fusion.

Vor allem in Japan wird anstelle der intermetallischen Verbindung Nb_3Sn die Verbindung V_3Ga verwendet. Sie bietet bei Magnetfeldern über 12 T gegenüber dem Nb_3Sn den Vorteil höherer Stromdichten. Doch sind die Ausgangsmaterialien bedeutend teurer.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in allen Laboratorien, die sich mit supraleitenden Werkstoffen befassen, die Herstellungsmethoden für die Werkstoffe Nb_3Sn und V_3Ga mit erster Priorität vorangetrieben werden und dass diese Werkstoffe heute auch bereits angeboten werden. Dabei werden aber Verbesserungen an den Nb-Ti-Supraleitern nicht vernachlässigt, da diese heute noch fast ausschliesslich angewandt werden.

4. Supraleitende Magnete für die Forschung

Die Anwendung der Supraleitung in der Forschung hat auf verschiedenen Gebieten Fortschritte gebracht. Die wichtigste Anwendung ist für Magnete in der Hochenergiephysik erfolgt. Man kann zwischen zwei Magnetgruppen unterscheiden, einerseits den Hochfeldmagneten für Magnetfelder von 8...16 T, anderseits den Mittelfeldmagneten, welche Detektormagnete mit grossem Feldvolumen, Strahlführungsmagnete und gepulste supraleitende Magnete umfassen.

4.1 Hochfeldmagnete

Die Hochfeldmagnete haben bei der Erforschung der Bandstrukturen von Metallen und Halbleitern insbesondere in Verbindung mit tiefsten Temperaturen Bedeutung erlangt. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um supraleitende Solenoide. Neuerdings verwenden Biophysiker und Chemiker starke Magnetfelder zur Beeinflussung von Reaktionen und zur magnetischen Orientierung von Molekülen in Makromolekülen und Hochpolymeren.

Die höchsten Felder in kommerziellen supraleitenden Spulen liegen bei 16 T, bei Bohrungen von der Grössenordnung von 30 mm. Noch höhere Magnetfelder lassen sich mit Hybridmagneten, d.h. Kombinationen von Bitterspulen mit supraleitenden Solenoiden erreichen (höchster erreichter Wert: 22 T).

4.2 Mittelfeld-Magnete

Auf diesem Gebiet werden durch die Anwendung der Supraleitung wirtschaftliche Lösungen angestrebt, was sowohl die Investitionskosten als auch die Betriebskosten betrifft. Dies ist insbesondere für die folgende Gruppe solcher Magnete von Bedeutung:

– *Detektormagnete mit grossen Feldvolumen:* Tab. II gibt einige Daten der heute in Betrieb stehenden grossen Detektormagneten. Bei diesen Grossmagneten spielt hauptsächlich der Aufwand für die Speisung im Betrieb eine sehr wichtige Rolle. So benötigt die grosse BEBC-Blasenkammer des CERN 500 W bei 50 K zur Kühlung der thermischen Abschirmungen und 400 W zur Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur von 4,5 K. Die notwendige Anschlussleistung beträgt 360 kW. Ein normalleitender Magnet der gleichen Dimension und Feld-

stärke würde dagegen 60...70 MW Anschlussleistung erfordern, d.h. ca. das 200fache.

– *Supraleitende Strahlführungsmagnete:* Diese Magnete können höhere Ablenk- respektive Fokussierfelder erzeugen als die klassischen Magnete. Dies ist wesentlich bei hochenergetischen oder sehr kurzlebigen Teilchen. Neben diesen technischen Belangen kommen auch hier wirtschaftliche Überlegungen in Betracht. Tab. III gibt die wesentlichsten Daten einiger bis heute realisierter supraleitender Ablenk- und Quadrupol-Magnete auf Basis Nb-Ti wieder.

– *Supraleitende gepulste Magnete:* Die Aussicht, die zweite Ausbaustufe des neuen 400-GeV-Protonensynchrotrons des CERN-II-Laboratoriums mit supraleitenden Magneten ausrüsten zu können, hat die Entwicklungsarbeiten an supraleitenden gepulsten Magneten stimuliert. Der Beschluss von 1972, die zweite Stufe ebenfalls mit konventionellen Magneten auszurüsten, hat die Aktivität auf diesem Sektor dann aber stark gedämpft. Dieser Entscheid musste gefällt werden, da die supraleitenden, gepulsten Magnete noch nicht fertig entwickelt waren und noch keine Erfahrung mit dem Betrieb solcher Magnete vorlag. Neuerdings bewirken die Anforderungen an Großspulen für die kontrollierte Fusion wiederum starke Impulse.

Die Entwicklung gepulster supraleitender Magnete ist möglich, nachdem entscheidende Fortschritte in der Entwicklung eigenstabiler Filamentsupraleiter gemacht worden sind. Sie gestatten eine Reduktion der in einem zeitlich variablen Magnetfeld im Supraleiter entstehenden Verluste. Die Verluste im supraleitenden Material sind dabei hysteresischer Natur, und hinzu kommen Wirbelstromverluste in der normalleitenden Matrix [5].

Fortschritte wurden erzielt durch Verwendung sehr dünner Filamente von Durchmessern unterhalb von 10 µm, von Barrieren aus Cu-Ni mit relativ hohem Widerstand zwischen den Filamenten und Verdrillung der SL-Drähte zur Verkürzung der Stromschleifen zwischen benachbarten Filamenten. Diese Entwicklung ist heute noch in vollem Gange, da die bis anhin erreichten Resultate noch zu verbessern sind. An den Spulenaufbau werden besondere Anforderungen gestellt bezüglich Stabilität und guter Kühlung zur Abführung der Verlustwärme.

5. Anwendungsbeispiele

5.1 Der Energy-Doubler des Fermi-Laboratoriums

Das weitaus grösste Projekt auf dem Gebiet der gepulsten Magnete, das beschlossen ist und sich zurzeit im Aufbau befindet, ist der «Energy-Doubler» zum 500-GeV-Beschleuniger des *Fermi*-Laboratoriums in Batavia USA. Durch Einbau eines zweiten Ringbeschleunigers mit supraleitenden Elementen soll die Energie des Beschleunigers auf 1000 GeV gebracht werden. Es ist geplant, den Ausbau dieser Maschine bis Ende 1979 zu bewerkstelligen. Dabei sind 800 Dipolmagnete und 200 Quadrupole notwendig. Die Gesamtkosten für die Beschaffung dieser Magnete wird auf Fr. 33 Mio veranschlagt, wobei das Institut einen Grossteil der Magnete selbst fertigen wird, und ein Teil der Dipole an die Industrie vergeben werden soll. Prototypen der Magnete sind im Fermi-Laboratorium bereits mit Erfolg getestet worden.

Das Ablenkfeld des Energie-Dopplers wird 4,5 T betragen, d.h. das Doppelte des Hauptringes von 2,25 T. Da der Energiekonsum des supraleitenden Ringes wesentlich kleiner sein wird als derjenige eines klassischen Beschleunigers, wird er auch eine Energieeinsparung bringen.

Seit Beginn des Bauvorhabens 1972 sind im Fermi-Laboratorium bereits eine Vielzahl von Prototypen gebaut worden, die schliesslich zu einer für ein Synchrotron preislich annehmbaren Lösung geführt haben. Ein definitiver Prototyp der 6,7 m langen Ablenkmagnete hat im März 1976 das gewünschte Magnetfeld geliefert. Es war sodann vorgesehen, bis Ende 1976 eine kleine Anzahl von Magneten beim Übergang vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand zu überprüfen. Dabei war die Hauptfrage die, ob ein Quench ohne Beschädigung der Magnete abläuft. Anschliessend soll das Fertigungsprogramm anlaufen.

5.2 Die 8-m- und 5-m-Müonenkanäle des SIN

Der erstmalige Einsatz eines supraleitenden Solenoids für die Sammlung der Müonen ist durch das Schweizerische Institut für Nuklearforschung (SIN) verwirklicht worden [3; 4; 6; 7]. Dieses Institut erteilte Ende 1973 den Auftrag zum Bau der supraleitenden Spulen des 8 m langen Kanales. Nach erfolgreicher Prüfung der ersten Spulen von je 50 cm Länge erfolgte eine Nachbestellung für die 10 Spulen eines zweiten,

Supraleitende Ablenkmagnete und Quadrupole auf Basis Nb-Ti — Tabelle III

Laboratorium	⌀ der Bohrung cm	Länge cm	Feldstärke T	Gradient kG/cm	Warme Bohrung	Gespeicherte Energie kJ	Test Jahr
Quadrupole							
CERN	13	90	4,0	5,0	ja	25	1972
CERN	17,3	1500	5,1	4,0	17,3	5000	1976
SACLAY	26	68	4,5	3,5	20,0	670	1971
	36	67	4,0	2,3	30,0	770	1972
GFK	6	30	2,0	3,0	nein	klein	1972
Ablenkmagnete							
CERN	13,2	195	3,4	–	13,2	370	1972
ANL	10,0	90	2,7	–	nein	50	1972
NAL	5×13	300	2,5	–	5×13	112	1972
	20×60	180	1,8	–	20×60	600	1972

ANL, CERN, NAL siehe Tab. II — SACLAY Commission de l'Energie Atomique (CEA), Laboratoire de Saclay
GFK Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe

5 m langen Kanals, der ohne Schwierigkeiten im März 1976 in Betrieb genommen werden konnte.

Während bis anhin die Müonen in einem klassischen Quadrupol-System gesammelt wurden, haben Rechnungen des Institutes gezeigt, dass ein supraleitendes Solenoid dem klassischen Konzept ausbeutemässig überlegen ist, da die Teilchen durch das starke Magnetfeld von 5 T besser zusammengehalten werden. Die konstruktive Auslegung der Spulen erfolgte, basierend auf den Vorarbeiten des SIN, in enger Zusammenarbeit zwischen dem Hersteller und dem Institut. Erstmals wurde für Objekte dieser Grösse eine indirekte Kühlung der mit Kunstharz vergossenen Spulen durch überkritisches Helium verwirklicht, welches durch Kühlschlangen gepumpt wird, die die Wicklung umschliessen und mit dieser vakuumimprägniert sind. Die Leiter sind als supraleitende Kabel ausgebildet. Jedes Kabel von 1150 m Länge besteht aus 11 supraleitenden Drähten zu je 48 Nb-Ti-Filamenten mit 53 μ Durchmesser. Zusätzlich enthält das Kabel 2 Drähte aus reinem Kupfer. Der kritische Strom beträgt 1000 A bei 4,2 K und 5,8 T. Der Betriebsstrom zur Erreichung des gewünschten Feldes von 5 T liegt bei 870 A.

20 der 30 erforderlichen supraleitenden Kabel sind von der Schweizerischen Arbeitsgemeinschaft für supraleitende Materialien (*Metallwerke Dornach AG*, Dornach; *Schweizerische Metallwerke Selve & Cie.*, Thun; *Métaux Précieux S.A.*, Neuchâtel; *AG. Brown Boveri & Cie.*, Baden) in Zusammenarbeit mit *Huber & Suhner A.G.*, Herisau, hergestellt worden. 10 Kabel wurden durch die englische Firma *Imperial Metal Industries* (IMI) gefertigt.

Im Hinblick auf den gleichzeitigen Betrieb von 16 bzw. 10 Einzelspulen von 50 cm Länge war das Verhalten der Spulen bei der Erregung besonders wichtig. Sie durften kein Trailing aufweisen, d.h., der Betriebsstrom war mit möglichst wenigen Übergängen in den normalleitenden Zustand (Quench) bei Stromstärken unterhalb von 1000 A zu erreichen. Durch eine sorgfältige Imprägnierung der Spulen mit einem für diese Anwendung speziell geeigneten Epoxydharzsystem wurde dieses Ziel auch sehr gut erreicht.

5.3 Supraleitende Hauptfeldspulen für die kontrollierte Fusion

Es wird erwartet, dass die kontrollierte Kernfusion neben Sonnenenergie und schnellen Brütern eine Energiequelle sein wird, die ab Beginn des 21. Jahrhunderts den Energiebedarf auf lange Zeit sicherzustellen verspricht.

Bei der magnetischen Einschliessung des Plasmas in der kontrollierten Kernfusion sind sehr hohe Magnetfelder in grossem Volumen erforderlich, weshalb der Einsatz von supraleitenden Spulen eine Voraussetzung für die Verwirklichung dieser Technik darstellt. Aus dieser Erkenntnis heraus hat die amerikanische Behörde ERDA (Energy Research and Development Administration) ein Programm aufgestellt, um die Möglichkeiten der Anwendung grosser supraleitender Spulen in der Kernverschmelzung möglichst rasch abzuklären. Dazu soll im Laboratorium von Oak Ridge ein Torus mit 6 supraleitenden Hauptfeldspulen aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Der Gesamtaufwand wird dabei auf 30...40 Mio Dollar geschätzt.

Die ERDA hat in der Folge eine internationale Beteiligung an diesem Projekt im Rahmen der IEA (Internationale Energie Agentur) vorgeschlagen. Das in Vorbereitung befindliche LCP-Projekt (Large Coil Project) soll den Nachweis der Funktionstüchtigkeit grosser supraleitender Spulen in der Kernfusion erbringen. Ein Zusatz-Abkommen ermöglicht Japan und Europa eine Beteiligung am LCP-Projekt, wobei eine Beistellung von 2...3 Spulen erwartet wird, die in der Testeinrichtung geprüft werden könnten.

Das Problem der Hauptfeldspulen wird durch das Vorhandensein des Wechselfeldes der poloidalen Spulen, die der Aufheizung des Plasmas dienen, sehr erschwert, da dieses Wechselfeld Verluste im Supraleiter der Hauptfeldspulen verursacht. Die Hauptdaten der Spulen sind wie folgt festgelegt worden:

Spulenform	D-förmig
Spulendimension	3 m × 4,5...5 m
Stromdichte im Leiter	2500 A/cm²
Betriebsstrom	10000 A
gepulstes Poloidal-Feld	0,5 T/s

Der Zeitplan für die Verwirklichung dieses Projektes sieht vor, dass die Hauptfeldspulen ab September 1980 abgeliefert und die Spulentests bis Ende 1982 durchgeführt werden.

Die D-förmigen Hauptfeldspulen eines zukünftigen Fusionsreaktors werden noch bedeutend grösser sein als die Spulen des LCP-Projektes. Damit scheint aus der heutigen Sicht das Gebiet der kontrollierten Kernfusion fussend auf der Technik des Einschlusses des Plasmas mit hohen Magnetfeldern ein sehr wichtiges Anwendungsgebiet für die Supraleitungstechnik zu werden.

Literatur

[1] *A. Asner:* Neue filamentierte Nb_3Sn-Hochfeld-Supraleiter. Bull. SEV/VSE 68(1977), S. 484...488.

[2] *J. L. Olsen:* Physikalische Eigenschaften für technische Supraleiter. Bull. SEV/VSE 68(1977)10, S. 473...478.

[3] *G. Vescey, I. Horvath* and *J. Zellweger:* The superconducting müon channels. Proceedings of the fifth International Conference on Magnet Technology, Frascati 5(1975), p. 110...119.

[4] *G. Vescey:* Supercritical cooling of superconducting magnets. Prodeedings of the fifth International Conference on Magnet Technology, Frascati 5(1975), p. 120...124.

[5] *K. Kwasnitza* and *I. Horvath:* Reduction of the ac losses of multifilament superconductors by the use of twist rates. Journal of Applied Physics 47(1976)11, p. 5038...5040.

[6] *H. Fillunger* und *I. Horvath:* Supraleitende Spulen für das Müonenkanal-System im Schweizerischen Institut für Nuklearforschung (SIN). Brown Boveri Mitt. 62(1975)10/11, S. 496...500.

[7] *G. Meyer:* Supraleitende Kabel für Magnetspulen. Brown Boveri Mitt. 62(1975)10/11, S. 490...495.

Adresse des Autors

Dr. N. Schaetti, Leiter des Teilbereiches Elektromagnete und Tieftemperaturtechnik, Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Werk Oerlikon, 8050 Zürich.