

Neue filamentierte Nb₃Sn-Hochfeld-Supraleiter

Autor(en): **Asner, A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **68 (1977)**

Heft 10

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915028>

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.

Neue filamentierte Nb₃Sn-Hochfeld-Supraleiter

Von A. Asner

537.312.62

Nach kurzem Überblick über die Herstellungsverfahren von fein filamentierten Nb₃Sn-Hochfeld-Supraleitern werden die Stabilitätsgrenzen derartiger Leiter dargelegt und die technologischen Probleme im Zusammenhang mit der etwaigen Anwendung in der Elektrotechnik, Hochenergiephysik und später beim Bau von Fusionsreaktoren erwogen. Abschliessend wird auf die Vorteile dieser neulich auch kommerziell erhältlichen Supraleiter hingewiesen.

Après un bref aperçu des procédés de fabrication de supraconducteurs finement filamentés en Nb₃Sn à champ intense, l'auteur en indique les limites de stabilité et mentionne les problèmes technologiques que pose leur emploi éventuel en électrotechnique, en physique des hautes énergies et, plus tard, dans la construction de réacteurs à fusion. Il termine en indiquant les avantages de ces supraconducteurs mis récemment sur le marché.

1. Aufbau und Herstellung von Supraleitern der Gruppe A15

Die Entdeckung supraleitender Eigenschaften von Legierungen der Gruppe A15 erfolgte 1953 durch Hardy und Hulm [1]). Die hohen kritischen Temperaturen T_c , Stromdichten j_c und Magnetfelder B_c dieser Legierungen sind seitdem von keinem Supraleiter übertroffen worden.

Eine A-15-Struktur wird allgemein bei stöchiometrischen Verhältnissen A₃B vorgefunden, wobei sich die A-Atome auf Übergangs- oder Transitionsmetalle Titan (Ti), Vanadium (V), Zirkonium (Zr), Niobium (Nb), Tantal (Ta), Chrom (Cr) und Molybdän (Mo) beziehen und die B-Atome allgemeinerer Art sind [2]. Von den insgesamt 45 supraleitenden A-15-Legierungen sind infolge der angestrebten hohen T_c , j_c und B_c nur 6 von praktischem Interesse: V₃Si (Silizium), V₃Ga (Gallium), Nb₃Sn (Zinn), Nb₃Al (Aluminium), Nb₃Ga und Nb₃Ge (Germanium), wobei die drei zuletzt genannten noch schwerwiegende Instabilitäten und Herstellungsprobleme aufweisen. Hingegen scheinen gewisse ternäre Legierungen wie Nb₃(Al_{0,75}

Ge_{0,25}) interessante Entwicklungs- und Anwendungsmöglichkeiten zu bieten.

Von den Hochfeld-Supraleitern der Gruppe A15 kommt in erster Linie dem Nb₃Sn und V₃Ga praktische Bedeutung zu. Da sich die Entwicklung von insbesondere fein filamentierten Leitern aus Nb₃Sn vor einem Abschluss befindet und derartige Supraleiter bereits kommerziell erhältlich sind, scheint es angebracht, über die Herstellungsprozesse zu berichten. Im Gegensatz zu Nb-Ti-Leitern wird man bei zukünftigen praktischen Anwendungen der Nb₃Sn-Supraleiter immer mit den Imperativen ihrer Herstellung rechnen müssen.

Die hohen T_c , j_c und B_c von Nb₃Sn und V₃Ga im Vergleich zu Nb-Ti sind seit langem bekannt (Fig. 1); bandförmige Supraleiter aus Nb₃Sn sind noch vor den filamentierten Nb-Ti-Leitern hergestellt worden. Diese Bandleiter von etwa 0,12 mm Dicke und 12 mm Breite waren aus mehreren dünnen Bändern aus Kupfer oder Bronze, Stahl und aus dem bandförmigen Supraleiter selbst zusammengepresst. Wegen der beträchtlichen Breite dieser Leiter waren bei transversalem Magnetfeld weder die Bedingung der Eigenstabilität [3] noch die in diesem Aufsatz erörterte Bedingung der Transportstrom- oder Eigenfeldstabilität erfüllt [5; 6], so dass die erwarteten hohen j_c und B_c nach Fig. 1a bei weitem nicht erreicht wurden.

Es war folglich naheliegend und erforderlich, Supraleiter aus Nb₃Sn (und aus V₃Ga) in Form von sehr dünnen Filamenten herzustellen. Die seit etwa 5 Jahren in den USA, Japan und Westeuropa eingesetzte Entwicklung hat nun zu technologischen Herstellungsverfahren von insbesondere fein filamentierten Supraleitern aus Nb₃Sn geführt, die hier erklärt werden sollen.

1.1 Methode der Bronze-«Matrix»

Ausgangselemente sind zylindrische Nb-Stäbe, die in eine maximal 8% Sn enthaltende Bronze-«Matrix» eingesetzt und gemeinsam gezogen werden (Fig. 2a). Nachdem der Leiter seine endgültigen Abmessungen erreicht hat, wobei die Nb-Stäbe einen 10...20-µm-Durchmesser aufweisen, wird der Kompositenleiter einem Reaktionsprozess bei 650...750 °C während etwa 100 h ausgesetzt. Das Sn diffundiert in die Nb-Stäbe und bildet eine 1...5 µm dicke ringförmige supraleitende Nb₃Sn-Schicht. Der Anteil des Supraleiters in der Bronze beträgt 10...20%. Diese weist einen relativ hohen elektrischen Widerstand von 1...2 · 10⁻⁸ Ωm bei 4,2 K auf.

1.2 Methode der oberflächlichen Sn-Diffusion

Die Nb-Stäbe werden in eine Cu-Matrix, die sich besser für den Ziehprozess eignet, eingesetzt und auf die Endabmessungen gebracht (Fig. 2b). Danach wird eine Schicht aus hoch-

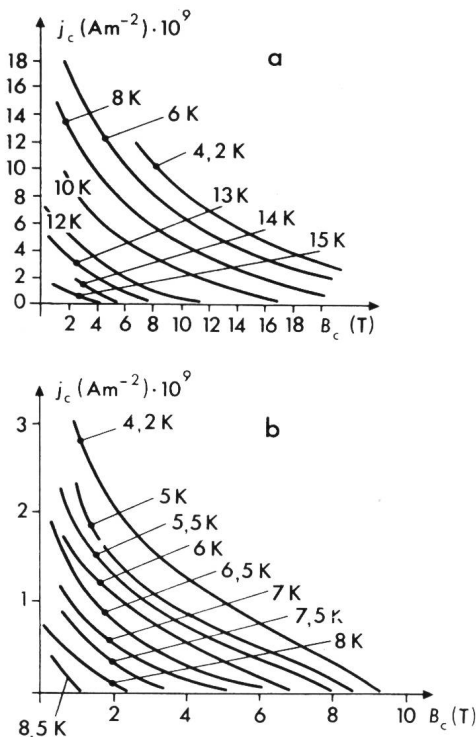


Fig. 1 Kritische Stromdichte j_c , kritisches Magnetfeld B_c und kritische Temperatur T_c
a für Supraleiter der Gruppe A15
b für Nb-Ti

wertigem Sn auf der Kompositenoberfläche aufgetragen. Der Reaktions- und Diffusionsprozess des Sn ist gleich wie beim ersten Verfahren.

Wegen des hohen spezifischen Widerstandes der Bronzematrix ist es notwendig, die supraleitenden Kompositen zu stabilisieren. Dies erfordert den geeigneten Einbau von hochwertigem Kupfer und dessen Abgrenzung gegen den beim Reaktionsprozess diffundierenden Sn. Als Barriere wird ein Schutzring aus Ta, seltener aus Cu-Ni verwendet. Der Einbau des stabilisierenden Kupfers kann nach drei Methoden erfolgen (Fig. 3):

a) Cu-Stäbe, mit schützendem Ta-Ring umgeben, werden mit den Nb-Stäben in die Bronzematrix gesetzt und gezogen (*innere Stabilisierung*).

b) Die Ausgangskomponenten für die Bildung der supraleitenden Schicht, die Nb-Stäbe und die zumeist kreisförmige Bronzematrix werden durch einen äusseren Kupferring, der durch einen dünnen Ta-Ring gegen die Bronze geschützt ist, stabilisiert (*äussere Stabilisierung*).

c) Als Ausgangsmaterial werden anstelle von Nb-Stäben Nb-Ringe oder Röhren verwendet. In diese Röhren werden stabilisierende Cu-Stäbe eingesetzt und die drei Komponenten Cu, Nb und Bronze auf das Endmass gezogen. Die Cu-Stäbe sind durch die Nb-Ringe gegen das Eindringen von Sn geschützt.

Es sollen nun folgende Probleme untersucht werden:

– Wie kann ein Kompositenleiter für 1000 A...10000 A und für Magnetfelder von 7...10 T hergestellt werden, der gleichzeitig sämtliche Stabilitätskriterien, insbesondere das Transportstrom- oder Eigenfeld-Stabilitätskriterium erfüllt?

– Wie wird der Reaktionsprozess von Nb₃Sn-Leitern die Herstellung von entsprechenden Wicklungen beeinflussen und in welchem Masse ist eine Abweichung von der bisherigen Wicklungstechnik mit Nb-Ti-Supraleitern zu erwarten?

Abschliessend sollen die Perspektiven, die sich durch die Anwendung von filamentierten Nb₃Sn-Supraleitern ergeben, besprochen werden.

2. Einfluss der Stabilitätskriterien

Nach dem adiabatischen Stabilitätskriterium [3] beträgt der maximal zulässige Filamentendurchmesser, bei dem noch keine Flußsprünge auftreten

$$d_{\max} \leq 2 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{300 T_0 c}{\mu_0 j_c^2}} \quad (1)$$

mit $T_0 = \frac{j_c}{\partial j_c / \partial T}$ und c der spezifischen Wärme des Supraleiters. Diese Gleichung führt auf Werte von $d_{\max} \leq 40$ bis $50 \mu\text{m}$.

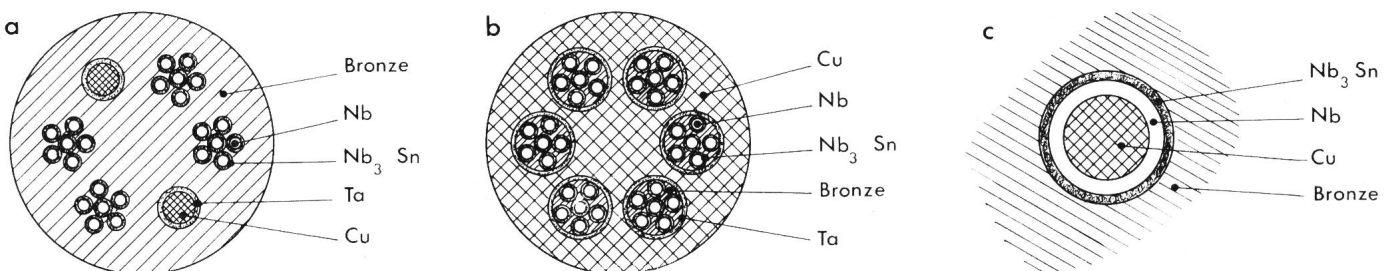


Fig. 3 Stabilisierung von Supraleitern aus Nb₃Sn

a innere Stabilisierung b äussere Stabilisierung c innere Stabilisierung im Nb-Stab

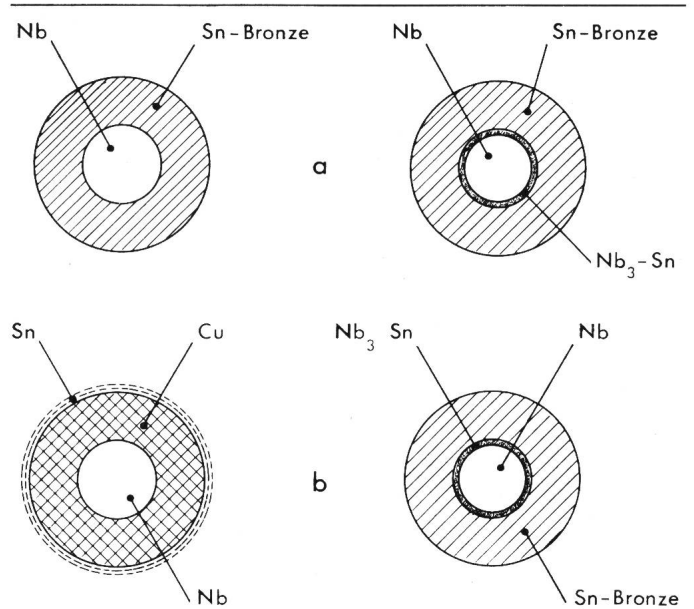


Fig. 2 Filamentierte Supraleiter aus Nb₃Sn vor und nach dem Reaktionsprozess

a Methode der Bronzematrix

b Methode der Kupfermatrix mit Zinndiffusion

Da bei filamentierten Nb₃Sn-Supraleitern die Ringschicht 1...2,5 μm beträgt, ist das adiabatische Stabilitätskriterium bestimmt erfüllt. Durch eine *Verdrillung* der Filamente wird ferner eine magnetische Entkopplung bezüglich des äusseren Magnetfeldes erreicht.

Das Eigenfeld B_t ist das vom Transportstrom I_t hervorgerufene Magnetfeld im Supraleiter. Bis vor kurzem war man der Ansicht, dass das Stabilitätskriterium bezüglich B_t die Herstellung von Supraleitern für hohe Ströme nicht beeinträchtigen würde. Man war deshalb in erster Linie bestrebt, die bei Pulsbetrieb im stabilisierenden Kupfer auftretenden Wirbelströme durch Barrieren aus Ta oder Cu-Ni geschickt zu unterbrechen. Trotzdem kam es in derartigen Nb-Ti-Leitern zu Degradationserscheinungen bei Strömen, die weit unter den erwarteten Nennströmen lagen.

Es ist heute theoretisch und experimentell erwiesen, dass der Anzahl von supraleitenden Filamenten in einem Leiter und dessen Gestaltung durch die Einwirkung des Eigenfeldes B_t bestimmte Grenzen auferlegt sind, selbst wenn dieser Leiter sämtliche Bedingungen erfüllt, die durch die Magnetisierungsströme im Supraleiter bedingt sind und sich auf den Filamentdurchmesser und die Verdrillung beziehen. Da Eigenfeldeffekte in Nb₃Sn-Supraleitern infolge der hohen kritischen Strom-

dichte j_c einen bedeutenden Einfluss ausüben, ist es angebracht, die von *Turck* und *Duchateau* [5; 6] entwickelten Kriterien für die Eigenfeldstabilität kurz zu erörtern.

Das Eigenfeld-Stabilitätskriterium wird dabei in zwei Schritten abgeleitet: man betrachtet vorerst nur den in einer Richtung fließenden Transportstrom I_t , d.h. den Strom, der in der betrachteten Wicklung die erwünschte Feldkonfiguration erzeugt. I_t fließt in der äusseren Ringschicht des Supraleiters und dringt bei Erhöhung von I_t immer tiefer in den Supraleiter ein. Die Eindringtiefe stellt sich dabei so ein, dass durch die kritische Stromdichte j_c im Ring der Innenteil des Supraleiters vom Eigenfeld B_t geschirmt wird. Es sei erwähnt, dass j_c durch das wesentlich höhere Aussenfeld B_a bestimmt ist.

Eine geringe Störung der Gleichgewichtsbedingungen, etwa eine lokale Temperaturerhöhung ΔT , ruft eine Verringerung um $-\Delta j_c$ und eine entsprechende Erweiterung der den Transportstrom führenden Ringschicht hervor, und B_t dringt tiefer in den Leiter ein (Fig. 4). Derartige Flußsprünge können unter bestimmten thermischen Bedingungen des Kompositenleiters (Leitfähigkeit, spezifische Wärme und Wärmeübertragung an das Kühlmittel) zu einem Quench führen.

Die angeführten Voraussetzungen sind pessimistisch, da der Einfluss des Aussenfeldes B_a nicht berücksichtigt wurde. Die dem stets vorhandenen B_a entgegenwirkenden Magnetisierungsströme mit $\pm j_c$ im Supraleiter überlagern sich dem Transportstrom und bewirken, dass ein geringer Teil von I_t auch im Inneren der durch die Ringschicht begrenzten Fläche des Supraleiters fließt. Dieser Effekt kann durch eine Korrektur des reinen Transportstrom-Stabilitätskriteriums berücksichtigt werden. Dabei geht man vom Verhältnis der resultierenden magnetischen und thermischen Diffusionskonstanten D_m und D_{th} aus und bildet

$$\nu = \frac{D_m}{D_{th}} = \frac{e/\mu_0}{k/c} \quad (2)$$

mit μ_0 der Permeabilität des Vakuums, dem resultierenden spezifischen Widerstand des Leiters, k seiner resultierenden thermischen Leitfähigkeit und c der resultierenden spezifischen Wärme. Man bestimmt ferner

$$\beta = \frac{\mu_0 \cdot (\eta \cdot j_c \cdot R)^2}{c \cdot T_0} \quad (3)$$

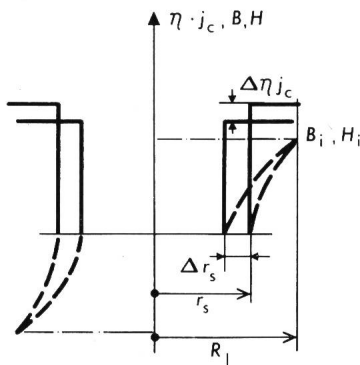


Fig. 4 Transportstrom- oder Eigenfeldstabilität

- R_1 Leiterradius
- r_s Radius der feldfreien Zone
- j_c kritische Stromdichte
- η Anteil des Supraleiters am Gesamtleiter
- B_i, H_i Feld, Erregung bei erster Felddurchdringung des Supraleiters

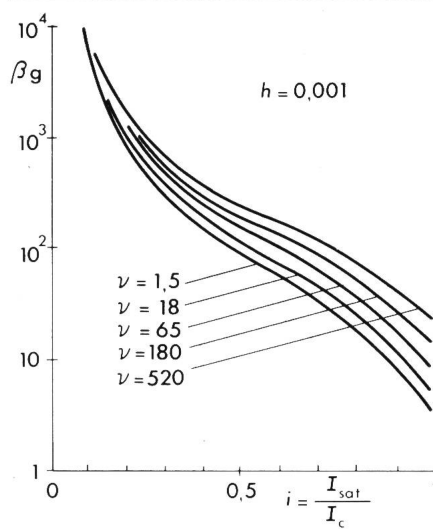


Fig. 5 Bestimmung des Grenzwertes β_g für die Eigenstabilität

$i = I_{sat}/I_c$ normierter Sättigungsstrom

$h = 0,001$ normierter Wärmeübertragungskoeffizient für Wicklung mit Epoxydharzimprägnierung

ν Diffusionsparameter des Leiters

mit η dem Anteil des Supraleiters im Gesamtleiter und R dem (äquivalenten) Radius des Leiters.

Falls $\beta > \beta_g$, wobei β_g die von *Turck* und *Duchateau* berechneten und in Fig. 5 gegebenen Grenzwerte sind, ist keine Eigenfeldstabilität mehr vorhanden. Diagramme nach Fig. 5 können für verschiedene Kühlverhältnisse der Wicklung, die durch den normierten Wärmeübergangskoeffizienten h gegeben sind, berechnet werden, wobei

$$h = \frac{H \cdot R}{k} \quad (4)$$

Für flüssiges Helium (He) ist $H = 2 \cdot 10^{-4}$ [W/m² K]. Der in Fig. 5 angenommene Wert $h = 0,001$ entspricht einer Epoxydharzimprägnierung der Wicklung.

Aus den ν - und β -Werten kann aus Fig. 5 der normierte, auf den kritischen Strom I_c reduzierte Sättigungsstrom $i = I_{sat}/I_c$ bestimmt werden. Der Einfluss des Aussenfeldes B_a wird durch eine Korrektur berücksichtigt, die man Fig. 6 entnehmen kann. Man bestimmt das Produkt $G \cdot r_f$ aus der Erregerkennlinie $G = B_a/I_t$ der betrachteten Wicklung und dem Filamentenradius r_f und findet den korrigierten normierten Transportstrom I_t/I_c , bei welchem noch keine Transportstrom-Instabilität zu erwarten ist.

Nimmt man z. B. einen $1,1 \times 2,2$ -mm²-Kompositenleiter mit $3500 \times 2,5$ μ m dicken Nb₃Sn-Ringen und mit 34% Kupfer zur Stabilisierung an, so können nach Fig. 5 bereits bei 4 T, d.h. bei etwa 40% von j_c , Transportstrom-Instabilitäten erwartet werden; bei 7...8 T erhöht sich die Grenze auf 70...80% von j_c , indem die bei tieferen Magnetfeldern hohen j_c entstabilisierend wirken. Unter Berücksichtigung des Aussenfeldes B_a und der Korrektur nach Fig. 6 erhöhen sich die obigen Werte auf 55% bzw. 85% von j_c .

Um in zukünftigen Hochstromleitern aus Nb₃Sn die kritische Stromdichte zu erreichen, wird es unerlässlich sein, den Gesamtleiter aus mehreren Teilleitern auszuführen und diese unter sich *völlig zu transportieren*. Nach Gl. (3) ist dann für die Bestimmung des β -Wertes der Radius des Teilleiters R_{el}

einzusetzen, so dass eine Erhöhung der Grenze für die Transportstromstabilität von

$$\beta_{el} = \left(\frac{R_{el}}{R} \right)^2 \cdot \beta \quad (5)$$

erreicht wird. Bei völliger Transponierung der einzelnen Kompositenleiter, die einen Durchmesser von 0,4...0,7 mm \varnothing aufweisen, kann β_{el} um mehr als eine Größenordnung gegenüber β des nicht transponierten Gesamtleiters verringert werden, so dass unter Berücksichtigung von Fig. 5 und 6 die kritische Stromdichte j_c erreicht wird.

3. Einfluss des Reaktionsprozesses auf die Wicklungstechnik

Hier drängt sich ein Vergleich mit den zurzeit fast ausschliesslich verwendeten Supraleitern aus Nb-Ti auf, die mit beliebigem Querschnitt in der Form von kompakten Leitern, Seilen oder Hohlleitern hergestellt werden und selbst komplizierten Wicklungsanordnungen keinerlei Begrenzungen aufliegen. Bei den Isolierungs-, Wicklungs- und Imprägnierungsverfahren von Nb-Ti-Leitern kann somit auf die Erfahrungen mit normalen Kupferleitern zurückgegriffen werden.

Bei der Bewicklung mit bereits reagierten Nb-Sn-Supraleitern, ein für praktische Anwendungen sicher einfacher und attraktiver Fall, haben Versuche ergeben, dass minimale Biegeradien von etwa $\rho_{min} > 150 \cdot \Delta$ (mit Δ der schmalen Leiterabmessung) nicht unterschritten werden sollen. Im Gegenfall rufen Risse und Sprünge in den Nb₃Sn-Schichten eine Verringerung von I_c hervor.

Um sich von geometrischen Einschränkungen und unkontrollierbaren Stromverringern zu befreien, erscheint es angebracht, auch die Möglichkeit einer Bewicklung mit nicht reagiertem Leiter und nachträglichem Reaktionsprozess zu prüfen. Es ergeben sich dann eine Reihe noch offener technologischer Probleme, da dann sämtliche Wicklungsteile, Vorrichtungen usw. Temperaturänderungen zwischen 4,2 K und 750 °C ausgesetzt sein können. Die zu lösenden Probleme beziehen sich auf:

– *Die Leiterisolation*: Eine nicht organische Isolation, z. B. aus Quarzglasfasern, könnte die Reaktionstemperatur ohne

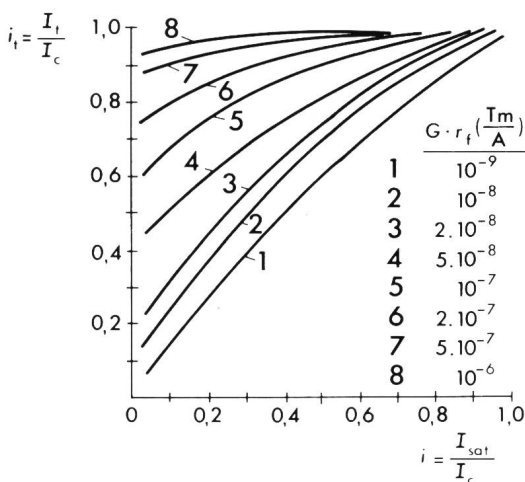


Fig. 6 Korrektur infolge der Magnetisierungsströme

$i = I_{sat}/I_c$ normierter Sättigungsstrom
 $G = B_n/I_t$ Erregungskennlinie der Wicklung
 r_t Filamentenradius
 $i_t = I/I_c$ normierter zulässiger Transportstrom

Beschädigung ertragen. Klebstoffe für eine Haftung der Isolation am Leiter, die weit unter der Reaktionstemperatur verdampfen und keine, für eine spätere Imprägnierung mit Epoxydharz schädlichen Zerfallsprodukte hinterlassen, wären erforderlich. Man könnte auch an Leiter mit einer dünnen äusseren Al-Schicht denken, die nach der Bewicklung chemisch oxydiert würde, um eine isolierende Al₂O₃-Schicht auf der Leiteroberfläche zu erhalten.

– *Herstellung von Wicklungen*: Für Wicklungen von bestimmten Magneten der experimentellen Hochenergiephysik, zum Teil auch für Wicklungen elektrischer Maschinen, sind enge geometrische Toleranzen erforderlich. Es ergibt sich somit die Notwendigkeit von geeigneter Materialauswahl und geeignetem Aufbau der Wickelvorrichtungen, um bei den hohen Temperaturen des Reaktionsprozesses und bei späterer Abkühlung unzulässige Deformationen zu vermeiden.

– *Imprägnierung*: Eine Imprägnierung der geformten Wicklung würde nach dem Reaktionsprozess erfolgen. Als Varianten kann eine Vakuumimprägnierung oder vorteilhafterweise eine Hochdruckimprägnierung bei Drücken bis zu 100 at mit Epoxydharz vorgesehen werden.

4. Perspektiven und Möglichkeiten, die sich durch Anwendung von filamentierten Nb₃Sn-Leitern ergeben

Unter Annahme, dass die technologischen Probleme im Zusammenhang mit einer erfolgreichen Anwendung von filamentierten Nb₃Sn-Supraleitern gelöst werden können, ergeben sich für den Bau von elektrischen Maschinen, für Magnete der Hochenergie-Teilchenphysik und für die Projektierung zukünftiger Fusionsreaktoren vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten.

In elektrischen Maschinen mit supraleitenden Erregerwicklungen aus Nb₃Sn können die bei gleicher effektiver Stromdichte der Nb-Ti-Leiter möglichen Felder 7...8 T kaum realisiert werden, da die dann auftretenden elektromagnetischen Kräfte nicht mehr beherrscht werden könnten. Erregerwicklungen aus Nb₃Sn sind dennoch von grossem Interesse, da durch die hohen T_c und j_c eine bedeutende Erhöhung der Betriebssicherheit gewährleistet ist. Bei 5 T beträgt nämlich die verbleibende Temperaturdifferenz ΔT_c gegenüber dem flüssigen He 1...1,5 K gegenüber ≈ 6 K für Nb₃Sn. Das Verhältnis von j_c Nb₃Sn zu Nb-Ti beträgt ≈ 2 .

Durch eine erfolgreiche Entwicklung von Dipol- und Quadrupolmagneten mit Bohrungsfeldern von 7...8 T ergeben sich für die Hochenergie-Teilchenphysik folgende Möglichkeiten:

Die Energie der 28-GeV-Speicherringe des CERN in Genf könnte bei gleichem Maschinenradius um einen Faktor 6...7 erhöht und auf etwa 200 GeV gebracht werden. Dies bedeutet, dass derartige Speicherringe im gleichen Gebäude und unter Benützung der gleichen Infrastruktur wie die mit klassischen Magneten erbauten 28-GeV-Ringe untergebracht und vom neuen 400-GeV-Synchrotron des CERN mit Protonen gefüllt werden können.

Strahltransportmagnete mit Bohrungsfeldern von 7...8 T würden sehr kurze Strahlkanäle für Sekundärteilchen ermöglichen, wodurch die Intensität von Teilchen mit sehr kurzen Zerfallszeiten, den sog. Hyperonen, beträchtlich erhöht werden kann.

Auch Targetmagnete mit Nb₃Sn-Wicklungen weisen Vorteile auf. Unter Targetmagneten versteht man Dipol- und Quadrupolmagnete, die unmittelbar nach einem Target ange-

ordnet sind. Durch Einwirkung von primären Protonen auf das Target werden Sekundärteilchen erzeugt, deren Gesamtfluss durch Anwendung der hohen Felder im Targetmagneten beträchtlich erhöht werden kann. Der primäre Protonenstrahl ruft jedoch im Aktivteil des Targetmagneten, d.h. in seinen Wicklungen, seiner Eisenabschirmung usw. Reaktionsprozesse hervor, die zur Erzeugung weiterer Sekundärteilchen führen. Dadurch wird im Aktivteil des Magneten Wärme erzeugt, die vom Kühlmittel, dem flüssigen He aufgenommen wird und zu einer Temperaturerhöhung führt. Infolge der wesentlich grösseren zulässigen Temperaturerhöhung von Nb₃Sn kann die Strahlintensität erhöht werden, ohne dass die Wicklung des Targetmagneten normalleitend wird.

Bei gleichem Feld weisen Wicklungen mit Nb₃Sn den Vorteil dünnerer Strombeläge auf. Bei Dipolmagneten verringern sich die radialen Wicklungsabmessungen im Verhältnis der Stromdichten j_c von Nb₃Sn zu Nb-Ti (Gl. 6). Bei Quadrupolmagneten ist der Gewinn noch grösser (Gl. 7), da

$$j_c \cdot (R_2 - R_1) = j_c \cdot \Delta R = c_1; \Delta R = c_1/j_c \quad (6)$$

$$j_c \cdot \ln R_2/R_1 = c_2; \Delta R = e^{c_2/j_c} - 1 \quad (7)$$

Als Folge der dünneren Strombeläge kann eine Vereinfachung der Bewicklung und Imprägnierung sowie eine billigere Herstellung erwartet werden.

Wegen den grossen Abmessungen von zukünftigen Fusionsreaktoren erscheinen die hohen Stromdichten von Nb₃Sn nicht unbedingt erforderlich. Es wird jedoch vorgesehen, dass derartige Reaktoren mit einer thermischen Leistung von etwa 5 GW, Torusachsendurchmessern von ≈ 30 m und Torus-

breiten von ≈ 15 m Zentralfelder von etwa 5 T benötigen werden, wobei das Feld am Innendurchmesser des Torus bis auf 8 T ansteigen soll. Bei diesen Feldern sind j_c und ΔT_c von Nb-Ti gering, während Nb₃Sn-Leiter eine weitaus höhere Betriebssicherheit gewährleisten.

Ein weiterer von der spezifischen Anwendung unabhängiger Vorteil von Nb₃Sn-Supraleitern kann sich aus der Auslegung zukünftiger Kältemaschinen ergeben. Während man bei Nb-Ti-Leitern auf die Temperatur des flüssigen He von 4,2 K oder auf noch geringere Temperaturen angewiesen ist, könnte bei Nb₃Sn an höhere Temperaturen von 9...10 K und an Anwendung von gasförmigem He gedacht werden, wodurch eine Verbilligung der Kältemaschinen erreicht werden kann.

Literatur

- [1a] G.F. Hardy and J.K. Hulm: Superconducting silicides and germanides. Physical Review 89(1953)4, p. 884.
- [1b] G.F. Hardy and J.K. Hulm: The superconductivity of some transition metal compounds. Physical Review 93(1954)5, p. 1004...1016.
- [2] D. Dew-Hughes: Superconducting A-15 compounds; a review. Cryogenics 15(1975)8, p. 435...454.
- [3] P. Smith a. o.: Experimental and theoretical studies of filamentary superconducting composites. Rutherford Laboratory Preprint RPP/A73. Chilton Didcot, Berkshire, Rutherford High Energy Laboratory, 1973.
- [4] M.N. Wilson: Filamentary composite superconductors for pulsed magnets. Rutherford Laboratory Preprint RPP/A89. Chilton Didcot, Berkshire, Rutherford High Energy Laboratory, 1972.
- [5] J.L. Duchateau and B. Turck: Prediction of maximum quenching currents in coils made of high current multifilamentary composites of multistrand cables. Proceedings of the fifth International Conference on Magnet Technology, Frascati 1975.
- [6] J. Sutton: Induced circumferential currents and losses in flexible superconducting cables. Cryogenics 15(1975)9, p. 541...545.

Adresse des Autors

Dr. A. Asner, Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN), 1211 Genève 23.

Ewald Jürgen von Kleist 1700–1748

Am 11. Oktober 1745 wollte Ewald Jürgen v. Kleist, der sich ernsthaft mit physikalischen Problemen beschäftigte, das Wasser in einem Glas elektrisch aufladen. In das mit Wasser gefüllte Glas hatte er einen Nagel gestellt, der mit einer Art Elektrysiermaschine in Verbindung gebracht wurde. Als er darauf mit der einen Hand den Zinnteller mit dem darauf stehenden Glas, mit der andern den Nagel berührte, erhielt er zu seinem Schrecken einen heftigen Schlag. Ein andermal geschah das gleiche, als er mit einem mit Quecksilber gefüllten Fläschchen experimentierte. Er erkannte, dass durch diese Einrichtung Elektrizität gespeichert werden konnte, und belegte hierauf das Äussere der Flasche mit einer Stanniofolie. Der innere Belag, ursprünglich durch die leitende Flüssigkeit gebildet, wurde später durch einen zweiten Stanniolbelag ersetzt.

Kleist meldete seine Beobachtungen sofort an Gelehrte in Danzig und Berlin. Trotzdem wurde die Sache nicht allgemein bekannt. Ein Jahr später entdeckte ein holländischer Privatmann namens Cunaeus die gleiche Erscheinung, meldete sie an Professor Musschenbroek in Leiden und dieser wiederum an Abbé Nollet in Paris. Nollet gab der Einrichtung den Namen «Leidenerflasche», weil er glaubte, Musschenbroek sei deren Erfinder.

Über das Leben von Kleist weiss man relativ wenig. Geboren wahrscheinlich am 10. Juni 1700 in der Nähe des kleinen pommerschen Orts Belgard, als Sohn einer adeligen Familie, studierte er von 1719...1722 die Rechte an der Universität Leiden. Nach Pommern zurückgekehrt, verzichtete einer seiner Vettern zu seinen Gunsten auf den Sitz im Domkapitel zu Kammin. Kleist diente von 1722–1747 als Domdechant der Kurie. Während dieser Zeit betrieb er eifrig physikalische Studien, derentwegen er zum Mitglied der Berliner Akademie ernannt wurde. Im Herbst 1747 erhielt er die Berufung zum Präsidenten des königlichen Hofgerichtes in Köslin. Ein Jahr später, am 10. Dezember 1748 starb er dort. Von seiner Familie – er hatte sieben Söhne und eine Tochter – überlebten ihn seine Gattin und 4 Söhne. H. Wüger

Leute, die sich auskennen,
bestätigen:

Funkanlagen von BBC funkten besser und länger

als
viele andere.

Hier einige Gründe:

Qualität der Geräte

Das A und O: beste Bauteile, sorgfältige Verarbeitung, rigorose Schlussprüfung, robuste Gehäuse. Viel und gutes Zubehör.

Technologische Spitze

Ein eigenes Forschungszentrum bringt Lösungen, Schaltungen und Bauteile, die andere nicht haben.

Robuste Bauweise

BBC-Geräte fürchten weder Nässe, Hitze noch Kälte. Sie sind für harten Arbeitseinsatz in klimatisch extremen Lagen gebaut.

Zukunftssichere Anlagenkonzepte

BBC baut Funkanlagen mit Blick auf die Zukunft. Was immer an Neuem kommen mag: ihre BBC-Anlage ist nicht verplant, der Fortschritt nicht verbaut.

Problem-Analyse

Darauf kommt es an: zu erkennen, was Ihnen dienen wird. Bei komplizierten Analysen hilft der Computer.



BBC sorgt für unterbrechungsfreien Betrieb: in der Mehrzweckanlage Säntis tragen neben verschiedenen Basisfunkstellen auch die Hochspannungsanlagen, -transformatoren und die Ersatzstromversorgung das BBC-Zeichen.

Beratung

Das übernehmen Leute, die sich auskennen: in Ihrem Gebiet, in der Funktechnik, in deren Anwendung.

Projektierung

Eine Sache mit Hand und Fuss: BBC-Projekte nehmen Rücksicht auf örtliche Gegebenheiten, auf Ihre Wünsche und auf betriebliche Anforderungen.

Installation

Nicht zu unterschätzen: gut installiert ist halb gefunkt. Eine saubere Installation garantiert eine lange Lebensdauer der Anlage und niedrige Unterhaltskosten.

Service

Damit steht (oder fällt!) die ganze Übung. Wer behauptet, seine Ge-

räte brauchten keinen Service, hat vielleicht keinen. BBC hat: siehe nächster Abschnitt.

Präsenz

In 25 Orten der Schweiz gibt es BBC-Servicestellen, wo qualifizierte Fachleute bereitstehen, um notfalls einzuspringen. Innert Stunden funkt's dann wieder!

Das tönt ja gut!

SEV

Beweisen Sie mir, was Sie können. Ich möchte

Unterlagen über _____

einen Anruf _____

den Besuch eines Spezialisten für _____

Name, Firma _____

Adresse _____

PLZ/Ort _____

Telefon _____

Einsenden an BBC, Abt. ENR-V,
5300 Turgi Tel. 056-29 96 11

Sprechfunk, Datenfunk,
Richtfunk, Rundfunk,
Sprachverschlüsselung:
moderne Technik –
robust gebaut.



BBC
BROWN BOVERI

... eine solide
Sache!

BBC Aktiengesellschaft
Brown Boveri & Cie
Abt. ENR-V, 5300 Turgi,
Tel. 056-29 96 11.

Zweigbüros in Baden, Basel,
Bern, Lausanne und Zürich.

Autorisierte Verkaufs- und
Servicestellen in Aarau,
Aubonne, Basel, Bellinzona,
Disentis, Genf, Hochwald,
Hünibach, Lausanne,
Leysin, Ligerz, Luzern,
Moudon, Moutier, Neuhaus-

sen, Niederurnen, Rothrist,
Sargans, Schaan, Sierre,
St. Blaise, St. Moritz, Uzwil,
Zürich.

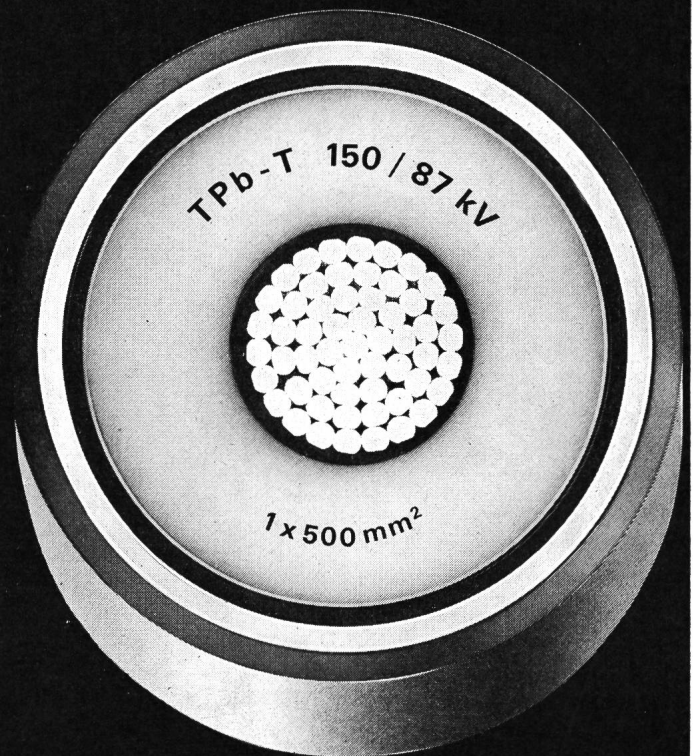
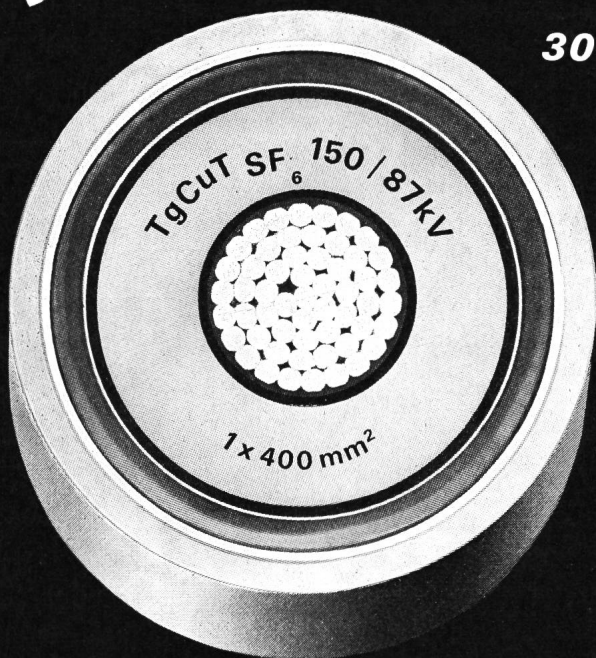
501 318 VI/S 2

POLYÄTHYLEN HOCHSPANNUNGSKABEL

jetzt bis 150 kV

COSSONAY

*30 Jahre Erfahrung in Entwicklung
und Herstellung von PE-Kabeln*



**S.A. DES CÂBLERIES ET
TRÉFILERIES DE COSSONAY
1305 COSSONAY-GARE VD/SUISSE
Tél. (021) 87 17 21**