Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 64 (1973)

Heft: 17

Artikel: Die Supraleitung : ihre Anwendung in der Elektrotechnik

Autor: Schaetti, N.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915593

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: 10.07.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Die Supraleitung

Ihre Anwendung in der Elektrotechnik

Von *N. Schaetti*

537.312.62

1. Einleitung

Im Jahre 1911 wurde die Erscheinung der Supraleitung durch *Kammerlingh Onnes* und *Holst* an Quecksilber entdeckt. Dies gelang den Forschern nach der Lösung des Problemes der Heliumverflüssigung, wodurch das Medium bereitgestellt war zur Untersuchung des Verhaltens der verschiedenen Metalle und deren Legierungen bei der Temperatur von 4,2 K. Jahrzehnte aber blieb diese Erscheinung lediglich ein äusserst interessantes physikalisches Phänomen, das aber keine praktische Anwendungsmöglichkeiten zu bieten schien. Ebenso steckte die Tieftemperaturtechnik noch in den ersten Anfängen.

Kammerlingh Onnes baute auch als erster ein Solenoid mit supraleitender Bleidrahtwicklung, doch es erwies sich als nicht möglich, ein Magnetfeld von mehr als einigen Gauss zu erzeugen. Bei Erhöhung des Betriebsstromes wurde die Wicklung bei einem bestimmten Wert des Magnetfeldes wieder normalleitend.

Bei allen damals bekannten supraleitenden Materialien wurde dieselbe Erscheinung beobachtet und es war nicht möglich, höhere Magnetfelder zu erzeugen. Dies führte zur Erkenntnis des Bestehens von kritischen Grössen, die für eine Aufrechterhaltung des supraleitenden Zustandes nicht überschritten werden dürfen.

Diese kritischen Grössen sind:

a) Kritische Temperatur T_c;
b) Kritisches äusseres Magnetfeld H_c;
c) Kritische Stromdichte J_c.

Alle um 1911 bekannten supraleitenden Materialien wiesen eine kritische Feldstärke von max. 1000 Gs auf, waren somit für die Herstellung von Solenoiden unbrauchbar. Eine Wende setzte erst Anfang der sechziger Jahre ein, nachdem die sog. magnetisch harten supraleitenden Legierungen und intermetallischen Verbindungen gefunden worden waren. Gleichzeitig sind grosse Fortschritte in der Heliumverflüssigung gemacht worden.

Im Jahre 1963 wurde der erste supraleitende Magnet mit einer Feldstärke von über 100 kGs gebaut. Es wurden dabei noch Vollkernleiter aus NbZr und NbTi mit einem dünnen Kupfermantel eingesetzt, die allerdings Unstabilitäten im Betrieb aufwiesen. Erst durch die Technik der stabilisierten Supraleiter, d. h. Leiter bestehend aus verschiedenen supraleitenden Drähten, gemeinsam eingebettet in einer Matrix aus Kupfer mit kleinem Restwiderstand und hohem Kupferanteil (Querschnittsverhältnis Kupfer : Supraleiter wie 20...50 : 1), wurde es möglich, auch räumlich ausgedehnte Magnetfelder mit supraleitenden Spulen von sehr grossem Energieinhalt zu erzeugen. Ende 1969 kam der erste grosse supraleitende Blasenkammermagnet im Argonne National Laboratory in den USA in Betrieb.

Zu Beginn dieses Jahres sind die beiden grossen supraleitenden Magnete des CERN erfolgreich in Betrieb genommen worden, die grosse Europäische Blasenkammer und die Funkenkammer «Omega».

Neben solchen Grossmagneten sind supraleitende Laboratoriumsmagnete von kleineren Dimensionen, aber mit wesentlich höheren Magnetfeldern von über 100 kGs in Betrieb.

Die neuen Entwicklungstendenzen auf dem Gebiet der Supraleiter gehen hauptsächlich in folgende Richtungen:

a) Auflösung des Leiters in eine Vielzahl von supraleitenden Filamenten von 5...50 μm Durchmesser in eine stabilisierende Matrix eingebaut mit den Zielen:
aa) Volle Stabilität des Supraleiters (sog. eigenstabile Leiter) und damit verbunden, Möglichkeit einer Reduktion des Anteiles an Kupfer im Supraleiter;
ab) Reduktion der Erregungsverluste durch Verdrillen der supraleitenden Filamente;
ac) Gewichtsreduktion des Leitermaterials;
ad) hohe mittlere Stromdichten bis zu 10^5 A/cm^2;
b) Entwicklung von Leitern mit Mischmatrix aus Kupfer und Kupfer–Nickel zur Reduktion der Verluste des Leiters im zeitlich veränderlichen Magnetfeld.

Die heute bekannten Supraleiter führen nur einen Gleichstrom verlustfrei. Im zeitlich veränderlichen Magnetfeld treten Verluste auf, die mit zunehmender Frequenz der Feldänderung sehr stark ansteigen und bei den technischen Wechselstromfrequenzen nicht mehr tragbar sind. Arbeiten sind im Gange, um diese Verluste durch Formgebung und Aufbau der Leiter möglichst zu reduzieren. Eine Reduktion dieser Verluste ist die Vorbedingung für eine allgemeine Einführung der Supraleiter in die Elektrotechnik für Einheiten grösster Leistungen.

In Erkenntnis der Tatsache, dass es sich hierbei um eine höchst bedeutungsvolle Entwicklung handelt, ist das Gebiet der Supraleitung auch in die Themenkreise der COST-Programme für eine Europäische Zusammenarbeit mit Dringlichkeitsstufe 1 aufgenommen worden.

2. Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiete der wissenschaftlichen und technischen Forschung

Die Bezeichnung dieser Europäischen Zusammenarbeit COST ist die Abkürzung der französischen Bezeichnung «Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique».

Die Anregung zu dieser Zusammenarbeit ist von den 6 Gründerstaaten der Europäischen Gemeinschaft (EG) ausgegangen. Neben den gemeinsamen Anstrengungen auf dem Gebiete der Atomforschung (EURATOM) wollte man angesichts der raschen technischen Entwicklung weitere Bereiche der Forschung in eine gemeinsame Organisation einbeziehen. 1967 beauftragte der Rat der Europäischen Gemeinschaften die im Ausschuss für mittelfristige Wirtschaftspolitik gebildete Arbeitsgruppe PREST (Politique de la Recherche Scientifique et Technique) einen Bericht über die Möglichkeiten einer Zusammenarbeit auf folgenden Gebieten auszuarbeiten: Informatik, Fernmeldewesen, neue Verkehrsmittel, Ozeanographie, Metallurgie, Umweltschutz und Meteorologie.

Der 1969 vorgelegte Bericht enthält 47 konkrete Vorschläge für Gemeinschaftsaktionen, wobei in den meisten Fällen die Mitarbeit von Europäischen Staaten ausserhalb des gemeinsamen Marktes als wünschenswert bezeichnet wurde.

Ende 1969 wurden 9 Staaten, darunter die Schweiz, eingeladen, an der Abklärung dieser Forschungsvorhaben mitzuwirken. Inzwischen ist dieser Kreis auf 19 Staaten erweitert worden.

Im November 1969 erklärte die Schweiz ihre Bereitschaft, an diesen Abklärungen mitzuwirken. In unserem Lande wurde die Arbeitsgruppe für Technologie gebildet, um die verschiedenen Probleme und Fragen zu studieren.

Mit der Überwachung und Koordination der Arbeiten ist vom Ministerrat der 6 EG-Staaten ein Ausschuss hoher Beamter eingesetzt worden. Bis heute sind 11 Projekte gutgeheissen worden, wobei sich die Schweiz an deren 5 beteiligt.

Durch zwei Bundesbeschlüsse vom Frühjahr 1972 ist der Bundesrat ermächtigt worden:

a) An den bereits beschlossenen Aktionen teilzunehmen;
b) Weiteren späteren Aktionen ebenfalls beizutreten, dies im Rahmen der dazu bewilligten Kredite.

Innerhalb des Fachgebietes Metallurgie sind im Originalbericht (von 1969) 8 Spezialgebiete vorgeschlagen worden. In Vorverhandlungen der Experten auf dem Gebiete der Metallurgie sind drei Gebiete mit der Prioritätsstufe 1 versehen worden:

a) Werkstoffe für Gasturbinen;
b) Werkstoffe für Meerwasserentsalzung;
c) Werkstoffe für supraleitende elektrische Maschinen.

Die ersten zwei Aktionen sind bereits beschlossen und in Ausführung. Die Vorarbeiten für die Verwirklichung der dritten Aktionen sind abgeschlossen. Ein endgültiger Beschluss über die Durchführung wird vermutlich noch in diesem Sommer gefasst werden können.

3. COST-Aktion 56 – Werkstoffe für supraleitende elektrische Maschinen

In der Erkenntnis, dass einer aktiven Förderung der Arbeiten auf dem Gebiet der supraleitenden Werkstoffe im Hinblick auf die Entwicklung von elektrischen Maschinen höchster Leistung grosse Bedeutung zukomme, wurde dieses Problem innerhalb des Fachgebietes Metallurgie unter Prioritätsstufe 1 gestellt. Dabei wurde die Erniedrigung der Verluste in den Supraleitern im Wechselfeld als vordringlichstes Problem betrachtet.

In den Jahren 1971/72 wurden die Probleme durch zwei Expertengruppen eingehend untersucht und im Dezember 1972 der Abschlussbericht mit einem Arbeitsprogramm dem Ausschuss der hohen Beamten unterbreitet. Dieser ist von diesem Ausschuss genehmigt worden und zur Zeit sind die weiteren notwendigen Vorabklärungen im Gange.

Da für die Herstellung einer supraleitenden elektrischen Maschine nicht nur die Technik der Herstellung von geeigneten Supraleitern ausschlaggebend ist, sondern ebenso eine eingehende Kenntnis der Daten und des Verhaltens der für den Bau der Maschine verwendeten Struktur- und Isolationsmaterialien, dies bei der Temperatur des flüssigen Heliums, ist die Aktion 56 in drei Teilgebiete unterteilt worden:

a) Supraleitende Werkstoffe;
b) Konstruktionswerkstoffe;
c) Isolationswerkstoffe und spezielle Materialprobleme.

Wie im Falle der bereits beschlossenen Aktionen der Metallurgie, würde auch die Aktion 56 in Form einer konzertierten Aktion durchgeführt, bei welcher jeder teilnehmende Staat für die Kosten der von ihm vorgeschlagenen Beiträge selbst aufzukommen hat (interne Aufteilung: 50 % der Staat, 50 % die beteiligte Industrie).

4. Anwendungsgebiete der Supraleiter in der Elektrotechnik

Derzeitige Anwendungen:

Diese liegen in der Magnettechnik. Dabei sind zwei Magnettypen zu unterscheiden, bei welchen die Supraleitung mit Vorteil zur Anwendung gelangt:

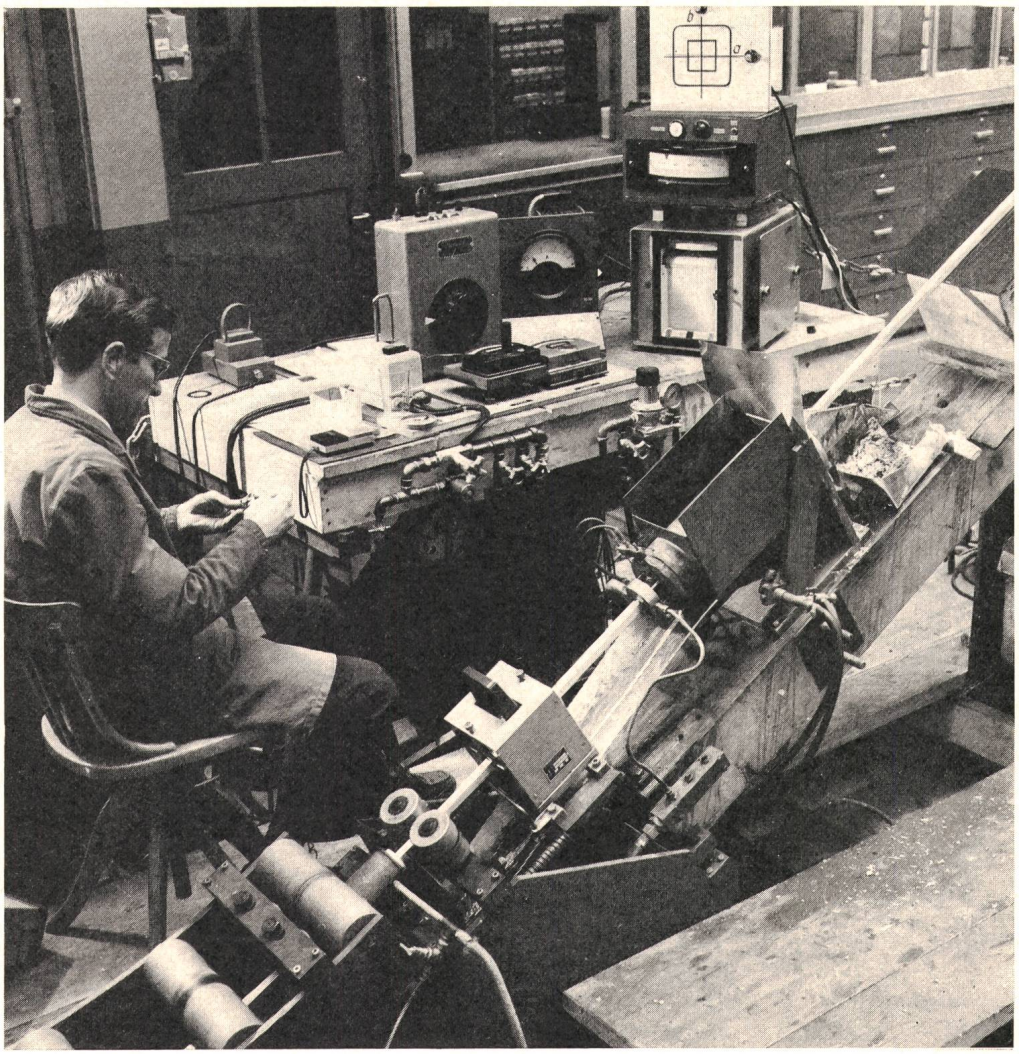
a) Supraleitende Magnetspulen für Magnete mittlerer Feldstärke (15...40 kGs), aber sehr grossem Magnetfeldvolumen.
Beispiele: Blasen- und Funkenkammermagnete.
b) Supraleitende Magnete mit kleinem Feldvolumen, aber sehr hohen Magnetfeldstärken (100...150 kGs).
Beispiele: Solenoide und Helmholtzspulen für verschiedene Forschungsgebiete.

Zukünftige Anwendungsgebiete:

Es sind dies, aufgeführt in der Reihenfolge ihres voraussichtlichen Markteinsatzes:

a) Magnetspulen für Gleichstrombetrieb mit sehr hohen mittleren Stromdichten bis zu 10^2 A/cm^2.
Beispiele: Supraleitende Quadrupole und Bendingmagnete, wobei bei diesen Magnettypen das Hauptproblem in der grossen Genauigkeit der Formgebung der Spulen liegt.
b) Magnetspulen, die im Pulsbetrieb eingesetzt werden, wobei Feldänderungen von 60 kGs/s erreicht werden sollen.
Beispiele: Strahlentransportmagnete im Zusammenhang mit Teilchenbeschleuniger.
c) Supraleitende Generatoren für Leistungen oberhalb von 2500 MW. Die Rotorwicklung ist supraleitend, die Statorwicklung normalleitend.
d) Supraleitende Spulen für Magnetkissenbahnen, Schwebebahnen mit Geschwindigkeiten von 300...500 km/h.
e) Supraleitende Energieübertragungskabel für höchste Leistungen der Grössenordnung von 2000 MW.
f) Supraleitende MHD-Sattelspulen. Das Hauptmerkmal dieser Spulen ist ihre Abmessung (Länge: 16...20 m) und damit verbunden die Einwirkung von ausserordentlich hohen magnetischen Kräften. Sie dienen der Erzeugung hoher Magnetfelder von 80...100 kGs in einem sehr grossen Volumen.
g) Supraleitende Torusspulen für Fusionsreaktoren. Hier gelten dieselben Feststellungen wie im Falle der MHD-Spulen: sehr grosse Abmessungen der Grössenordnung von 10 · 16 m bezüglich des Spulenquerschnittes bei Feldstärken von 100...160 kGs.

Fig. 1
Verzinnungsapparatur für «Hohlleiter» OMEGA



5. Anforderungen an das supraleitende Material

In derselben Reihenfolge ergeben sich die nachfolgenden Anforderungen an das supraleitende Material:

a) Verwendung von eigenstabilen Supraleitern mit Filamentdurchmessern der Grössenordnung von 50 µm eingebettet in einer Matrix aus Kupfer oder Aluminium mit kleinem Restwiderstand, mit Querschnittsverhältnissen Matrix: Supraleiter wie 1,5...4,0 : 1. Zur Reduktion der beim Erregen der Magnetspulen in der Matrix erzeugten Wirbelströme, sowie zur Reduktion der Abklingzeiten dieser induzierten Ströme werden die Leiter um die eigene Achse verdrillt.

b) Reduktion der Leiterverluste in gepulsten Feldern, durch Reduktion der Filamentdurchmesser auf 3...8 µm. Die Leiter werden mit der minimal möglichen Ganghöhe verdrillt (1...5 mm). Endlich wird die Einheitsmatrix aus Kupfer durch eine Mischmatrix aus Kupfer und Kupfer-Nickel ersetzt.

Hauptdaten der wichtigsten Werkstoffe

Tabelle I

Werkstoff	Kritische Temperatur T_c K	H_c kGs
NbTi[1])	9,3	120
V_3Ga	14,5	280
V_3Si	17,1	≈ 300
Nb_3Sn	18,0	240
$Nb_3Al_{0,8}Ge_{0,2}$	20,7	≈ 410

[1]) die kritische Temperatur von NbTi50 beträgt bei einem äusseren Feld von 50 kGs 6,9 K.

c) Versucht wird eine weitere Reduktion der Verluste in einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld durch Reduktion der Filamentdurchmesser auf ca. 1 µm.

d) Hohe Magnetfelder von 100...160 kGs machen die Verwendung von neuem supraleitendem Material in Form von Filamenten anstelle der heute am meisten verwendeten NbTi-Legierung notwendig (Supraleiter der zweiten Generation). Dazu eignen sich die intermetallischen Verbindungen wie Nb_3Sn und V_3Ga in Form von kleinsten Filamenten eingebettet in einer Matrix.

Tabelle I gibt die Daten für T_c und H_c der wichtigsten supraleitenden Werkstoffe der zweiten Generation im Vergleich zu denjenigen von NbTi.

6. Entwicklungsarbeiten der Arbeitsgemeinschaft auf dem Supraleitergebiet

Als Grundlage für seine Aktivität auf dem Gebiete der Supraleiter hat sich die A.G. Brown Boveri & Cie. als erstes für die Fabrikationsverfahren für moderne Supraleiter auf der Basis NbTi interessiert. Zur Durchführung solcher Arbeiten wurde im Jahre 1967 eine Arbeitsgemeinschaft auf dem Gebiete der Supraleiter gegründet. Diese Arbeitsgemeinschaft umfasst heute folgende Schweizer Firmen:

Métaux Précieux S.A. Neuchâtel,
Herstellung der NbTi-Legierung.
Metallwerke Dornach A.G., Dornach,
Schweizerische Metallwerke Selve & Cie., Thun,
beide Firmen Verarbeitung der Leiter.
A.G. Brown Boveri & Cie., Werk Oerlikon,
Auslegung der Leiter, Festlegung der Verarbeitungsverfahren, Prüfung der Produkte im Tieftemperaturlaboratorium dieses Werkes, Anwendung des Materiales.

Und zusätzlich:

Huber & Suhner A.G., Werk Herisau,
Herstellung der supraleitenden Kabel und Hohlleiter.

Anschliessend an erste Untersuchungen über das Herstellungsverfahren von Einkern-NbTi-Supraleitern hat die Arbeitsgemeinschaft ein Herstellungsverfahren für Bandleiter zur grossen Europäischen Blasenkammer des CERN ausgearbeitet und dem CERN einen Musterleiter unterbreitet.

Nach diesen Arbeiten folgten Versuche für die Verwirklichung von supraleitenden Hohlleitern. Auf Grund des ausgearbeiteten Verfahrens wurde die Arbeitsgemeinschaft mit der Ausführung des supraleitenden Hohlleiters der Funkenkammer «Omega» des CERN und zusätzlich mit der Herstellung des gesamten Spulensystemes beauftragt.

Über den Hohlleiter «Omega» ist bereits an anderen Stellen ausführlich berichtet worden.

Das supraleitende Material ist NbTi mit einem Gewichtsanteil an Ti von 49 %. Das Material wird in Form von Filamenten in ein Spezialkupfer mit kleinem Restwiderstand eingebettet. Die Kupfermatrix ist ein Draht von 1,5 mm Durchmesser, welcher 4 NbTi-Filamente von 0,25 mm Durchmesser enthält. Jeder supraleitende Draht dieses Aufbaues ist für sich voll stabilisiert.

Der Omega-Leiter enthält 30 supraleitende Drähte mit insgesamt 120 NbTi-Filamenten mit einem totalen Supraleiterquerschnitt von 6,8 mm². Dieser Querschnitt genügt, um den Betriebsstrom von 5000 A bei 5 K und einem äusseren Magnetfeld von 35 kGs im supraleitenden Zustand zu transportieren.

Die supraleitenden Drähte sind in Form einer Spirale von 200 mm Ganghöhe um ein zentrales Kupferrohr gewickelt. Über diese erste Drahtlage ist eine zweite im Gegensinn gewickelt, bestehend aus 40 Kupferdrähten. Diese zweite Drahtlage bildet einen mechanischen Schutz der supraleitenden Drähte. Zusätzlich zur Verlegung in Form einer Spirale sind die supraleitenden Drähte innerhalb einer Ganghöhe einmal um die eigene Achse verdrillt. Die supraleitenden Filamente sind somit in einer Gruppe zu vier zueinander verdrillt und zusätzlich in Form einer Spirale transponiert.

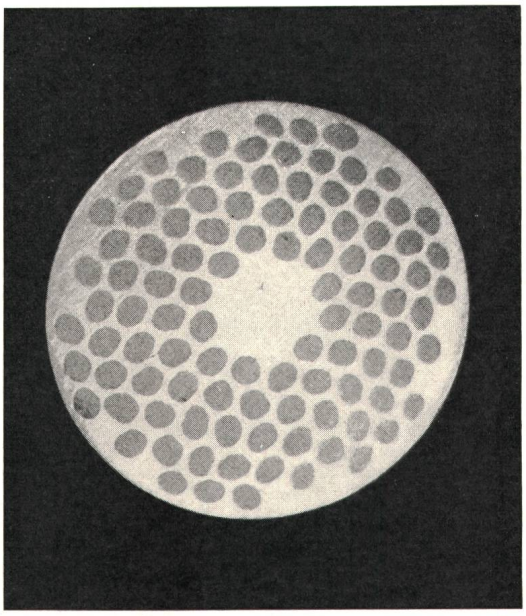


Fig. 2
Schnitt durch Supraleiter mit 102 NbTi-Filamenten

Einige Hauptdaten des supraleitenden Hohlleiters «Omega»

Tabelle II

Leiterquerschnitt	18 × 18 mm
Querschnitt des Kühlkanales	min. 75 mm²
Einheitslänge	950 m
Gesamtlänge des Leiters (12 Einheitslängen)	11 400 m
Gesamtlänge der supraleitenden Drähte	365 000 m
Gesamtgewicht des Leiters	24 000 kg
Kritischer Strom bei 4,2 K und $B = 35$ kGs	11 500 A
Betriebsstrom bei 4,9 K und $B_0 = 18$ kGs	5000 A

Wärmeleitfähigkeit verschiedener Werkstoffe bei 4,2 K

Tabelle III

Werkstoffe	Wärmeleitfähigkeit W/cm²
Cu-ETP/SV	4,0
Lot SnAg5	0,4
NbTi50	0,0036

Der Zweck dieser Massnahmen ist eine Reduktion des Stromwertes der beim Erregen des Magneten in der Kupfermatrix erzeugten Wirbelströme. Messungen haben ergeben, dass die Stromstärke der Wirbelströme unter den gegebenen Erregungsgeschwindigkeiten des Omega-Magneten auf 20% des Wertes von parallel zur Leiterachse verlegten Filamenten reduziert wird. Die Abklingzeit der induzierten Rest-Wirbelströme beträgt 6 s. Die Wirbelströme haben somit keinen Einfluss auf die Feldwerte des Magneten.

Das zentrale Kupferrohr und die beiden Lagen der Drähte wurden anschliessend an das Verseilen mit einem Zinn-Silber-Lot miteinander verbunden, um gut leitende thermische und elektrische Verbindungen zwischen den Komponenten sowie eine gute mechanische Verbindung zu gewährleisten. Die Verzinnung des Gesamtleiters war ein sehr anspruchsvoller Prozess, da verschiedene Parameter innerhalb von sehr engen Grenzen über lange Zeit konstant gehalten werden mussten.

Fig. 1 zeigt den zentralen Teil der Verzinnungsapparatur im Werk Oerlikon. Der supraleitende Hohlleiter wird durch ein Zinnbad gezogen, in welchem das flüssige Zinn-Silber-Lot auf einer sehr konstanten Temperatur gehalten wird. Der Badbehälter ist ein Eisenrohr, dessen Achse mit der Horizontalen einen Winkel von 45° bildet. Er ist am unteren Ende mit einer Matrize abgeschlossen, die eine der Leiterdimension genau entsprechende Öffnung besitzt. Diese Matrize ist auf eine bestimmte konstante Temperatur gekühlt, darin erfolgt die erste Abkühlung des Leiters und dadurch die Verfestigung der Zinn-Silber-Lotschicht. Anschliessend wird der Leiter durch eine erste Kontrolleinrichtung geführt und sodann auf Zimmertemperatur abgekühlt. Die Kontrolleinrichtung ist in Fig. 1 unterhalb des Zinnbades sichtbar. Mit Hilfe von Wirbelströmen wird die Homogenität der Zinn-Silber-Schicht laufend überwacht und registriert.

In einer zweiten Kontrollstation wird der Leiter nach dem Abkühlen mit Ultraschall nochmals überprüft.

Die Verzinnung des Leiters erfolgte in einem Arbeitsgang von ca. 35 h Dauer.

Die Hauptvorteile der gewählten Herstellungsmethode des Hohlleiters sind:

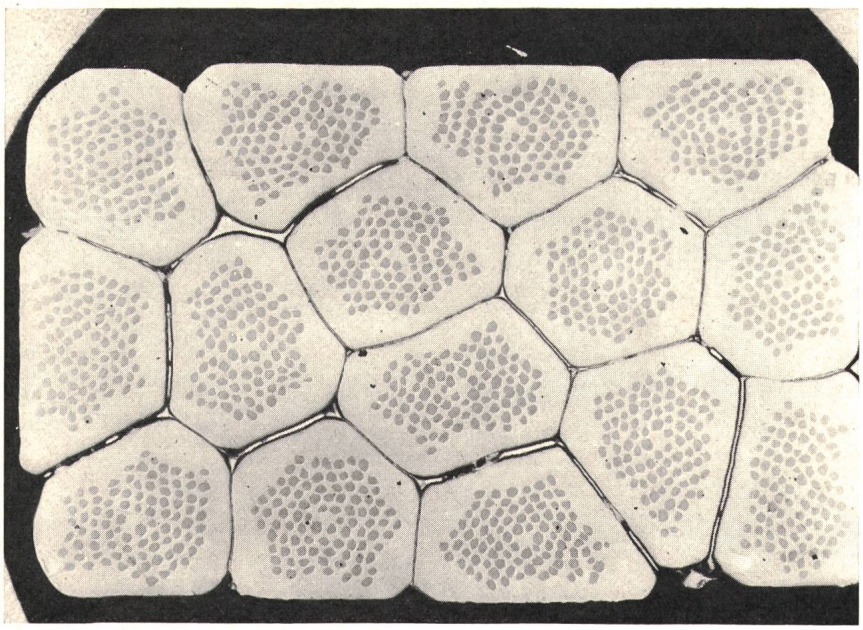


Fig. 3
Supraleiter aus 15 Einzelleitern zu je 90 NbTi-Filamenten

a) Herstellung von Einheitslängen des Gesamtleiters von 950 m Länge ohne innere Verbindungsstellen zwischen den supraleitenden Drähten, da diese in Längen von 2000...3000 m gezogen wurden.
b) Einfaches Verfahren für das Verdrillen und Transponieren der supraleitenden Filamente.

Tabelle II gibt einige Hauptdaten des supraleitenden Hohlleiters «Omega».

6.1 *Weitere Entwicklungen auf dem Gebiete der Niob-Titan-Supraleiter (NbTi)*

Die im Omega-Leiter verwendeten NbTi-Filamente von 250 µm Durchmesser sind im Betrieb nicht stabil. Sie können spontan in den normalleitenden Zustand übergehen. Aus diesem Grunde müssen sie zu einem Leiter mit hohem Kupferquerschnitt zusammengefasst werden, damit bei einem Übergang des NbTi vom supraleitenden Zustand in den normalleitenden das Kupfer den Stromtransport ohne merkliche Erwärmung des Leiters kurzzeitig übernehmen kann. Wichtig ist daher das Verhalten des Leiters im Betriebszustand, in welchem der Stromtransport sowohl im Supraleiter als auch im Kupfer stattfindet (Mischzustand der Stromführung des Leiters). Das Querschnittsverhältnis Kupfer zu Supraleiter beträgt bei «Omega» 30 : 1.

1969 wurde erkannt, dass der Hauptgrund für die Instabilität in der sehr schlechten Wärmeleitfähigkeit des NbTi liegt. In Tabelle III sind einige Messresultate an verschiedenen Materialien wiedergegeben.

Es wurde erkannt, dass durch Reduktion des Durchmessers der supraleitenden Filamente ein stabiles Verhalten des Supraleiters erreicht wird. Der kritische Durchmesser liegt bei 50 µm. Filamente von diesem Durchmesser werden eigenstabil bezeichnet.

Bei solchen Leitern kann der Kupfer-Anteil am Leiterquerschnitt entscheidend verringert werden. Man verwendet heute Querschnittsverhältnisse Cu : Supraleiter von 6 : 1 bis 1,5 : 1. Dadurch werden Dimension und Gewicht der supraleitenden Leiter ganz wesentlich verkleinert und es lassen sich mittlere Stromdichten bis zu 10^2 A/cm^2 erreichen.

Die Arbeitsgemeinschaft hat anschliessend an die Verwirklichung des Omega-Leiters ebenfalls Arbeiten in dieser Richtung ausgeführt, so dass heute Leiter auf NbTi-Basis mit verschiedenen C : Supraleiter-Verhältnissen von 4 : 1 bis zu 1,3 : 1 mit Filamentdurchmessern von 60 µm bis zu 3...8 µm hergestellt werden.

Fig. 2 zeigt das Schliffbild eines Supraleiters mit 102 Filamenten und einem Cu : Supraleiter-Verhältnis von 1,1 : 1. Die Aufnahme ist in einem Zwischenstadium der Verarbeitung gemacht, d. h. bei einem Leiterdurchmesser von 6 mm. Bei einem Leiterdurchmesser von 0,7 mm betragen die mittleren Durchmesser der Filamente 45 µm.

Fig. 3 zeigt einen Leiter, der aus 15 Einzelleitern zu je 90 NbTi-Filamenten aufgebaut ist. Die verseilten Leiter sind auf einen Rechteck-Querschnitt verpresst und anschliessend mit Zinn-Silber-Lot verlötet. Die Querschnittsabmessung des Leiters ist 2,5 · 3,2 mm. Der vorgesehene Betriebsstrom bei einem äusseren Magnetfeld von 50 kGs und 4,2 K ist 1000 A.

7. Weitere Tätigkeiten von BBC auf dem Gebiete der Tieftemperaturtechnik

7.1 *Spulen für grosse Blasen- und Funkenkammern*

Sie können in einer gewissen Hinsicht als die Vorläufer der grossen Spulen für Fusionsreaktoren betrachtet werden. BBC hat auf dem Gebiet der grossen supraleitenden Spulen einen wesentlichen Beitrag für die Verwirklichung der Funkenkammer «Omega» des CERN geleistet.

Daten verschiedener Funkenkammern

Tabelle IV

Daten	ARGONNE	CERN-BBC	CERN-OMEGA
Innendurchmesser der Wicklung m	4,8	4,5	3,5
Zentralfeld kGs	18	35	18
Gespeicherte Energie MJ	80	830	50
Supraleiter	Bandleiter 50 · 2,5 mm Cu+NbTi48	Bandleiter 61 · 3,0 mm Cu+NbTi50	Hohlleiter 18 · 18 mm Cu+NbTi50 +SnAg-Lot
Betriebsstrom A	4600	5700	5000
Gesamtgewicht des Leiters t	45	93	24
Gewicht des Joches t	1600	kein Joch	1400

Tabelle IV zeigt eine Zusammenstellung der Daten der grossen Blasen- und Funkenkammern von ARGONNE und CERN.

Die Spulen der Funkenkammer «Omega» sind dabei erstmalig mit einem supraleitenden Hohlleiter ausgerüstet und werden mit superkritischem Helium im geschlossenen Kreislauf auf Betriebsstrom gebracht. Im Falle dieser Funkenkammer umfasst die Lieferung von BBC das betriebsfertige Erregersystem bestehend aus:

a) Supraleitendem Hohlleiter (zusammen mit Arbeitsgemeinschaft);
b) Vakuumimprägnierten Spulen;
c) Spulentrag- und Abstützsystem;
d) thermische Isolation der Spulen.
e) Strom- und Kühlmittelzuführungen;
f) Toroidförmige Vakuumtanks für 10^{-5} Torr.

7.2 *Die supraleitenden Wicklungen*

Zwei identische Wicklungen werden auf dem unteren und oberen Magnetjoch befestigt. Jede Wicklung mit 408 Windungen, aus je 6 Doppelscheiben aufgebaut, wird von einem Gleichstrom von 5000 A durchflossen. Sie sind in Achsrichtung zwischen 2 Platten aus antimagnetischem Stahl eingespannt und über dem Kühlschirm aus Kupfer durch 120 Schichten von Superisolation – mit Aluminium beschichteten Kunststoff-Folien – gegenüber der Umgebung thermisch sehr gut isoliert.

Bei der Herstellung der Spule wird der Hohlleiter von zwei Schichten Glasgewebeband umwickelt und zunächst die erste Hälfte des Leiters auf eine Hilfsspule gewickelt. Anschliessend wird die erste Lage der Doppelscheibe gewickelt, worauf die zweite Lage der Doppelscheibe ab Hilfstrommel kommt.

Auf diese Weise wird eine Doppelscheibe ohne innere Verbindungsstelle verwirklicht. Fig. 4 zeigt den Wickelvorgang.

Die fertig gewickelte Spule wird anschliessend mit einer Paketisolation aus Glasgewebeband versehen. Dann wird sie in eine heizbare Kokille eingesetzt und unter Vakuum bei erhöhter Temperatur getrocknet. Es folgt die Imprägnation unter Vakuum mit einem Spezialharz, welches ein wiederholtes Abkühlen der Spule auf 4,2 K ohne Rissbildung zulässt.

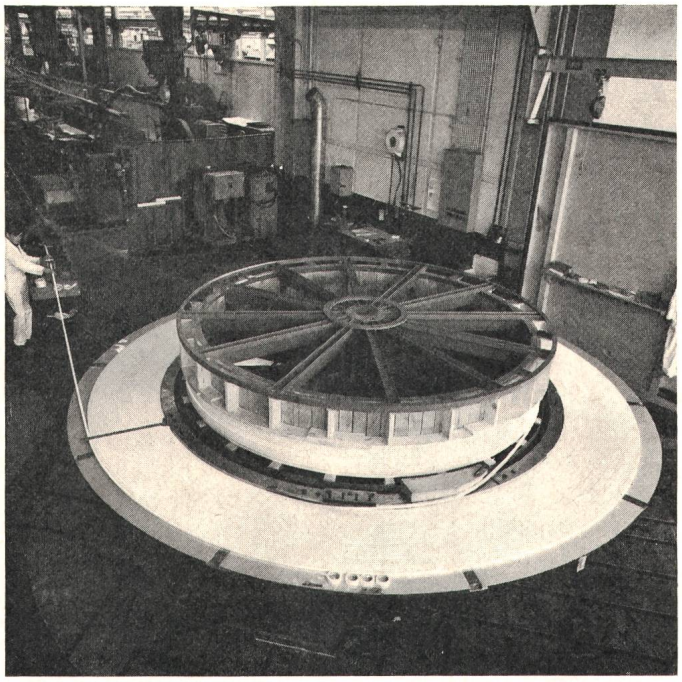


Fig. 4
Wickelvorgang einer supraleitenden Doppelscheibenspule

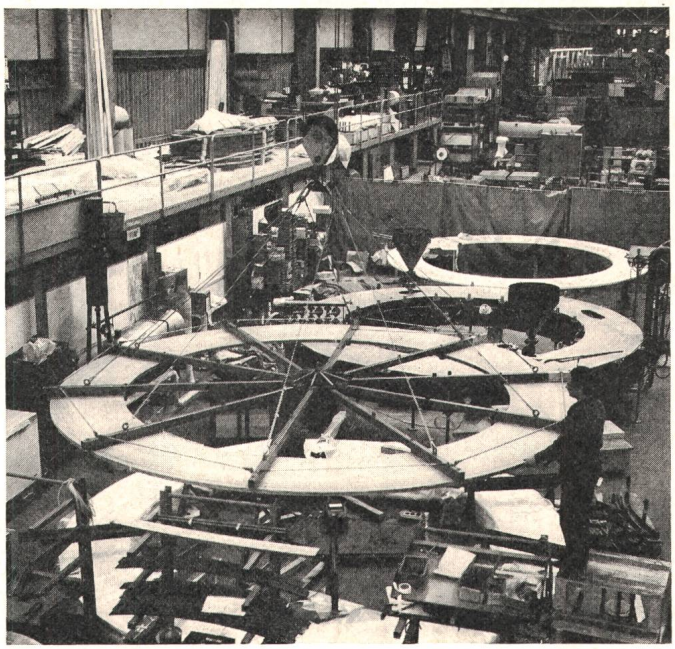


Fig. 5
Montagewerkstätte mit einer Doppelscheibenspule, einer Kokille für Vakuumimprägnation und in Arbeit befindlichen Doppelscheibenspulen

Fig. 5 zeigt die Montagewerkstätten mit einer fertig gewikkelten Doppelscheibenspule von 5 m äusserem Durchmesser (im Vordergrund), die Kokille für Vakuumimprägnation (in der Mitte) und eine Spule, die mit der Paketisolation versehen wird (im Hintergrund).

7.3 *Erste Betriebsergebnisse mit dem OMEGA-Magneten*

Seit Beginn des Monates Januar 1973 ist der Magnet mit beiden Spulen in Betrieb. Er wird im Wechsel während der Dauer eines Monates in Betrieb gehalten. Anschliessend ist er während eines Monates ausser Betrieb, d. h., die beiden Spulen können sich langsam erwärmen. Die bisherigen Ergebnisse bei dieser Betriebsart sind sehr gut und das Funktionieren des Magneten einwandfrei.

Literatur

[1] *J.-M. Rayroux:* Supraleitung und Kryotechnik. Brown Boveri Mitt. 53(1966)1/2, p. 42...47.
[2] *N. Schaetti* a. o.: Hollow conductor with twisted superconducting filaments for a spark chamber magnet. Proceedings of the Third International Conference of Magnet Technology 3(1970), p. 1136...1147.
[3] *K. Kwasnitza* and *I. Horvath:* Energy losses and instabilities of superconducting multifilament composite conductors caused by interfilament magnetisation currents. Proceedings of the Third International Cryogenic Engineering Conference (ICEC)3(1970), p. 461...465.
[4] *A. Schiller, J.-M. Rayroux* and *I. Horvath:* Steady-state stability of composite superconductors with a copper-solder stabilising substrate. Proceedings of the Third International Cryogenic Engineering Conference (ICEC) 3(1970), p. 341...345.
[5] *G. Meyer* und *R. Maix:* Supraleiter und supraleitende Magnete. Brown Boveri Mitt. 57(1970)8/9, S. 355...362.
[6] *N. Schaetti:* Supraleiter für die Magnetspulen der Funkenkammer «Omega» des CERN. Brown Boveri Mitt. 59(1972)2/3, S. 73...77.
[7] *A. Schleich:* Supraleitende Magnetspulen für die Funkenkammer «Omega» des CERN. Brown Boveri Mitt. 59(1972)2/3, S. 79...87.
[8] *K. Kwasnitza:* Flux jumps in composite superconductors in a time dependent magnetic field. Cryogenics 13(1973)3, p. 169...174.
[9] *M. Morpurgo:* Construction of a superconducting test coil cooled by helium forced circulation. CERN Report -(1968)17.
[10] *M. Morpurgo:* A superconducting solenoid by forced circulation. CERN Report -(1969)25.
[11] *M. Morpurgo:* The design of the superconducting magnet for the OMEGA-project. Particle Accelerators 1(1970)3, p. 255...263.
[12] *Z. J. J. Stekly, R. Thome* and *B. Strauss:* Principles of stability in cooled superconducting magnets. Proceedings of the 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators -(1968), p. 748...764.
[13] *P. F. Smith* a. o.: Intrinsically stable conductors. Proceedings of the 1968 Summer Study on Superconducting Devices and Accelerators -(1968), p. 913...919.

Adresse des Autors:
Dr. *N. Schaetti*, Leiter des Teilbereiches Elektromagnete und Tieftemperaturtechniken, AG Brown Boveri & Cie., Werk Oerlikon, 8050 Zürich.