

Die physikalischen Grundlagen und die Bedeutung der Anwendungen der Supraleitung

Autor(en): **Heinz, W.**

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): **72 (1981)**

Heft 21

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-905164>

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 physikalischen Grundlagen und die Bedeutung der Anwendungen der Supraleitung¹⁾

Von W. Heinz

537.313.62;

1. Die physikalischen Grundlagen der Supraleitung

1.1 Was ist Supraleitung?

Die elektrische Leitfähigkeit ist eine der fundamentalen Eigenschaften der Materie. Der spezifische elektrische Widerstand von Kupfer ist um 24 Größenordnungen kleiner als derjenige des besten Isolators. Darauf beruht die überragende Bedeutung des Kupfers in der Elektrotechnik.

Die Transportverluste sind dem Widerstand eines Leiters direkt proportional. Als «idealen» Leiter bezeichnet man einen Leiter mit verschwindendem elektrischem Widerstand. Der Supraleiter ist insofern ein idealer Leiter. Die gemessene Widerstandsabnahme beim Eintreten der Supraleitung beträgt mindestens 14 Größenordnungen. Mit gutem Grund kann der «Restwiderstand» eines Supraleiters für Gleichstrom zu null angenommen werden.

Lange Zeit glaubte man, dass die charakterisierende Eigenschaft eines Supraleiters seine Widerstandslosigkeit sei. *Meissner* und *Ochsenfeld* [1] entdeckten dann aber, dass beim Eintritt der Supraleitung ein Magnetfeld vollständig aus dem Leiter verdrängt wird. Abschirmströme an der Oberfläche des Supraleiters kompensieren das äussere Magnetfeld in der Weise, dass sein Inneres feldfrei wird. Der Supraleiter zeigt vollkommen diamagnetische Eigenschaften. Das geht so lange, bis das äussere Magnetfeld so stark wird, dass die Oberflächenströme einen kritischen Wert überschreiten und zusammenbrechen. Der Supraleitungszustand wird aufgebrochen, Magnetfluss dringt ein.

Die Supraleitung ist ein neuer thermodynamischer Zustand, der durch ideale Leitfähigkeit und vollkommenen Diamagnetismus gekennzeichnet ist.

Anzumerken ist hier, dass ein zweiter Typ von Supraleitern existiert, der mit einer in das Material eingedungenen magnetischen Flussverteilung koexistiert.

1.2 Der supraleitende Zustand

Das Eintreten des supraleitenden Zustandes ist die Konsequenz einer neuen Wechselwirkung [2]. Grundsätzlich sind eine ganze Reihe möglicher Wechselwirkungen zwischen den Leitungselektronen eines Metalls denkbar. Als richtig erwies sich die Vorstellung einer Wechselwirkung der Elektronen mit den Schwingungen des Kristallgitters. Bewegt sich ein Elektron im Gitter, so führt seine negative Ladung zu einer Polarisierung der positiven Ionen. Aufgrund der Trägheit der schweren Ionen kann dieser Zustand solange bestehen bleiben, dass ein zweites Elektron diese positive Ladungshäufung spürt und dadurch eine Anziehung erfährt. Damit entsteht eine anziehende, von der Eigenfrequenz des Gitters abhängige Wechselwirkung. Das kann dazu führen, dass je zwei Elektronen zu Paaren korreliert sind. Dabei bewegt sich das zweite in der Polarisierungsspur des ersten. Das Paar nimmt insgesamt einen niedrigeren Energiezustand ein. Diese Elektronenpaare sind

die sogenannten *Cooperpaare*. Sie bestehen aus zwei Elektronen mit entgegengesetzten Impulsen und Eigendrehimpulsen. Alle Cooperpaare besitzen denselben Quantenzustand. Sie verhalten sich wie Boseteilchen und «kondensieren» in einen energetisch tiefsten Quantenzustand. Offenbar ist dieser Quantenzustand für alle die ungewöhnlichen Eigenschaften eines Supraleiters verantwortlich.

Legt man ein elektrisches Feld an einen Leiter an, so werden seine Ladungsträger beschleunigt, es fliesst ein Strom. Dasselbe geschieht bei einem Supraleiter mit den Cooperpaaren: Es fliesst ein *Suprastrom*. Die Beschleunigungsenergie verteilt sich dabei auf alle Cooperpaare in gleicher Weise, da alle stets denselben Zustand einnehmen müssen. Der Suprastrom fliesst widerstandslos, weil individuelle Stösse der gepaarten Elektronen untereinander oder mit dem Gitter nicht möglich sind.

Erst wenn das elektrische Feld und damit der Strom zu gross werden und die kinetische Energie der Elektronenpaare ihre Bindungsenergie übertrifft, kann das Elektronenpaar in zwei ordinäre Elektronen aufbrechen. Diese zeigen dann wieder «normales» Elektronenverhalten im Kristall und damit Widerstandsverhalten. Der Leiter kehrt in den Normalleitungszustand zurück. Es existiert ein *kritischer Strom*, bei dessen Überschreiten Rückkehr in die Normalleitung erfolgt.

Wird in einem supraleitenden Ring durch Induktion ein Dauerstrom angeworfen, so bleibt dieser Strom konstant, solange der Ring supraleitend ist. Als Besonderheit treten infolge der Phasenkorrelation nur solche Ströme auf, dass der von ihnen erzeugte magnetische Fluss Φ durch den Ring ganzzahlige Vielfache n eines kleinsten *Flussquantums* Φ_0 beträgt:

$$\Phi = n \Phi_0 \quad \text{mit} \quad \Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$$

1.3 Die kritischen Parameter

Ganz allgemein ist der Supraleitungszustand an die Existenz mehrerer kritischer Parameter gebunden: Temperatur, Strom und Magnetfeld. Keiner dieser Parameter darf einen kritischen Wert übertreffen. Der Eintritt der Supraleitung erfolgt beim Unterschreiten einer *kritischen Temperatur*, der Sprungtemperatur T_c . Der kritische Temperaturbereich reicht von einigen mK bis 23 K für den Supraleiter mit der derzeit höchsten Sprungtemperatur. Bei knapp der Hälfte aller Elemente des periodischen Systems wurde (zum Teil erst unter Druck) Supraleitung gefunden. Die Liste der bekannten Supraleiter enthält mehr als 1000 Elemente, Legierungen und Verbindungen.

Jeder Supraleiter ist durch eine *kritische Stromdichte* J_c charakterisiert, die für technische Supraleiter einige 10^{10} A/m² ausmacht. Die Ströme mögen dabei Abschirmströme oder Transportströme sein. Ihr Wert ist stark von den Präparationsbedingungen abhängig.

Schliesslich existieren kritische Werte für die Grösse des Magnetfeldes, bei denen sich der Charakter der Supraleitung ändert oder die Supraleitung ganz zerstört wird: das *kritische Magnetfeld* B_c oder B_{c1} und B_{c2} . Figur 1 zeigt das Existenzgebiet der Supraleitung für einige technische Supraleiter.

¹⁾ Übersichtsreferat der SEV-Informations- und Diskussionstagung «Supraleitung» vom 3. September 1981 in Bern.

Der Tagungsband mit allen Referaten der Tagung kann beim SEV, Abt. Vereinsverwaltung, Postfach, 8034 Zürich, zum Preis von Fr. 60.– (plus Versandkosten) noch bezogen werden.

1.4 Arten von Supraleitern

Die Supraleiter unterscheiden sich durch ihr Verhalten im externen Magnetfeld. *Typ-1-Supraleiter* zeigen das beschriebene Verhalten: widerstandsloser Stromtransport und vollkommene Feldverdrängung aus dem Innern infolge supraleitender Abschirmströme in der Oberfläche mit geringer Eindringtiefe (ca. $5 \cdot 10^{-8}$ m). Dieser Zustand existiert bis zum Erreichen eines Feldwertes B_c , bei dem die Supraleitung zerstört wird und bei dem äusseres und inneres Magnetfeld identisch werden. Die Magnetisierung (etwa einer stabförmigen Probe im achsenparallelen externen Feld B_a) ist proportional zum angelegten Feld. Beide Kurven werden völlig reversibel durchlaufen (Fig. 2). Für Typ-1-Supraleiter sind diese Felder klein (10–100 mT) und für technisch nutzbare Magnetfelder ohne Interesse.

Erst nach der Entdeckung eines anderen Typs von Supraleitern [3], den *Typ-2-Supraleitern*, bei denen Supraleitung auch in hohen Magnetfeldern existieren kann, gelang der Supraleitung der Übergang von einer physikalischen Kuriosität zu einer technisch nutzbaren Eigenschaft. Zunächst zeigen auch diese Supraleiter «Typ-1-Verhalten», verdrängen also das Feld bis zu einem ersten kritischen Feldwert B_{c1} . Dann aber erfolgt aus energetischen Gründen eine Umverteilung der Supraströme in das Innere des Supraleiters unter Aufrechterhaltung seiner supraleitenden Eigenschaften. Magnetischer Fluss dringt in den Supraleiter ein. Der supraleitende Zustand bleibt erhalten, bis ein wesentlich grösseres Magnetfeld B_{c2} , das obere kritische Feld, erreicht wird (Fig. 3). Es existieren supraleitende und normalleitende Bereiche nebeneinander: *Mischzustand* oder *Shubnikov-Phase*. Typ-2-Supraleitung kann in sehr hohen Magnetfeldern existieren. Das obere kritische Feld B_{c2} kann im besten Fall Werte bis 60 T erreichen.

Der Fluss dringt in Form von Flusslinien ein, wobei jede Flusslinie ein Flussquantum trägt. Jede Flusslinie ist durch geschlossene Supraströme abgeschirmt. Die Flusslinien liegen parallel zum externen Magnetfeld, ihre Zahl ist dem angelegten Feld proportional. Sie stossen sich wie Parallelströme ab, so dass sich in einem idealen Kristall ein reguläres Muster, ein Flussliniengitter, ergibt. Beim Anlegen eines Transportstromes gerät das Flussliniengitter aufgrund der auf jede Flusslinie einwirkenden Lorentzkraft in Bewegung. Dies führt zu einer Energiedissipation und zu elektrischen Verlusten. Der Supraleiter ist resistiv geworden. Ideale Typ-2-Supraleiter können Strom nicht verlustfrei tragen.

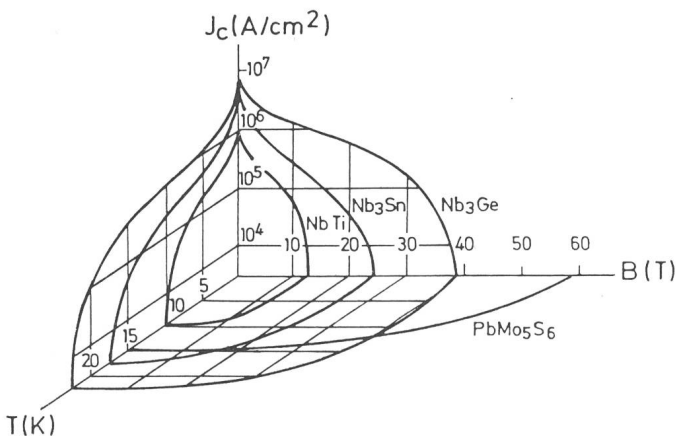


Fig. 1 Existenzgebiet einiger technischer Supraleiter

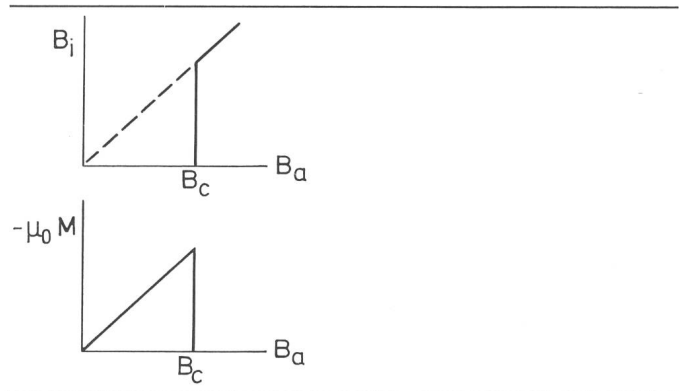


Fig. 2 Magnetisierung von Typ 1-Supraleitern

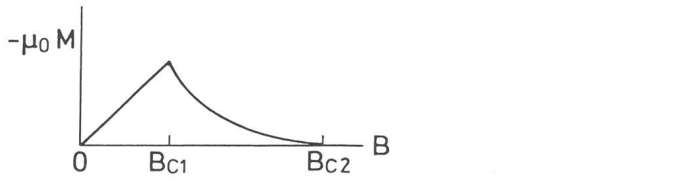


Fig. 3 Magnetisierung von idealen Typ 2-Supraleitern

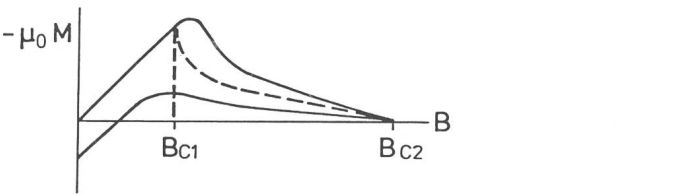


Fig. 4 Magnetisierung von irreversiblen Typ 2-Supraleitern (harten Supraleitern)

Erst wenn die Flußschläuche im Kristall festgehalten, gepinnt, werden, kann ein Transportstrom wieder verlustfrei fließen. Dies gilt, solange die *Pinningkräfte* die auftretenden Lorentzkräfte übersteigen. Als Pinningzentren wirken Gitterstörungen durch Kristallfehler oder Einschlüsse von Fremdphasen, wie etwa Versetzungen, normalleitende Ausscheidungen, Korngrenzen, Leerstellenanhäufungen usw. Solche Kristalldefekte können durch metallurgische Behandlung kontrolliert erzeugt werden. Vielfach wird dabei das «ideale» Material metallurgisch gehärtet, z. B. durch Kaltverarbeitung und anschließende Wärmebehandlung. Es entsteht ein *harter Supraleiter*, der allein von technischem Interesse für Magnetanwendungen ist [4]. Durch metallurgische Behandlung können Defekte der richtigen Art, Grösse und Verteilung eingebracht und damit Pinningzentren geschaffen werden, um eine hohe Stromtragfähigkeit des Supraleiters zu erreichen.

Durch die Pinningkräfte wird das Eindringen des Flusses behindert, so dass sich beim Auf- und Aberregen eines solchen Supraleiters eine magnetische Hysterese ergibt. Die Magnetisierungskurven sind nicht mehr reversibel (Fig. 4). Feldänderungen sind nunmehr unvermeidlich mit Hystereseverlusten gekoppelt, was u. a. ihren Einsatz für Wechselfeldanwendungen begrenzt.

1.5 Josephson-Effekte

Eine interessante Konsequenz des supraleitenden Quantenzustandes wurde von *Josephson* [5] vorausgesagt. Alle Cooperpaare befinden sich im gleichen Quantenzustand; Energie und

gegenseitige Phasenkorrelationen sind dadurch festgelegt. Diese Korrelation wird auch aufrechterhalten zwischen zwei Supraleitern, die durch eine sehr dünne isolierende Barriere getrennt sind. Dann sollten wie Elektronen auch Cooperpaare diese Barrieren durchdringen bzw. durchtunneln können. Das heisst, es kann ein Supraström durch eine sehr dünne Isolierschicht fließen. Dieser Supraström, der *Josephson-Gleichstrom*, fliesst bereits ohne elektrische Spannung am Josephson-Kontakt, der aus der isolierenden Schicht mit den beiden angrenzenden Supraleiterschichten besteht. In einem Magnetfeld parallel zur Isolierschicht zeigt der Josephson-Gleichstrom in Abhängigkeit von der Stärke dieses Magnetfeldes einen charakteristischen Verlauf (Fig. 5). Die Nullstellen treten dabei gerade dort auf, wo in der Barriere ganzzahlige Vielfache des elementaren Flussquantes auftreten.

Schliesslich tritt nach Überschreiten eines Maximalwertes für den Supraström eine endliche Kontaktspannung und in ihrer Folge ein hochfrequenter Wechselstrom auf, der *Josephson-Wechselstrom*, der allein durch diese Kontaktspannung und Elementarkonstanten festgelegt ist.

Die Josephson-Effekte vertieften einesteiils das Verständnis des Supraleitungsphänomens, anderenteils ergaben sich daraus eine Reihe wichtiger technischer Anwendungsmöglichkeiten. Heute gewinnen solche Dünnschichtanordnungen in der Messtechnik als Hochfrequenzgeneratoren oder -detektoren und für Hochgeschwindigkeitsrechner wachsende Bedeutung [6].

2. Bedeutung der Anwendungen der Supraleitung

2.1 Anwendungsbereiche

Bereits von *K. Onnes* [7] wurde die Bedeutung der Supraleitung für die Anwendung in der Elektrotechnik, insbesondere zur Herstellung sehr hoher Magnetfelder, erkannt. Es gelang aber erst 50 Jahre später, harte Supraleiter herzustellen, die in solchen Feldern ihre Supraleitungseigenschaften behalten. Heute sind supraleitende Magnete in der Forschung etabliert und für viele technische Anwendungen in der Entwicklung. Supraleitende Kabel für den Transport grosser Mengen elektrischer Energie sind im Labormaßstab geprüft und prinzipiell technisch einsetzbar.

Die Ernüchterung unserer Tage liegt darin, dass es nur wenige Anwendungsbereiche gibt, für die Supraleitungsanordnungen die ökonomisch günstigere Lösung darstellen. Das liegt u. a. an den hohen Grundkosten, die für die Herstellung und die Erhaltung der kryogenen Umgebung ($< 10\text{ K}$) aufzuwenden sind. Mit normalleitenden Anordnungen wirtschaftlich konkurrierende Supraleitungslösungen, etwa beim Supraleitungskabel zur Übertragung hoher elektrischer Leistungen, haben daher oft erst im oberen Leistungsbereich günstigere spezifische Kosten (im genannten Beispiel oberhalb einiger GVA übertragener Leistung).

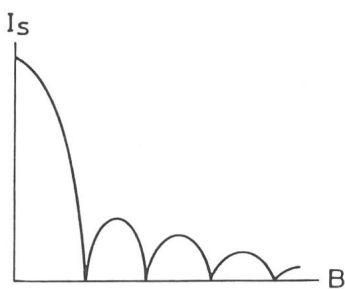


Fig. 5 Josephson-Gleichstrom

Hochstromanwendungen

- Supraleitende Magnete
- Hochleistungskabel

Hochfrequenzanwendungen

- Supraleitende Kavitäten
- Millimeterwellengeneratoren

Mikroanordnungen

- Supraleitung in der Messtechnik
- Hochgeschwindigkeitsrechner

Anwendung hat die Supraleitung im wesentlichen in drei Bereichen gefunden: in der Hochstromtechnik, der Hochfrequenztechnik und bei Mikrobaulementen im Niederleistungsbereich (Tabelle I). Derzeit beherrscht die Anwendung von Supraleitungsmagneten das Feld: bei der Erforschung der Wechselwirkungen von Elementarteilchen, bei der Festkörperforschung sowie für spezielle industrielle Anwendungen oder in der zukünftigen Energietechnik.

Supraleitende Hochfrequenzkavitäten versprechen einen erheblichen Leistungsgewinn durch die Verringerung der Hochfrequenzverluste in den Kavitäten. Sie haben Einsatz bei der Beschleunigung oder Ablenkung von Elementarteilchen in der Kernphysik gefunden. Dabei wurden Verbesserungsfaktoren von 10^5 erzielt.

Die Quanteneigenschaften eines Supraleiters werden bei den supraleitenden Mikrobaulementen im Niederleistungsbereich ausgenutzt; u. a. für die Messung von Herz-, Muskel- oder Gehirnströmen in der Medizin, zur Detektion kleinster Magnetfelder oder Magnetfeldänderungen, etwa von Anomalien des Erdfeldes in Geologie, Lagerstättenforschung oder Bodenmechanik, für die Messung kleinster Ströme (10^{-12} A), Magnetfelder (10^{-15} T) oder Spannungen (10^{-16} V) und als logische Bauelemente in einer neuen Generation von Hochgeschwindigkeitsrechnern.

2.2 Supraleiter in der Hochstromtechnik

Supraleitende Magnete haben einen weiten Anwendungsbereich. Sie dienen als Werkzeuge in der Forschung; ihre Anwendung verspricht eine Verbesserung des Energiekonversionswirkungsgrades bei supraleitenden Generatoren; sie sind unabdingbar für zukünftige Fusionsreaktoren mit magnetischem Einschluss oder für magnetohydrodynamische Generatoren (MHD). Einen ersten Überblick gibt die Tabelle II.

Trotz der grossen Zahl supraleitender Materialien erweisen sich nur wenige für den technischen Einsatz als brauchbar. Die Anforderungen an einen technischen Supraleiter sind:

- eine Sprungtemperatur, die genügend oberhalb der Betriebstemperatur liegt. Dabei ist die Betriebstemperatur durch die Kühlung mit flüssigem Helium bestimmt und liegt im allgemeinen zwischen 4 und 5 K;
- eine genügend hohe Stromtragfähigkeit (einige 10^5 A/cm^2) gemittelt über das Supraleiterbündel einschliesslich des Stabilisierungsmaterials;
- ein oberes kritisches Feld von mehr als 10 T;
- ein stabiles Verhalten unter Betriebsbeanspruchungen insbesondere in mechanischer und elektrischer Hinsicht;
- ein wirtschaftlicher Herstellungsprozess und gute Verarbeitbarkeit.

<p>1 <i>Supraleitende Magnete in der Forschung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Hochfeldanordnungen zur Materialforschung - Strahlführungsmagnete und Detektormagnete für die Teilchenphysik - Führungsmagnete für die Medizintechnik <p>2 <i>Supraleitung im industriellen Bereich</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Generatoren und Maschinen - Magnetische Separation - Magnetische Schwebetechnik und Antriebssysteme <p>3 <i>Supraleitung in der zukünftigen Energietechnik</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Fusion mit magnetischem Einschluss - MHD-Anlagen - Energiespeicher
--

Nach diesen Kriterien verbleiben nur wenige Supraleiter für den technischen Einsatz. Es sind Niob- oder Vanadium-Verbindungen, vorab Nb₃Sn mit A15-Struktur und NbTi als eine Legierung mit nahezu gleichen Gewichtsprozenten der beiden Komponenten. Die höchsten Sprungtemperaturen werden bei den A15-Verbindungen gefunden (Nb₃Ge mit 23 K), die beste Bearbeitbarkeit und mechanische Beanspruchbarkeit zeigt NbTi. Die höchsten kritischen Felder werden bei den Chevrelphasen beobachtet. Eine Übersicht über Hoch-T_c-Supraleiter gibt Figur 6.

Supraleitende Magnete als Forschungswerkzeuge

1. *Magnete in der Teilchenphysik:* Der grösste existierende Supraleitungsmagnet ist auch heute noch das Spulenpaar für die grosse europäische Blaskammer beim CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, Genève) mit ca. 1 GJ magnetischem Energie-Inhalt. Die grösste Supraleitungsanlage ist derzeit im Fermilaboratorium in Batavia in der Nähe von Chicago im Aufbau: der «Energy Saver/Doubler», ein grosser supraleitender Beschleuniger, bei dem 800 Dipol- und 200 Quadrupolmagnete die hochenergetischen Teilchen auf ihren über 6 km langen Rundkurs führen. Die Energieeinsparung mit supraleitenden Magneten ist beträchtlich. Die Verlustleistung eines Beschleunigers mit normalleitenden Magneten und gleicher Maximalenergie ist um eine Grössenordnung höher. Die Energieverdoppelung kann bei gleichen Dimensionen der Anlage erreicht werden. Die Anlage soll zunächst als «Energy Saver» mit 500 GeV, der Hälfte der vorgesehenen Maximalenergie, im Jahre 1982 in Betrieb gehen.

Andere interessante Anwendungen supraleitender Strahlführungsmagnete sind die Torusanordnung des Pionenapplikators des Schweizerischen Instituts für Nuklearforschung (SIN) zur Fokussierung von Pionenstrahlen und Bestrahlung von Tumoren oder die supraleitenden Ondulatoren zur Erzeugung kurzwelligen und intensiven Synchrotronlichts an Elektronenbeschleunigern. Die Ondulatoren bestehen aus Stapeln von kurzen supraleitenden Dipolen mit entgegengesetzter Feldrichtung.

2. *Hochfeldmagnete:* Grosse stationäre Magnetfelder finden vielfältige Anwendung in der Festkörperforschung oder Biologie. Die Untersuchung der Wechselwirkung von Lochungen und magnetischen Momenten mit dem Magnetfeld erlaubt Rückschlüsse auf die Struktur der Materie. Besondere Bedeutung haben dabei hohe Magnetfelder (bis zu 12 T) grosser

Homogenität für die hochauflösende magnetische Kernresonanzspektrometrie erlangt.

Noch höhere stationäre Magnetfelder werden mit wassergekühlten Hochleistungsmagneten erzeugt (bis 25 T bei 10 MW Verlustleistung). Die Begrenzung für wassergekühlte Magnete stellt die verfügbare elektrische Anschluss- und Kühlleistung dar. Ein Herausschieben dieser Grenze um mehr als 10 T kann mit Hilfe zusätzlicher supraleitender Spulen erreicht werden. Solche Hybridmagnete haben einen normalleitenden Einsatz, der von zylinderförmigen Supraleitungsspulen umgeben ist. Die höchsten auf diese Weise erzeugten Feldstärken betragen 30 T (Massachusetts Institute of Technology, USA).

Supraleitung für industrielle Anwendungen

1. *Supraleitende Maschinen:* Die einfachste Anwendung supraleitender Magnete für rotierende Maschinen ist der Ersatz der Gleichstromwicklung durch einen Supraleiter. Für supraleitende Generatoren ist dies der Rotor. Supraleitungswicklung und Kryostat rotieren. Der Supraleiter und das Kühlmittel stehen unter einer hohen Zentrifugalbelastung. Es sind grosse Fortschritte bei der technischen Lösung der auftretenden Probleme erzielt worden. Der grösste heute im Bau befindliche Supraleitungsgenerator ist für eine Leistung von 300 MVA geplant und soll 1984 in Betrieb gehen (Westinghouse, USA).

2. *Magnetische Separation:* Für die Aufbereitung schwachmagnetischer Erze oder die Reinigung von Rohstoffen (wie Schwefel oder Kaolin) von magnetischen Verunreinigungen wurden supraleitende Anordnungen entwickelt, die grosse Magnetfelder und Feldgradienten in grossen Volumina erzeugen können und damit ausreichend grosse magnetische Kräfte auf die magnetischen Partikel auszuüben gestatten. Das Interesse an einer solchen Anordnung ist in der Möglichkeit einer Erschliessung neuer Rohstoffquellen begründet. Möglicherweise ist eine erste grossindustrielle Anwendung der Supraleitungstechnologie am ehesten hier zu erwarten, weil alle Voraussetzungen dafür günstig erscheinen: Die einzelnen

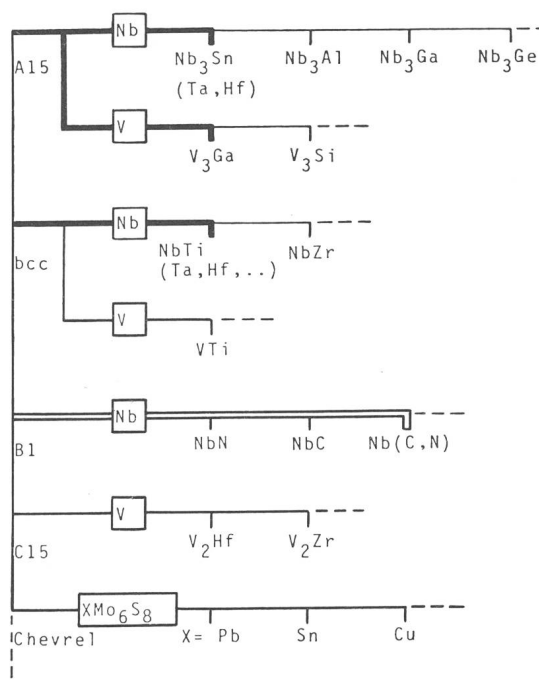


Fig. 6 Übersicht über Hoch-T_c-Supraleiter

Komponenten sind von mittlerer Grösse und können parallel zu konventionellen Anlagen betrieben werden; das Verfahren der magnetischen Separation ist dem eingeführten Flotationsverfahren in mancherlei Hinsicht überlegen, etwa aus Gründen der Umweltbelastung; am Labormodell erwiesen sich alle technischen Probleme als lösbar.

3. Magnetische Schwebetechnik und andere Anwendungen: Eine grosstechnische Anwendung könnten Supraleitungsmagnete beim magnetischen Schweben finden. Es wurde eine Hochgeschwindigkeitsbahn entwickelt, bei der Supraleitungsmagnete das bewegte Fahrzeug reibungslos über der Fahrstrecke halten und führen. In Japan wurden auf einer Versuchsstrecke Geschwindigkeiten von über 500 km/h erreicht. Supraleitungskabel zum Transport von Leistungen im GVA-Bereich werden dagegen nur noch zögernd verfolgt, weil der Transport so hoher Blockleistungen, die den Einsatz der Supraleitung wirtschaftlich rechtfertigen, in naher Zukunft nicht zu erwarten ist.

Supraleitungsmagnete in der zukünftigen Energietechnik

1. Kernfusion mit magnetischem Einschluss: Die Kernfusion ist eine der zukünftigen Energiequellen. Die besten Realisierungschancen werden dabei Fusionsanordnungen mit magnetischem Einschluss des Fusionsplasmas eingeräumt. Am weitesten entwickelt ist eine Anordnung nach dem sog. Tokamakprinzip. Es ist eine toroidale Anordnung mit ringförmig aufgestellten Torusspulen. Das axiale Feld dieser Spulen und das azimutale Feld des Plasmastromes überlagern sich zu einer helischen Feldstruktur, die die Stabilität des eingeschlossenen Plasmas gewährleistet. Zur Induktion des Plasmastromes und zur Aufheizung des Fusionsplasmas werden zusätzlich gepulste Feldspulen benutzt, die parallel zum Plasmastrom verlaufen. Nur bei Verwendung supraleitender Spulen ist ein Netto-Energiegewinn zu erwarten.

Eine solche Torusspule für einen kommerziellen Fusionsreaktor hat nach heutigen Vorstellungen lineare Abmessungen von 10 bis 20 m und Feldstärken am Leiter bis zu 12 T. Spulen für einen Fusionsreaktor nach dem Prinzip des magnetischen Spiegels haben ähnlich grosse und zum Teil komplexere Geometrie. Eine Vereinfachung ergibt sich aus dem stationären Betrieb des Magnetsystems und der linearen Anordnung des Systems, das eine bessere Zugänglichkeit gewährleistet.

Eine der herausragenden Entwicklungen zur Bereitstellung der Supraleitungstechnologie für zukünftige Fusionsreaktoren ist das grosse Spulenprojekt LCT (Large Coil Task), ein internationales Projekt. Dafür werden in Europa zwei grosse Supraleitungsspulen nach verschiedenen Konzepten entwickelt und gebaut und danach zusammen mit 4 anderen Spulen in einer Prüfanlage im ORNL (Oakridge National Laboratory, USA) getestet: im SIN zusammen mit BBC und im Kernforschungszentrum Karlsruhe zusammen mit Siemens und der Vacuumschmelze [8; 9; 10]. Jede einzelne Spule hat innere Abmessungen von $2,5 \times 3,5 \text{ m}^2$ und soll ein Maximalfeld von 8 T erreichen. Die verwendeten Leiter sind nach verschiedenen Konzepten aufgebaut und werden in verschiedener Weise gekühlt. Die Spulen sind für die grossen Kräftebelastungen im Torusverband ausgelegt. Im Normalbetrieb und bei unsymmetrischen Lastfällen treten dabei Spannungen von etwa 10^8 N/m^2 auf. Die Fertigstellung der Spulen ist für 1981/82 vorgesehen. Der Leiter für die Spule des KfK Karlsruhe ist ein flaches Kabel mit Aussenabmessungen von $40 \times 10 \text{ mm}$ für einen Be-

triebsstrom von 11 kA bei 3,8 K und 8,2 T (kritischer Stromwert 15 kA bei 4,2 K und 8 T) (Fig. 7).

2. MHD-Anlagen und Energiespeicher: Strömt ein elektrisch leitendes Gas (z.B. Verbrennungsgas mit Leitfähigkeitszusätzen) durch einen Kanal, in dem senkrecht zur Bewegungsrichtung ein Magnetfeld wirkt, so werden die Ladungsträger aufgrund der Lorentzkraft senkrecht zur Geschwindigkeits- und Magnetfeldrichtung abgelenkt. Sie können von Elektroden gesammelt und zur elektrischen Energiegewinnung ausgenutzt werden. Auf diese Weise wird durch Direktkonversion eine elektrische Spannung erzeugt: magneto-hydrodynamischer Generator. Leistungsfähige MHD-Generatoren erfordern grossvolumige Magnete ($1 \dots 2 \text{ m}^2$ Querschnitt mit $5 \dots 10 \text{ m}$ Kanallänge für mehrere 100 MW_e) mittlerer Feldstärke (etwa 5 T). Aus wirtschaftlichen Gründen müssen solche Magnete supraleitend sein. Die MHD-Forschung ist im westlichen Europa wegen der noch ungelösten Materialprobleme für die Elektroden im Kanalbereich in den Hintergrund getreten.

Grosse supraleitende Energiespeicher zum Ausgleich der Tages- und Wochenlastschwankungen im elektrischen Netz mit Spulenabmessungen von Hunderten von Metern werden an mehreren Stellen untersucht und für technisch lösbar gehalten.

3. Schlussbemerkungen

Dieser notwendigerweise unvollständige Überblick über die Bedeutung der Supraleitungstechnologie sollte den Entwicklungsstand und das Potential für zukünftige Entwicklungen erkennen lassen. In den letzten 10 Jahren sind aus Labormagneten grosse und komplexe Anlagen geworden. Grosse Aufmerksamkeit wird zurzeit der Entwicklung von Supraleitermaterialien mit verbessertem Betriebsverhalten gewidmet. Auch die Suche nach neuen Hochtemperatursupraleitern mit noch höherer Sprungtemperatur war erfolgreich und könnte revolutionierend wirken, wenn die Betriebstemperaturen in den Bereich der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs kommen. Verbessertes Hochfeldverhalten der Supraleiter lässt 20-T-Supraleitungsmagnete möglich erscheinen. Die Grösse der Anlagen hat längst grossindustrielle Maßstäbe erreicht. Es bleibt jedoch noch viel zu tun, um von den einzigartigen Möglichkeiten der Supraleitung auch wirtschaftlich zu profitieren.

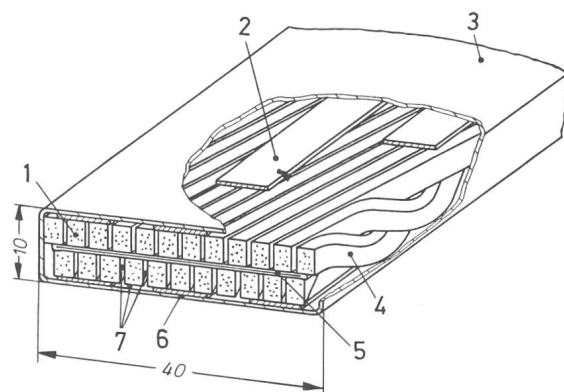


Fig. 7 LCT-Leiter der KfK-Spule

- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| 1 NbTi-Kupfer-Leiter | 5 CrNi-Kern mit Kaptonisolierung |
| 2 Abstandshalter | 6 Schweissnaht |
| 3 Edelstahlhülle | 7 Kühlkanäle |
| 4 Roebelübergang | |

Literatur

- [1] *M. Meissner* und *R. Ochsenfeld*: Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften* 21(1933)44, S. 787...788.
- [2] *Z.B.W. Buckel*: Supraleitung, Grundlagen und Anwendungen. 2. Auflage. Weinheim, Verlag Physik, 1977.
- [3] *J.E. Kunzler* a.o.: Superconductivity in Nb₃Sn at high current density in a magnetic field of 88 kGauss. *Physical Review Letters* 6(1961)3, p. 89...91.
- [4] *H. Ullmaier*: Irreversible properties of type II superconductors. Berlin a.o., Springer, 1975.
- [5] *B.D. Josephson*: Possible new effects in superconductive tunnelling. *Physics Letters* 1(1962)7, p. 251...253.
- [6] *P. Wolf*: Josephson-Kontakte in der Digitaltechnik. *Bull. SEV/VSE* 68(1977)2, S. 66...70.
- [7] *H. Wüger*: Pioniere der Elektrotechnik: Heike Kamerlingh Onnes, 1853...1926. *Bull. SEV/VSE* 67(1976)21, S. 1144.
- [8] *P.N. Haubenreich*: Superconducting magnets for toroidal fusion reactors. *IEEE Trans. MAG* 17(1981)1, p. 31...37.
- [9] *H. Krauth* a.o.: Status of European LTC coil. *IEEE Trans. MAG* 17(1981)5, p. 1726...1729.
- [10] *G. Vécsey*: Status of the Swiss LTC coil. *IEEE Trans. MAG* 17(1981)5, p. 1738...1740.

Adresse des Autors

Prof. Dr. *W. Heinz*, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH,
Institut für Technische Physik, Postfach 3640, D-7500 Karlsruhe.